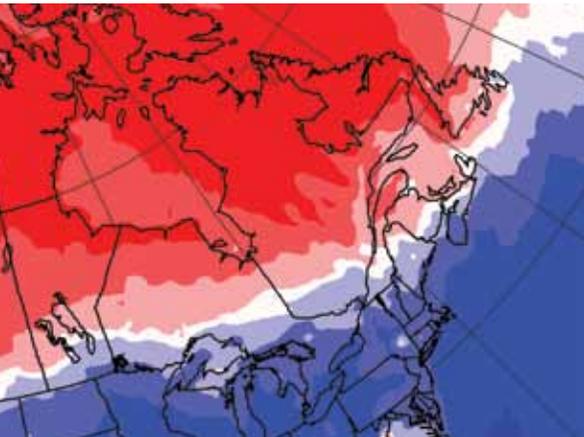
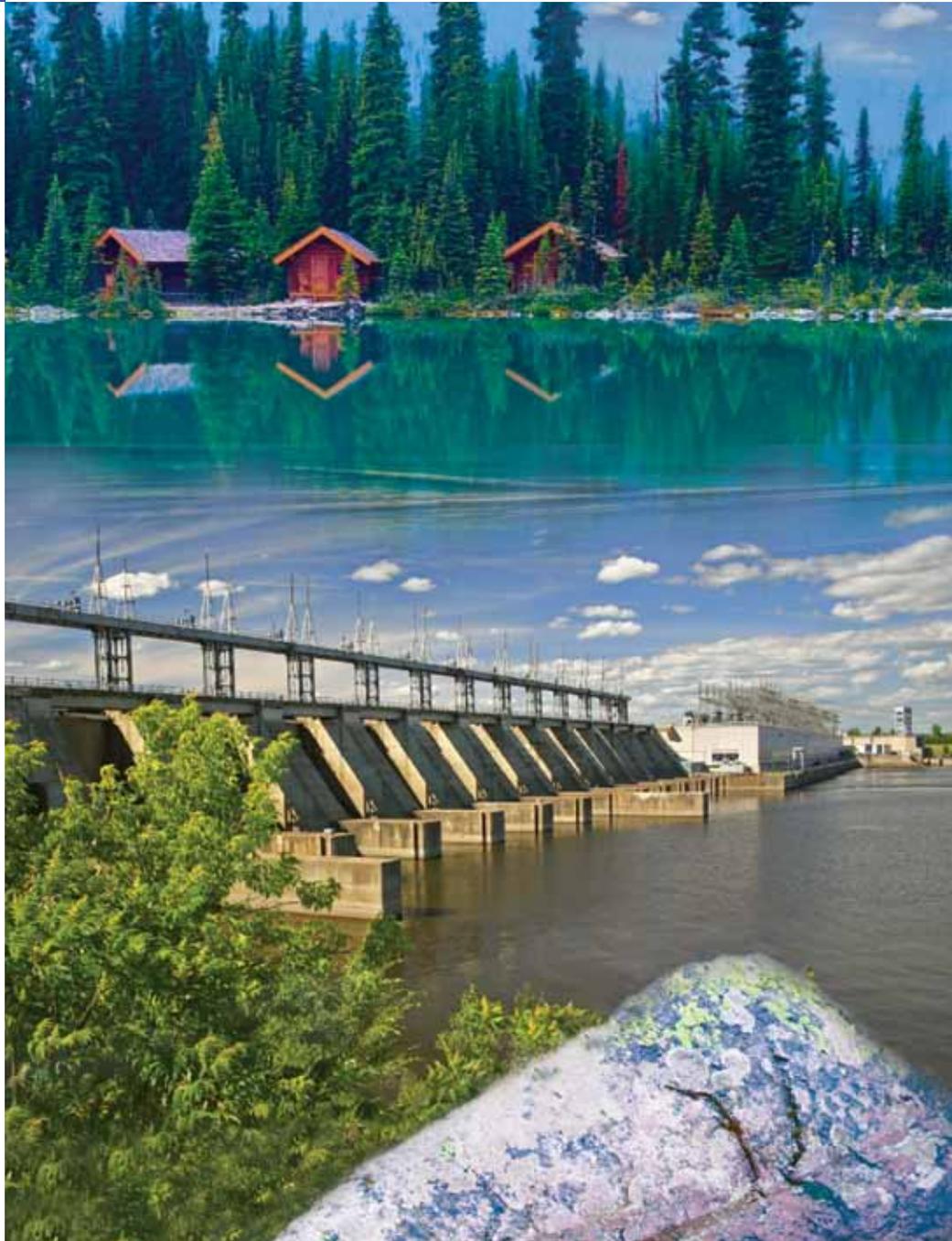




CONSORTIUM SUR LA CLIMATOLOGIE RÉGIONALE
ET L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES



SAVOIR s'adapter *aux changements climatiques*



RÉDACTION GÉNÉRALE ET COORDINATION

Claude DesJarlais, Anne Blondlot

AUTEURS PRINCIPAUX PAR SECTION

Michel Allard : le Nord

Alain Bourque : sommaire et conclusion

Diane Chaumont : le climat du Québec et les changements projetés

Claude DesJarlais : la demande énergétique, le tourisme et les loisirs, les transports

Pierre Gosselin ⁽¹⁾ : la santé des populations

Daniel Houle ⁽²⁾ : la forêt

Caroline Larrivée : environnement bâti, le Sud

Nancy Lease : l'agriculture

René Roy : la production hydroélectrique

Jean-Pierre Savard : la zone côtière

Richard Turcotte : les ressources en eau

Claude Villeneuve : écosystèmes et biodiversité

COLLABORATEURS

⁽¹⁾ : **Diane Bélanger**

⁽²⁾ : **Ariane Bouffard et Anh Thu Pham**

RÉVISION

Anne Blondlot

Claude DesJarlais

Robert Siron

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE

Ouranos. *Savoir s'adapter aux changements climatiques,*

rédaction : C. DesJarlais, M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque,

D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy,

J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve,

Montréal, 2010, 128 p.

ISBN : 978-2-923292-03-8

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Québec, 2010

Dépôt légal - Bibliothèque nationale du Canada, 2010

SAVOIR s'adapter *aux changements climatiques*

OURANOS 2010

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, de l'INRS et des universités Laval et McGill.

Les opinions et résultats présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et d'Ouranos et n'engagent pas ses membres.

AVANT-PROPOS

Le réchauffement du système climatique est maintenant sans équivoque et attribuable en grande partie à l'action de l'homme. Il est aussi très clair que les émissions mondiales de gaz à effet de serre continueront d'augmenter au cours des prochaines décennies et qu'un réchauffement additionnel important est inévitable. De plus, même si les émissions de gaz à effet de serre diminuaient suffisamment pour stabiliser leurs concentrations, le réchauffement du climat et l'élévation du niveau de la mer se poursuivront pendant des siècles.

Ce réchauffement s'accompagnera de nombreux impacts négatifs dans toutes les régions du monde, tant pour les écosystèmes que pour l'environnement bâti, la santé des populations et plusieurs activités socioéconomiques. Le Québec ne sera pas épargné et devra lui aussi faire face à ces défis.

Il est cependant possible de diminuer ou d'éviter une bonne partie de ces impacts en prenant des mesures vigoureuses d'atténuation. En outre, plus celles-ci seront mises en œuvre rapidement, plus elles contribueront à leur réduction. À cet égard, il faut souhaiter que les négociations internationales et les politiques nationales établissent le plus rapidement possible des objectifs et des plans d'action à la fois réalistes et efficaces.

Malgré ce progrès espéré, des impacts importants sont à craindre et certains systèmes, secteurs et régions seront plus durement touchés par l'évolution du climat. Pour d'autres, au contraire les changements climatiques se traduiront, du moins à moyen terme, par des occasions d'affaires à saisir. La mise en place de mesures et stratégies d'adaptation pertinentes constitue, à cet égard, un autre moyen essentiel pour faire face aux changements climatiques.

Depuis la création d'Ouranos en 2001, le Québec dispose d'une expertise exceptionnelle pour orienter ses stratégies d'adaptation. Les travaux de recherche suscités, coordonnés et réalisés par Ouranos ont en effet déjà permis de canaliser les efforts et d'orienter la prise de décision vers un développement qui intègre les plus récentes anticipations en matière de changements climatiques.

Ce document *Savoir s'adapter aux changements climatiques* se veut un portrait des connaissances actuelles en la matière, accessible à tous les Québécois qui veulent s'informer sur les enjeux des changements climatiques dans leur région et leur domaine d'activité.

Le président du conseil d'administration,



Pierre Baril

REMERCIEMENTS

Ce document est l'œuvre collective de douze spécialistes directement ou indirectement rattachés à Ouranos, qui en ont rédigé les différentes sections. Ils se sont eux-mêmes appuyés sur les travaux de plus en plus nombreux réalisés par différentes équipes et portant sur l'évolution du climat québécois, ses impacts prévisibles sur la vulnérabilité des systèmes naturels et socioéconomiques ainsi que sur les pistes d'adaptation à privilégier.

À ce titre, c'est donc en premier lieu à Diane Chaumont, Caroline Larrivée, Nancy Lease, Michel Allard, Alain Bourque, Claude DesJarlais, Pierre Gosselin, Daniel Houle, René Roy, Jean-Pierre Savard, Richard Turcotte, Claude Villeneuve et leurs collaborateurs que vont mes remerciements, de même qu'à tous les chercheurs qui, au cours des dernières années, ont contribué à préciser les enjeux des changements climatiques pour le Québec. Ces remerciements s'adressent également à Line Bourdages et Travis Logan pour les cartes de climat et de degrés-jours de croissance qui illustrent si bien le document.

Il importe aussi de souligner le travail patient et minutieux de coordination réalisé par Anne Blondlot et Claude DesJarlais ainsi que leur travail de révision, auquel a contribué Robert Siron.

L'édition de ce document et sa traduction en langue anglaise n'auraient pu se réaliser sans l'appui financier des membres d'Ouranos qu'il convient également de remercier.

Le directeur général,



André Musy

TABLE DES MATIÈRES

PRINCIPALES CONCLUSIONS	1
INTRODUCTION	3
PREMIÈRE PARTIE : PORTRAIT DU QUÉBEC	5
Le territoire et l'environnement naturel	6
Le climat du Québec et les changements projetés	6
Le climat actuel	7
Le climat projeté	7
Les changements dans la variabilité et les extrêmes	10
La population	11
L'économie	12
L'évolution sociale	14
L'environnement bâti	15
DEUXIÈME PARTIE : VULNÉRABILITÉS, IMPACTS ET OPTIONS D'ADAPTATION	17
Introduction	18
L'environnement bâti	20
Le Nord	20
La zone côtière	24
Le Sud	28
Les activités économiques	31
La production hydroélectrique	31
La demande énergétique	37
Les ressources en eau	40
La forêt	47
L'agriculture	53
Les transports	58
Le tourisme et les loisirs	61
La santé des populations	64
Écosystèmes et biodiversité	76
SOMMAIRE ET CONCLUSION	83
Références	89
Références du tableau 8	115
Liste des figures et tableaux	118
Glossaire	121
Liste des sigles et des acronymes	124

PRINCIPALES CONCLUSIONS

Les changements climatiques auront au Québec des impacts importants sur l'environnement bâti, l'activité économique, la population et l'environnement naturel dont l'ampleur et les coûts iront vraisemblablement en augmentant avec le temps.

1. DÉJÀ PLUSIEURS CHANGEMENTS DU CLIMAT RÉCENT PEUVENT ÊTRE OBSERVÉS.

Au cours des dernières décennies, le climat du Québec a évolué de façon significative. Les températures journalières moyennes dans le Sud du Québec ont augmenté de 0,2 °C à 0,4 °C par décennie, le réchauffement étant plus important pour les températures minimales que maximales. La hausse des températures se manifeste aussi par le raccourcissement de la saison de gel, l'augmentation du nombre de degrés-jours de croissance et la diminution du nombre de degrés-jours de chauffage.

Du côté des précipitations, on remarque une augmentation du nombre de jours avec précipitations de faible intensité ainsi que des changements dans les précipitations de neige, qui ont diminué dans le Sud du Québec et augmenté dans le Nord.

2. DES CHANGEMENTS ATTENDUS PLUS MARQUÉS EN HIVER ET AU NORD.

D'une façon générale, le climat se réchauffera sur l'ensemble du territoire québécois, et de façon plus marquée en hiver qu'en été. Ainsi, en hiver à l'horizon 2050, les températures augmenteraient de 2,5 °C à 3,8 °C dans le Sud du Québec et de 4,5 °C à 6,5 °C dans le Nord. En été, les hausses de température se situeraient entre 1,9 °C et 3,0 °C au Sud et entre 1,6 °C et 2,8 °C au Nord.

Des augmentations de précipitations — de 16,8 % à 29,4 % au Nord et de 8,6 % à 18,1 % au Sud — sont attendues en saison hivernale à l'horizon 2050. La hausse des précipitations hivernales entraînera une augmentation de l'accumulation de la neige au sol dans le Nord. Par contre, dans le Sud du Québec, une diminution de l'accumulation de neige au sol est projetée, en raison de la hausse des températures et du raccourcissement de la saison froide. En saison estivale, la hausse des précipitations serait de 3,0 % à 12,1 % dans le Nord alors que, dans le Sud, aucun changement significatif des précipitations n'est attendu.

3. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AFFECTERONT DIRECTEMENT LES INFRASTRUCTURES DE TOUTES LES RÉGIONS DU QUÉBEC.

Dans l'Arctique québécois, l'augmentation rapide et marquée des températures entraînera une fonte accélérée du pergélisol qui exposera les infrastructures et les bâtiments à des risques d'affaissement et de déformation. En particulier, les pistes d'aéroport de plusieurs villages, essentielles aux communications et aux approvisionnements, pourraient être sévèrement endommagées et requérir des travaux d'entretien plus fréquents.

De leur côté, les bâtiments et les infrastructures publiques de la zone côtière de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent seront exposés à une accentuation de l'érosion des berges. La hausse du niveau de la mer, la diminution de l'englacement, la géomorphologie de certaines côtes et les changements dans les régimes de tempêtes se conjuguent pour entraîner cette intensification du processus naturel d'érosion.

Dans le Sud, l'augmentation de la fréquence, de l'intensité ou de la durée des événements climatiques extrêmes tels que les précipitations représente des risques accrus pour les infrastructures vieillissantes. Le renouvellement ou la réhabilitation de ces infrastructures offrent une occasion unique de s'adapter dès aujourd'hui aux conditions climatiques de demain.

4. PLUSIEURS ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES SUBIRONT LES EFFETS DIRECTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, AVEC DES CONSÉQUENCES À LA FOIS POSITIVES ET NÉGATIVES.

L'exploitation forestière, la production hydroélectrique, l'agriculture, le tourisme et plusieurs autres activités économiques seront directement touchés par les changements de températures et de précipitations. Dans de nombreux cas, ces modifications climatiques et leurs effets indirects tels qu'épidémies de ravageurs, feux de forêt ou étiages auront des impacts négatifs sur des activités qui sont au cœur même de l'existence de nombreuses communautés du Québec. De plus, les événements météorologiques récents ont démontré la forte dépendance des communautés urbaines et rurales à l'égard des infrastructures d'approvisionnement en eau, en énergie et de transport exposées aux aléas climatiques. À l'inverse, certaines modifications du climat présentent des aspects positifs — par exemple, une augmentation du potentiel hydroélectrique, une demande réduite d'énergie de chauffage et des gains de productivité végétale — dont l'économie québécoise pourrait tirer profit.

5. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES REPRÉSENTENT UN DÉFI POUR LA SANTÉ HUMAINE.

Les impacts des changements climatiques sur la santé humaine sont nombreux et divers. Ils vont des effets directs du réchauffement moyen, des vagues de chaleur et des îlots thermiques urbains, de la pollution atmosphérique, des feux de forêt ou de friche, des tempêtes estivales et hivernales et de l'exposition aux rayons ultraviolets (UV), jusqu'aux effets indirects des changements dans la quantité et la qualité des ressources hydriques et des maladies zoonotiques. En particulier, des températures plus élevées associées à un haut taux d'humidité ainsi que des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses représentent des risques importants pour la santé humaine. Un deuxième ensemble d'impacts importants est lié à l'incidence de l'augmentation des températures sur la pollution atmosphérique, notamment les pollens, l'ozone et les particules en suspension.

6. CERTAINS ÉCOSYSTÈMES SONT DAVANTAGE VULNÉRABLES.

La région Arctique sera possiblement la plus touchée par l'ampleur du changement climatique, alors que les espèces adaptées aux conditions extrêmes de cette région subiront la compétition d'espèces provenant du Sud. D'ailleurs, les écosystèmes terrestres et aquatiques ont commencé à changer, notamment dans leur structure à cause de la dégradation du pergélisol, de la formation de cuvettes et de mares de thermokarst, et de l'expansion des populations arbustives.

Dans le Sud, des hivers plus doux et des étés plus chauds et plus humides signifieraient une évaporation accrue des eaux naturelles, entraînant une fragilisation des milieux humides dépendants du régime des crues. En outre, plusieurs espèces menacées, aux habitats fragmentés et à faible capacité migratoire, déjà soumises à divers stress, courent de grands risques.

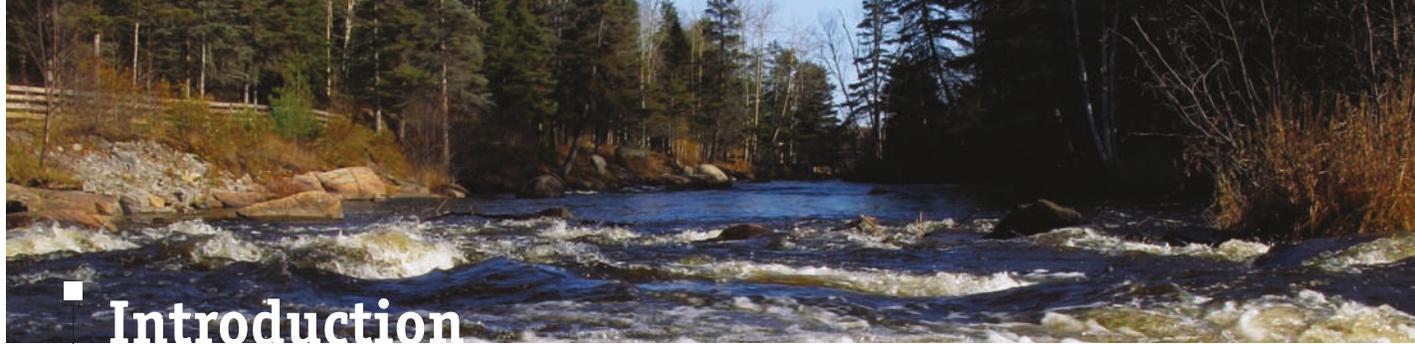
Les changements climatiques modifieront la dynamique des écosystèmes. Dans certains cas, cela se traduira par une réduction des effectifs ou la disparition de certaines populations; dans d'autres, cela permettra à des populations de s'accroître et d'étendre leur aire de répartition. Les changements climatiques vont venir s'ajouter aux autres pressions exercées par les activités humaines sur les écosystèmes et la biodiversité. Déterminer les éléments les plus vulnérables de l'environnement naturel et mettre en œuvre des mesures d'adaptation afin de minimiser cette pression sur les écosystèmes s'avère indispensable si on veut contribuer à la sauvegarde du capital naturel de la planète pour ainsi préserver les services écologiques essentiels à la survie et au bien-être de la société.

7. L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES PERMET D'ENVISAGER DE NOMBREUSES SOLUTIONS AFIN D'EN ATTÉNUER SUBSTANTIELLEMENT LES IMPACTS NÉGATIFS.

Les sociétés humaines se sont de tout temps montrées aptes à s'adapter à la variabilité climatique. Elles devraient donc être capables de surmonter les obstacles à l'adaptation aux changements climatiques, laquelle repose sur les éléments suivants :

- déterminer et comprendre les enjeux prioritaires ;
- acquérir et communiquer les données et les informations dont ont besoin les acteurs de l'adaptation ;
- concevoir et mettre en œuvre les techniques ou les technologies optimales ;
- modifier ou adapter les politiques et les normes ainsi que les structures organisationnelles ;
- tenir compte des incertitudes dans la prise de décision.

Le Québec jouit d'une grande capacité d'adaptation, notamment grâce à une économie du savoir toujours plus diversifiée. L'environnement naturel, quant à lui, s'adapte surtout de façon spontanée et autonome, et la société humaine a pour responsabilité de faciliter cette adaptation. Bien que l'adaptation soit une option incontournable, un renforcement des études économiques pour en déterminer les limites et les coûts se révèle nécessaire. Cette adaptation doit impérativement s'accompagner de réductions des émissions de gaz à effet de serre afin d'attaquer le problème à sa source et de minimiser les coûts mêmes de l'adaptation.



Introduction

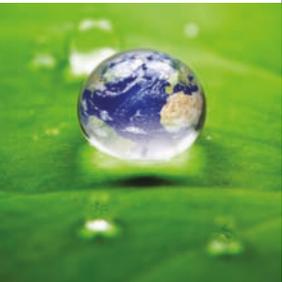
En 2004, le consortium Ouranos publiait un premier bilan des connaissances sur les impacts et les stratégies d'adaptation aux changements climatiques au Québec, sous le titre de *S'adapter aux changements climatiques*. À ce moment-là, les travaux de recherche sur cette importante question, au Québec, en étaient à leurs balbutiements dans la plupart des secteurs.

Depuis, plusieurs études ont été réalisées, dans bien des cas grâce aux travaux et à la participation d'Ouranos. Les connaissances des impacts potentiels sont maintenant beaucoup plus précises et détaillées. Ainsi, une première évaluation des impacts appréhendés est maintenant disponible dans la plupart des domaines, accompagnée pour un certain nombre d'entre eux d'une mesure du degré de confiance. De plus, dans certains domaines, des stratégies ou mesures d'adaptation ont été élaborées et quelques-unes ont fait l'objet d'une quantification monétaire ou encore ont commencé à être mises en oeuvre.

Plus récemment, en 2007, le gouvernement canadien publiait le document *Vivre avec les changements climatiques*. Le chapitre portant sur le Québec, rédigé par Ouranos, y faisait le point sur les connaissances alors disponibles. Plusieurs autres études ont été menées depuis et il a été jugé utile de réunir l'ensemble des connaissances actuelles dans un nouveau document intitulé *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, entièrement consacré au Québec.

Les principaux changements climatiques attendus et leurs conséquences sur les secteurs les plus vulnérables de la société québécoise sont décrits dans ce document. Son titre souligne le rôle du savoir dans les constats établis et dans l'orientation des stratégies d'adaptation. Le document est construit à partir de recherches effectuées essentiellement au Québec, dans bien des cas par des chercheurs d'Ouranos ou associés au consortium.

La première partie du document porte sur les caractéristiques humaines, économiques et environnementales du Québec. Elle présente aussi les tout derniers scénarios de températures et de précipitations pour le Québec à divers horizons temporels, dans le contexte des changements climatiques. La deuxième partie décrit les impacts appréhendés et les stratégies d'adaptation envisageables tant pour le milieu bâti que pour les diverses activités humaines, la santé des populations ainsi que les écosystèmes et la biodiversité. La conclusion, en plus de résumer les principaux enjeux des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques, comprend un tableau d'exemples de mesures d'adaptation appliquées dans différentes communautés du Québec et divers domaines.





PREMIÈRE PARTIE

Portrait du Québec



Le relief du Québec (MRNF)

La nature et l'ampleur de la vulnérabilité du Québec aux changements climatiques dépendent tout autant du type et de l'importance des changements climatiques eux-mêmes que des caractéristiques de l'environnement naturel, de l'économie et de la société sur lesquels s'exerceront les changements de température, de précipitations, d'humidité et d'autres variables climatiques. À cet égard, il est utile de jeter un regard sur les principales caractéristiques du Québec et sur leur évolution attendue au cours des prochaines décennies.

LE TERRITOIRE ET L'ENVIRONNEMENT NATUREL

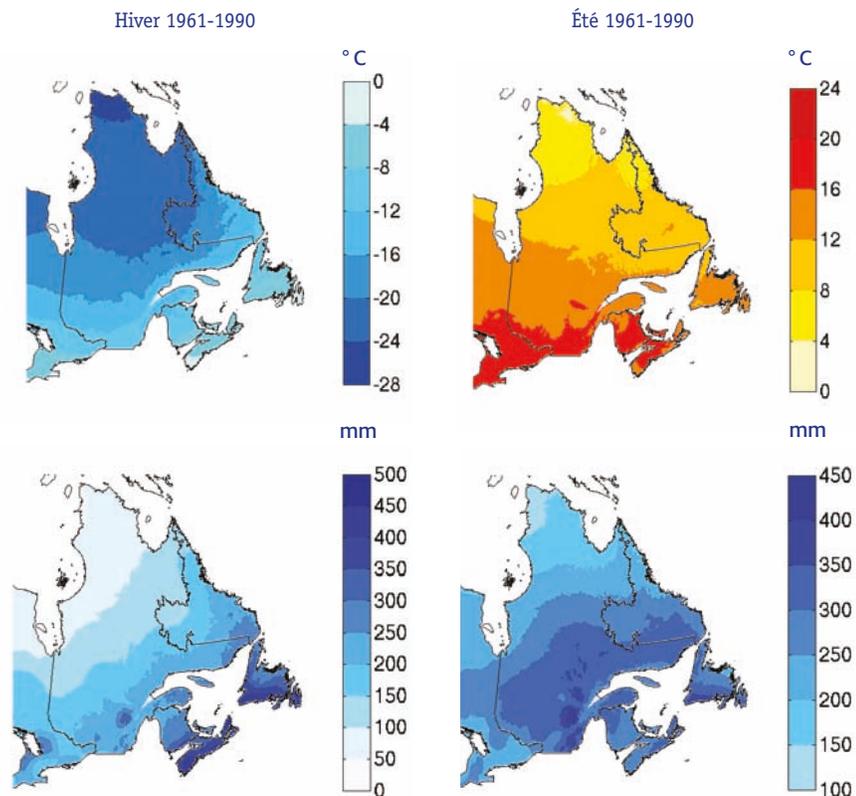
La première caractéristique de l'environnement naturel du Québec est l'immensité de son territoire, d'une superficie de 1 667 441 km². Le Québec s'étend sur environ 2 000 km du sud au nord entre les 45° et 62° de latitude Nord, et sur environ 1 500 km d'est en ouest. En raison même de cette étendue, le Québec regroupe plusieurs zones climatiques et écosystèmes très différenciés. La partie extrême nord présente une végétation de toundra, un sol constitué d'un pergélisol plus ou moins continu et un climat rigoureux aux vents forts. Plus au sud, la forêt boréale dense domine, couvrant près de la moitié du territoire québécois et abritant une faune importante et une grande variété d'oiseaux.

La forêt mixte, mélange de feuillus et de conifères, couvre les basses terres du Saint-Laurent et compte une diversité encore plus grande d'espèces végétales et animales. Le Québec possède aussi une très grande façade maritime sur le golfe du Saint-Laurent à l'est, sur le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava au nord, ainsi que sur les baies d'Hudson et James au nord-ouest. Le relief du territoire est peu accentué, dépassant rarement les 900 m d'altitude. Par ailleurs, grâce à son important réseau hydrographique et ses milliers de lacs et de rivières recensés, le Québec détient, d'après les estimations, 3 % des eaux renouvelables de la planète. Enfin, un tiers du territoire fait partie du bassin versant du Saint-Laurent, fleuve qui dessert 80 % de la population (MRNF, 2006b).

LE CLIMAT DU QUÉBEC ET LES CHANGEMENTS PROJÉTÉS

Les caractéristiques du territoire québécois expliquent en partie son climat, marqué par d'importants contrastes entre les saisons, typiques d'un climat continental avec un écart des températures moyennes de près de 30 °C entre l'hiver et l'été pour une région donnée. De même, en raison de l'étendue sud-nord, le climat du Québec comprend à la fois des zones de climat tempéré et d'autres typiquement subpolaires et polaires. Globalement, des augmentations des températures et des précipitations sont projetées mais, comme le territoire du Québec est vaste, celles-ci seront assez différentes entre le Nord et le Sud et également en fonction des saisons.

Figure 1 : Moyennes des températures (haut) et des précipitations (bas) hivernales et estivales observées (1961-1990). D'après la banque de données du Service national d'information sur les terres et les eaux (SNITE) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, qui se base sur les observations aux stations des archives d'Environnement Canada interpolées sur une grille d'une résolution de 10 km.



Le climat actuel

La moyenne de température estivale sur le territoire québécois, au cours des dernières décennies, se situe du Sud au Nord de 20 °C à 3 °C alors qu'en hiver elle couvre une plage allant de -8 °C à -25 °C (voir la figure 1).

Les précipitations moyennes en été montrent un important gradient nord-ouest/sud-est avec près de 450 mm dans le Sud et à peine 120 mm dans le Nord. L'hiver, alors que dans certaines régions montagneuses du Sud le cumul des pluies et de l'équivalent en eau de la neige peut atteindre 350 mm, l'extrême Nord du Québec ne reçoit que 50 mm d'équivalent en eau (voir la figure 1).

Au cours du passé récent (1960-2005), le climat du Québec a évolué de façon significative. Les températures journalières moyennes du Sud du Québec ont augmenté de 0,2 °C à 0,4 °C par décennie (Yagouti *et al.*, 2008). Ce réchauffement était plus important pour les températures nocturnes que diurnes (Zhang *et al.*, 2000 ; Vincent et Mekis, 2006 ; Yagouti *et al.*, 2008). La hausse des températures s'observe aussi dans les variables climatiques dérivées, telles que le raccourcissement de la durée de la saison de gel, l'augmentation du nombre de degrés-jours de croissance et la diminution du nombre de degrés-jours de chauffage (Yagouti *et al.*, 2008).

Du côté des précipitations, on remarque une augmentation du nombre de jours avec précipitations de faible intensité (Vincent et Mekis, 2006) ainsi que des changements dans les précipitations solides, qui ont diminué dans le Sud du Québec et qui, au contraire, ont augmenté dans le Nord (Brown, *sous presse*).



Le climat projeté

D'après les modèles de climat, les changements climatiques se traduiront à la fois par des changements dans les moyennes de températures et de précipitations et par des modifications dans leur distribution, notamment pour certaines valeurs extrêmes.

D'une façon générale, les températures sur l'ensemble du territoire québécois s'élèveront, de façon plus marquée en hiver qu'en été (Christensen *et al.*, 2007, Plummer *et al.*, 2006). Ainsi, en hiver à l'horizon 2050 (voir le tableau 1), les températures augmenteraient de 2,5 °C à 3,8 °C dans le Sud du Québec et de 4,5 °C à 6,5 °C dans le Nord. En été, les hausses de température se situeraient entre 1,9 °C et 3,0 °C au Sud et 1,6 °C et 2,8 °C au Nord.

Des augmentations de précipitations — de 16,8 % à 29,4 % au Nord et de 8,6 % à 18,1 % au Sud — sont attendues en saison hivernale à l'horizon 2050. La hausse des précipitations hivernales entraînera une augmentation de l'accumulation de la neige au sol dans le Nord. Par contre, le Centre et le Sud du Québec verront une diminution de l'accumulation de la neige au sol. En saison estivale, la hausse des précipitations serait de 3,0 % à 12,1 % dans le Nord alors que, dans le Sud, aucun changement significatif dans les précipitations n'est attendu.

L'ensemble de simulations régionales (environ 45 km de résolution) produit par Ouranos permet d'illustrer le climat futur résultant à l'horizon 2050. Tel que présenté à la figure 2, en hiver, la température des régions les plus froides se situera autour de -19 °C alors que, dans le Sud, on observera des températures moyennes hivernales de -4 °C. En période estivale, la température moyenne varierait de 23 °C à 5 °C du sud au nord.

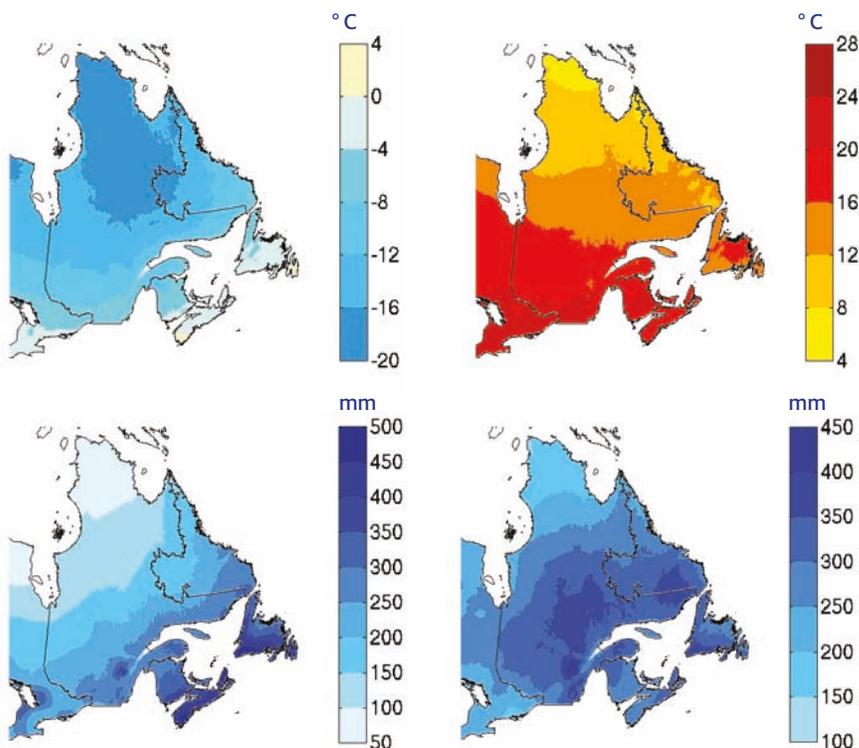
Du côté des précipitations, le climat de la décennie 2050 serait caractérisé par un cumul de précipitations estivales de 150 mm dans le Nord alors qu'il se maintiendrait environ à 450 mm dans les régions montagneuses les plus humides au Sud. En hiver, l'extrême nord du Québec recevrait 65 mm d'équivalent en eau de la neige, et le sud cumulerait 380 mm de précipitations (voir la figure 2).

Ainsi, malgré la hausse relative de précipitations plus importante dans le Nord que dans le Sud (voir le tableau 1), le gradient de précipitations sud-est/nord-ouest demeurerait très marqué.

Hiver 2041-2070

Été 2041-2070

Figure 2 : Scénarios des températures (haut) et des précipitations (bas) hivernales et estivales (2041-2070). Les scénarios reposent sur les normales climatiques 1961-1990 des données du SNITE, sur lesquelles on applique le changement saisonnier moyen projeté (2041-2070 vs 1961-1990) par un ensemble de 17 simulations du Modèle régional canadien du climat (MRCC) (de Elía et Côté, 2009).

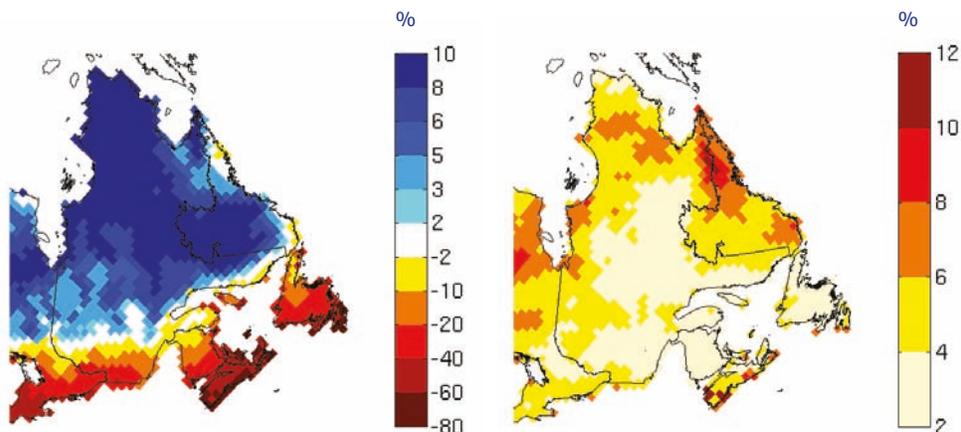


Une combinaison des changements de températures et de précipitations doit être prise en considération afin de dégager plusieurs variables d'intérêt pour l'évaluation des impacts des changements climatiques. Tel est le cas pour le changement de cumul de neige au sol, une variable de première importance en ce qui concerne l'hydrologie, l'environnement naturel et la viabilité hivernale au Québec. Comme le présente la figure 3, malgré la hausse des précipitations hivernales sur tout le territoire, une diminution du cumul de neige au sol est projetée à l'horizon 2050 dans l'extrême sud du Québec en raison du raccourcissement de la saison froide.

Par contre, dans le Nord, l'importante hausse projetée des précipitations hivernales amènera une augmentation du cumul de neige au sol malgré la hausse des températures.

Bien que les modèles globaux de climat n'aient pas une résolution spatiale aussi fine que les modèles régionaux utilisés précédemment, leur analyse demeure intéressante, puisque le très grand ensemble de simulations disponibles permet une couverture élargie des incertitudes en considérant plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Le tableau 1 indique les changements saisonniers de température (°C) et de précipitations (%) projetés sur trois horizons temporels pour 4 régions du Québec (ces régions sont présentées à la figure 4).

Figure 3 : Changement moyen (gauche) (2041-2070 vs 1961-1990) et écart-type des changements (droite) de l'équivalent en eau de la neige cumulée au sol en mars. Les changements sont estimés d'après un ensemble de 5 simulations du MRCC pilotées par 5 membres différents du modèle couplé climatique global (MCCG3) selon le scénario d'émissions de gaz à effet de serre A2 (SRES A2).



NORD				
Saison		CHANGEMENT à l'HORIZON 2020	CHANGEMENT à l'HORIZON 2050	CHANGEMENT à l'HORIZON 2080
Hiver	Températures	2,4 à 4,0 °C	4,5 à 6,5 °C	5,8 à 9,5 °C
	Précipitations	6,2 à 17,9 %	16,8 à 29,4 %	24,0 à 43,8 %
Printemps	Températures	1,1 à 1,9 °C	1,9 à 3,3 °C	2,8 à 5,4 °C
	Précipitations	2,2 à 11,8 %	6,3 à 19,0 %	12,1 à 29,4 %
Été	Températures	0,9 à 1,7 °C	1,6 à 2,8 °C	2,1 à 3,6 °C
	Précipitations	1,6 à 8,2 %	3,0 à 12,1 %	5,8 à 17,9 %
Automne	Températures	1,2 à 2,3 °C	2,3 à 3,7 °C	2,8 à 4,6 °C
	Précipitations	5,5 à 12,0 %	9,8 à 20,1 %	16,2 à 29,5 %

CENTRE				
Saison		CHANGEMENT à l'HORIZON 2020	CHANGEMENT à l'HORIZON 2050	CHANGEMENT à l'HORIZON 2080
Hiver	Températures	1,8 à 2,9 °C	3,5 à 4,9 °C	4,5 à 7,1 °C
	Précipitations	5,6 à 14,3 %	12,0 à 22,9 %	19,7 à 35,5 %
Printemps	Températures	1,0 à 1,7 °C	1,8 à 3,0 °C	2,4 à 4,7 °C
	Précipitations	3,6 à 9,6 %	7,0 à 14,3 %	12,6 à 26,0 %
Été	Températures	0,9 à 1,8 °C	1,8 à 3,0 °C	2,3 à 4,1 °C
	Précipitations	0,4 à 5,2 %	1,1 à 6,9 %	3,4 à 9,3 %
Automne	Températures	1,1 à 2,0 °C	2,1 à 3,2 °C	2,6 à 4,3 °C
	Précipitations	1,5 à 7,6 %	4,5 à 13,1 %	9,7 à 18,5 %

MARITIME				
Saison		CHANGEMENT à l'HORIZON 2020	CHANGEMENT à l'HORIZON 2050	CHANGEMENT à l'HORIZON 2080
Hiver	Températures	1,4 à 2,2 °C	2,5 à 3,8 °C	3,4 à 5,0 °C
	Précipitations	2,8 à 9,7 %	6,5 à 5,4 %	12,6 à 22,9 %
Printemps	Températures	0,8 à 1,5 °C	1,6 à 2,7 °C	2,2 à 4,1 °C
	Précipitations	0,3 à 8,1 %	3,1 à 11,5 %	8,8 à 18,5 %
Été	Températures	0,9 à 1,6 °C	1,7 à 2,7 °C	2,2 à 3,8 °C
	Précipitations	-1,9 à 5,2 %	-1,4 à 5,7 %	-4,0 à 7,1 %
Automne	Températures	1,1 à 1,6 °C	1,9 à 2,8 °C	2,3 à 4,1 °C
	Précipitations	-2,8 à 3,6 %	-2,0 à 7,1 %	-0,9 à 10,1 %

SUD				
Saison		CHANGEMENT à l'HORIZON 2020	CHANGEMENT à l'HORIZON 2050	CHANGEMENT à l'HORIZON 2080
Hiver	Températures	1,3 à 2,3 °C	2,5 à 3,8 °C	3,6 à 5,7 °C
	Précipitations	3,7 à 11,1 %	8,6 à 18,1 %	14,5 à 27,6 %
Printemps	Températures	1,0 à 1,7 °C	1,9 à 3,0 °C	2,7 à 4,3 °C
	Précipitations	2,0 à 8,6 %	4,4 à 13,1 %	8,9 à 22,2 %
Été	Températures	1,1 à 1,7 °C	1,9 à 3,0 °C	2,6 à 4,4 °C
	Précipitations	-1,5 à 4,4 %	-1,8 à 5,4 %	-4,9 à 6,0 %
Automne	Températures	1,2 à 1,9 °C	2,0 à 3,1 °C	2,7 à 4,5 °C
	Précipitations	-2,7 à 3,6 %	-0,7 à 7,7 %	0,4 à 12,8 %

Tableau 1 : Changements saisonniers de températures et de précipitations pour 4 régions du Québec évalués à partir d'un ensemble de 126 simulations climatiques globales. Les changements sont calculés par rapport au climat de 1961-1990 ; les valeurs correspondent aux 25^e et 75^e quantiles des changements projetés. L'ensemble inclut 3 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (SRES A1B, A2 et B1), 20 modèles de climat globaux (MCGs) et plusieurs membres en combinaison MCG/SRES (Meehl *et al.*, 2007).

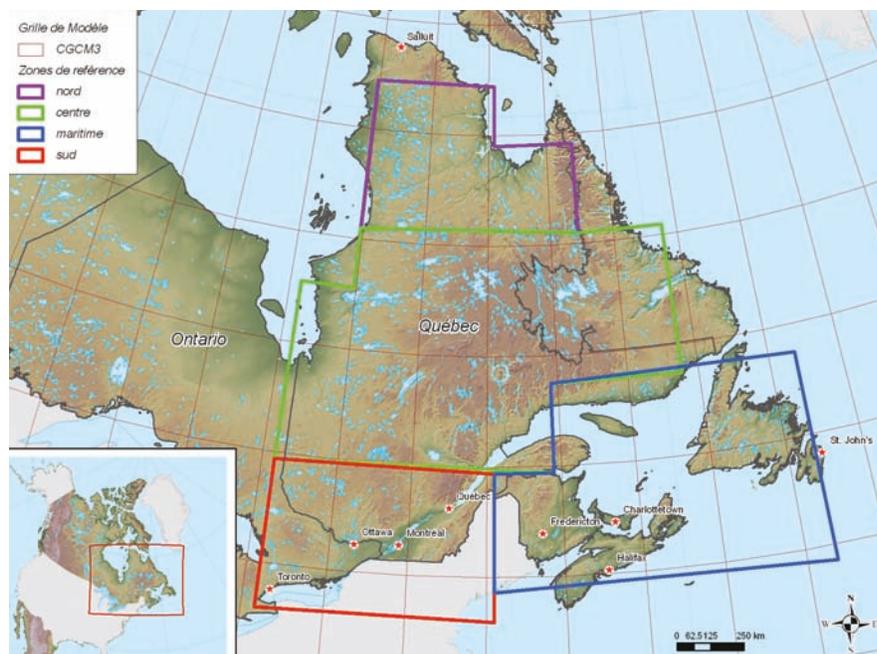


Figure 4 : Limite des régions décrites au tableau 1.

D'une façon générale, lorsqu'il y a un changement, celui-ci s'accroît avec le temps, tout comme la plage de l'incertitude qui y est associée. Par contre, lorsque le changement se situe autour de zéro, cela se maintient jusqu'à l'horizon 2080. Par exemple, en hiver dans le Nord du Québec, la hausse des températures se situerait entre 2,4 °C et 4,0 °C vers 2020 et atteindrait des valeurs entre 5,8 °C et 9,5 °C en 2080. En été dans le Sud du Québec, l'ensemble des projections climatiques suggère un très faible changement dans la quantité de précipitations.

Les changements dans la variabilité et les extrêmes

Les changements attendus dans les moyennes climatiques peuvent être accompagnés de changements dans la variabilité et les extrêmes. Les distributions des températures moyennes quotidiennes simulées sur la période couvrant le passé récent ainsi que celles projetées à l'horizon 2041-2070 par un ensemble de 5 simulations régionales du Modèle régional canadien du climat (MRCC) sont présentées à la figure 5.

Ces distributions montrent des changements de variabilité différents selon les saisons et les régions. Ainsi, la figure 5 montre, en hiver, une hausse de la moyenne et une diminution de la variabilité dans le Sud et dans le Nord. En été, c'est plutôt une augmentation de la variabilité dans le Sud tandis que dans le Nord seule la moyenne change. La diminution de l'écart-type de la distribution d'hiver résulte principalement de la moins grande fréquence de froids intenses alors que les températures extrêmes chaudes en hiver augmentent peu. Par contre, en saison estivale, dans le Sud, le déplacement de la queue de distribution est plus accentué à droite, ce qui illustre une augmentation plus importante de la fréquence des journées aux températures très élevées.

En ce qui a trait au changement de distribution des précipitations, les résultats publiés par Mailhot *et al.* (2007b) suggèrent une prolongation de la saison propice aux orages de même qu'une augmentation des événements de pluie intense. Ces changements sont également projetés dans les régions où la moyenne des précipitations ne change pas.

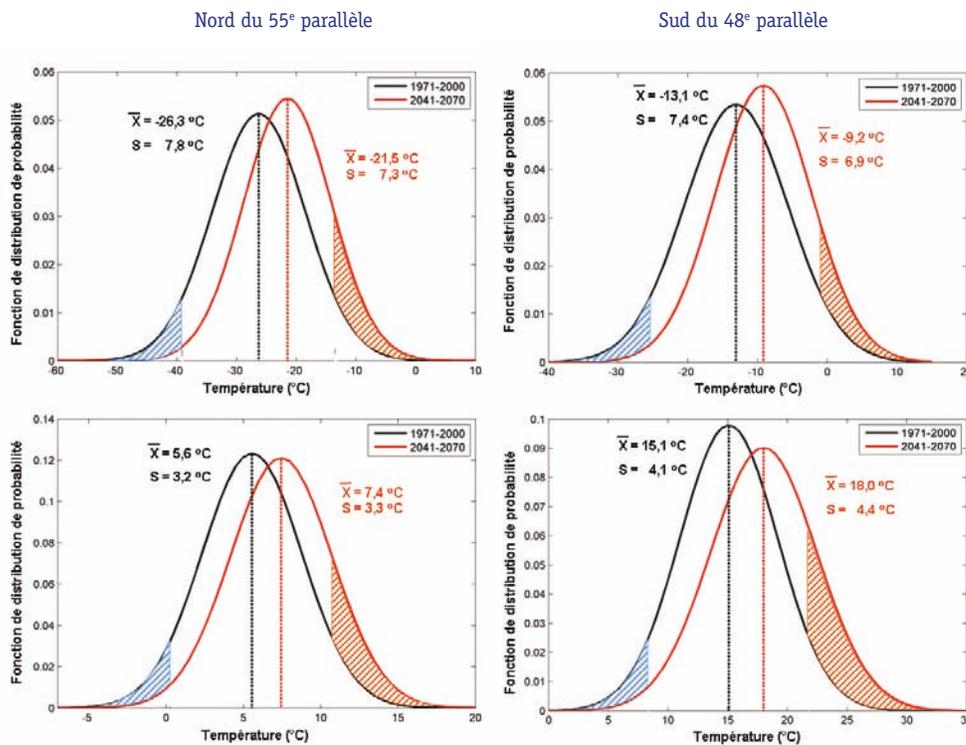


Figure 5 : Distributions hivernales (DJF) (haut) et estivales (JJA) (bas) des températures quotidiennes moyennes simulées en climat actuel (1971-2000) et projetées dans le futur (2041-2070) par un ensemble de 5 simulations MRCC4.2.3 pilotées par 5 différents membres de MCG3 sur la base du scénario A2. Les zones hachurées représentent les 10^e et 90^e percentiles basés sur le climat actuel. \bar{X} et S réfèrent respectivement à la moyenne et à l'écart-type de la distribution.

LA POPULATION

La population du Québec s'élève à 7,7 millions de personnes (2006). Elle se concentre largement (82 %) dans le sud du territoire et le long du fleuve Saint-Laurent. Dans les autres régions (18 % de la population), l'économie est davantage axée sur l'exploitation des ressources naturelles. Le Québec est relativement urbanisé, avec 75 % de sa population résidant dans 73 villes de plus de 10 000 habitants, dont 54 % dans 9 villes de plus de 100 000 habitants, qui sont Montréal, Québec, Lévis, Gatineau, Sherbrooke, Laval, Longueuil, Saguenay et Trois-Rivières. Le territoire rural (80 % du territoire habité) abrite 1,6 million de personnes (22 % de la population) vivant dans près de 1 000 agglomérations. Pour sa part, la population autochtone totale avoisine les 87 000 personnes (77 000 Amérindiens, 10 000 Inuits) (Secrétariat aux affaires autochtones, 2007).

Selon le plus récent scénario de référence de l'Institut de la statistique, la population du Québec pourrait passer de 7,7 millions d'individus en 2006 à près de 9 millions en 2056 (voir la figure 6). Une situation démographique moins favorable entraînerait plutôt un plafonnement à près de 8,3 millions de personnes en 2029, suivi d'un déclin qui ramènerait la population du Québec à 7,7 millions en 2056. À l'inverse, une très forte croissance pourrait faire augmenter la population du Québec à 11 millions en 2056.

Onze des 17 régions administratives du Québec devraient continuer de croître au moins jusqu'en 2031. Les régions de Lanaudière et des Laurentides connaîtraient les augmentations les plus marquées (38 % et 34 %, respectivement), avec pour conséquences notables des besoins accrus de ressources en eau.

En 2031, la région administrative de Montréal serait toujours la plus peuplée avec 2 101 000 habitants, soit 227 000 de plus qu'en 2006. Pour leur part, les autres régions connaissent déjà ou connaîtraient d'ici 2031 une certaine décroissance de leur population (de -1,3 % à -12,0 %), la migration interne vers les grands centres jouant ici un rôle important. Notons que le Nord du Québec, qui comprend le Nunavik, devrait voir sa population augmenter fortement à l'horizon 2031. Ces variations dans l'évolution régionale des populations pourraient aggraver les problèmes d'occupation du territoire créés par les changements climatiques, notamment dans le Nord où serait accentuée la difficulté de déterminer l'emplacement des bâtiments.

La croissance marquée du nombre d'ainés partout au Québec constitue un autre phénomène démographique important (voir la figure 7). En 2031, le nombre de personnes âgées de 65 ans et plus dépasserait les 2 millions et leur poids démographique excéderait les 20 % dans toutes les régions sauf dans le Nord-du-Québec, atteignant même plus de 30 % dans le Bas-Saint-Laurent et le Saguenay-Lac-Saint-Jean. Par comparaison, la région présentant la moyenne d'âge la plus élevée en 1996, la Mauricie, comptait moins de 15 % de personnes âgées de 65 ans et plus. Ainsi, une proportion croissante de la population viendrait augmenter les tranches d'âge potentiellement plus vulnérables aux changements climatiques.

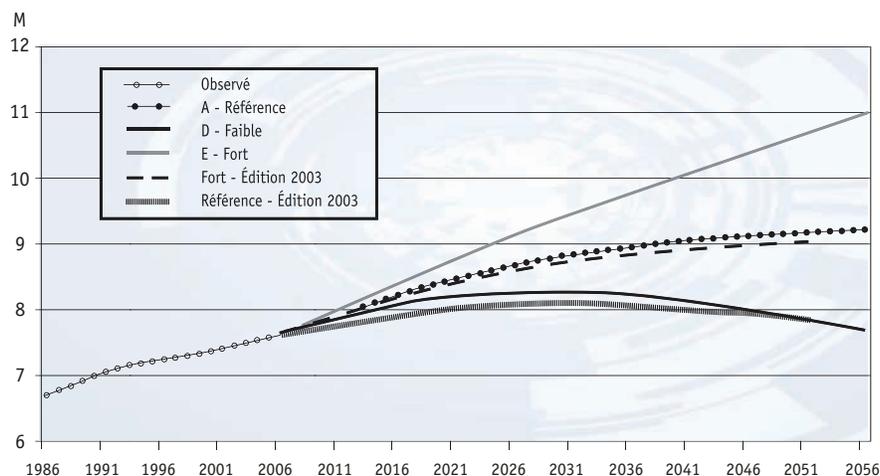


Figure 6 :
Scénarios d'évolution de la population totale du Québec jusqu'en 2056, en millions (ISQ, 2009a).

Tous ces changements auront des impacts sur la vulnérabilité de la société québécoise, particulièrement sur les moyens financiers disponibles pour des services de santé de plus en plus en demande (Godbout *et al.*, 2007). Ce vieillissement de la population doit être analysé en combinaison avec l'évolution de l'état de santé de la population québécoise qui, selon l'Institut national de la santé publique du Québec (INSPQ, 2006), évolue positivement pour les différentes régions administratives du Québec. En effet, la majorité des indicateurs socioéconomiques et de santé indiquent une amélioration graduelle et constante de l'état de santé, contrairement au rapport précédent qui avait signalé un accroissement potentiel du nombre de personnes vulnérables pour diverses raisons (sédentarité, excès de poids, personnes âgées vivant seules).

Notons enfin que le nombre de ménages augmentera plus rapidement que la population, amenant une diminution progressive de la taille des ménages, et se stabilisera à 4,2 millions vers 2046 (ISQ, 2009a).

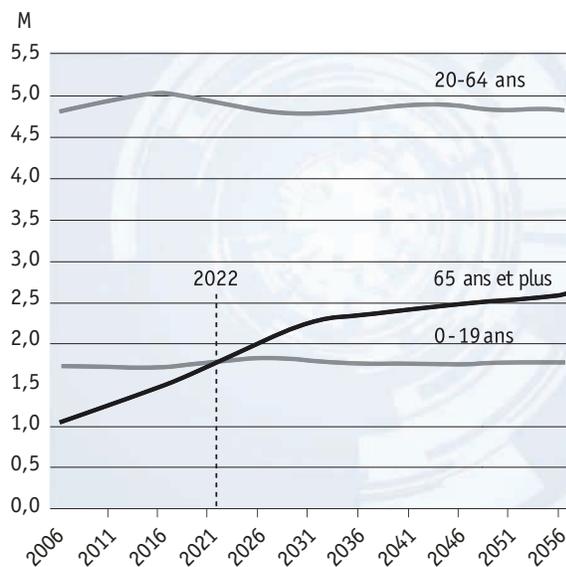


Figure 7 :
Effectifs de la population selon les groupes d'âge, scénario A - Référence, Québec, 2006-2056, en millions (ISQ, 2009a).

L'ÉCONOMIE

L'économie du Québec, avec un produit intérieur brut (PIB) de près de 278 milliards de dollars en 2007 (voir le tableau 2), se classe au 44^e rang dans le monde. C'est une économie très diversifiée allant de la production de biens issus de l'exploitation des ressources naturelles jusqu'aux produits de haute technologie, en passant par les services financiers et culturels. C'est aussi une économie largement tournée vers l'extérieur, avec un ratio relativement élevé d'exportation et d'importation vers le reste du Canada et les autres pays.

Ceci la rend particulièrement sensible à l'évolution de ses partenaires commerciaux, qui seront eux aussi touchés par les changements climatiques. La production de biens et services par habitant au Québec est parmi les plus élevées dans le monde et lui permet de disposer d'importantes ressources techniques et financières pour faire face aux impacts potentiels des changements climatiques.

C'est une économie fortement tertiaisée. En effet, le secteur des services (secteur tertiaire), composé des activités commerciales et financières, de la santé et de l'éducation, des loisirs et de l'administration publique, occupe près de 70 % du PIB, contre 30 % pour les industries productrices de biens (secteurs primaire et secondaire) (ISQ, 2009b). Tout indique que cette tertiaisation de l'économie s'accroîtra encore, notamment avec la croissance des industries de l'information, des loisirs et du tourisme ainsi que l'accroissement des services de santé.

Cette structure de l'économie québécoise implique que d'une façon très globale, l'économie du Québec n'est donc que modérément vulnérable aux changements climatiques. En effet, les industries de l'agriculture, de foresterie, de chasse et pêche, qui sont particulièrement sensibles au climat, ne représentaient en 2007 que 1,6 % du PIB. Il faut toutefois prendre en compte également la production d'électricité, que l'on retrouve sous l'appellation services publics dans la production de biens et qui représente 4 % du PIB. Cette production d'électricité, à 96 % d'origine hydraulique, est bien sûr éminemment sensible aux variations climatiques.

Il est prévu d'ailleurs que cette production s'accroisse au cours des prochaines décennies. Il en va de même pour la filière éolienne, une industrie actuellement en plein essor et dont la puissance installée devrait passer de 100 MW à 4 000 MW d'ici 2015 (MRNF, 2006a).

Tableau 2 : Produit intérieur brut aux prix de base, par activité économique, Québec, 2002-2007, en millions de dollars (ISQ, 2009b).

	2002	2003	2004	2005	2006*	2007*
ACTIVITÉ ÉCONOMIQUE						
Industries de production de biens						
Agriculture, foresterie, pêche et chasse	4 173	4 376	4 818	4 400	4 184	4 449
Extraction minière et extraction de pétrole et de gaz	1 232	1 410	1 645	2 012	2 285	2 673
Services publics	9 479	9 936	9 695	10 108	10 709	11 249
Construction	11 183	11 859	13 598	13 747	14 479	16 501
Fabrication	47 482	46 279	48 243	47 879	48 204	48 827
Industries de services						
Commerce de gros	11 365	12 025	12 896	13 133	13 823	14 883
Commerce de détail	13 325	14 239	14 926	15 682	16 601	17 291
Transport et entreposage	9 589	9 944	10 177	10 776	11 330	11 586
Industrie de l'information et industrie culturelle	8 912	9 027	9 167	9 571	10 191	10 943
Finance et assurance, services immobiliers et de location, gestion de sociétés et d'entreprises	36 513	38 264	40 774	42 198	44 660	47 185
Services professionnels, scientifiques et techniques	9 141	9 913	10 546	10 916	11 753	12 336
Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	5 659	6 132	6 413	6 878	7 440	7 921
Services d'enseignement	11 789	12 315	12 674	12 916	13 504	14 377
Soins de santé et assistance sociale	16 244	17 404	18 245	18 999	19 731	21 955
Arts, spectacles et loisirs	2 478	2 642	2 735	2 754	2 945	3 144
Hébergement et services de restauration	4 944	5 259	5 659	5 994	6 273	6 541
Autres services, sauf les administrations publiques	5 784	6 072	6 356	6 709	7 095	7 618
Administrations publiques	14 559	16 884	16 625	16 978	17 682	18 489
Produit intérieur brut aux prix de base	223 850	232 980	243 389	251 650	262 789	277 967

* estimation

Pour sa part, le secteur manufacturier recouvre plusieurs industries qui pourraient se révéler vulnérables, dans la mesure où elles reposent sur la transformation des ressources. Parmi elles, l'agroalimentaire et la transformation du bois. Cette dernière industrie représente près de 3 % du PIB de même qu'une proportion importante des exportations du Québec.

Les industries des services sont *a priori* moins sensibles aux changements climatiques, si on fait exception de l'industrie du tourisme et des loisirs (hébergement et restauration), dont l'offre est en partie axée sur le climat, et des services de santé, qui pourraient subir les conséquences des variations climatiques sur la santé publique. À ces deux industries il faut ajouter celle des assurances, bien sûr concernée par l'accroissement des événements de vents violents et de précipitations intenses qui entraînent une augmentation des dommages et donc des réclamations.

Ce portrait global cache cependant de profondes différences régionales. Dans certaines régions, l'agriculture, la forêt, la production hydroélectrique, les mines et la transformation des ressources continuent de fournir une part importante des emplois directs (entre 12 % et 20 %). Au total, il s'agit de plusieurs centaines de communautés qui dépendent directement de l'exploitation d'une ou de plusieurs ressources naturelles locales et qui pourraient ainsi être plus fortement affectées par les changements climatiques.

Il est bien sûr prévisible que ce portrait de l'économie québécoise évolue fortement au cours des prochaines décennies. Selon les tendances actuelles de la démographie et de la productivité du travail, le Québec connaîtrait une croissance économique soutenue et doublerait sa production d'ici 50 ans (MFQ, 2005).



Les ménages et les individus verraient ainsi leurs revenus augmenter substantiellement et disposeraient alors de moyens accrus pour satisfaire leurs besoins. L'augmentation de la scolarisation et de l'urbanisation est également envisagée (ISQ, 2003). En région, l'évolution démographique créerait des différences importantes sur le plan de la croissance économique globale et par habitant, auxquelles viendraient s'ajouter les effets de la croissance différenciée des industries des ressources par rapport aux effets de la croissance des autres secteurs économiques.

Pour leur part, l'évolution du commerce international (accords commerciaux, développement économique des pays émergents), les changements technologiques (produits nouveaux, procédés de production améliorés) ou encore les modifications de disponibilité et de coût des approvisionnements auront aussi une influence considérable sur les différentes activités de production de biens et services. Dans ce contexte, on comprend que s'il est possible de circonscrire l'évolution globale de l'économie à moyen terme, il est très risqué de se prononcer sur la situation future d'une industrie en particulier (par exemple, les pâtes et papiers, la transformation du bois ou l'agro-alimentaire) et sur les impacts que pourront avoir les changements climatiques sur le niveau ou la nature des activités dans 50 ou 100 ans.

Enfin, les changements démographiques et socioculturels auront aussi des impacts notables sur la demande de biens et services, tels qu'une hausse des besoins en services de santé d'une population vieillissante ou encore des besoins en loisirs des retraités, allant de pair avec des moyens technologiques accrus pour les satisfaire. En somme, l'environnement socioéconomique sera bien différent du contexte actuel.

L'ÉVOLUTION SOCIALE

Au-delà des impacts physiques et économiques comme tels, aisément mesurables, l'importance qu'on leur accorde sera influencée par l'évolution des perceptions et des valeurs de la société. Les acquis socioéconomiques importants, le niveau croissant d'éducation, la sensibilité accrue à la valeur de l'environnement, une meilleure information et une prise de conscience de la complexité des enjeux entraîneront une augmentation de l'importance accordée aux différents impacts et influenceront les décisions d'adaptation permettant de composer avec ces derniers (Bryant *et al.*, 2007).

Il est clair que la société québécoise est désormais beaucoup plus préoccupée de la qualité de l'environnement, comme en font foi plusieurs politiques et décisions gouvernementales des dernières décennies en matière de déchets, d'énergie, de gestion de l'eau et de développement durable. Notons en particulier qu'en 2006 le Québec se dotait d'un *Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques* (MDDEP, 2006b) et adoptait la *Loi sur le développement durable* (MDDEP, 2006a).

Bien qu'il soit difficile de prévoir avec précision l'importance qui sera accordée dans l'avenir aux questions environnementales, il semble bien qu'une conscience accrue des services que procure l'environnement à la société (services écologiques) en augmentera la valeur.

Les Inuits du Nunavik et les Premières nations d'autres régions entretiennent avec leur environnement naturel une relation qui rejoint de près l'identité même de leurs communautés et les fondements de leur culture. La pêche et la chasse jouent dans ces communautés un rôle majeur tant sur le plan économique que culturel. Ces populations, qui dans bien des cas connaissent un fort accroissement démographique, sont aux prises avec des changements profonds apportés par le développement économique et l'évolution des technologies et des moyens de communication. Les changements climatiques viendront s'insérer dans cet ensemble de changements avec lesquels ces sociétés doivent composer.

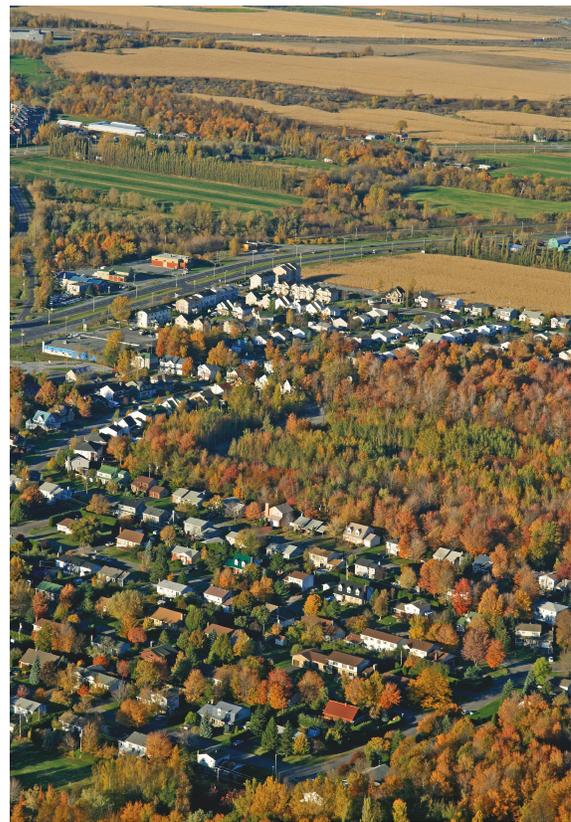
Sur un autre plan, une proportion non négligeable de la population vit dans des conditions de précarité socio-économique (INSPQ, 2006). Cette population, concentrée dans les grandes villes, affronte des défis particuliers en matière de vulnérabilité aux changements climatiques, notamment face aux vagues de chaleur. Les progrès qui seront accomplis au cours des prochaines décennies pour réduire le nombre de personnes à faible revenu, notamment par différentes mesures d'aide et de soutien au revenu, pourraient avoir un effet direct sur ce type de vulnérabilité.

L'ENVIRONNEMENT BÂTI

Depuis le début du XX^e siècle, l'environnement bâti a connu une progression fulgurante au Québec. Elle s'explique entre autres par l'urbanisation, l'enrichissement, les développements technologiques, la croissance et l'étalement de la population ainsi que par l'interdépendance et la complexité croissantes des activités socioéconomiques. Comme l'environnement bâti est généralement exposé au climat, sa vulnérabilité s'exprime en fonction de seuils coût/risque critiques. Ceux-ci sont établis à partir de données climatiques historiques intégrant les dernières décennies sur la base d'une hypothèse de climat stationnaire. La non-stationnarité qu'impliquent les changements climatiques risque d'affecter l'efficacité, la durée de vie et la sécurité des infrastructures et des édifices.

L'environnement bâti se compose de divers types d'infrastructures et d'édifices. Par exemple, les infrastructures de transport – terrestre (route, rail), maritime, aérien – et les infrastructures liées aux ressources hydriques – barrages, canaux et ports. D'autres, associées aux domaines de l'énergie et de la géologie, permettent l'exploitation des ressources naturelles. Pour leur part, les infrastructures municipales assurent entre autres la distribution de l'eau et son traitement, la gestion des eaux de surface ou encore l'élimination des déchets. Les édifices publics et privés, qui représentent un grand nombre de bâtiments, assurent différents services à la population. Les ouvrages de protection, parfois qualifiés de critiques, servent à garantir la sécurité des populations, des activités socioéconomiques ou de l'environnement naturel et bâti.

Ces dernières années, beaucoup d'attention a été accordée au problème des infrastructures vieillissantes, notamment dans les municipalités, car plusieurs ont dépassé leur durée de vie utile (Infrastructure Canada, 2004 ; Villeneuve *et al.*, 1998). À cet égard, les besoins en nouvelles infrastructures mais surtout en réhabilitation d'infrastructures existantes demeurent et demeureront importants, et les investissements massifs attendus et prévus au cours des prochaines décennies sont déjà amorcés (Statistique Canada, 2006). Les changements climatiques viendront accentuer les besoins de réhabilitation des infrastructures dans la mesure où celles-ci ne pourront plus assurer les services pour lesquels elles ont été conçues. Ces tendances semblent démontrer que l'intégration, lorsque pertinente, de nouvelles données climatiques ou de nouvelles approches, au moment de la conception ou de la réhabilitation des infrastructures, est déterminante en ce qui a trait à la vulnérabilité future de l'environnement bâti du Québec.





DEUXIÈME PARTIE

Vulnérabilités, impacts et options d'adaptation



INTRODUCTION

La sensibilité aux changements climatiques est multiple car ceux-ci nous touchent, directement et indirectement, de nombreuses façons. Cette sensibilité est très variable selon les régions, les populations, les milieux naturels et la structure de l'économie. De même, les capacités d'adaptation ne sont pas les mêmes pour les êtres humains et les écosystèmes, selon les régions du monde ou encore la richesse d'une économie et sa structure. Certains pays seront nettement plus désavantagés que d'autres.

Le Québec, comme les autres régions du monde, subira les impacts à la fois positifs et négatifs des changements climatiques. Comme on le verra dans les prochaines pages, les impacts attendus dépendent en bonne partie de l'horizon auquel on se réfère, selon qu'il s'agisse de 2020, 2050, 2080 ou 2100, et du scénario de gaz à effet de serre que l'on envisage. En effet, plus on s'éloigne dans le temps et plus les concentrations de gaz à effet de serre augmentent, plus les impacts sont importants ; certains impacts modestement positifs au départ deviennent par la suite fortement négatifs.

Les pages qui suivent décrivent, en fonction des études réalisées à ce jour, les impacts potentiels des changements climatiques au Québec ainsi que, s'il y a lieu, les mesures d'adaptation envisagées. La description de ces impacts et de ces mesures d'adaptation a été séparée en quatre catégories : les impacts sur l'environnement bâti, sur les activités économiques, les impacts directs sur les populations humaines et enfin ceux affectant les systèmes naturels.

- La première catégorie regroupe les impacts sur l'environnement bâti, composé à la fois des bâtiments résidentiels et non résidentiels et des infrastructures publiques et privées. Ces bâtiments et ces infrastructures ont été conçus en fonction de conditions climatiques données, et la modification de ces conditions compromet leur capacité à assurer les services prévus et dans certains cas met en jeu la sécurité et le bien-être des populations. En ce sens, l'Arctique québécois et le littoral sont particulièrement vulnérables. En effet, l'importance du réchauffement des températures dans l'extrême nord du Québec entraînera la fonte du pergélisol sur lequel sont construits de nombreux bâtiments et infrastructures. Quant à l'érosion côtière, accrue par la réduction de la protection des glaces hivernales et la hausse du niveau de la mer, elle menace les infrastructures et les bâtiments d'une très vaste région. L'ensemble des infrastructures du Québec méridional risque aussi d'être touché, notamment en raison des modifications du régime des précipitations et des températures.

- La deuxième catégorie rassemble les impacts sur les activités économiques qui pourraient venir modifier la productivité, la demande et les prix des biens et services. À cet égard, le Québec est un peu plus sensible aux changements climatiques que certaines autres régions développées du monde dont l'économie est moins liée au climat. Cela est dû, en premier lieu, à la prédominance de la production hydroélectrique, qui fournit 94 % de l'approvisionnement en électricité du Québec et est totalement tributaire des précipitations sous forme de pluie et de neige. Toute augmentation ou diminution du bilan hydrique se traduira pour le Québec par d'importantes variations des bénéfices. De même comme la demande en énergie pour fins de chauffage et de climatisation représente au Québec, une part importante de la dépense totale des familles et des entreprises, tout réchauffement climatique influencera nécessairement la demande de l'ensemble des formes d'énergie en abaissant les besoins en chauffage et en haussant les besoins en climatisation.

La gestion des ressources en eau jouera pour sa part un rôle central dans l'ampleur des impacts des changements climatiques. En effet, l'approvisionnement en eau est un élément clé de l'adaptation de plusieurs activités économiques aux nouvelles conditions climatiques, notamment l'agriculture et le tourisme, tout en étant essentiel à la santé humaine et au maintien des écosystèmes.

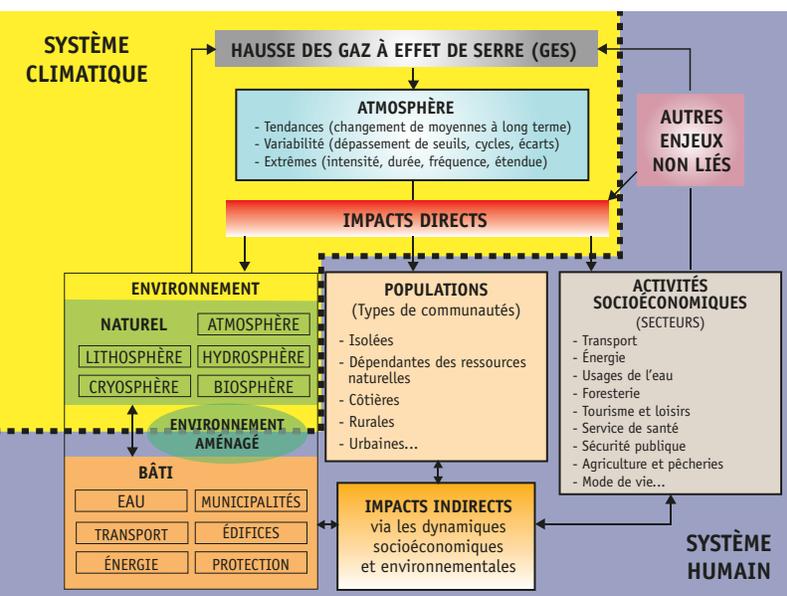


Figure 8 : Impacts directs et indirects du climat, de sa variabilité et de ses extrêmes sur l'environnement naturel et bâti, les populations et les activités socioéconomiques.

Parmi les autres industries qui dépendent dans une bonne mesure du climat viennent en tête de liste l'exploitation forestière, l'agriculture ainsi que la chasse et la pêche. Pour leur part, les industries de transformation, dont l'agroalimentaire, le bois d'œuvre, la transformation des métaux, les pâtes et papiers, pourraient être indirectement touchées par des modifications de disponibilité des ressources et des coûts d'approvisionnement.

Outre les industries basées sur les ressources naturelles, plusieurs industries de service sont sensibles aux modifications du climat, notamment le tourisme qui pourrait être avantagé ou désavantagé en fonction de sa capacité d'adaptation aux conditions changeantes. De même, les services de santé et sanitaires pourraient devoir faire face à de nouveaux besoins. D'autres secteurs auraient aussi à s'ajuster, comme les transports routiers et maritimes ainsi que les services d'assurances.

En somme, une partie importante de l'économie québécoise serait directement ou indirectement touchée. Les répercussions pourraient être d'autant plus importantes dans les régions ressources et rurales dont l'économie est davantage tournée vers les activités dépendantes du climat, comme l'exploitation forestière, le tourisme, la chasse, la pêche ou l'agriculture. En fait, la distribution des impacts des changements climatiques sur le territoire du Québec ne sera pas uniforme, et dans certaines collectivités la capacité à s'adapter efficacement au nouveau contexte climatique pourrait constituer à la fois un défi et un élément de prospérité supplémentaires.

Les secteurs qui subiront les impacts les plus directs sont abordés successivement dans les sections qui suivent.

- La troisième catégorie regroupe les impacts des changements climatiques sur la sécurité, la santé et le bien-être des populations, ainsi que sur les écosystèmes. Les événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses, les pluies intenses, les orages et les tempêtes, les vagues de froid et les canicules représentent des dangers réels pour la santé, voire pour la survie de plusieurs groupes, notamment les plus vulnérables.

Enfin, l'intégrité des milieux naturels risque aussi d'être affectée par l'augmentation des événements climatiques extrêmes ainsi que par les changements dans les moyennes de températures et de précipitations. Là encore, les espèces les plus vulnérables, à la limite de leur aire de distribution naturelle, seront grandement touchées par les changements.

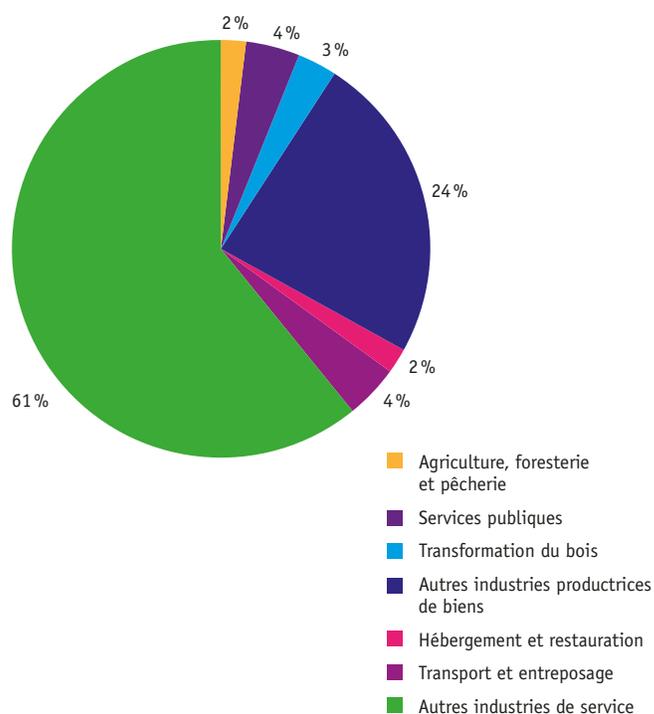


Figure 9 : Part de certaines activités économiques sensibles au climat dans le produit intérieur brut (PIB), à partir du PIB aux prix de base du Québec, en 2007 (ISQ, 2009b).

L'ENVIRONNEMENT BÂTI

Le Nord

Le territoire du Nunavik, situé au nord du 55^e parallèle, se caractérise par son climat arctique qui régit la dynamique de son environnement physique et humain. L'hiver y dure de 9 à 10 mois par an, de sorte que la neige et la glace dominent le paysage une longue partie de l'année, ce qui a fortement contribué au façonnement des modes de vie autochtones traditionnels. Le Québec est la seule des 10 provinces du Canada à réunir sur son territoire les caractéristiques des milieux arctiques. Le Nunavik est traversé par la limite des arbres au-delà de laquelle s'étend la toundra. Les sols, souvent rocheux et rocailleux, mais parfois de texture plus fine, sont en bonne partie gelés en permanence : c'est le pergélisol. La faune, abondante, est composée de grandes populations animales, notamment les plus importants troupeaux de caribous du monde. Une multitude de lacs et de grandes rivières qui se déversent dans trois bassins versants (baie d'Hudson, détroit d'Hudson et baie d'Ungava) contiennent d'importantes populations ichtyologiques, dont les salmonidés parmi lesquels l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*), une espèce étroitement liée à la vie des Inuits. Majoritairement inuite, la population est regroupée dans 14 villages côtiers (voir la figure 10) où sont concentrées les infrastructures.

Depuis trois générations, les villages nordiques connaissent une expansion démographique rapide, et leurs activités socio-économiques passent par de grandes transformations. Ces activités étaient autrefois essentiellement basées sur des modes de vie traditionnels ; désormais, seules quelques activités traditionnelles (approvisionnement alimentaire, vente de fourrures sur les marchés internationaux) comptent encore pour une part notable de l'économie locale.

Les impacts environnementaux

De pair avec l'évolution récente du climat, la température du pergélisol à 4 m et à 20 m de profondeur sur l'ensemble du territoire s'est élevée en moyenne respectivement de 1,9 °C et de près de 1,1 °C entre 1994 et 2007 (Allard *et al.*, 2008). Ce réchauffement du pergélisol a causé, comme on a pu le constater, un approfondissement notable de la couche active, c'est-à-dire la partie superficielle du terrain qui dégèle en été (Allard *et al.*, 2002a).



Le pergélisol

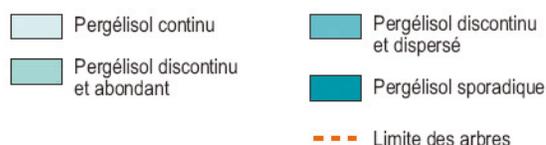


Figure 10 : Le pergélisol (Allard et Seguin, 1987).

Déjà, les Inuits rapportent d'importantes transformations environnementales, et même les chasseurs expérimentés disent avoir du mal à prévoir les conditions météorologiques de même que l'état de la neige ou de la mer lors de leurs déplacements en motoneige ou en canot (Tremblay *et al.*, 2006). Ces récentes modifications font en sorte que le savoir traditionnel inuit ne semble plus aussi fiable, et que de nombreux accidents impliquant parfois des personnes expérimentées sont rapportés (Nickels *et al.*, 2005).

Or, on prévoit que le Nunavik subira les plus importants changements climatiques du Québec en valeur absolue, en particulier à cause de l'effet de rétroaction climatique de la neige et de la glace ainsi que de la présence de la baie d'Hudson à l'ouest.

Au cours des prochaines décennies, les augmentations des températures dues aux changements climatiques dans le Nord pourraient atteindre en 2080 une moyenne de 2,6 °C en été et de 7,0 °C en hiver.

Le transfert de chaleur dans le sol, consécutif à ce réchauffement climatique, provoquera inévitablement une fonte partielle du pergélisol (Lawrence et Slater, 2005). En raison de cette dégradation du pergélisol qui entraîne déjà des affaissements de terrain ainsi que la création et l'expansion de petits lacs de thermokarst (Seguin et Allard, 1984), les écosystèmes seront fortement perturbés. De surcroît, les réseaux de drainage des sols sensibles sont susceptibles d'être modifiés par l'assèchement et l'extension des tourbières et des terres humides (selon les conditions locales de topographie et de texture du sol) ainsi que par le ravinement et l'érosion en rigoles (Payette *et al.*, 2004). Des recherches en cours démontrent par ailleurs que les nombreux lacs de thermokarst issus de la dégradation du pergélisol deviennent, par suite de l'activité biologique qui s'y développe, des générateurs de gaz carbonique et de méthane.

Favorisée par les saisons estivales plus clémentes et une protection hivernale du couvert de neige accru dans la toundra, l'expansion des populations arbustives, qui a déjà commencé, continuera de transformer les écosystèmes de façon importante, augmentant leur productivité primaire, phénomène qui devrait se répercuter sur le règne animal. L'aire de répartition de certaines espèces animales vivant normalement plus au sud est aussi appelée à progresser vers le nord au rythme de ces changements. L'incidence sur le comportement de populations migratrices, y compris, entre autres, les caribous, l'omble chevalier, les oies, les canards, les phoques et les baleines, reste à déterminer.

Dans la mesure où le régime des précipitations, de l'évapotranspiration et de l'écoulement souterrain sera touché, le régime hydrologique des rivières évoluera et les températures de l'eau se réchaufferont. Des apports sédimentaires pourraient résulter de la détérioration du pergélisol, bien que leur ampleur reste à évaluer. Tous ces changements auront un impact non négligeable sur la faune aquatique régionale.

Les impacts socioéconomiques

Déjà, en plusieurs endroits, le pergélisol discontinu, dont les températures se situent près du point de congélation, est devenu beaucoup moins froid et a atteint des températures près du point de dégel. Le réchauffement régional prévu agira d'abord sur les marges sud du pergélisol, puis progressivement sur les territoires plus nordiques.

Les bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels

La dégradation du pergélisol présente des risques pour plusieurs communautés du Nunavik. Ces risques varient selon la géomorphologie (massifs de roche, sols granulaires ou sols argileux comportant de la glace, facteur d'instabilité au dégel) et l'importance des structures en cause. Dans les zones où le sol est constitué de dépôts meubles contenant de la glace, la fonte du pergélisol cause des tassements et des déformations du sol susceptibles d'endommager les infrastructures. Jusqu'à présent, la planification urbaine a tenu compte, autant que possible, de la nature du terrain dans chaque communauté. De plus, la plupart des bâtiments institutionnels (écoles, hôpitaux) et résidentiels sont construits sur des pieux ou des chevalets, favorisant par la circulation de l'air le maintien du sol à des températures approchant celles de l'air (Fortier et Allard, 2003a et 2003b). Cependant, certaines constructions et infrastructures importantes (aéroports, routes) sont, par nécessité, partiellement ou totalement construites sur des terrains sensibles et, par conséquent, se montrent vulnérables à la dégradation du pergélisol.

Les infrastructures aéroportuaires

C'est le cas des infrastructures aéroportuaires de 13 villages, sous la responsabilité du ministère des Transports du Québec (MTQ), dont la sécurité et l'intégrité sont devenues préoccupantes (Grondin et Guimond, 2005). En effet, la fonte du pergélisol y a déjà provoqué des tassements et des fissures, et elle est à l'origine de signes de détérioration observables tant sur plusieurs pistes d'atterrissage que sur les routes qui relient les aéroports aux villages (Beaulac et Doré, 2005). Les mesures d'entretien courantes ont jusqu'à maintenant suffi à assurer la sécurité ; toutefois, la hausse des dommages et des activités d'entretien ainsi que la fréquence et les coûts accrus des réparations ont amené le MTQ et Ouranos à mettre sur pied un programme de recherche visant à caractériser le pergélisol en dessous et en bordure des infrastructures (profil thermique, tassements, conditions climatiques), à évaluer le comportement de ces infrastructures depuis leur construction, à prévoir leur évolution et à élaborer des mesures d'adaptation (Beaulac et Doré, 2005 ; MTQ, 2006a ; Allard *et al.*, 2007a).



L'accès aux ressources

Au Nunavik, les chasseurs et les cueilleurs se servent principalement d'embarcations en été et de motoneiges en hiver pour se déplacer. Les voies navigables et les chemins de glace sont essentiels pour l'accès aux diverses ressources traditionnelles provenant de la chasse et de la trappe, de la pêche ainsi que de la cueillette de petits fruits et des œufs, de même que pour le déplacement des biens et des personnes entre les collectivités dans diverses activités économiques, familiales, culturelles et sociales. Ces déplacements sont cruciaux pour s'alimenter et pour conserver la cohésion sociale indispensable au maintien d'une culture déjà fragilisée par d'autres stress (Lafortune *et al.*, 2005). En plus d'influer sur les diverses activités socioéconomiques, les nouvelles conditions climatiques (prévisions météorologiques plus incertaines, gel tardif et dégel précoce), qui rendent les déplacements plus risqués, affectent aussi la transmission des connaissances traditionnelles, se répercutant ainsi sur l'identité individuelle et collective de cette société en mutation (Tremblay *et al.*, 2006).

Les nouvelles activités

Le Nunavik s'ouvre de plus en plus à l'exploitation de nouvelles ressources, notamment celles de l'industrie minière. Les changements climatiques viennent dans une certaine mesure favoriser ce développement, par exemple en prolongeant la saison de navigation, ce qui permet de réduire les coûts de transport des minerais. Par contre ceux-ci créent de nouvelles conditions d'exploitation qui peuvent être moins favorables, telles que la fonte du pergélisol qui affecte le drainage de surface et pourrait compliquer l'application des mesures préventives contre la contamination environnementale. Il sera aussi nécessaire que les compagnies minières prennent des mesures pour éviter la pollution de l'environnement par les résidus miniers dans plusieurs années si leur gel permanent ne peut être garanti.

Il est également possible que l'exploitation des rivières de la baie d'Ungava à des fins de production d'électricité devienne intéressante à long terme sur les plans commercial et social ; à cet égard, l'augmentation des précipitations et leurs répercussions sur le régime hydrologique pourraient être avantageuses. En raison de son potentiel élevé dans la région (Environnement Canada, 2007a), on peut aussi envisager un développement de la filière éolienne en complément à la production électrique des centrales au diesel dans quelques collectivités, assurant du même coup la diversification de l'approvisionnement et une réduction de la dépendance aux combustibles fossiles coûteux, transportés par bateau.

Les stratégies d'adaptation

Au cours d'un atelier portant sur l'état de la situation des projets régionaux qui s'est déroulé à Montréal le 6 octobre 2005, l'éducation et les outils de sensibilisation et d'information ont été identifiés comme des moyens importants de réduire la vulnérabilité des infrastructures du Nord aux changements climatiques. Il a également été souligné qu'il est nécessaire d'améliorer les données météorologiques et la capacité de prédire les événements extrêmes, notamment les risques de blizzards, les tempêtes, les coups de vent, le dégel brutal et le brouillard. Les représentants inuits ont mentionné, parmi leurs préoccupations, leur besoin de disposer d'une meilleure analyse des impacts des changements climatiques sur les écosystèmes et la faune. Jusqu'à présent, les études ont surtout cherché à définir les méthodes d'adaptation pour répondre à des enjeux liés à l'environnement bâti ou à l'aménagement des villages et, dans une moindre mesure, à mieux connaître les plus importants changements touchant les ressources et les activités traditionnelles de chasse, de pêche et de cueillette.

Ainsi, pour réduire les risques encourus par les bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels, la cartographie à grande échelle des conditions du pergélisol dans chaque village constitue un outil essentiel de planification urbaine pour une adaptation à long terme (Allard *et al.*, 2007b) (voir la figure 11). En outre, il est important que les normes de construction et les plans d'aménagement urbain tiennent compte en ces domaines des changements climatiques (Allard *et al.*, 2004) afin d'empêcher l'augmentation des vulnérabilités.

Pour ce qui est de la consolidation et du maintien de l'intégrité des infrastructures qui sont par nécessité bâties sur le pergélisol, diverses solutions sont à l'essai ou ont déjà démontré leur efficacité. À cet égard, les nouvelles connaissances sur le pergélisol qui se trouve sous les infrastructures, ainsi que l'application de solutions et de pratiques de génie civil, aideront à gérer les impacts des changements climatiques sur les aéroports, les routes et les bâtiments (Allard *et al.*, 2002b). Par exemple, la pénétration de chaleur dans les remblais peut être contrée par la convection d'air et par des techniques d'isolation et de surfaces réfléchissantes ; ou bien la chaleur peut être extraite des remblais au moyen de drains thermiques. La mise en place de géotextiles ou encore la consolidation et le rehaussement des infrastructures à risque peuvent également aider à diminuer les vulnérabilités (Beaulac et Doré, 2005). La modification des profils transversaux des remblais de pistes et de routes pour les rendre aérodynamiques limite l'accumulation de neige contre les accotements, qui est actuellement le principal facteur de réchauffement local responsable de la dégradation du pergélisol sous ces infrastructures.

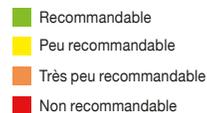
Des impacts à l'adaptation : l'étude du cas de Salluit

Afin d'appuyer l'adaptation aux changements climatiques dans la communauté de Salluit, qui est construite sur du pergélisol très riche en glace et affecté par des problèmes de stabilité, le CEN, le gouvernement du Québec et Ouranos ont cartographié les propriétés géotechniques du pergélisol au cours d'une première phase de travaux (Allard *et al.*, 2004). Dans une deuxième phase en cours, des analyses prédictives du régime thermique et du comportement du pergélisol sont réalisées afin d'orienter les meilleurs choix de fondations pour les infrastructures et les bâtiments.

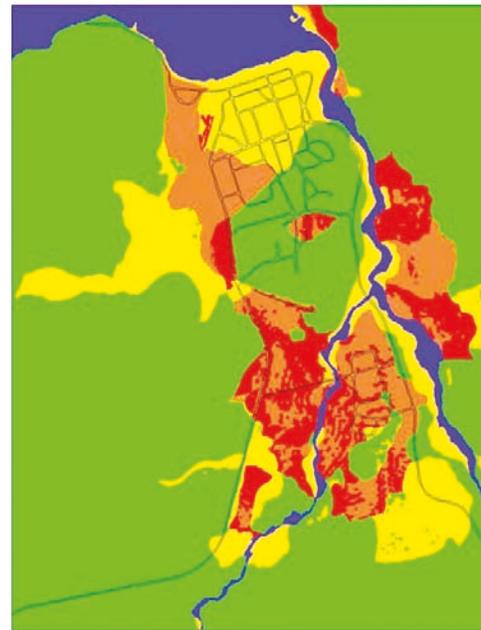
Les scénarios climatiques, produits par Ouranos et utilisant le MRCC, servent d'intrants aux modèles de simulation du régime thermique du pergélisol. Le gouvernement du Québec a aussi formé un comité technique qui, de concert avec la communauté et le gouvernement régional, conseille et oriente les choix de la communauté pour son adaptation aux difficultés actuelles et la planification de l'aménagement de son territoire aux conditions futures.

Le dossier de Salluit constitue une source d'information technique et un laboratoire d'expertise transférable aux autres communautés arctiques confrontées aux changements climatiques et aux besoins engendrés par la forte croissance démographique. Dans toutes ces communautés, les pratiques d'aménagement actuelles, y compris le maintien du drainage urbain, les méthodes de déneigement, le dessin des nouvelles rues et les concepts de fondations, doivent faire l'objet d'une révision en vue de limiter les effets des changements climatiques sur le terrain. Diverses méthodes d'adaptation issues du génie civil, telles que les remblais à convection, les drains de chaleur, les surfaces réfléchissantes et l'adaptation de la géométrie des remblais, sont aussi expérimentées à Salluit et aux aéroports de Tasiujaq et Puvimituq (Povungnituk) dans le cadre d'un projet visant à évaluer leur rapport coût/efficacité, compte tenu des conditions sévissant dans les zones étudiées (Beaulac et Doré, 2005).

Figure 11 : Carte de la vulnérabilité et de la capacité d'accueil du terrain en ce qui a trait à la construction d'infrastructures : l'exemple de Salluit (Nunavik, Québec) (Solomon-Côté, 2004).



Classification du potentiel d'aménagement des terrains à Salluit



L'accessibilité au territoire pour les activités traditionnelles fait l'objet d'une attention particulière de la part des autorités locales, telles que l'Administration régionale Kativik, en ce qui concerne la sécurité le long des voies terrestres (chemins de glace) ou sur les voies navigables (Bégin, 2006). En collaboration avec les collectivités locales, une étude est en cours pour déterminer les moyens de mieux prévoir et de mieux s'adapter aux nouvelles conditions de glace et de neige en hiver, en s'appuyant sur le réseau de stations météorologiques du Nord (Lafortune *et al.*, 2005).

Le faible nombre de stations météorologiques et la mauvaise qualité des séries chronologiques de données rendent actuellement difficile la validation des modèles, mais cette difficulté est en voie de disparaître avec l'installation de nouvelles stations climatiques par Environnement Canada et grâce au réseau de télémétrie environnementale SILA du Centre d'études nordiques (CEN).

En résumé, dans le Nord du Québec, la forte augmentation de la démographie régionale, le développement urbain qui en découle ainsi que les modifications dans l'accès aux ressources et dans les activités traditionnelles de chasse, de pêche et de cueillette sont principalement à l'origine d'une mutation socioéconomique délicate aux multiples facettes. À cela s'ajoutent l'implantation probable de nombreuses mines, en fonction de l'évolution du marché mondial des métaux, ainsi que d'éventuels développements hydro-électriques importants. Les modifications climatiques accentuées, qui entraînent notamment l'accélération de la fonte du pergélisol et l'allongement de la saison de navigation, s'ajoutent à ces sources et parfois en intensifient le rythme d'évolution.

La zone côtière

Le Québec possède quelque 3 000 km de littoral dans la partie est de son territoire, qui s'étend de l'estuaire fluvial au golfe du Saint-Laurent. Cette région maritime comprend la Côte-Nord, le Bas-Saint-Laurent, la Gaspésie, les Îles-de-la-Madeleine et l'île d'Anticosti.

Les 395 000 habitants (Statistique Canada, 2005) de cette région maritime sont répartis dans 239 municipalités, dont 110 situées sur la côte. Parmi les plus importantes, on compte Sept-Îles, Havre-Saint-Pierre, Baie-Comeau, Forestville, Chandler, Sainte-Anne-des-Monts, Percé, Gaspé, New Richmond, Carleton-sur-Mer, Rivière-du-Loup, Rimouski, Matane et La Pocatière. Plus du quart de la population vit à moins de 500 m des berges (Dubois *et al.*, 2006), et plus de 90 %, à moins de 5 km. S'y concentrent aussi plusieurs des principales industries telles que la pêche, le tourisme et les alumineries ainsi qu'une bonne partie des infrastructures de transport terrestre et maritime dont notamment les routes provinciales 132, 138 et 199 et les installations portuaires. Une proportion significative de la population est donc exposée à l'érosion qui menace le patrimoine bâti de même qu'une partie des infrastructures essentielles.

La géologie de la région maritime se caractérise par la présence à 60 % de dépôts meubles friables, pouvant s'éroder facilement sous l'action des processus hydrodynamiques de faible à moyenne énergie (Bernatchez *et al.*, 2008). La Côte-Nord est couverte de silts argileux post-glaciaires surmontés de sable deltaïque, le tout reposant en discordance sur les formations granitiques précambriennes du Bouclier canadien (Dubois *et al.*, 2006).



Ces dépôts meubles non consolidés, dont l'épaisseur peut atteindre une centaine de mètres, s'avancent dans le golfe et forment des deltas, des terrasses et des plages. Quant à la Gaspésie et aux Îles-de-la-Madeleine, leurs formations rocheuses appalachiennes sont constituées de grès et de schistes argileux faiblement consolidés, s'érodant facilement sous l'action du gel, du dégel, de la pluie, du vent et des processus hydrodynamiques qui attaquent le pied des talus, ce qui provoque régulièrement des éboulements et des glissements de terrain. L'érosion fluviale et marine de ces roches friables libère du sable et du gravier, à l'origine des nombreuses plages et des flèches sableuses abritant des lagunes ou des barachois. Ce qui détermine la sensibilité du système côtier à l'érosion est l'équilibre entre les apports sédimentaires résultant de l'érosion des falaises et des talus côtiers et les pertes de sédiments des plages et de marais sous l'influence des vagues, des courants côtiers et des glaces. Dans les zones deltaïques, l'apport de sable des rivières et des estuaires côtiers peut contribuer de manière significative au bilan sableux des plages.

Les facteurs climatiques

Dans cet environnement géologique particulier, le réchauffement climatique aurait pour effet de modifier le rythme d'érosion des berges et d'augmenter les risques de submersion. La zone côtière du golfe du Saint-Laurent serait affectée par plusieurs facteurs climatiques liés au réchauffement des températures (Savard *et al.*, 2008), soit :

- la hausse du niveau de la mer ;
- les changements de fréquence :
 - des pluies et des tempêtes hivernales ;
 - des redoux et des cycles de gel-dégel ;
- la disparition des glaces de mer et des glaces de rivage.

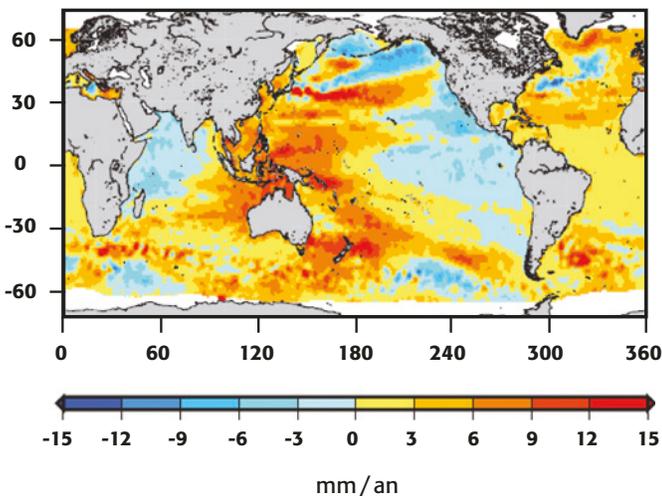


Figure 12 : Distribution géographique des tendances linéaires à court terme pour le niveau moyen de la mer, dans la période 1993-2003 (mm/an), sur la base des données altimétriques du satellite Topex-Poséidon (GIEC, 2007a).

La hausse du niveau de la mer

D'après le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007a), le niveau moyen des océans s'est élevé de $1,8 \pm 0,5$ mm/an au cours du XX^e siècle, puis de $3,1 \pm 0,7$ mm/an au cours de la décennie 1995-2006. Le GIEC évalue la hausse probable du niveau des océans à $3,8 \pm 2,0$ mm/année au cours du XXI^e siècle. Cependant, plusieurs experts considèrent cette évaluation comme trop conservatrice parce qu'elle sous-estime la perte de masse des calottes glaciaires. À cet égard, Pfeffer *et al.* (2008) situent la hausse moyenne du niveau de la mer aux environs de 0,8 m d'ici 2100. La distribution géographique de cette hausse est par ailleurs très variable, comme le montrent les relevés altimétriques satellitaires présentés à la figure 12. Les hausses du niveau de la mer ont varié entre plus ou moins 15 mm/an selon la région d'étude dans la période 1993-2003 tandis que la hausse moyenne était de 3,1 mm/an. Cette grande variabilité spatiale constitue un défi de taille lorsqu'on cherche à déterminer le niveau moyen futur à l'échelle régionale.

À l'échelle du golfe du Saint-Laurent et de l'Atlantique Nord-Ouest, on observe par ailleurs de grandes variations du niveau relatif de la mer causées par des phénomènes d'origine géologique (ajustement isostatique postglaciaire) et atmosphérique (oscillation nord-atlantique [ONA ou NAO en anglais], vents dominants, etc.). Ainsi, à court terme, le niveau moyen annuel du golfe du Saint-Laurent peut varier de ± 15 cm sur une dizaine d'années en réponse à des fluctuations de la pression atmosphérique et des vents à l'échelle régionale et à l'échelle de l'Atlantique Nord. Les réajustements postglaciaires de la croûte terrestre provoquent une subsidence dans le sud du golfe du Saint-Laurent (Daigle *et al.*, 2005), alors que dans le nord cela entraîne une légère émergence (Tarasov et Peltier, 2004 ; Bernatchez et Dubois, 2004). Ainsi, les secteurs des Îles-de-la-Madeleine et de la baie des Chaleurs subiraient l'effet conjugué de la subsidence de la côte et de la hausse planétaire du niveau des océans (Savard *et al.*, 2008). Les systèmes lagunaires et les plages des Îles-de-la-Madeleine montrent déjà les signes d'un déficit sédimentaire important qui provoque un affaissement des plages et un recul important des talus côtiers (Bernatchez *et al.*, 2008).

Les pluies et les tempêtes hivernales

Les tempêtes produisent des variations du niveau d'eau, de fortes vagues et des pluies abondantes. L'intensité et la fréquence des tempêtes ont aussi pour effet de modifier les ondes de tempêtes causées par la pression atmosphérique et le vent ; celles-ci engendrent des variations du niveau d'eau et des vagues. La combinaison de niveaux élevés et de fortes vagues est l'une des causes majeures de dommages aux infrastructures et d'érosion des berges. Diaconesco *et al.* (2007) ont démontré que le régime des vents a changé dans le golfe au cours de la période 1960-2004. Savard *et al.* (2008) ont décrit le régime des tempêtes qui affecte certains secteurs du golfe du Saint-Laurent. Cette étude a révélé que les tempêtes qui affectent divers secteurs du golfe ont des trajectoires et des comportements différents. Les tempêtes passant au sud du golfe provoquent des hausses du niveau d'eau et des vagues provenant du secteur est, alors que les tempêtes dont le centre est situé à Terre-Neuve causent plutôt des baisses du niveau d'eau et des vagues des secteurs ouest à nord-ouest.

Il a été prouvé que les tempêtes varient selon les conditions climatiques ; des simulations climatiques préliminaires (Savard *et al.*, 2008) suggèrent que le nombre total de tempêtes diminuera dans le golfe du Saint-Laurent mais que le nombre total de vagues de tempêtes augmentera. Cette apparente contradiction est due à la disparition rapide des glaces de mer.

Les redoux hivernaux et les cycles de gel-dégel

Un troisième phénomène climatique lié au réchauffement des températures est l'augmentation des redoux hivernaux et des cycles de gel-dégel. Or, les talus argileux de la Côte-Nord, ainsi que les falaises de grès friables des Îles-de-la-Madeleine et de la baie des Chaleurs, sont particulièrement sensibles à la gélifraction (fragmentation par le gel et le dégel). Une augmentation du nombre de périodes de redoux hivernaux active l'érosion de ces falaises (Bernatchez et Dubois, 2004). Bernatchez *et al.* (2008) ont mis en évidence des corrélations entre le taux de recul des falaises (de grès, de schiste et argileuses) et le nombre de cycles de gel-dégel, de redoux hivernaux et d'autres facteurs climatiques hivernaux, comme la présence de neige sur les falaises, le taux d'ensoleillement et la fréquence des pluies hivernales.



La disparition des glaces de mer et de la banquise côtière

L'un des impacts les plus directs des changements climatiques est lié à l'effet du réchauffement des températures sur la durée et l'importance des glaces de mer et des glaces côtières. Les glaces de mer, lorsque leur concentration est supérieure à 30 % de la surface de l'eau, inhibent la formation des vagues causées par les vents de tempêtes. Or, de 30 % à 40 % environ de ces tempêtes se produisent pendant les mois d'hiver (Savard *et al.*, 2008). Les données recueillies par un comité d'experts sur l'érosion des berges de la Côte-Nord (Dubois *et al.*, 2006 ; Bernatchez *et al.*, 2008) ont démontré que les taux d'érosion ont fortement augmenté au cours des 10 dernières années dans la région de Sept-Îles. Savard *et al.* (2008) ont établi un lien entre ces taux plus élevés et l'effet conjugué du plus grand nombre de tempêtes hivernales produisant des vagues du sud-est et de la réduction de la couverture de glace. La couverture de glace dans le golfe était beaucoup plus faible que la moyenne de 1994 à 2005 (Environnement Canada, 2007b).

Senneville et Saucier (2007) ont calculé, sur la base des scénarios climatiques, que la saison des glaces de mer diminuera des deux tiers d'ici 2050 et que les glaces hivernales auront complètement disparu avant la fin du siècle dans le golfe du Saint-Laurent. C'est pourquoi, comme il a été mentionné précédemment, en dépit d'une diminution probable du nombre de tempêtes, on s'attend à une augmentation de la quantité de fortes vagues atteignant les côtes.

Les facteurs socioéconomiques

Certains facteurs socioéconomiques contribuent à accroître la vulnérabilité des collectivités à l'érosion côtière. Comme l'ont remarqué Morneau *et al.* (2001), le premier élément est la hausse du nombre de constructions en bordure des rives depuis 1970, résultat d'un engouement accru pour la zone côtière et d'une plus grande disponibilité des méthodes de protection des berges pour sauvegarder les infrastructures et les bâtiments résidentiels et industriels. Toutefois, ces techniques pour la préservation des berges, qui pour la plupart consistent en protections linéaires, en enrochement et en érection de murs verticaux (béton, palplanches, pierres et caissons de bois), sont souvent mal adaptées et causent des répercussions environnementales résiduelles importantes.

L'une de ces répercussions les plus importantes est un déficit en matériel granulaire, tel que le sable, dans les zones protégées par un ouvrage. Bernatchez *et al.* (2008) ont constaté que 80 % des plages devant ces structures de protection ont subi de graves dommages ou ont disparu. L'utilisation massive de structures lourdes pour protéger les côtes a pour effet d'aggraver l'impact des changements climatiques en rigidifiant le trait de côte, qui ne peut plus s'ajuster à la hausse du niveau marin et aux autres modifications hydrodynamiques. À moyen terme, les structures de protection deviennent souvent inefficaces et s'écroulent, exposant les infrastructures qu'elles devaient protéger à une érosion plus intense encore. De plus, la plupart des structures de protection n'empêchent pas les processus de submersion et peuvent même contribuer à les aggraver.

L'activité anthropique peut donc affecter les processus naturels qui agissent sur l'érosion des berges. Les interactions entre les processus côtiers et divers types d'activité anthropique (barrages, digues, épis, quais, déboisement, piétinement d'élyme des sables, prélèvements de sable de plage, etc.) sont trop nombreuses pour être détaillées ici. On doit surtout retenir le fait que la gestion des zones côtières doit intégrer non seulement les facteurs naturels mais aussi les actions anthropiques qui affectent la dynamique des systèmes côtiers.

Deux études (Bernatchez *et al.*, 2008 ; Drejza *et al.*, 2009) ont évalué à 71 millions de dollars les coûts de l'érosion d'ici 2050 à Sept-Îles, aux Îles-de-la-Madeleine et à Percé pour une longueur de côte totalisant 188 km. Cette estimation ne tient compte que de la valeur des terrains et des bâtiments, sans égard aux frais associés (démolition des habitations, indemnités diverses, perte de milieux naturels, etc.). Une étude réalisée par Tecslut (2008) dans la région de Sept-Îles et Gallix estime à 33,9 millions de dollars les coûts financiers de l'érosion des berges d'ici 25 ans. Pour l'ensemble du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent, on peut estimer à plusieurs centaines de millions de dollars les pertes potentielles. Il faut ajouter à cette estimation les coûts liés à la perte d'habitats critiques pour la faune aviaire et piscicole.

Par exemple, la population d'oies des neiges qui fréquente l'estuaire du Saint-Laurent subit actuellement une perte rapide de son habitat naturel. De même, la disparition des marais côtiers et des plages constitue une perte d'habitats pour de nombreuses espèces animales et végétales dont certaines ont une valeur critique pour la faune et la flore (capelan, zostère, scirpe d'Amérique, etc.) et, très souvent, une valeur commerciale ou patrimoniale (myes, algues, sauvagine). L'enjeu économique de l'érosion des berges est donc significatif.

Enfin, sur le plan social, la menace constante de perdre le patrimoine bâti, privé ou public, est source d'anxiété et de frustration et constitue parfois un enjeu de sécurité publique, lorsque l'érosion ou la submersion menace les infrastructures essentielles. Dans certains cas, le développement de certaines communautés est menacé par la nécessité de déplacer une bonne partie des citoyens ou par la disparition d'infrastructures essentielles (routes, quais, etc.).

Les solutions d'adaptation

Les solutions d'adaptation à l'érosion côtière sont nombreuses et diverses. Elle vont du zonage (voir la figure 13), afin de limiter les vulnérabilités futures, au retrait préventif des infrastructures et des bâtiments menacés à court ou moyen terme, en passant par les travaux de protection tels que la recharge en sable des plages, les épis protecteurs, l'enrochement et l'érection de murs. Leur choix dépend à la fois du coût des solutions techniques disponibles et des enjeux socioéconomiques et environnementaux en cause.

La complexité des facteurs qui contrôlent la dynamique côtière requiert une approche multidisciplinaire et la concertation de tous les acteurs de l'adaptation. Des études ont été amorcées à ce sujet en 1998 par le gouvernement du Québec (Dubois, 1999) et poursuivies à partir de 2005 par Ouranos (Savard *et al.*, 2008) et l'UQAR (Bernatchez *et al.*, 2008). Celles-ci cherchaient à élaborer une approche préventive pour évaluer les risques côtiers et pour adapter les stratégies d'aménagement et de réponse en tenant compte de l'impact des changements climatiques.

Ces études comportent trois éléments : un suivi historique de l'évolution des berges du golfe du Saint-Laurent ; une analyse détaillée, réalisée à l'aide de modélisation numérique à l'échelle régionale du climat et de l'hydrodynamique du golfe ; un cadre de gestion intégrée des zones côtières, impliquant les collectivités et les décideurs locaux et régionaux qui seront appuyés par des scientifiques. Une révision en profondeur des politiques gouvernementales et de la réglementation afférentes est entreprise en s'inspirant des résultats de ces études. Cette révision porte sur le zonage municipal, les schémas d'aménagement, la gestion des infrastructures essentielles, les politiques de sécurité publique, la réglementation, les méthodes de protection et autres stratégies de gestion du risque. Les choix d'adaptation sont alors faits en concertation avec les représentants des collectivités côtières et des divers ministères impliqués, sur la base d'analyses avantages-coûts indispensables.

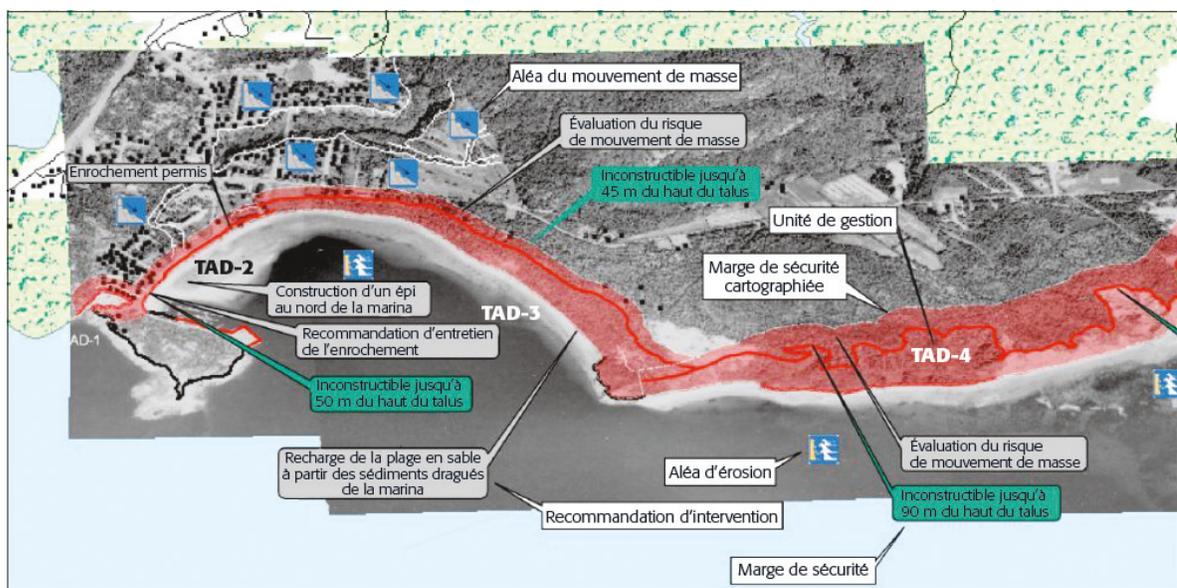


Figure 13 : Carte de zonage du risque d'érosion et des mesures de gestion du littoral sur la Côte-Nord (Dubois *et al.*, 2006).

Le Sud

Dans les sociétés occidentales, l'environnement bâti est très important, particulièrement dans les centres urbains où les réseaux et les structures sont relativement complexes et fortement interreliés (par exemple, les systèmes d'approvisionnement en eau potable dépendent d'une alimentation énergétique). Au Québec, les infrastructures représentent un investissement collectif considérable (par exemple, selon le MAMROT, à elles seules, les infrastructures souterraines d'eau potable et d'eaux usées sont évaluées à environ 60 milliards de dollars) et se révèlent essentielles au bien-être et à la santé des collectivités. Elles comprennent à la fois les réseaux de transport, de communication et d'énergie ainsi que les infrastructures municipales comme les systèmes d'approvisionnement en eau potable, de traitement des eaux usées et de gestion des déchets. Nous incluons aussi dans la définition les bâtiments, tant résidentiels, agricoles, industriels, commerciaux qu'institutionnels. L'ensemble de ces infrastructures forme une trame fortement interdépendante, fondamentale de notre mode de vie (Ruth, 2003).

Or, la vaste majorité des infrastructures construites au cours des dernières décennies ont été conçues à partir de critères basés sur une analyse statistique des événements climatiques passés. L'hypothèse selon laquelle les conditions climatiques passées seraient représentatives des conditions futures est remise en cause avec les changements climatiques. Cela soulève notamment des questions au sujet de la sécurité et de l'efficacité des infrastructures, dont la durée de vie est en général de plusieurs décennies, une période pendant laquelle les effets des changements climatiques se feront sentir.

Le développement même des communautés et des activités économiques, dans une société aussi tertiaisée que celle du Québec, dépend fortement du bon fonctionnement des infrastructures. L'interdépendance entre les infrastructures rend le Québec encore plus vulnérable aux défaillances provoquées par un événement climatique (Bruce *et al.*, 1999 ; Kirshen *et al.*, 2007 ; Chang *et al.*, 2007). Plusieurs exemples illustrent à quel point un événement climatique entraînant la destruction d'infrastructures peut perturber les activités socioéconomiques et les populations. On peut noter, à cet égard, les inondations du Saguenay en 1996 (MSP, 1996 ; MTQ, 2000), la tempête de verglas de 1998 (MSP, 1999) ou encore des glissements de terrain (Lebuis *et al.*, 1983) et des avalanches (Lied et Domaas, 2000 ; Sécurité publique Canada, 2006) provoqués par des précipitations importantes. Les pertes et les dommages causés par des événements climatiques sont en effet significatifs et semblent en augmentation (Bruce *et al.*, 1999 ; McBean et Henstra, 2003).



Les impacts

Pour le Québec, les principales craintes à l'égard des infrastructures par rapport aux changements climatiques sont liées à des changements dans la durée, la fréquence ou l'intensité des événements de pluie (Mailhot, 2007a), tant en milieu urbain que rural. De tels événements, pouvant amener des inondations telles que celles du rond-point l'Acadie à Montréal en 2006 et de Rivière-au-Renard en 2007, pourraient devenir plus fréquents. Les changements climatiques entraîneront vraisemblablement une augmentation des cycles de gel-dégel dans certaines régions, ce qui affectera la conception et l'entretien des infrastructures, tant en surface que sous terre (dégradation accélérée de la chaussée et nids-de-poule, bris des réseaux souterrains d'eau potable et d'eaux usées, etc.). Enfin, l'assèchement des sols, dû aux températures plus élevées et aux périodes sans pluie, particulièrement dans les zones argileuses comme dans les régions de Montréal et de l'Outaouais, pourrait aggraver les problèmes de lézardes dans les fondations. Comme on peut le voir plus en détail dans d'autres sections de ce document, les infrastructures sont également menacées dans le Nord du Québec et sur la côte.

Les événements climatiques extrêmes présentent sans doute les risques les plus grands pour les infrastructures (GIEC, 2007b ; Bruce *et al.*, 1999 ; Auld et MacIver, 2004), mais les changements graduels les affecteront aussi de manière significative. On distingue trois grands types d'impacts directs des changements climatiques sur les infrastructures et l'environnement bâti (Ingénieurs Canada, 2008 ; Infrastructure Canada, 2006 ; Auld et MacIver, 2004 ; Case, 2008) :

- Les problèmes structurels et la perte de fonctionnement à cause de charges excédant celles pour lesquelles la structure a été conçue à l'origine, par exemple : un volume et une intensité de pluie très élevés, une accumulation de neige considérable ou encore des vents très forts. Ces charges peuvent provoquer l'affaissement total ou partiel de la structure ou le bris de certaines de ses composantes (ponceaux, toitures, etc.).

- L'accélération du rythme d'usure des matériaux, qui se traduit par une diminution générale de la durabilité des matériaux, de la corrosion, etc. Les conditions climatiques peuvent agir comme catalyseurs de certaines réactions chimiques qui ont pour effet d'altérer les matériaux et leur rythme de dégradation (comme l'augmentation du dioxyde de carbone qui dégrade le mortier et la pierre). L'usure prématurée de l'infrastructure peut également la rendre beaucoup plus vulnérable aux événements extrêmes.
- La perte de la performance optimale de l'infrastructure. Même si l'intégrité de la structure n'est pas à risque, les nouvelles conditions climatiques peuvent affecter sa performance technique. À titre d'exemple, un bâtiment qui emmagasine beaucoup la chaleur peut constituer un milieu très inconfortable en période de chaleur intense, particulièrement pour des personnes vulnérables (voir la section « La santé des populations »).

Les impacts indirects des changements climatiques sur l'environnement bâti sont essentiellement liés aux conséquences de ces derniers sur l'environnement naturel. Par exemple, les précipitations plus abondantes pourront provoquer des inondations, des glissements de terrain et des avalanches qui à leur tour affecteront les infrastructures localisées dans ces zones à risque. Des impacts sur l'eau pourront aussi avoir des conséquences sur certaines infrastructures ou certains procédés qui dépendent d'une eau brute à une température, une qualité ou une quantité données.

Néanmoins, les intervenants associés au milieu bâti, dont les ingénieurs, sont de plus en plus sensibilisés à cet enjeu (Ingénieurs Canada, 2008 ; FCM, 2002 ; ICU, 2007 ; Ligeti *et al.*, 2007 ; Case, 2008), et la capacité d'adaptation des communautés semble s'améliorer (Infrastructure Canada, 2006). Cela s'inscrit dans le contexte d'un effort considérable de construction de nouvelles infrastructures et de remise en état des infrastructures vieillissantes (Statistique Canada, 2006 ; Mirza, 2007 ; Larsen *et al.*, 2008). Cet investissement massif dans les infrastructures constitue du même coup une occasion idéale pour intégrer des considérations liées aux changements climatiques dans la conception, la gestion et l'entretien des infrastructures.

L'adaptation des infrastructures et des bâtiments

À la suite de plusieurs événements climatiques d'envergure, des actions ont été entreprises pour diminuer les vulnérabilités des infrastructures et des milieux bâtis (voir le tableau 8). Ainsi, le MTQ et la Ville de Québec ont décidé d'imposer le « surdimensionnement » de certains ouvrages de gestion des eaux pluviales, comme les ponceaux. Plusieurs municipalités exigent des ouvrages de rétention d'eaux pluviales pour tous les nouveaux développements afin de prévenir les problèmes de drainage urbain. La Ville de Sept-Îles a revu ses politiques et ses formes d'aménagement du territoire ainsi que ses règlements de zonage afin de mieux contrôler le développement dans les zones à risque, comme celles exposées à l'érosion côtière.

En ce qui concerne les principales inquiétudes liées aux changements climatiques projetés, outre les initiatives déjà prises notamment par le MTQ et certaines municipalités, des études sur les impacts de la gestion des eaux pluviales sont en cours afin de vérifier l'efficacité réelle de différentes solutions d'adaptation sur le plan technique et économique. De son côté, Ingénieurs Canada poursuit ses travaux avec le Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (Ingénieurs Canada, 2008) et procède à des études de cas partout au pays pour promouvoir le recours aux analyses de vulnérabilité. L'Association canadienne de normalisation se penche également sur la gestion des risques pour les infrastructures dans un contexte de changements climatiques et se lance dans la conception d'outils pour aider les municipalités.

Malgré ces expériences et ces apprentissages, l'adaptation, planifiée afin de minimiser les impacts des changements climatiques, n'en est qu'à ses débuts. Selon la durée de vie d'une infrastructure, son stade de vie ou la fréquence des activités d'entretien ou de réhabilitation, il peut être plus ou moins facile (sur les plans technique, économique, social, environnemental, etc.) d'adapter cette infrastructure aux conditions changeantes. Tel qu'illustré à la figure 14, des mesures d'adaptation peuvent toutefois s'intégrer à tous les stades du cycle de vie d'une infrastructure, que ce soit :

- avant la construction (p. ex., le choix de l'emplacement au moment de la planification) ;
- pendant la construction (p. ex., l'ajout d'un facteur de sécurité à la conception ou les types de matériaux à privilégier pour la phase de construction) ;
- après la construction (p. ex., la modification du programme d'entretien ou de la façon de réhabiliter l'infrastructure).

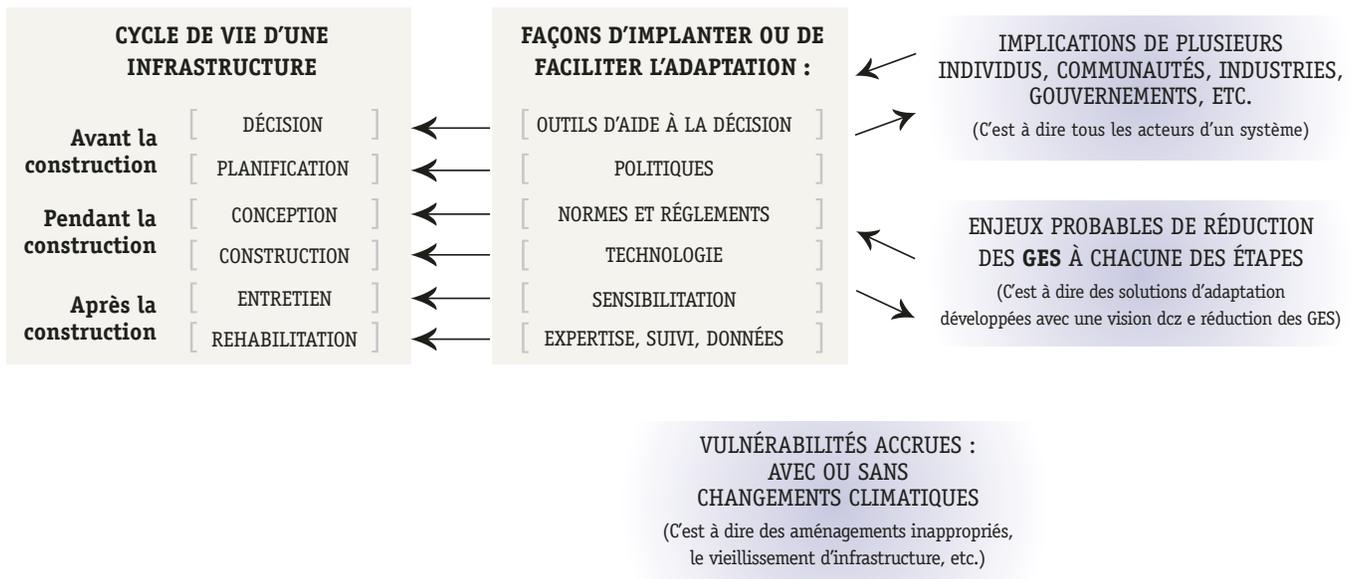


Figure 14 : Schéma de différentes catégories de mesures d'adaptation dans le cycle de vie d'une infrastructure (adapté de Larrivée et Simonet, 2007).

Bien que les études portant sur ce sujet soient rares, il serait avantageux de tenir compte, dans la conception des infrastructures, de divers scénarios climatiques lorsque disponibles, comme ce fut le cas pour le pont de la Confédération, reliant l'Île-du-Prince-Édouard et le Nouveau-Brunswick (Agence canadienne d'évaluation environnementale, 2000). En effet, une fois construites, les infrastructures sont peu adaptables et leur durée de vie est parfois longue. Pour les infrastructures de plus courte durée de vie, comme une route, il est plus facile d'introduire, au moment de leur réhabilitation ou des activités d'entretien, des solutions d'adaptation à moindre coût. Quant aux infrastructures essentielles liées à l'énergie, l'eau, l'alimentation, les services de santé et les transports, leur vulnérabilité doit être minimisée et faire l'objet de mesures palliatives en cas de défaillance.

Il existe plusieurs façons de favoriser l'adaptation, mais une mise en place effective exige une collaboration multidisciplinaire et une approche par gestion du risque (Ingénieurs Canada, 2008 ; Ruth, 2003). Une analyse des risques soutiendrait par exemple la décision de construire ou de réhabiliter une infrastructure côtière essentielle à un endroit plus éloigné. Elle pourrait promouvoir l'utilisation de matériaux de construction plus résistants, proposer une révision des critères de conception et réorienter les programmes d'entretien sur les problèmes appréhendés, bref des décisions couramment prises par les ingénieurs pour régler ou minimiser un problème.

Il n'en demeure pas moins que plusieurs freins limitent une mise en œuvre effective des solutions d'adaptation (Mailhot *et al.*, 2008b ; Koch, 2007). Au-delà des contraintes d'espace physique (surtout dans les secteurs déjà bâtis) ou de géographie (toutes les techniques ne sont pas applicables dans un climat nordique), des considérations économiques mais surtout organisationnelles peuvent aller à l'encontre d'une adaptation adéquate aux changements climatiques. Entre autres, la responsabilité professionnelle des concepteurs et des gestionnaires des infrastructures, associée à l'essai de techniques novatrices, de même que les coûts plus élevés engendrés par ces choix peuvent être difficiles à défendre, surtout avec l'incertitude qui accompagne les projections des changements climatiques ou encore l'efficacité réelle des solutions proposées.

Au Québec, l'environnement bâti demeure somme toute assez robuste, car la variabilité du climat est déjà relativement importante. Néanmoins, les infrastructures sont vieillissantes et, par conséquent, de plus en plus vulnérables. Dans ce contexte, le réinvestissement dans les infrastructures offre la possibilité non seulement de considérer les changements climatiques, mais aussi de revoir nos façons de concevoir les infrastructures, remettre en question le rôle qu'elles jouent et repenser la manière d'aménager le territoire.

LES ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES

La production hydroélectrique

L'industrie de l'électricité au Québec et au Canada pourrait être l'un des secteurs de l'économie les plus directement touchés par les changements climatiques tant du côté de la production, fortement hydroélectrique, que de celui de la demande. Au Québec en particulier, où la production hydroélectrique représente environ 96 % de la production totale d'électricité et près de 41 % de la demande totale d'énergie, les impacts des changements climatiques sur la ressource hydraulique sont d'une importance majeure.

Les impacts

Au cours des prochaines décennies, les changements climatiques entraîneront des modifications significatives dans les précipitations et conséquemment dans la disponibilité des ressources hydriques. Cela touchera en premier lieu le régime hydrologique des cours d'eau aménagés, mettant en jeu la capacité à respecter toutes les contraintes associées à l'usage multiple des ressources hydriques (production hydroélectrique, alimentation en eau potable, navigation, irrigation agricole, préservation des habitats fauniques, prévention des inondations, etc.).

En second lieu, il est permis de croire que la conception des ouvrages hydrauliques à venir sera elle-même affectée, dans la mesure où les changements climatiques attendus viendront modifier la productivité des installations tout au cours de leur durée de vie. La prise en compte des effets potentiels de l'évolution du climat sur l'hydraulicité des divers bassins versants aménageables permettra de mieux dimensionner les ouvrages et d'optimiser la planification de leur exploitation, de manière à produire un maximum d'énergie tout en respectant les multiples contraintes avec lesquelles il faut composer.

Les outils de simulation climatique mis au point par Ouranos ont permis d'améliorer la connaissance de l'évolution du climat projeté au cours des prochaines décennies, en portant une attention particulière aux changements attendus des températures et du régime des précipitations. Ces derniers ont, en effet, une grande incidence sur la prévision de l'offre et de la demande énergétique. L'amélioration des connaissances du climat à venir, plus spécifiquement de l'évolution du régime hydrologique, du régime thermique et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes, permettra éventuellement de modifier certaines stratégies d'exploitation ou certains exercices de planification et de conception, de manière à tenir compte des effets des changements climatiques.

D'une façon globale, on estime que les changements climatiques se traduiront par une augmentation des précipitations de neige et de pluie pour l'ensemble des bassins versants, avec cependant des différences importantes selon les régions (Desrochers *et al.*, 2008). Comme on peut le voir dans la figure 15a, la moyenne des changements de débits annuels projetés à l'horizon 2050 se situe entre 1 % et 15 % selon les différents bassins. L'augmentation de débit annuel serait plus importante dans le Nord du Québec que dans la partie sud-ouest. Ainsi, pour la région Nord-Ouest, l'augmentation varierait entre 10 % et 15 % selon les différents bassins versants et entre 7 % et 10 % pour Churchill Falls et la Côte-Nord, alors que pour la région Sud-Ouest, elle se situerait entre 1 % et 8 %.

Ces évaluations sont tirées de 90 simulations basées sur la combinaison de divers modèles globaux et de divers scénarios futurs d'émissions de gaz à effet de serre. Elles reposent sur la méthode des perturbations, qui consiste à modifier une série d'observations climatiques à partir de projections climatiques (Music *et al.*, 2008).

Figure 15 :

a) Évolution des conditions du régime hydrologique à l'horizon 2050

b) Dispersion entre les différentes projections de l'évolution du régime hydrologique à l'horizon 2050 (Desrochers *et al.*, 2008).

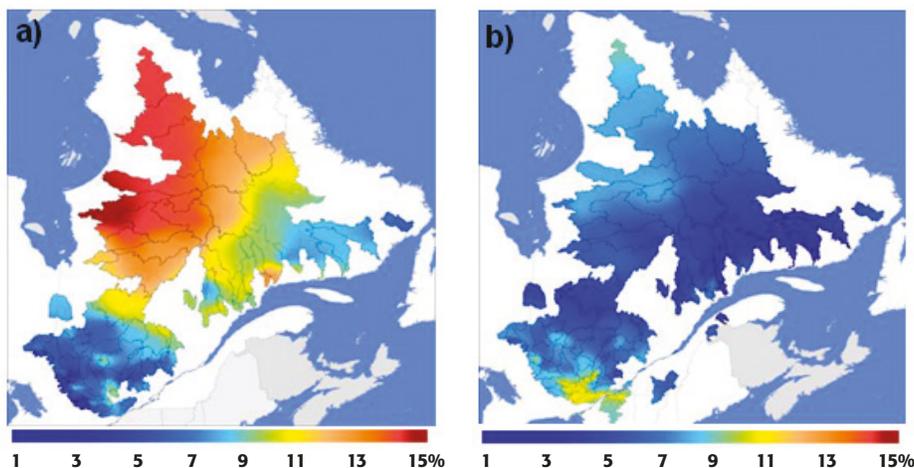
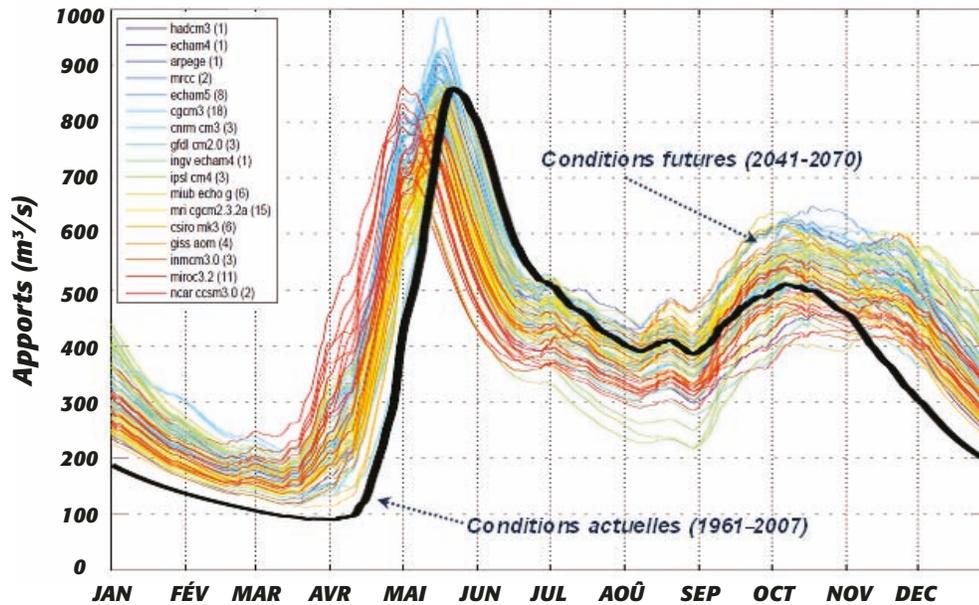


Figure 16 :
Hydrogrammes
moyens reconstitués
et futurs pour chacune
des 90 simulations
— bassins versants
du Nord québécois
(Roy *et al.*, 2008b).



Les deux chroniques climatiques (de référence et perturbée) alimenteront un même outil de modélisation hydrologique et les débits simulés pour la période de référence et la période future seront comparés de manière à évaluer les impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique à l'horizon 2050. Comme on peut le voir à la figure 15b qui présente la variabilité des résultats entre les simulations, celle-ci est cependant moindre que la moyenne du changement relatif de débit moyen annuel. Elle est généralement plus grande dans la partie sud-ouest du Québec que pour les bassins versants plus au nord. Il est intéressant aussi de souligner que pour le Nord-Ouest du Québec, là où l'on produit une quantité importante d'hydroélectricité, le signal de changement de débit annuel moyen est beaucoup plus grand que la dispersion entre les simulations, ce qui inspire une certaine confiance à l'égard des changements projetés dans cette région. Ce n'est pas le cas pour le Sud-Ouest du Québec, où la dispersion entre les différentes simulations se compare au signal de changement lui-même.

Les changements dans la répartition à travers l'année seraient tout autant, sinon plus importants que les changements de moyenne annuelle (Roy *et al.*, 2008b). La figure 16 présente les hydrogrammes (évolution des apports annuels sur un cycle annuel) moyens des 90 simulations sur la période 2041 à 2070 superposés à l'hydrogramme moyen reconstitué de la période actuelle.

À l'échelle saisonnière, c'est au printemps que les changements seraient les plus importants, tant en termes absolus que relatifs. En moyenne, les apports des mois de mars, avril et mai seraient plus importants dans le futur. Cette augmentation des apports s'expliquerait en grande partie par le devancement de la période de crue printanière.

Pour la période estivale, à l'inverse on s'attend à une diminution des apports naturels en raison justement de ce même déplacement de la période de crue. Le ruissellement résultant de la fonte des neiges a un impact plus important sur les débits des mois de juin, juillet et août de la période actuelle que pour les débits à l'horizon 2050. Une partie de cette diminution pourrait également s'expliquer par l'augmentation de l'évapotranspiration due à des températures plus chaudes à l'horizon 2050. Peu de changements sont anticipés pour la période automnale. On envisage enfin pour l'hiver, défini ici de décembre à février inclusivement, une augmentation des apports à l'horizon 2050. Cela résulterait de températures au-dessus du point de congélation plus fréquentes et, conséquemment, d'une proportion plus grande de précipitations sous forme liquide plutôt que solide au cours des mois d'hiver dans les prochaines décennies. Des étages hivernaux plus soutenus découleraient ainsi des conditions d'hydraulicité plus favorables existant avant le début de l'hiver.

Pour toutes les saisons tout comme pour les changements de volumes annuels, on note une certaine variabilité parmi les résultats des différentes simulations pour les changements du régime hydrologique à l'horizon 2050 — ce qui souligne le caractère incertain de ces évaluations. En dépit de cette incertitude, on note certaines caractéristiques communes, telles qu'un changement systématiquement positif à l'échelle annuelle de même que pour l'hiver. Pour l'automne cependant, toutes les projections ne s'accordent pas sur le sens du changement du régime hydrologique, certaines permettant d'envisager une réduction et d'autres une augmentation des débits automnaux considérés.

Les résultats des simulations n'ont pas encore permis de quantifier le changement de la variabilité naturelle inter-annuelle des débits, qui représente un risque d'affaires important pour Hydro-Québec, puisque les années de faible et de forte hydraullicité peuvent avoir des répercussions importantes sur les résultats financiers de l'entreprise. Il est cependant justifié de se demander si l'amplitude des variations interannuelles de l'hydraullicité pourrait être modifiée dans le futur. À cet égard, de nouvelles recherches ont été entreprises pour disposer de séries temporelles plus longues que les 50 années actuellement disponibles, afin de mieux connaître ce type de variabilité. Le recours aux indicateurs paléoclimatiques permet d'étendre dans le passé les séries d'apports énergétiques pour ainsi mieux qualifier leur variation interannuelle (Nicault *et al.*, 2009).

Les changements attendus, tant dans les moyennes de précipitations que dans leur variabilité, pourraient avoir des conséquences sur les risques auxquels font face les entreprises de cette industrie. Pour Hydro-Québec, par exemple, le « risque hydraulique » représente très nettement le risque économique le plus élevé, et sa capacité à prévoir les conditions d'hydraullicité des prochaines années est essentielle à l'évaluation du risque global que ce facteur déterminant fait peser sur ses bénéfices. En effet, les conditions d'hydraullicité représentent à elles seules, pour l'entreprise, un risque aussi important que toutes les autres sources de risque réunies. La figure 17, extraite du plan stratégique 2006-2010 d'Hydro-Québec, présente les résultats d'une analyse de sensibilité des principaux risques reconnus par l'entreprise sur son bénéfice net prévu pour 2008. Celle-ci indique que dans 70 % des cas, la variation du bénéfice net se situerait entre +645 M\$ dans le cas d'une augmentation de l'hydraullicité ou -635 M\$ dans le cas d'une baisse.

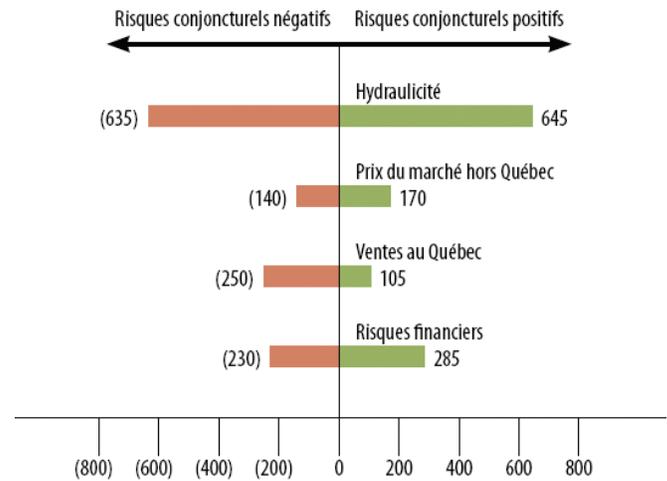


Figure 17 : Analyse de sensibilité du bénéfice net prévu pour 2008 en fonction de différents risques (en millions de dollars) (Hydro-Québec, 2006).

Notons dans ce graphique que la variation des ventes d'électricité au Québec constitue un autre élément de risque non négligeable, bien que dans une moindre mesure. Or, ces ventes sont elles aussi fortement conditionnées par le climat, plus spécifiquement par la rigueur de l'hiver et les besoins en chauffage qui en découlent. Comme le fait ressortir la section suivante sur la demande énergétique, l'évolution du régime thermique dans le Nord-Est du continent est susceptible de modifier cette demande de manière significative des deux côtés de la frontière canado-américaine. Ainsi, les hausses de température auraient pour conséquences de limiter les besoins énergétiques hivernaux, alors qu'en été elles stimuleraient la demande électrique pour la climatisation. La demande en électricité se trouvant réduite au cours de l'hiver aura pour conséquence de maintenir les niveaux d'eau plus élevés à la fin de cette saison.

Cette nouvelle réalité devra être prise en compte de manière à pouvoir maintenir la sécurité des installations au moment de la crue printanière. De même, les besoins accrus de climatisation en été, tant au Québec qu'à l'exportation, exigeront le maintien de niveaux d'eau relativement élevés.

Quant aux événements climatiques extrêmes, les modèles climatiques suggèrent que les cyclones extratropicaux affectant le territoire québécois pourraient être moins nombreux mais beaucoup plus intenses et donc que l'envergure des événements climatiques extrêmes à venir pourrait être plus grande. Si on négligeait de prévoir des mesures d'adaptation à ces événements climatiques, ceux-ci pourraient compromettre l'intégrité des installations de production, de transport et de distribution de l'hydroélectricité.

L'augmentation probable des températures pourrait aussi modifier la capacité de refroidissement des eaux qui circulent dans les turbines hydrauliques. La hausse des températures de l'eau pourrait exiger d'avoir recours à des systèmes de refroidissement d'appoint. Notons que ce dernier élément est surtout important pour les centrales thermiques conventionnelles et nucléaires qui dépendent des cours d'eau pour leur refroidissement et pour lesquelles un réchauffement des températures peut entraîner une baisse de production.

L'adaptation

On ne peut simplement conclure que l'augmentation du débit annuel moyen permettrait d'augmenter d'autant la production hydroélectrique au Québec. En fait, une augmentation du débit moyen annuel pourrait dans certains cas se traduire par une diminution de la production d'énergie si les débits plus soutenus n'étaient observés qu'au moment où les réservoirs sont remplis à pleine capacité, induisant par conséquent une augmentation importante des déversements non productibles. Le mode de gestion des réservoirs, la répartition de ces changements au cours de l'année ainsi que les changements possibles dans la fréquence des crues ont chacun leur influence sur la production d'énergie (Minville *et al.*, 2009 ; Pacher *et al.*, 2009).

C'est pourquoi l'analyse de l'évolution du régime hydrologique, telle que présentée précédemment, doit être suivie d'une analyse de ses conséquences sur la gestion des ressources hydriques et sur la planification et la conception des nouveaux équipements hydrauliques. Ces analyses permettront d'évaluer les bénéfices potentiels de différentes mesures d'adaptation, pour éventuellement conduire à leur déploiement. Roy *et al.*, 2008a) présentent un guide qui permet la réalisation d'analyses d'impacts des changements climatiques et qui décrit les avantages de recourir à une méthode de gestion adaptative pour tenir compte des éventuelles fluctuations du régime hydroclimatique.

Toute une gamme de mesures d'adaptation est disponible. Au nombre de celles-ci se trouvent des mesures structurales et non structurales. Le tableau 3 présente une liste non exhaustive des instruments d'adaptation qui peuvent permettre de profiter des avantages associés à l'évolution des conditions climatiques ou encore d'en limiter les impacts négatifs.

Il est important de noter qu'en général les mesures d'adaptation non structurales sont plus simples à réaliser et moins coûteuses, alors que les mesures structurales sont beaucoup plus complexes et onéreuses. Ces dernières ne seront envisagées que si le niveau de certitude relative aux retombées de leur déploiement est élevé. Autrement, il est plus avantageux de prendre graduellement des mesures moins contraignantes, au fur et à mesure que se manifestent les changements climatiques.

Tableau 3 : Instruments d'adaptation des ouvrages hydrauliques aux conditions hydroclimatiques en évolution (adapté de Roy *et al.*, 2008a).

Instruments non structuraux	Instruments structuraux
<ul style="list-style-type: none"> • Modifications des règles d'exploitation de l'ouvrage • Développement ou amélioration de modèles de prévision des débits • Meilleure coordination entre les différents usages de l'eau dans le bassin versant • Développement ou amélioration des méthodes d'évaluation des performances de l'ouvrage (en conditions de changements climatiques) • Modification des méthodes de conception 	<ul style="list-style-type: none"> • Dérivation des tributaires en amont de l'ouvrage • Mise en eau de nouveaux réservoirs en amont • Modification des caractéristiques des composantes électriques (générateurs, transformateurs, lignes de transport, etc.) • Conception d'ouvrages hydrauliques « adaptables » (ajout de groupes turboalternateurs ou de capacité d'évacuation, digues expansibles, etc.) • Modification de la dimension des canaux d'amenée ou des conduites • Modification du nombre ou de la taille des turbines • Augmentation de la capacité de l'évacuateur de crue

Les prérequis et les limites à l'adaptation

Le recours à des mesures d'adaptation semble se justifier aisément lorsque les bénéfices espérés sont importants. Une vision à très long terme des activités de l'entreprise constitue l'un des prérequis à l'adaptation des pratiques d'affaires. En effet, comme les conséquences attendues des éventuels changements climatiques porteront surtout sur les horizons de 30, voire 50 ans, il faut que le décideur soit en mesure de considérer de telles échéances. À cette fin, il faut qu'il dispose d'études d'impacts reposant sur des outils de modélisation climatique et hydrologique de haut niveau, produisant des résultats d'un haut degré de certitude. Malgré des bénéfices escomptés importants, peu de gestionnaires seront enclins à mettre en place les mesures d'adaptation, de surcroît si des coûts leur sont associés, à moins de connaître l'incertitude liée aux projections d'évolution du régime hydroclimatique. Enfin, l'entreprise doit être assez solidement établie pour pouvoir composer avec les risques découlant du déploiement de ces mesures. Selon Stankey *et al.* (2005) face à l'incertitude, si l'action exige une assurance totale de réussite c'est la recette parfaite pour l'inaction.

Parmi les autres facteurs limitatifs qui pourraient freiner le déploiement de mesures d'adaptation, il y a l'inertie des grandes organisations et certaines questions technico-légales. Par exemple, les règles de l'art conduisant au dimensionnement sécuritaire des ouvrages d'évacuation qui doivent être respectées par les concepteurs d'ouvrages (par exemple, crues maximales probables ou fréquentielles) reposent sur l'hypothèse de conditions hydroclimatiques stationnaires. Or, c'est justement cette hypothèse que les changements climatiques remettent en question. Plusieurs chercheurs travaillent à adapter ces méthodes au contexte des changements climatiques, mais il pourrait s'écouler plusieurs années avant que celles-ci soient reconnues et privilégiées. Enfin, l'une des principales limites à l'adaptation réside dans l'asymétrie de la relation coûts/bénéfices. L'adaptation exige que l'on investisse (possiblement des sommes considérables) dès aujourd'hui, pour des bénéfices escomptés dans quelques décennies seulement. Or, les taux d'escompte actuellement utilisés par les entreprises sont tels que d'éventuels bénéfices à très long terme n'ont que peu d'incidence sur la décision d'investir.

Les perspectives

La méthode des perturbations sur laquelle reposent les analyses d'impacts évoquées plus haut, bien qu'elle soit adéquate, comporte certaines limites, notamment en matière d'évolution de la variabilité des conditions de régime hydroclimatique. Les méthodes directes, avec ou sans recours aux modèles hydrologiques, qui permettent d'exploiter judicieusement le fort potentiel des modèles régionaux de climat, se révèlent des plus prometteuses et font actuellement l'objet de travaux de recherche au sein de plusieurs équipes à travers le monde (Music *et al.*, 2009 ; Lenderink *et al.*, 2007 ; Rosberg et Andréasson, 2006). Un rapport récent produit par la Banque mondiale (2007) conclut d'ailleurs à la plus grande pertinence de cette approche plutôt que la méthode plus usuelle des deltas pour l'analyse de la variabilité des conditions hydrologiques à venir. Les recherches d'Ouranos s'orientent donc vers cette utilisation de la méthode directe et plus spécifiquement vers les projections issues de modèles climatiques à haute résolution (MRCC, ARPÈGE-Climat et REMO). Les résolutions de ces modèles correspondent davantage à l'échelle des bassins versants pour lesquels on souhaite évaluer l'évolution des conditions de régime hydrologique.

Ouranos entend également poursuivre son évaluation des résultats de la « méthode directe via un modèle hydrologique » pour l'ensemble des bassins étudiés. En comparaison avec la méthode des deltas, cette méthode offre l'avantage de fournir une nouvelle séquence climatologique qui permettra, entre autres, d'étudier le changement de variabilité attribuable aux changements climatiques. La question du choix du modèle hydrologique demande à être davantage étudiée, notamment pour raffiner les analyses de certains aspects autres que les débits, par exemple l'humidité du sol.

Enfin, la question de la variabilité hydrologique prendra une importance accrue. Cette connaissance revêt en effet une grande importance, puisque la persistance de plusieurs années consécutives sèches ou humides est susceptible d'avoir des répercussions majeures sur l'exploitation, la planification et la conception des ouvrages. Beaucoup de travaux restent encore à faire pour mieux quantifier les différents aspects de la variabilité, mais il est permis de penser que les prévisions d'ensemble (approche multimodèle) permettront d'en avoir une meilleure connaissance.

Conclusion

Le climat évolue, et les conséquences sur le régime hydrologique des bassins versants québécois justifient les efforts de recherche pour déterminer la nature des impacts et éventuellement adapter certaines pratiques d'affaires de l'industrie hydroélectrique. À l'heure actuelle, les bases méthodologiques pour l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la ressource en eau au Québec ont été posées en ce qui concerne les principales vulnérabilités. Les résultats obtenus comportent encore une grande part d'incertitude qu'il faudra réduire sensiblement grâce, entre autres, à l'amélioration des modèles de climat et d'hydrologie. En dépit de cette incertitude, les résultats tendent à montrer que le Québec n'a pas vraiment à craindre les effets des changements climatiques sur sa capacité de production hydroélectrique annuelle. Cette conclusion est renforcée par plusieurs autres études sur l'hydroélectricité dans les pays nordiques qui sont arrivées à des résultats similaires (Graham *et al.*, 2007).

Cependant, des méthodes de gestion adaptative devront être mises en place afin de faire face aux inévitables modifications des apports qui surviendront, particulièrement à l'échelle saisonnière, selon les régions. En ajustant progressivement les méthodes de gestion à la lumière de l'amélioration de la connaissance du climat futur, il sera possible d'optimiser l'exploitation du parc de production existant et à venir.



La demande énergétique

Pour le Québec, l'un des impacts directs attendus des changements climatiques parmi les plus importants sur le plan économique serait l'effet du réchauffement des températures sur la demande d'énergie.

Les hivers froids et les étés relativement chauds au Québec entraînent en effet une demande de chauffage et de climatisation qui représente une forte dépense dans tous les secteurs de l'économie. L'impact du réchauffement du climat sur la demande énergétique se traduirait naturellement par des besoins de chauffage moindres en hiver et des besoins de climatisation accrus en été. En 2006, ces deux usages représentaient 59 % de la demande énergétique du secteur résidentiel et 56 % du secteur commercial et institutionnel. Comme ces deux secteurs correspondent eux-mêmes à 35 % de la demande totale (secteurs résidentiel, commercial et institutionnel, industriel et des transports), l'impact énergétique et économique total des changements climatiques sera donc significatif, tant pour la demande d'électricité qui assure une grande part du chauffage dans les secteurs résidentiels, commercial et institutionnel et l'essentiel de la climatisation, que pour le gaz naturel relativement important pour le chauffage dans le secteur tertiaire, comme on le verra ci-dessous (MRNF, 2009a).

Le rapport entre la température, le chauffage et la climatisation a fait l'objet de plusieurs analyses au cours des dernières décennies dans le cadre notamment d'études sur l'efficacité énergétique et d'analyses de prévision de la demande (MRNF, 2001 et 2005). Une étude plus récente sur l'augmentation des températures et de l'humidité, réalisée par Ouranos pour le compte de l'Agence de l'efficacité énergétique, visait aussi à mieux cerner l'impact des changements climatiques sur le chauffage et la climatisation des bâtiments (Sottile, 2006).

Dans le secteur résidentiel, les besoins de chauffage sont étroitement liés au nombre de degrés-jours de chauffe et, en général, on assume que la relation est essentiellement proportionnelle ou linéaire pour une région et un type d'habitation donnés. Dans le cas de la climatisation, la relation est un peu plus complexe et dépend à la fois de la variation des degrés-jours de climatisation et de la diffusion des équipements. Cette dernière est elle-même fonction de l'évolution des températures, notamment en ce qui concerne l'usage d'un climatiseur central. Ainsi, on observe que le pourcentage d'habitations pourvues d'un climatiseur central est plus important dans les régions plus au sud présentant des températures plus élevées.

Les impacts

D'après une étude réalisée en 2006 (Lafrance et DesJarlais, 2006) suivant un scénario médian de réchauffement de 2,6 °C en hiver et de 2,0 °C en été à l'horizon 2030 et de 3,5 °C en hiver et de 3,1 °C en été à l'horizon 2050, les besoins en énergie du secteur résidentiel diminueraient en 2030 de 6,7 % et de 6,9 % en 2050 (voir le tableau 4) par rapport à la demande d'un scénario de référence sans changements climatiques. On notera dans ce tableau que l'impact de la hausse de la climatisation sur la demande d'énergie des ménages est moins grand que celui de la diminution des besoins de chauffage. Cela s'explique à la fois par des hausses de température plus importantes en hiver qu'en été et par un usage beaucoup moins répandu de la climatisation dans les résidences. Notons cependant que les besoins énergétiques de climatisation seraient multipliés par 4 en 2030 et par 7 en 2050, tandis que les besoins de chauffage ne diminueraient respectivement que de 13 % et 14 %.

Tableau 4 : Impact (%) des changements climatiques sur le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel (Lafrance et DesJarlais, 2006).

Scénario	Sur la demande totale d'énergie (%)			Sur la demande d'électricité (%)		
	Chauffage	Climatisation	Net	Chauffage	Climatisation	Net
2030						
Optimiste	-7,5	3,4	-4,0	-5,8	4,3	-1,5
Médian	-11,0	4,4	-6,7	-8,6	5,5	-3,1
pessimiste	-15,7	6,4	-9,2	-12,1	8,1	-4,0
2050						
Optimiste	-10,5	5,5	-5,1	-8,5	6,6	-1,9
Médian	-15,2	8,3	-6,9	-12,3	10,0	-2,3
Pessimiste	-12,1	12,3	-8,8	-17,1	14,8	-2,3

Pour sa part, la demande d'énergie dans le secteur commercial et institutionnel baisserait en 2050 de 10 % en raison des économies de chauffage dans un scénario médian et augmenteraient de 2,5 % pour les besoins de climatisation, soit une baisse nette de 7,5 % de la demande totale. En 2001, la part de la climatisation dans la consommation de ce secteur était supérieure à celle du secteur résidentiel.

Dans le secteur industriel, qui représente 40 % de la demande totale d'énergie (MRNF, 2009a), la consommation d'énergie est due principalement aux procédés industriels et non au chauffage et à la climatisation. On note cependant dans la consommation des combustibles une variation saisonnière, qui permet d'estimer un impact limité du climat dans ce secteur, notamment dans l'industrie légère. Enfin, l'examen des consommations dans le secteur des transports (25 % de la demande totale d'énergie) ne permet pas d'établir de lien significatif entre climat et consommation d'énergie.

Globalement, la demande en énergie (chauffage et climatisation) dans l'ensemble des secteurs (résidentiel, commercial et institutionnel, industriel et des transports) serait réduite de 2,7 % selon le scénario médian à l'horizon 2050. De plus, cette réduction affectera beaucoup plus fortement l'usage des combustibles, contribuant ainsi sensiblement à la réduction des gaz à effet de serre.

Bien que modestes en pourcentage de la consommation totale de l'économie québécoise, ces économies annuelles peuvent s'élever à plusieurs centaines de millions de dollars sur la base des prix de 2003 (voir le tableau 5). Par ailleurs, ces économies touchent davantage les combustibles importés, ce qui contribue à l'amélioration de la balance commerciale du Québec.

L'impact sur la demande d'électricité du secteur résidentiel et du secteur commercial et institutionnel est également significative quoique moindre en raison de l'utilisation importante des combustibles pour fins de chauffage. On estime que pour le secteur résidentiel la demande d'électricité serait réduite de 2,3 % dans un scénario médian à l'horizon 2050, tandis que celle du secteur institutionnel et commercial augmenterait de 0,7 %. Dans ce dernier cas, les hypothèses de diffusion de la climatisation dans les établissements de santé expliquent en partie les résultats.

Enfin, il est intéressant de noter que l'impact sur la demande de pointe en hiver sera encore plus important, car les vagues de froid sont appelées à diminuer de façon encore plus marquée que la réduction des degrés-jours, comme on le voit à la figure 18, où l'on constate une quasi-disparition des températures inférieures à -25 °C.

Tableau 5 : Économies potentielles (millions de dollars de 2003, sans taxe) (Lafrance et DesJarlais, 2006).

	Résidentiel	Commercial	Industriel	Total
Scénario				
2030				
Optimiste	197	77	56	330
Médian	329	139	83	552
pessimiste	453	206	118	776
2050				
Optimiste	229	104	82	415
Médian	313	166	117	596
Pessimiste	397	259	163	820

Les stratégies d'adaptation

Les résultats présentés dans les paragraphes précédents permettent de croire que la modification des besoins énergétiques face aux changements climatiques ne présente pas de difficulté globale majeure puisqu'elle se traduirait par une baisse de la demande.

La réduction du chauffage ne nécessite en soi aucune adaptation particulière et pourrait même se traduire par des possibilités accrues d'exportation d'électricité. Elle se traduit cependant par une diminution de la courbe de charge des distributeurs d'énergie, ce qui pourrait avoir à terme un impact sur la composition de leur parc d'équipements.

Par ailleurs, l'augmentation de la demande d'énergie pour fins de climatisation amène à s'interroger sur les meilleurs moyens de la satisfaire. En effet, cette demande pourrait être atténuée par des actions simples, qui résulteraient en une diminution des apports de chaleur dans les résidences et les autres bâtiments, telles que la plantation d'arbres, l'installation de volets, la pose de revêtements de surface à plus grande réflexion ou encore l'aménagement de toits verts. Ces moyens pourraient concourir à réduire les besoins de climatisation tout en augmentant le degré de confort des résidences et habitations sans climatisation. Les systèmes de refroidissement à faible consommation d'énergie, comme les ventilateurs et les appareils de climatisation par évaporation, permettent de réduire l'usage des systèmes de climatisation à plus forte consommation d'énergie, soit en retardant l'usage, soit en diminuant la demande pour ces systèmes. Enfin, puisque la durée de vie des habitations dépasse souvent les 50 ans, il serait important de les concevoir en fonction de l'impact appréhendé des changements climatiques de façon à y intégrer l'installation des systèmes de climatisation les plus efficaces (Lafrance et DesJarlais, 2006).

La demande d'énergie est un domaine où le niveau de connaissance est relativement poussé 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 pourrait avoir une fréquence accrue des événements climatiques extrêmes sur le comportement des réseaux et d'étudier les conséquences de divers autres scénarios climatiques.

Les prévisions présentées ici prennent en considération la pénétration accrue des systèmes de climatisation dans le secteur des soins de santé, mais ne tiennent pas compte d'une stratégie d'adaptation plus poussée visant à réduire la vulnérabilité des populations (personnes âgées ou malades) aux vagues de chaleur appréhendées.

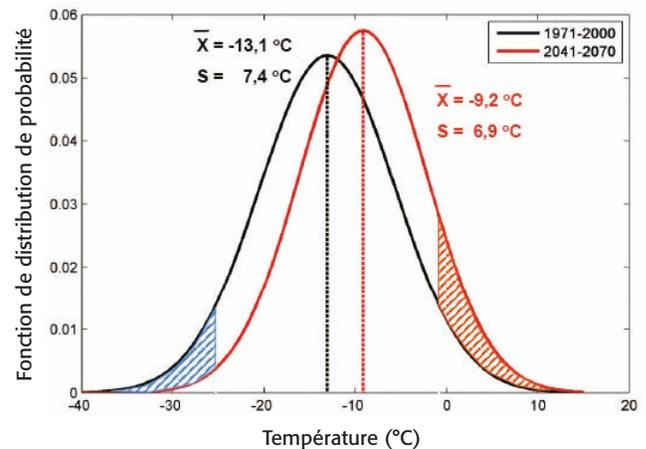


Figure 18 : Distribution hivernale (DJF) des températures quotidiennes moyennes au sud du 48° parallèle simulées en climat actuel (1971-2000) et projetées dans le futur (2041-2070) par un ensemble de 5 simulations MRCC4.2.3 pilotées par 5 différents membres de MCG3 sur la base du scénario A2. Les zones hachurées représentent les 10^e et 90^e percentiles basés sur le climat actuel. \bar{X} et S réfèrent respectivement à la moyenne et à l'écart-type de la distribution.

Les ressources en eau

Le territoire québécois recèle une quantité importante d'eau douce, soit environ 3 % des eaux douces renouvelables de la planète. Les ressources en eau sont essentielles, tant en quantité qu'en qualité, au bien-être économique, social et environnemental du Québec. Leur utilisation dans une perspective de développement durable, intégrant par définition une réflexion prospective, relève de l'intérêt commun.

De nombreuses infrastructures ont été mises en place au fil des ans pour profiter de cette ressource, tant par les individus et les entreprises que par les municipalités et les autres paliers de gouvernement.

Au nombre de celles-ci, on compte les infrastructures de retenue (barrages, digues, ouvrages de contrôle), de protection (protection des berges, protection contre les inondations), de prélèvement (prises d'eau de surface, puits), de circulation de l'eau (drainage, ponts, ponceaux) et de navigation (voie navigable, écluses).

Or, les changements climatiques appréhendés laissent entrevoir des perturbations importantes dans le régime hydrique. Comme on l'a vu à la section sur l'hydroélectricité et plus spécifiquement aux figures 15 et 16, différentes projections climatiques laissent penser que la fréquence d'apparition et l'amplitude des crues d'été et d'automne pourraient se modifier. Les crues de fonte des neiges pourraient quant à elles être devancées, et les débits maximums, atteints au moment de ces crues, auraient tendance à diminuer. Pour leur part, les étiages estivaux pourraient être plus sévères et de plus longue durée. Globalement, on assisterait à une amplification de la variabilité des débits par rapport aux conditions actuelles et à une augmentation des situations de stress ponctuelles sur les systèmes hydriques.

En ce qui a trait à la qualité de l'eau, des augmentations de température et des réductions des débits en été risquent de contribuer à la dégradation de certains de ses paramètres. De surcroît, l'intensification des étiages risque aussi d'amplifier certains problèmes de pollution des milieux récepteurs en réduisant la dilution bénéfique des contaminants.

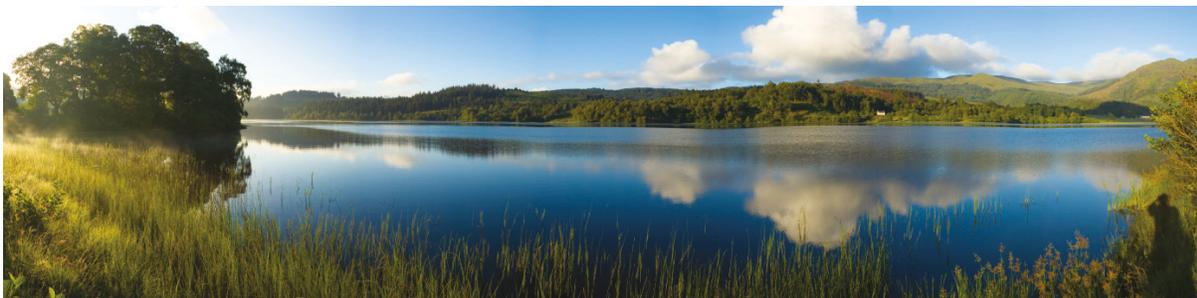
De plus, l'augmentation possible de la fluctuation des débits, jumelée à une augmentation possible des crues subites, risque d'augmenter l'érosion des berges des différents plans d'eau québécois. Enfin, les modifications du régime hydrique qu'apporteront les changements climatiques risquent de fragiliser l'apport des cours d'eau aux écosystèmes.

À eux seuls, le grand nombre de ces infrastructures de même que leur rôle clé dans l'économie québécoise justifient amplement la réflexion sur l'étude des changements climatiques et de leurs effets sur les ressources en eau. Les changements appréhendés dans les caractéristiques du régime hydrique nécessiteront des adaptations de l'utilisation et de la mise à niveau des infrastructures liées à l'eau existantes.

Cela pourrait aussi entraîner l'installation de nouvelles infrastructures à titre de mesures d'adaptation. En effet, l'utilisation et la mise en valeur actuelles de l'eau au Québec dépendent dans une certaine mesure des quantités d'eau disponibles et de leur variabilité dans le temps. Les infrastructures de gestion de l'eau mises en place pour tirer parti de cette disponibilité ont été conçues pour jouer efficacement leurs rôles à partir de données historiques sur les conditions hydriques moyennes et leurs fluctuations.

À ces mesures d'adaptation de nature structurelle doit s'ajouter une réflexion sur les ajustements à apporter au cadre législatif et réglementaire, à l'aménagement du territoire et à l'optimisation de la gestion des systèmes hydriques dans ce nouveau contexte de changements climatiques.

Tant en zones rurales qu'urbaines, les usages de l'eau sont majeurs et nombreux : mentionnons à titre d'exemples les prélèvements pour l'embouteillage, l'approvisionnement industriel, municipal, piscicole, agricole et minier de même que l'utilisation sur place de l'eau pour la production hydro-électrique, le transport fluvial, les usages récréatifs, la pêche et l'évacuation des eaux usées. Considérant ces besoins multiples et souvent conflictuels, ces mesures d'adaptation aux changements climatiques en matière de gestion de l'eau devront s'inscrire dans un processus de participation des usagers concernés.



Enfin, il est à prévoir que l'environnement naturel et les écosystèmes qui sont, jusqu'à un certain point, en équilibre avec ces mêmes quantités moyennes et fluctuations historiques seront également perturbés et que des mesures d'adaptation spécifiques seront, là aussi, nécessaires.

La provenance des approvisionnements en eau de la population et de l'économie québécoises se répartit entre le fleuve Saint-Laurent (environ 45 %), les lacs et les rivières (35 %) et les eaux souterraines (20 %). La section suivante abordera donc en premier lieu les questions relatives aux eaux de surface en s'intéressant aux bassins versants du Sud du Québec considérés globalement et au fleuve Saint-Laurent plus particulièrement, et en second lieu aux eaux souterraines. Enfin, le texte présentera un certain nombre d'éléments liés à l'adaptation.

Les eaux de surface

Les eaux de surface représentent environ 80 % des volumes d'eau utilisés au Québec (Mailhot *et al.*, 2004 ; Rousseau *et al.*, 2004). Leur abondance dans toutes les régions du Québec a en partie déterminé tant le mode de vie des Québécois que l'aménagement même du territoire habité et la nature des activités économiques.

Sans que l'on puisse formellement y associer l'effet des changements climatiques, l'analyse des observations de 56 stations hydrométriques localisées dans le Sud du Québec, comparant les 15 années les plus récentes aux 15 précédentes (Larouche *et al.*, 2008), a révélé des étiages plus sévères (-11 %) et plus longs (+3 jours), des crues de printemps moins intenses (-8 %) et une plus grande variabilité des débits (écart-type de +22 %). Ce type de comportements est semblable à ce que les projections climatiques futures attribuent généralement à l'impact des changements climatiques. Il semble aussi que les crues d'été et d'automne auraient été plus fortes au cours des 15 dernières années (+20 %), alors que les volumes annuels n'auraient pas subi de modifications statistiquement significatives. On doit par ailleurs préciser, bien que les différences entre ces deux périodes de 15 ans soient importantes, qu'elles ne constituent pas nécessairement des indices de tendances statistiquement démontrables.

Sur le plan des statistiques tendanciennes, l'étude de Jones (2008) s'attardant plus spécifiquement à la rivière Massawippi, en Estrie, montre que, même si certains paramètres climatiques ont été significativement modifiés au cours des dernières années (diminution de la neige au sol, plus grande proportion de précipitations liquides par rapport aux précipitations solides), cela n'a pas conduit à des modifications statistiquement significatives des débits.

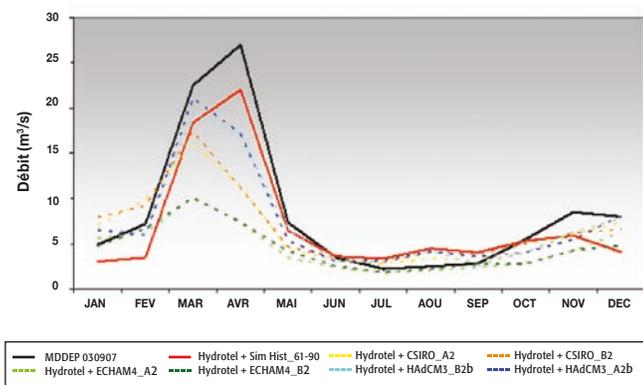
Au cours des prochaines décennies, on s'attend cependant à ce que la ressource en eau subisse des impacts similaires dus aux changements climatiques, dont des avancements et des réductions des crues de printemps, une intensification des étiages et des changements dans l'intensité et la fréquence des crues d'été et d'automne. Des changements sont aussi possibles dans les volumes annuels d'écoulement (Rousseau *et al.*, 2003 ; Nantel *et al.*, 2005).

À cet égard, les études réalisées ces quatre dernières années sur le bassin versant de la rivière Châteauguay illustrent bien les impacts futurs des changements climatiques sur les eaux de surface dans le Sud du Québec.

Ainsi, les modèles hydrologiques HYDROTEL et HSAMI, appliqués à la rivière des Anglais (un tributaire de la rivière Châteauguay), ont permis d'évaluer l'impact associé à six simulations climatiques futures à partir de trois modèles globaux du climat (ECHAM4, HadCM3 et CSIRO) et de deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A2 et B2), en utilisant la méthode des deltas pour la mise à l'échelle des résultats de simulation (Chaumont et Chartier, 2005). Comme le montre la figure 19, les pointes de crues de printemps seraient devancées dans le futur de près de deux mois, passant de la fin d'avril pour la période de 1961 à 1990, au début de mars au cours de la décennie 2050. L'exercice semble aussi indiquer une baisse des débits des étiages estivaux pour chacune des projections malgré la hausse des précipitations, en raison de l'augmentation plus importante de l'évapotranspiration (Pugin *et al.*, 2006). En ce qui concerne le volume annuel d'écoulement, les projections divergent. Les projections alimentées par le modèle HadCM3 projettent une hausse du volume annuel d'écoulement, celles alimentées par ECHAM4 montrent une baisse importante, et celles utilisant CSIRO, une baisse plus faible. Ces écarts s'expliquent par les différences d'évolution des températures et des précipitations projetées par ces modèles climatiques.



Rivière : Des Anglais / Station : 030907 / Régime : NAT / Superficie : 643 km²
Hydrotel+ParPrev - Période historique (1961-90) et années 2040-69 en CC



Rivière : Des Anglais / Station : 030907 / Régime : NAT / Superficie : 643 km²
HSAMI - Période historique (1961-90) et années 2040-69 en CC

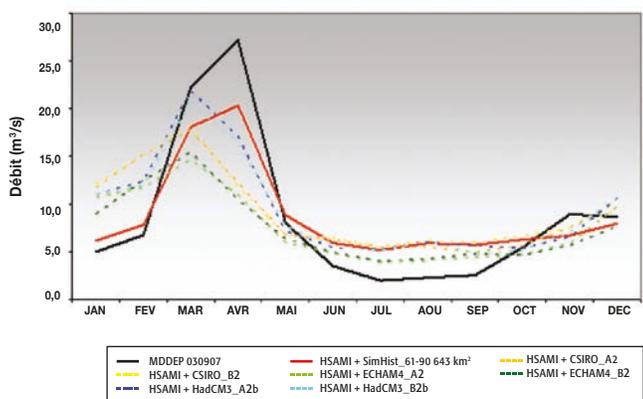


Figure 19 : Hydrogrammes moyens annuels simulés par les modèles hydrologiques HYDROTEL (en haut) et HSAMI (en bas) à l'exutoire de la rivière des Anglais. Les simulations ont été réalisées pour la période de référence 1961-1990 et les décennies 2040-2069 (Chaumont et Chartier, 2005).

Des résultats similaires, avec une plus grande diversité de méthodes de mise à l'échelle, ont été obtenus sur le bassin de la rivière Chaudière (Quilbé *et al.*, 2008a). De même, l'étude de trois approches de modélisation différentes pour l'estimation de l'évapotranspiration sur le bassin de la rivière Châteauguay a permis d'estimer une augmentation annuelle de l'évapotranspiration allant de 79 mm à 141 mm (Vescovi *et al.*, 2009).

Trois approches ont aussi été testées pour estimer l'évapotranspiration à partir des simulations climatiques du modèle régional canadien MRCC4 pilotées par le modèle global canadien MGCC3 et à partir des modèles HYDROTEL et PROMET (Mauser et Ludwig, 2002) alimentés par les précipitations et températures des mêmes simulations du climat. Les résultats, variables selon les approches, ont enclenché la réalisation d'une étude des choix de modèles hydrologiques pour les évaluations en changements climatiques, dont les premiers résultats ont été compilés par Ludwig *et al.* (2009).

À une échelle plus fine, des évaluations des teneurs en eau des couches supérieures du sol, réalisées sur le ruisseau Norton (un sous-bassin de la rivière des Anglais) à l'aide d'un modèle de bilan, montrent une augmentation des besoins en irrigation des terres agricoles. Ceci s'explique essentiellement par la hausse de l'évapotranspiration. Compte tenu des contraintes environnementales liées au prélèvement d'eau de surface et malgré la relative dispersion des résultats des différents scénarios climatiques analysés, il faudrait vraisemblablement augmenter les efforts de planification concertée de l'utilisation de la ressource hydrique. Celle-ci devrait s'appuyer sur une gestion globale et intégrée à l'échelle du bassin versant afin de maintenir la proportion des besoins futurs en eau d'irrigation actuellement comblés à partir des cours d'eau du sous-bassin (Pugin *et al.*, 2006).

Les inondations provoquées par les crues de rivières demeurent parmi les événements hydroclimatiques les plus dommageables (Ashmore et Church, 2001 ; Brissette *et al.*, 2003 ; Ouranos, 2004) auxquels le Québec doit faire face (MSP, 1996). À cet égard, Caron (2005) et Mareuil (2005) ont mené, eux aussi sur le bassin versant de la rivière Châteauguay, un exercice de modélisation basé sur un générateur stochastique de climat comprenant les anomalies mensuelles de températures et de précipitations tirées de trois modèles de circulation générale : MCGG2, HadCM3 et ECHAM4. Les scénarios dégagés du modèle ECHAM4 à l'horizon 2050 indiquent une diminution statistiquement significative des crues printanières pour les périodes de retour de 2 à 500 ans, et ceux dérivés des modèles HadCM3 et MCGG2 des résultats similaires, mais statistiquement non significatifs.

Pour la période estivale, HadCM3 montre une légère augmentation de l'intensité des crues (mais statistiquement non significative), et ce, pour toutes les périodes de retour. Quant aux modèles ECHAM4 et MCGG2, ils indiquent une diminution statistiquement significative de 8 % à 10 %. Une étude complémentaire (Laforce, 2008) sur un tout autre bassin versant, celui de la rivière du Nord, présente des résultats similaires.

Notons enfin que, pour le bassin versant de la rivière Châteauguay, les impacts appréhendés des changements climatiques prendraient la forme de crues printanières devancées et d'étiages plus sévères mais aussi d'inondations amplifiées ou réduites en fonction des variations des niveaux du Saint-Laurent. En effet, si les inondations causées par les embâcles à Châteauguay même résultent surtout du comportement du bassin hydrologique et de la présence de glace s'accumulant sur la rivière (Leclerc *et al.*, 2006), les inondations récurrentes en eau libre que connaît cette municipalité résulteraient davantage des niveaux fluctuants du fleuve.

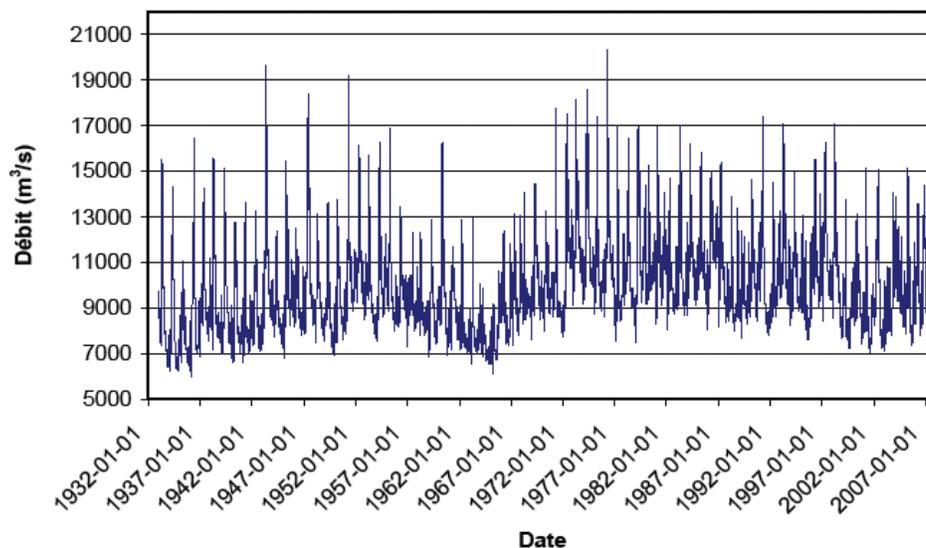
Le fleuve Saint-Laurent

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 le golfe du Saint-Laurent et 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.

Le Saint-Laurent 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. À lui seul, le Saint-Laurent représente plus de la moitié des eaux de surface et contribue à approvisionner en eau plusieurs des centres urbains les plus importants du Québec. Il constitue un milieu naturel exceptionnel, notamment dans la partie du lac Saint-Pierre, réserve de biosphère reconnue par l'UNESCO, dont 90 % du territoire est demeuré sauvage.

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 illustre l'évolution du débit mensuel à Sorel pour la période 1932-2007. Examinée dans son ensemble, cette série de données sert à apprécier l'ampleur des fluctuations du débit du fleuve, variant de quelque 14 000 m³/s, soit de 6 000 m³/s à 20 000 m³/s (Morin et Bouchard, 2000).

Figure 20 :
Débit du Saint-Laurent à Sorel, 1^{er} janvier 1932 au 1^{er} janvier 2007 (Morin et Bouchard, 2000 ; J.-F. Cantin, communication personnelle).



Le Saint-Laurent est alimenté par deux principaux bassins qui sont régularisés : les Grands Lacs et la rivière des Outaouais. Le premier est le plus important et a un débit moyen annuel de 7 060 m³/s avec des variations entre 6 000 m³/s et 9 000 m³/s. Le second enregistre des fluctuations encore plus importantes avec un débit allant de 1 000 m³/s 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. D'une manière générale, la régularisation des eaux réduit les débits au printemps et les augmente à l'automne et à l'hiver.

Selon l'étude de Croley (2003), qui a utilisé les sorties de quatre modèles de circulation générale, la quantité d'eau transitant du lac Ontario vers le fleuve Saint-Laurent serait réduite de 4 % à 24 % sur une base annuelle à l'horizon 2050 par rapport au niveau actuel. En utilisant une méthode similaire, Fagherazzi *et al.* (2005) ont conclu à une faible réduction des débits variant de 1 % à 8 % de la rivière des Outaouais, le principal tributaire du Saint-Laurent. En combinant ces deux résultats, Lefavre (2005) a conclu que les niveaux du Saint-Laurent seraient réduits dans le secteur de Montréal d'un maximum de 20 cm à 120 cm selon le scénario.

Une telle diminution des débits aurait surtout des conséquences importantes sur la navigation commerciale en réduisant considérablement la surface d'eau libre dans le fleuve, et particulièrement au lac Saint-Pierre qui est peu profond. Des impacts également importants sur les milieux naturels exceptionnels de ce lac sont à craindre, avec un assèchement des milieux humides qui à son tour affectera les populations de poissons et les oiseaux migrateurs.

Les embouchures des tributaires du Saint-Laurent ont aussi été analysées. Il a été montré que l'apport sédimentaire et le profil en long de trois rivières (Saint-François, Richelieu et Batiscaun) seront influencés par les changements climatiques. L'étude de Verhaar *et al.* (2009) conclut toutefois que les impacts seront très variables d'un cours d'eau à l'autre.

En effet, ces trois tributaires ont des caractéristiques hydrodynamiques à l'entrée du fleuve et des seuils de débits de mise en transport des sédiments différents, tout en étant chacun à des stades distincts de leur évolution géomorphologique. Il est à noter que les apports sédimentaires pour la rivière Saint-François risquent de diminuer alors que ceux des deux autres cours d'eau risquent d'augmenter.

Les eaux souterraines

Les eaux souterraines sont la source de 20 % des approvisionnements en eau potable au Québec. Rivard *et al.* (2003 et 2008) ont constaté que la recharge annuelle des ressources en eau souterraine semble être restée stable ou avoir diminué légèrement ces dernières décennies au Québec. Des baisses significatives de disponibilité en eau souterraine auraient d'importantes répercussions, surtout en zone rurale où une proportion non négligeable de la population (26 % en Chaudière-Appalaches, par exemple, contre 10 % pour l'ensemble du Québec) s'approvisionne à une source souterraine à l'aide de puits individuels (Régie régionale de la santé et des services sociaux de Chaudière-Appalaches, 2001). La vulnérabilité des nappes d'eau souterraine au Canada est d'autant plus grande que les connaissances à leur sujet accusent encore des lacunes. Au Québec, la cartographie de l'aquifère du bassin de la rivière Châteauguay (Côté *et al.*, 2006) et le nouveau programme québécois d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines (MDDEP, 2008a) marquent des pas dans la bonne direction. De plus, sur ce même bassin, plusieurs projets de recherche démarrés en 2006 et soutenus par Ouranos et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) tentent d'améliorer les connaissances des systèmes intégrant à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines, entre autres à l'aide de la modélisation couplée. Ces connaissances permettront de contribuer à l'étude de la vulnérabilité de ces aquifères à l'échelle locale.

Les mesures d'adaptation

Dans le domaine des ressources en eau, les mesures d'adaptation envisageables sont nombreuses. Il est possible de les regrouper sous quatre grandes catégories :

- la mise à jour des cadres législatifs et réglementaires ;
- la mise à niveau des infrastructures existantes et la construction de nouvelles infrastructures (prises d'eau, puits, barrages, digues, drainage, ponts, ponceaux, voie navigable, écluses, ouvrages de protection des berges, ouvrages de protection contre les crues) ;
- l'aménagement du territoire (occupation du sol, aménagement des zones inondables) ;
- l'optimisation de la gestion de l'eau (déploiement d'outils, gestion intégrée, modification de la gestion des infrastructures).

La combinaison d'une ou de plusieurs de ces mesures d'adaptation devrait permettre de minimiser les effets adverses des changements climatiques et même, lorsque possible, de tirer profit des nouvelles possibilités qu'amènent les changements du climat.

Figure 21 : Simulations du plan de gestion actuel des réservoirs Saint-François et Aylmer dans un contexte de changements climatiques à l'horizon 2050, selon les modèles et les scénarios ECHAM4 A2 et HadCM3 A2b. Les chiffres du tableau correspondent au nombre de jours sur 30 ans (1961-1990) pendant lesquels des contraintes du plan de gestion (pour des usages spécifiques) ne sont pas respectées. Ces contraintes sont des niveaux d'eau des réservoirs ou des débits en rivière (Fortin *et al.*, 2007).

	Plan de gestion actuel			Gestion adaptée ECHAM4 A2			Gestion adaptée CSIRO A2			
	Période de référence	ECHAM4 A2	CSIRO A2	HadCM3 A2b	ECHAM4 A2	CSIRO A2	HadCM3 A2b	ECHAM4 A2	CSIRO A2	HadCM3 A2b
Risque de rupture	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Domage aux réservoirs (amont)	14	0	8	12	8	39	82	0	8	29
Villégiature	481	2634	1137	480	461	192	61	2028	481	213
Alimentation en eau	0	310	15	0	0	0	0	272	0	0
Domages au lac Louise	16	4	17	13	4	16	29	2	12	12
Production d'énergie (aval)	596	364	523	579	345	482	498	369	526	567

Compromis actuel

Adaptation non nécessaire ou négligeable

Niveau minimum rehaussé
Période de remplissage devancée

Période de remplissage devancée

L'utilisation et la mise en valeur de l'eau se situent souvent dans un contexte où les besoins sont multiples, voire conflictuels. Il y a donc avantage à s'inscrire dans un processus de participation de tous les usagers concernés. À cet égard, les organismes de bassins versants créés dans le cadre de la Politique nationale de l'eau du Québec sont particulièrement appropriés pour accomplir une telle démarche. Puisque la gestion par bassin versant s'impose comme l'une des meilleures approches d'adaptation, il importe que la perspective des changements climatiques y soit intégrée systématiquement. Les solutions d'adaptation passent donc idéalement par une gestion globale, intégrée et adaptée du cycle de l'eau dans les bassins versants méridionaux ainsi que du système des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Elles doivent être élaborées dans un contexte d'aménagement territorial durable, qui respecte les réalités socioéconomiques et environnementales.

La gestion des barrages

Un premier exemple de gestion des barrages, visant simultanément plusieurs objectifs (protection contre les crues, alimentation en eau, soutien aux activités fauniques, soutien aux activités récréatives, production d'énergie), permet de bien saisir les nécessités et les défis de l'adaptation dans le domaine des ressources hydriques.

La modification de la gestion des barrages à objectifs multiples est probablement l'un des cas d'application parmi les plus directs d'adaptation aux changements climatiques en ressources hydriques, et ce, pour plusieurs raisons :

- la disponibilité des modèles de simulation (modèles d'hydrologie et de gestion) essentiels à l'application de projections climatiques ;

- des objectifs de gestion des eaux explicites et très souvent quantifiés en termes de niveaux ou de débits critiques — par exemple, la protection contre les crues implique que les niveaux des réservoirs et les débits soutirés demeurent inférieurs à des valeurs connues, alors que la protection de l'environnement faunique peut nécessiter entre autres l'atteinte de niveaux et de débits précis à des dates déterminées pour favoriser la fraie ;
- l'accès à des tables de concertation, telles que des comités consultatifs où siègent les représentants des principaux usagers ;
- possibilité d'ajustement des plans de gestion des barrages. La figure 21 présente les résultats d'une étude réalisée sur les possibilités d'adaptation des plans de gestion actuels des barrages du bassin versant du Haut-Saint-François situé dans la région centre-sud du Québec (Turcotte *et al.*, 2005 ; Fortin *et al.*, 2007). Cette étude s'appuie sur un modèle simulant l'application quotidienne des plans de gestion des réservoirs Saint-François et Aylmer. L'exercice de modélisation montre que les changements climatiques, tels que simulés par les modèles ECHAM4 et CSIRO, entraîneraient une modification des agencements et compromis actuels entre les différents usages de l'eau des réservoirs. Par contre, aucune adaptation majeure ne serait requise si le climat changeait tel que simulé par le modèle HadCM3 qui prévoit un climat plus humide. Dans les deux premiers cas, en revanche, devancer les périodes de remplissage des réservoirs et rehausser les niveaux minimaux s'avèreraient des mesures d'adaptation nécessaires.

L'occupation du territoire

L'occupation du territoire, par exemple par l'agriculture, peut, pour différentes raisons liées ou non au climat, être source de changements à la fois dans les besoins et dans la disponibilité en eau. L'étude de Quilbé *et al.* (2008b) a cherché à préciser ce lien à partir du modèle HYDROTEL et de la reconstitution des occupations historiques du sol. Les résultats démontrent qu'il existe effectivement un lien entre la superficie des terres agricoles et le régime hydrique. Cependant, l'application de deux scénarios d'occupation du sol ayant des caractéristiques opposées, un scénario dit « d'intensification de l'agriculture » et un autre dit « de développement durable », en combinaison avec différentes projections climatiques à l'horizon 2025 montre des résultats très variables. Cela indique qu'il est actuellement difficile de sélectionner l'un ou l'autre des scénarios d'occupation comme meilleur moyen pour contrer les effets négatifs des changements climatiques mais illustre la nécessité de considérer l'évolution de l'occupation du sol dans les études d'impacts.

La gestion des eaux en milieu urbain

L'adaptation dans le domaine de l'approvisionnement en eau potable peut s'appuyer sur des mesures liées aux infrastructures comme la réhabilitation, voire la relocalisation de certaines prises d'eau, la réduction des volumes d'eau perdus en réseau ou l'augmentation des capacités des réserves, mais aussi sur l'optimisation des modes de gestion actuels qui pourraient découler par exemple d'un programme d'économie d'eau.

La modification appréhendée des récurrences des événements de pluie intense devrait résulter en une augmentation des débordements de réseaux, des refoulements, voire des inondations. Dans un contexte d'infrastructures vieillissantes, Mailhot *et al.* (2007a) ont souligné que les répercussions d'une augmentation probable des intensités et probabilités d'occurrence des événements de pluie intense pourraient être limitées :

- par la révision de critères de conception des infrastructures et édifices ;
- par de nouvelles façons d'utiliser les statistiques de précipitations intenses au moment du dimensionnement (Duchesne *et al.*, 2005) ;
- par une meilleure gestion des eaux pluviales, principalement par l'amélioration du contrôle à la source grâce à un aménagement urbain optimal et à une maximisation de l'infiltration.



La navigation commerciale sur le Saint-Laurent

En ce qui concerne l'adaptation de la navigation commerciale à une baisse plus ou moins importante des niveaux d'eau du Saint-Laurent, une étude a été commandée par le Comité de concertation navigation du Plan d'action Saint-Laurent sur les options d'adaptation qui permettraient le maintien des activités maritimes et portuaires à leur niveau actuel (D'Arcy *et al.*, 2005). L'étude constate que, si les baisses des niveaux d'eau demeurent faibles, l'amélioration des prévisions à long terme permettrait d'optimiser les critères de marge de sécurité que les transporteurs établissent pour les chargements outre-mer, diminuerait leur vulnérabilité et constituerait du même coup un moyen d'adaptation pertinent. Par contre, si les baisses sont plus importantes, des adaptations d'ordre organisationnel, comme la réorganisation du transport maritime et de ses infrastructures, ou d'ordre technologique, comme l'adaptation des vaisseaux afin de minimiser le tirant d'eau, seraient requises. L'étude ajoute que, bien que de telles adaptations semblent théoriquement réalisables, elles paraissent difficiles à appliquer dans un contexte d'échanges économiques croissants et que des investissements majeurs seraient requis pour une telle réorganisation (de 260 M \$ à 1 000 M \$). Finalement, des adaptations du milieu physique, comme le dragage et les ouvrages de régularisation, peuvent permettre de diminuer la vulnérabilité du transport maritime, par contre elles auraient des répercussions environnementales importantes, dont les incidences et les coûts liés aux mesures de compensation sont difficiles à mesurer avec précision.

La Commission mixte internationale (CMI) a entrepris, il y a plusieurs années, une vaste étude sur l'évaluation de différents plans de régularisation des débits, incluant l'analyse des débits en conditions de changements climatiques (CMI, 2006) et des options pour faciliter l'adaptation puisque le principe de la gestion adaptative est l'une des avenues considérées. De plus, les gouvernements du Québec, de l'Ontario et des huit États américains bordant les Grands Lacs, ont signé en décembre 2005 l'Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, qui vise à maîtriser les prélèvements d'eau sur l'ensemble du bassin dans tous les secteurs et interdit notamment les dérivations hors du bassin. L'entente fait explicitement référence aux changements climatiques et au principe de précaution (Conseil régional des ressources en eau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, 2005). Au Québec, l'encadrement législatif de cette entente s'inscrit dans une loi adoptée en 2009 affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection.

La forêt

Depuis la dernière glaciation, la forêt du Québec a évolué sous un climat rigoureux conjugué à une dynamique de perturbations naturelles principalement dominée par les feux de forêt et les épidémies d'insectes. Ceci a mené à la formation (voir zones et sous-zones de végétations de la figure 22) de trois grandes écozones forestières du sud au nord : l'érablière (11-15), la sapinière (7-10) et la pessière (4-6). Dans le dernier siècle, le climat s'est réchauffé de façon importante et les impacts des activités humaines sur la forêt, notamment la récolte, ont sensiblement modifié le paysage forestier. Ces impacts ont déjà entraîné une modification de la dynamique entre le climat et la composition forestière.

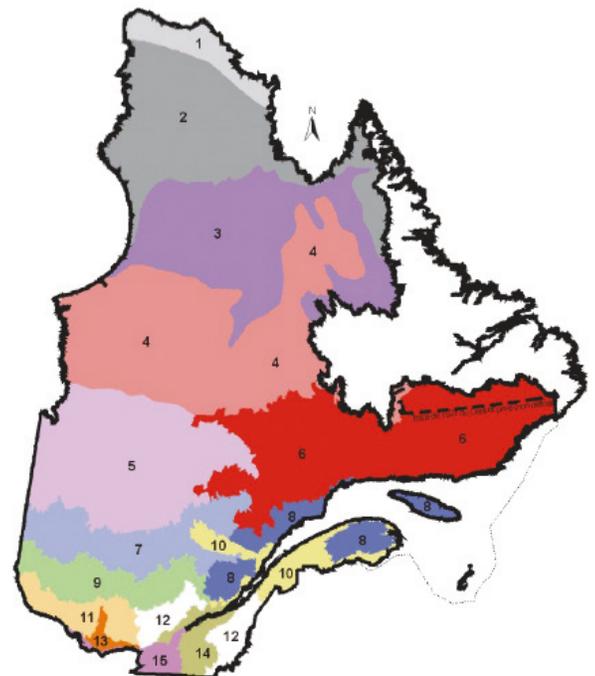
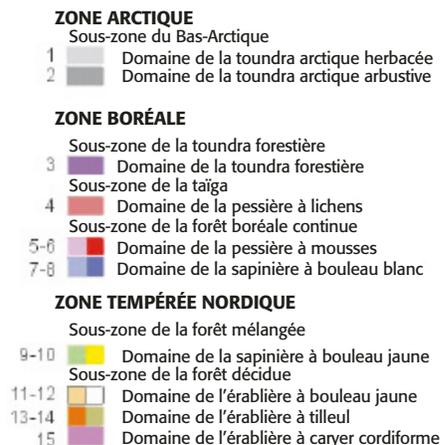
Il est prévisible que le réchauffement climatique appréhendé en raison d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, et qui sera beaucoup plus rapide que celui observé au cours du siècle dernier, accélère davantage la rupture de l'équilibre entre le climat et la forêt. Cela entraînerait des modifications dans la composition et la productivité des peuplements forestiers. La dynamique des perturbations naturelles (feux et insectes) et la fréquence des événements météorologiques extrêmes (sécheresses et verglas) sont également appelées à changer. Dans ce contexte, les décisions qui sont prises aujourd'hui en matière d'aménagement forestier sont cruciales et doivent s'inspirer des connaissances les plus à jour sur les effets multiples et subtils des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers.

Croissance et productivité

Les changements de température, les changements dans le régime des précipitations ainsi que les concentrations atmosphériques croissantes de CO₂ ont chacun leur influence sur la croissance et la productivité des écosystèmes forestiers. L'augmentation des températures peut se traduire par un allongement de la saison de croissance. Ainsi, Julien et Sobrino (2009) ont estimé qu'entre les années 1981 et 2004, la longueur de la saison de croissance a augmenté, en moyenne, de 0,8 jour par année. Des signes d'un allongement de la saison de croissance sont déjà perceptibles ; par exemple, Raulier et Bernier (2000) ont constaté à l'aide de modélisations que l'ouverture des bourgeons de l'érable à sucre a été devancée de quelques jours sur une centaine d'années. Au cours du XXI^e siècle, le réchauffement du climat pourrait devancer de 9,2 jours en moyenne (Morin *et al.*, 2009) la date d'apparition des feuilles de nombreuses autres espèces présentes en Amérique du Nord.

En plus de prolonger la saison de croissance, l'augmentation des températures pourrait agir directement sur la physiologie et le métabolisme des arbres et par le fait même augmenter la productivité primaire des forêts, dans la mesure où cet accroissement des températures n'affecterait pas la disponibilité en eau (Price *et al.*, 1999 ; Kirschbaum, 2000). L'augmentation des températures du sol pourrait aussi induire une accélération de la décomposition de la matière organique, augmentant la disponibilité de l'azote pour le système racinaire des arbres (Van Cleve *et al.*, 1990 ; Kirschbaum, 1995 ; MacDonald *et al.*, 1995 ; Rustad *et al.*, 2000 et 2001 ; Verburg, 2005).

Figure 22 : Zones et sous-zones de végétation au Québec. Le Québec est partagé en trois zones de végétation : la zone tempérée nordique, dominée par des peuplements feuillus et mélangés, la zone boréale, caractérisée par des peuplements de conifères sempervirents, et la zone arctique, marquée par une végétation arbustive et herbacée (MRNF, 2009b).



La figure 23 montre les écarts en degrés-jours de croissance pour la période 2041-2070 par rapport à la période de référence 1971-2000 simulés par le modèle régional canadien du climat (MRCC). La quantité de degrés-jours pour une région donnée est un indice de la quantité d'énergie disponible pour la croissance des végétaux. Plus précisément, cet indice indique le total annuel des degrés-jours au-dessus de 5 °C.

La figure 24, pour sa part, présente les projections médianes tirées d'un ensemble de modèles globaux de climat ainsi que les écarts-types associés.

Sur le territoire de la forêt québécoise, la prédiction médiane de l'ensemble des modèles globaux montre une augmentation d'environ 300 à 400 degrés-jours, avec des augmentations plus élevées au sud du territoire. Considérer un grand nombre de modèles permet d'associer une mesure de dispersion autour d'un scénario moyen.

Ainsi, on remarque qu'au sud de la forêt dans le domaine de l'érablière, les augmentations prédites sont de l'ordre de 400 ± 200 degrés-jours alors qu'au nord, dans le domaine de la pessière, on prédit des augmentations de 300 ± 175 degrés-jours. La simulation du modèle régional canadien montre des hausses de degrés-jours un peu plus élevées que la médiane de l'ensemble des modèles globaux mais avec une résolution accrue, ce qui permet de mieux apprécier le gradient spatial des changements escomptés. Globalement, les augmentations de degrés-jours prévues sont quantitativement très élevées, étant de l'ordre de 35 % à 45 %.

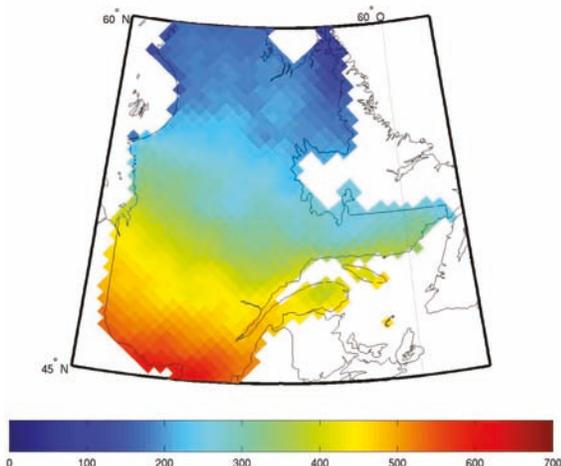


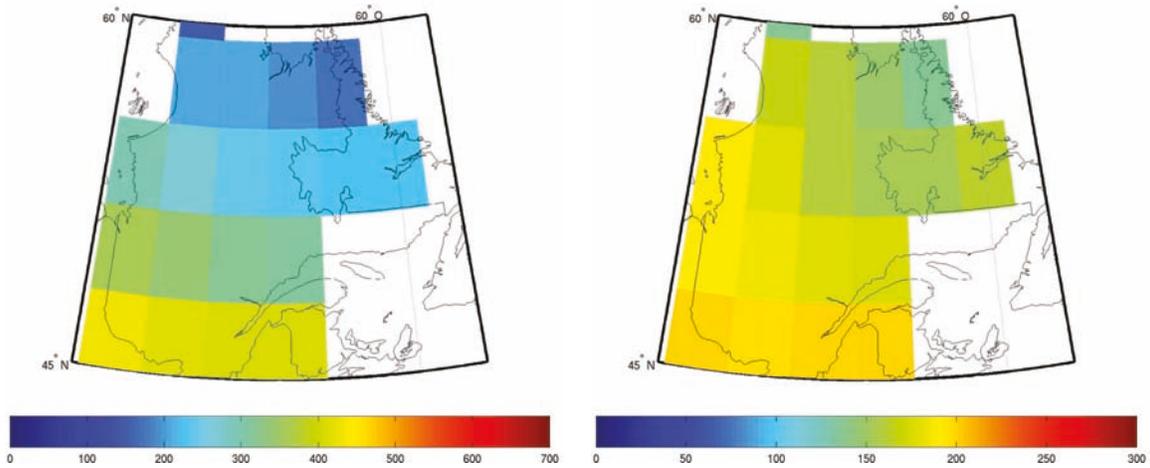
Figure 23 : Résultats des simulations des écarts de degrés-jours de croissance de la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000, à partir de deux simulations du modèle régional canadien (MRCC version 4.2.0) et du scénario SRES A2 (Music et Caya, 2007).

Un autre indice important pour la forêt est la longueur de la saison de croissance, qui est une variable définie comme étant le nombre maximal de jours consécutifs sans gels. Les prédictions des modèles globaux ainsi que du modèle régional pour 2050 montrent des augmentations de l'ordre de 25 à 30 jours (Logan *et al.*, en préparation). Étant donné que la longueur de la saison de croissance est déjà plutôt courte, en particulier pour les conifères de la forêt boréale, une telle hausse est quantitativement importante.

Le deuxième facteur est la hausse de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère qui aurait un effet fertilisant sur les forêts en augmentant le rendement photosynthétique des plantes et leur efficacité d'utilisation de l'eau, entraînant ainsi une augmentation de la productivité primaire nette (Drake *et al.*, 1997 ; Ainsworth et Long, 2005 ; Norby *et al.*, 2005). Plusieurs études dénotent déjà des productivités accrues dans les forêts au cours des dernières décennies (Gielen et Ceulemans, 2001 ; Nemani *et al.*, 2003 ; Boisvenue et Running, 2006). Toutefois, à long terme, ces gains pourraient être annulés par l'acclimatation des arbres aux nouvelles concentrations de CO₂ (DeLucia *et al.*, 1999), ou encore limités par le manque d'éléments nutritifs, tels que l'azote, dans le sol (Luxmoore *et al.*, 1993 ; Luo *et al.*, 2004).

Le contexte climatique en 2050 semble donc être plus favorable à la croissance de la forêt si on se base sur l'évolution probable des variables discutées ci-haut. Cependant, la vue d'ensemble paraît moins positive du côté des précipitations. En effet, bien que le MRCC (voir la figure 25) envisage des hausses marquées des précipitations annuelles, principalement pendant l'hiver et dans le Nord du Québec (Logan *et al.*, en préparation), les changements seront minimes pendant la saison de croissance (juin, juillet et août) pour la majeure partie du Québec forestier sauf pour des hausses très marquées dans le Nord du Québec. Dans l'ensemble, ces résultats concordent avec ceux tirés des simulations des modèles globaux présentés à la figure 26. Des précipitations à peu près identiques conjuguées à des températures plus élevées pourraient donc augmenter l'évapotranspiration des plantes et causer un assèchement des sols. Ces changements pourraient avoir des conséquences à la fois sur la composition et la productivité des forêts.

Figure 24 : Médiane des écarts de degrés-jours de croissance selon plusieurs modèles globaux (à gauche) et écarts-types associés (à droite), à partir de 70 simulations utilisant les scénarios SRES A1b, A2 et B1 (adapté de Logan *et al.*, en préparation).



En considérant ces effets possibles d'une modification du climat sur les forêts, les résultats préliminaires de modèles de prédiction de croissance utilisant un scénario de doublement des concentrations de CO₂ prévoient une augmentation de la productivité primaire nette des forêts de l'Est du Canada, alors que celles de l'Ouest seraient touchées de manière contraire (Price et Scott, 2006). La plupart des modèles sont toutefois basés sur des relations entre le climat et la croissance propres à diverses essences et ne tiennent pas compte des facteurs potentiellement défavorables à la productivité. Par exemple, les génotypes des espèces présentes dans un écosystème sont en général étroitement adaptés au climat qui y règne. Andalo *et al.* (2005) et Beaulieu et Rainville (2005) ont à cet égard démontré que lorsque des semences d'épinettes blanches du Québec étaient plantées dans des régions plus chaudes de 4 °C et où les précipitations étaient légèrement plus abondantes que dans leur lieu d'origine, leur productivité diminuait significativement. Les forêts pourraient avoir besoin de plusieurs générations pour s'adapter aux nouvelles conditions résultant d'un changement climatique.

Il faut tenir compte du fait que l'évolution des écosystèmes forestiers face aux changements climatiques ne dépend pas uniquement de leur réponse directe aux facteurs énumérés plus haut. Le climat affecte aussi la forêt indirectement par l'influence qu'il exerce sur le régime des perturbations naturelles telles que les épidémies d'insectes, les sécheresses ou les feux.

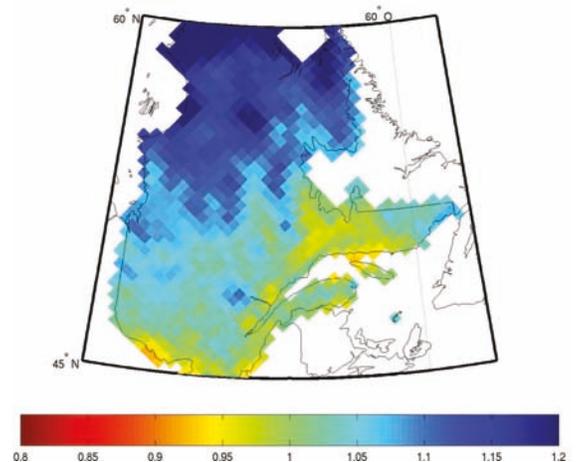


Figure 25 : Résultats des simulations des précipitations pendant la saison de croissance, pour la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000, utilisant deux simulations du modèle régional canadien (MRCC version 4.2.0) et le scénario SRES A2 (Music et Caya, 2007).

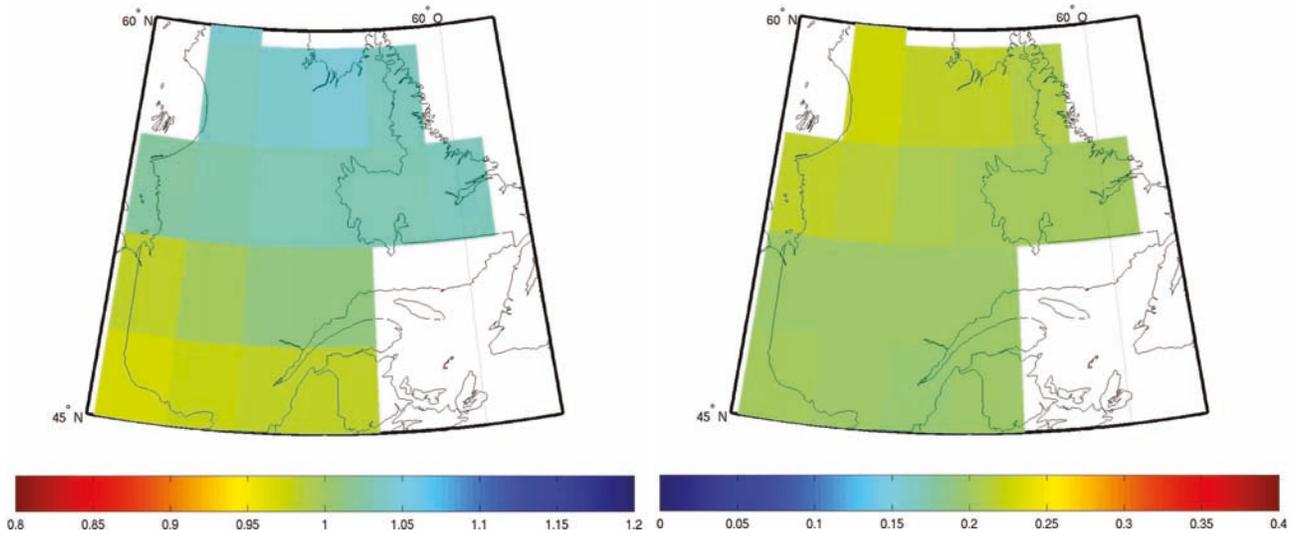


Figure 26 : Résultats des simulations des précipitations pendant la saison de croissance, pour la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000 (médiane à gauche et écarts-types à droite), à partir de 127 simulations utilisant plusieurs modèles globaux et les scénarios SRES A1b, A2 et B1 (adapté de Logan *et al.*, en préparation).

La migration

L'une des stratégies d'adaptation et d'acclimatation des forêts est la migration des espèces et des communautés. Dans un scénario de doublement de la teneur atmosphérique en CO₂, les modèles prédisent que les différents biomes auraient le potentiel de faire des déplacements d'aires géographiques importants, tant en latitude qu'en altitude. La hausse de température annuelle moyenne appréhendée de 3,2 °C d'ici à 2050 au centre du Québec provoquerait un déplacement des zones climatiques de 515 km vers le nord. Une forêt en équilibre avec un tel climat serait très différente d'aujourd'hui. Ainsi, la zone de l'érablière pourrait s'étendre jusqu'à Baie-Comeau alors que la pessière noire verrait son aire de distribution s'agrandir de façon spectaculaire vers le nord.

Toutefois, pour que les communautés forestières soient capables de « suivre » la vitesse des changements climatiques, cela impliquerait une vitesse de migration d'environ 10 km par an. Dans les faits, la vitesse de migration des arbres est beaucoup plus lente, atteignant des vitesses de 10 km à 45 km par siècle (Davis, 1981 ; Huntley et Birks, 1983). En outre, plusieurs facteurs risquent de ralentir ce mouvement, dont la fragmentation des écosystèmes forestiers (Schwartz, 1992). Par ailleurs, en raison des différences de vitesse de migration d'une espèce à l'autre, le déplacement pourrait mener à de nouvelles communautés forestières, affectant ainsi les interactions interspécifiques (Kirschbaum, 2000 ; Hansen *et al.*, 2001). Enfin, la fertilité des sols et la capacité de rétention en eau pourraient également limiter le déplacement des arbres vers le nord, puisque les besoins en éléments nutritifs de la forêt varient selon les peuplements.

Par exemple, les érablières ont un plus grand besoin d'éléments nutritifs que les sapinières ou les pessières (Houle, 2006). La migration des écosystèmes, qui prendra plusieurs siècles à s'effectuer, sera donc nettement inférieure au rythme de modification des habitats induit par les changements climatiques (Weber et Flannigan, 1997 ; Parker *et al.*, 2000 ; Price *et al.*, 2001 ; Malcolm *et al.*, 2002 ; Neilson *et al.*, 2005 ; Aitken *et al.*, 2008).

Les perturbations

Le régime des perturbations naturelles joue un rôle important dans le façonnement du paysage forestier : il a un effet sur la composition, la structure et les processus inhérents aux écosystèmes. Ces perturbations comprennent les proliférations d'insectes, les feux de forêt, les maladies et les conditions climatiques extrêmes, telles que sécheresse, verglas et vents violents. Un changement de conditions climatiques influencera la gravité, la fréquence et l'étendue de ces perturbations.

Les changements climatiques pourraient influencer sur la distribution et l'abondance des insectes. L'adaptation de ceux-ci pourrait être rapide à cause de leur grande mobilité et de leur taux de reproduction élevé. Leur rythme métabolique pourrait bénéficier d'une augmentation des températures (Ayres et Lombardero, 2000). Les infestations pourraient donc être plus fréquentes, plus intenses et plus longues, rendant les forêts particulièrement vulnérables (Logan *et al.*, 2003).

En se basant sur une modélisation à l'échelle du paysage, Régnière *et al.* (2005) ont révélé que la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* [Clem.]) verrait son aire de répartition augmenter de façon importante. De plus, la tordeuse provoquerait davantage de dommages dus à des infestations plus longues et à une augmentation du pourcentage de défoliation (Gray, 2008). Également, l'invasion de plusieurs espèces exotiques d'insectes, due aux changements climatiques, pourrait toucher grandement les forêts du Québec. Par exemple, la distribution de la spongieuse (*Lymantria dispar* [L.]) pourrait en progressant vers le nord atteindre le Sud du Québec, le dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae* [Hopk.]) pourrait s'étendre sur toute la forêt boréale de l'Ouest canadien jusqu'au Québec et aux Maritimes, alors que le longicorne asiatique (*Anoplophora glabripennis* [Motschulsky]) pourrait envahir les érables, les ormes et les bouleaux du Sud-Est du Canada (Carroll *et al.*, 2003 ; Gray, 2004 ; Peterson et Scachetti-Pereira, 2004).

Le réchauffement climatique pourrait aussi accroître la fréquence des feux de forêt dans plusieurs écosystèmes en raison notamment de l'allongement de la saison de croissance et d'une augmentation de l'occurrence de la foudre (Wotton et Flannigan, 1993). Plusieurs observations démontrent déjà une recrudescence des épisodes d'incendies extrêmes en lien avec les récents changements climatiques (Podur *et al.*, 2002 ; Gillett *et al.*, 2004). Dans un scénario de triplement de la teneur atmosphérique en CO₂, Flannigan *et al.* (2005) estiment que d'ici la fin du siècle, la superficie de forêt brûlée annuellement au Canada pourrait doubler. Au Québec, la modification de la fréquence des feux pourrait être assez variable, selon la région géographique : ainsi, elle pourrait augmenter dans le Nord du Québec, alors qu'elle resterait inchangée ou diminuerait dans l'Ouest et le Sud (Bergeron *et al.*, 2004).

Les modèles actuels projettent une augmentation des événements météorologiques extrêmes (précipitation intenses, vents violents, ouragans, tempêtes de verglas) en Amérique du Nord, bien qu'une certaine incertitude persiste (Field *et al.*, 2007). Une hausse de la fréquence de ces événements pourrait modifier la dynamique des populations et des communautés ainsi qu'altérer les processus de l'écosystème forestier (Williamson *et al.*, 2009).

Finalement, le réchauffement climatique pourrait perturber la dynamique de gel du sol forestier. La diminution de l'épaisseur du couvert nival, sa discontinuité ou sa fonte précoce exposerait davantage le sol au gel, entraînant potentiellement des dommages importants aux racines, ce qui nuirait à la croissance des arbres (Boutin et Robitaille, 1995). La réduction du couvert de neige et la diminution de la durée de l'hiver pourraient également influencer sur les activités forestières et leur planification, notamment par une réduction de la période d'accès aux sites pendant l'hiver, une hausse du potentiel de dégradation du terrain et une augmentation des fluctuations saisonnières des emplois.

La production de sirop d'érable

Le Québec est le plus grand producteur mondial de sirop d'érable, et cette activité rapporte plus de 200 millions de dollars bruts aux nombreux producteurs québécois. On sait depuis longtemps que la quantité de sève produite par chaque érable à sucre à la coulée printanière est directement influencée par les conditions climatiques. Une succession de jours pendant lesquels la température descend sous zéro la nuit et passe au-dessus de zéro le jour offre des conditions idéales et il peut être relativement facile, pour un endroit donné, de relier quantitativement la production journalière de sève au climat.

Jusqu'à tout récemment, on ne disposait pas d'un modèle permettant de relier la production annuelle québécoise de sirop d'érable au climat. Il existe maintenant un modèle qui prédit 84 % de la variabilité dans la production annuelle (exprimée par arbre entaillé) à partir de 4 variables mensuelles. À partir de ce modèle, Duchesne *et al.* (2009) ont utilisé des scénarios climatiques provenant de plusieurs modèles climatiques globaux pour estimer les effets du réchauffement climatique sur la production de sirop.



Les résultats suggèrent que la production pourrait diminuer en moyenne de 15 % et 22 %, en 2050 et 2090 respectivement. Des mois d'avril de plus en plus chauds sont responsables de la majeure partie de ces diminutions dans le futur. Il est possible par contre que les pertes escomptées soient moins grandes si l'érable à sucre peut s'adapter pour devancer la période de production maximale de sève de 12 et 19 jours respectivement en 2050 et 2090. Or, il existe déjà une variation importante dans les dates de coulées d'une année à l'autre, ce qui suggère une certaine adaptabilité de l'érable à sucre, mais cette variabilité est présentement mal documentée. Une meilleure quantification de la variabilité intra- et interannuelle nous permettra d'améliorer notre compréhension des effets des changements climatiques sur la production de sirop d'érable.

Les stratégies d'adaptation

Comme les écosystèmes forestiers seront vraisemblablement très affectés par les changements climatiques, il est nécessaire d'adapter la gestion forestière afin de réduire la vulnérabilité de la forêt et de maintenir la viabilité des activités forestières. Les mécanismes d'adaptation permettront entre autres de :

- 1) tirer profit des nouvelles possibilités ;
- 2) réduire les impacts potentiellement négatifs des changements climatiques ;
- 3) réduire les risques associés aux changements climatiques (Williamson et al., 2009).

Les stratégies d'adaptation et d'acclimatation devront comprendre des efforts de sensibilisation, de surveillance et d'aménagement de la forêt. Plusieurs actions peuvent être envisagées afin de limiter les effets des changements climatiques. Ainsi, la prise en considération de ces effets dans la planification stratégique de l'aménagement forestier pourrait permettre de minimiser la propagation du feu ainsi que la prolifération d'insectes et de maladies. La détermination du potentiel forestier devra également tenir compte de l'impact des changements climatiques sur la productivité des différentes espèces exploitées.

Une autre option d'adaptation serait de faciliter la migration des forêts par la plantation d'espèces et de génotypes mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques ainsi que de limiter la fragmentation des habitats (Spittlehouse et Stewart, 2004). Un autre exemple concret serait d'adapter les opérations forestières aux conditions changeantes, en modifiant les infrastructures et la machinerie.

Conclusion

En résumé, les changements climatiques affecteront la productivité et la composition des forêts. Les recherches ne permettent pas à ce jour de déterminer avec certitude l'impact net sur la productivité forestière, bien qu'à moyen terme celui-ci puisse être positif. La fréquence et l'intensité des perturbations naturelles, la prolifération d'agents pathogènes et d'insectes ravageurs, ainsi que la fréquence d'événements climatiques extrêmes pourraient s'accroître. Étant donné la sensibilité des forêts aux changements climatiques et l'importance socioéconomique du domaine forestier au Québec, il est impératif d'élaborer et d'appliquer des stratégies d'adaptation afin de réduire les impacts négatifs des changements climatiques.

L'agriculture

Les activités agricoles au Québec se concentrent essentiellement dans le Sud, région propice à l'agriculture grâce à son climat et à ses terres fertiles, notamment dans les régions centrales (Montérégie, Chaudière-Appalaches et Centre-du-Québec) où sont réalisés plus de 58 % des revenus agricoles en provenance du marché (MAPAQ, 2008a). Les superficies cultivées, qui atteignaient 2,5 millions d'hectares en 1931, ont diminué pour atteindre 1,6 million d'hectares en 1991. Elles ont recommencé à augmenter depuis, avec 1,9 million d'hectares en culture au Québec en 2006 (voir le tableau 6). En même temps, à l'instar de la plupart des pays développés, le nombre de fermes a chuté considérablement, entraînant une augmentation de la superficie en culture par ferme (Statistique Canada, 2007).

En 2006, l'industrie agricole atteignait un produit intérieur brut (PIB) de 2 840 millions de dollars et procurait plus de 60 562 emplois. Les produits animaux et le bétail représentaient près de 68 % des recettes agricoles, avec les produits laitiers qui à eux seuls en constituaient 30 %. Les légumes, le maïs, les produits de l'industrie horticole et des pépinières, les produits de l'érable, la pomme de terre et le soya constituaient les principales productions végétales et comptaient pour plus de 74 % des recettes provenant des cultures (MAPAQ, 2008b).

Le climat et l'agriculture

Le climat est avec la nature et la qualité des sols l'un des éléments déterminants des activités agricoles pouvant être exercées. Le climat ainsi que les sols influencent surtout les cultures mais ont aussi leur importance pour l'élevage, entre autres par le biais des ressources d'alimentation.

La longueur de la saison de croissance des cultures et le cumul de chaleur pendant cette saison constituent des facteurs agroclimatiques fondamentaux qui conditionnent le choix des cultures et les rendements. Les hybrides et les variétés cultivés sont sélectionnés en fonction du cumul de chaleur généralement observé dans une région donnée. Plus le cumul de chaleur pendant la saison de croissance est élevé, plus le potentiel de rendement est grand.

Les conditions climatiques relativement fraîches et humides des régions agricoles du Québec sont favorables aux plantes fourragères et aux petites céréales (blé, orge, avoine, seigle), ce qui explique en partie l'importance de la production laitière dans l'agriculture québécoise. Pour les cultures plus exigeantes en chaleur, telles que le maïs et le soya, les superficies dédiées sont concentrées dans les régions plus au sud du Québec. Notons que la productivité des cultures dont les besoins en chaleur sont importants est généralement supérieure à celle des cultures mieux adaptées aux climats frais.

Selon Yagouti *et al.* (2008), les degrés-jours de croissance au-dessus de 5 °C (une mesure du cumul de chaleur pendant la saison de croissance) ont augmenté de façon statistiquement significative à 38 des 53 stations étudiées entre 1960 et 2005 dans le Québec méridional, rendant la saison plus favorable à la majorité des cultures. Par contre, il n'y a pas de tendance observable dans la longueur de la saison de croissance, cette dernière ayant diminué dans le tiers des cas et augmenté dans les autres mais, dans les deux cas, sans être statistiquement significative.

La variabilité interannuelle climatique peut indiquer l'état de la sensibilité du secteur agricole par rapport aux conditions climatiques. Par exemple, dans la période s'étendant de 1987 à 2001 (voir la figure 27), la plus importante baisse de rendement du maïs a eu lieu en 2000, année marquée par une humidité excessive et un ensoleillement insuffisant pour en favoriser la croissance (Environnement Canada, 2002). En conséquence, il y a eu un niveau record des indemnités versées par les assurances-récoltes pour le maïs, soit 97 millions de dollars en 2000, contre 191 000 \$ en 1999 (La Financière agricole du Québec, 2006). Dans la même période, les sous-régions ont aussi montré des différences quant aux impacts de la variabilité climatique, en raison des différents environnements biophysiques : type de sol, topographie, température (Bryant *et al.*, 2005).

Tableau 6 : Superficie en culture et nombre de fermes au Québec, de 1931 à 2006 (Statistique Canada, 2007).

	1931	1951	1971	1981	1991	2001	2006
Superficie (x 1000 ha)	2 485	2 484	1 755	1 756	1 638	1 850	1 933
Fermes ¹	135 957	134 336	57 549	42 646	31 160	26 036	23 967
Superficie par ferme (ha) ¹	18	17	30	41	53	71	81

¹ Fermes déclarant des superficies en culture pour la période de 1971 à 2006, toutes les fermes pour la période de 1931 à 1951

Les impacts potentiels

Au Québec, la production agricole est limitée surtout par une saison de croissance courte et un cumul de chaleur restreint. Les scénarios climatiques des prochaines décennies indiquent que les conditions climatiques pourraient être plus favorables à plusieurs cultures. À l'inverse, ces mêmes conditions climatiques peuvent aggraver la pression des ennemis des cultures et les risques d'érosion des sols. De plus, l'augmentation de la concentration atmosphérique du CO₂ influe directement sur la croissance des cultures en augmentant la photosynthèse nette (Long *et al.*, 2006) et peut aussi affecter le ratio feuille/racine des plantes (Ziska et McClung, 2008). L'effet net, soit positif soit négatif, dépendra des interactions complexes et parfois imprévisibles de tous ces facteurs et pourrait se traduire par des gains ou des pertes de revenus selon les cultures, l'intensité et la rapidité des changements ainsi que, bien entendu, la réaction des agriculteurs.

Les températures

Pour des cultures qui profitent de la chaleur estivale et d'une longue saison de croissance (comme le maïs et le soya), on prévoit une augmentation importante du potentiel agronomique pour les années à venir (Bootsma *et al.*, 2004, 2005a et 2005b). Leur culture pourrait s'étendre dans de nouvelles régions où les sols et la topographie se prêtent à leur culture, par exemple le Saguenay-Lac-Saint-Jean, l'Abitibi et le Bas-Saint-Laurent-Gaspésie. Selon les mêmes études, les rendements des petites céréales seraient, toutefois, moins favorisés par les changements climatiques. Quant aux plantes fourragères, le nombre de récoltes par saison pourrait augmenter (Bélanger, 2002), mais la qualité nutritive en être diminuée (Gitz *et al.*, 2006).

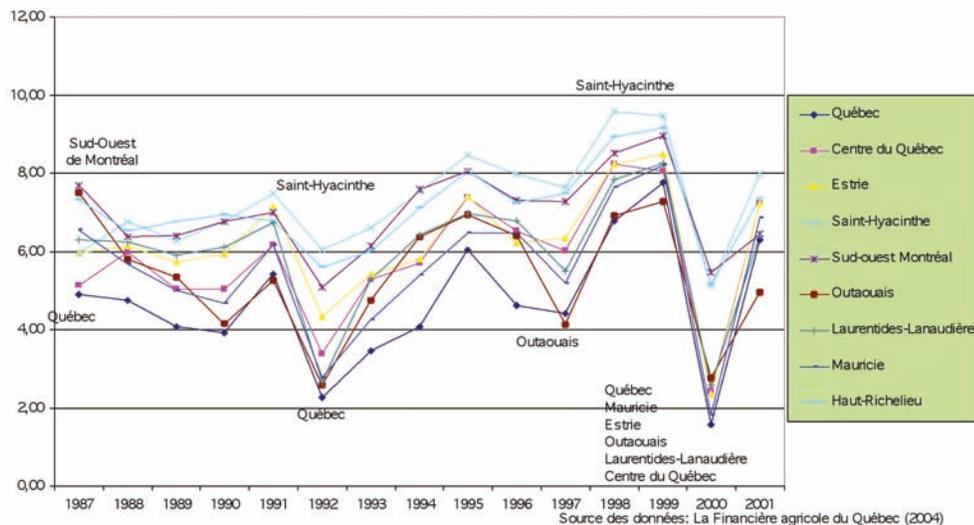
Les conditions climatiques en dehors de la saison de croissance auront aussi des répercussions sur l'agriculture, notamment sur les plantes pérennes. Pour les plantes fourragères, dont les superficies représentaient environ 40 % des hectares cultivés en 2007 (ISQ et MAPAQ, 2009), des automnes plus chauds, une diminution de la couverture de neige et une hausse des pluies hivernales augmenteraient les risques de mortalité en hiver (Bélanger *et al.*, 2002). Dans la région actuelle de la pomiculture commerciale au Québec, les pommiers seraient exposés à un risque moindre de froids intenses en hiver, tandis que le risque de gel printanier des bourgeons demeurerait inchangé (Rochette *et al.*, 2004 ; Lease *et al.*, 2009).

Les précipitations

Étant donné que la plupart des scénarios climatiques pour le Sud du Québec n'indiquent pas d'augmentation significative des précipitations pendant la saison de croissance, il existe une probabilité accrue de stress hydrique due à l'augmentation de l'évapotranspiration occasionnée par les températures plus élevées. Puisque l'efficacité de l'utilisation d'eau par les plantes augmente sous une atmosphère enrichie en CO₂ (Bunce, 2004), l'évaluation des impacts combinés de ces différents facteurs sur la productivité des cultures est incertaine.

Par ailleurs, les excès d'eau sont aussi dévastateurs en agriculture, et les changements climatiques pourraient augmenter la probabilité de ces événements. À part leur impact direct sur les cultures, les précipitations ont une grande influence sur le ruissellement, l'érosion des sols et la qualité de l'eau. Des questions non seulement sur les apports en eau, mais également sur les changements d'intensité et sur le ratio pluie/neige des précipitations sont donc à considérer (Nearing *et al.*, 2004). En effet, la fonte des neiges au printemps est une période particulièrement propice à l'érosion des sols et aux pertes d'éléments nutritifs (Beaudet *et al.*, 2008).

Figure 27 : L'évolution des rendements du maïs-grain tels qu'ils ont été rapportés par les agriculteurs dans leurs déclarations pour des indemnités, 1987-2001, pour les différentes régions agricoles du Québec (Bryant *et al.*, 2007).



Toutefois, la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique est aussi fonction de l'occupation agricole du territoire. Dans une étude de modélisation historique du bassin versant de la rivière Chaudière (Savary *et al.*, 2009), on voit que la lame d'eau annuelle, la charge en sédiments et le débit d'étiage à l'exutoire du bassin versant ont été fortement influencés par l'évolution de la superficie agricole. Dans l'étude de Quilbé *et al.* (2008b), on note que les incertitudes liées aux scénarios climatiques ne permettaient pas d'évaluer l'impact des différents scénarios de l'utilisation du territoire sur les différents paramètres hydrologiques étudiés.

On sait que les choix de gestion des producteurs agricoles peuvent augmenter les risques d'érosion appréhendés, dans le cas d'un accroissement des superficies en culture laissant le sol exposé à l'érosion. En revanche, ces risques peuvent être atténués par une amélioration des pratiques de conservation des sols et par la gestion des ressources en eau.

Les autres facteurs de stress

Les changements climatiques risquent d'accroître les stress hydriques et thermiques qui menacent toujours les cultures et plus particulièrement les productions horticoles. La combinaison simultanée ou successive de différents stress climatiques cause des dommages immédiats aux cultures ou encore les rend plus vulnérables aux maladies. Plus précisément, quand les températures changent radicalement et trop rapidement, les plantes ne peuvent s'acclimater au même rythme, et l'on observe des problèmes d'insolation tels que brûlures et chancres au collet sur les carottes, laitues, radis et bon nombre d'autres plantes maraîchères. On relève également des cas d'asphyxie racinaire dans la pomme de terre, le maïs et le soja qui proviennent d'épisodes de précipitations abondantes qui, en laissant plusieurs centimètres d'eau dans les baissières, créent des conditions asphyxiantes aux racines. Dans ces circonstances, les délais pour le drainage de l'eau excédentaire des champs permettent l'entrée des champignons secondaires.

Des modifications des populations d'agents pathogènes et d'insectes sont inéluctables, ces derniers étant étroitement affectés par la température et l'humidité. Une évaluation de l'ampleur des impacts de ces éléments demeure toujours difficile. Cette lacune est due aux différences parfois importantes entre les scénarios climatiques, aux réponses non linéaires des systèmes biologiques aux paramètres environnementaux et à la capacité non prévisible des organismes de s'adapter génétiquement aux nouvelles conditions environnementales (Scherer, 2004). L'efficacité des traitements de contrôle des mauvaises herbes peut diminuer, en partie à cause de l'effet direct d'une augmentation de la concentration atmosphérique du CO₂ sur la croissance des racines des mauvaises herbes (Ziska et Goins, 2006).

Les changements climatiques auront des conséquences aussi sur les productions animales qui dominent l'agriculture au Québec. Le danger que peuvent poser les vagues de chaleur a été mis en évidence en juillet 2002 quand au moins 500 000 volailles ont péri, malgré les systèmes de ventilation modernes. À l'opposé, des conditions hivernales moins rudes pourraient avoir pour effets un plus grand gain de poids chez les bovins de boucherie élevés en plein air et une réduction des besoins en chauffage des poulaillers et des porcheries.



Les facteurs socioéconomiques

Tracer un portrait intégré des impacts potentiels des changements climatiques sur le secteur agricole exige que l'on tienne compte de la situation décisionnelle des producteurs (Wall *et al.*, 2004). Le projet européen *Assessing climate change effects on land use and ecosystems* (ACCELERATES) (Rounsevell *et al.*, 2006) visait justement à intégrer divers modèles biophysiques avec des modèles socio-économiques afin d'évaluer la sensibilité future des agroécosystèmes européens. Il a permis de conclure que les impacts les plus importants sont liés aux scénarios socio-économiques plutôt que climatiques. L'incertitude inhérente à ces scénarios empêche de tirer des conclusions claires quant à l'avenir de l'agriculture.

De nombreux autres facteurs influencent les activités agricoles, dont l'évolution des marchés domestiques et internationaux liée aux accords commerciaux, l'action des gouvernements et leurs programmes d'appui au revenu agricole, l'évolution des technologies, la capacité de gestion des entreprises, l'accès au financement, la réglementation en matière d'environnement. En particulier, il faudra tenir compte des impacts des changements climatiques sur l'agriculture hors Québec, qui provoqueront des changements dans les marchés mondiaux des produits agricoles potentiellement aussi importants que les impacts directs sur la production québécoise.

Les stratégies d'adaptation

Les impacts décrits dans les paragraphes précédents pourront dans une large mesure être atténués par les exploitants agricoles à l'aide de technologies et de pratiques déjà utilisées dans des régions connaissant à l'heure actuelle les conditions climatiques attendues au Québec. La capacité des agriculteurs à s'adapter, avec le soutien des institutions, déterminera le degré de réduction ou d'augmentation de la productivité agricole qu'entraîneront les changements climatiques. Or, le milieu agricole a déjà démontré à maintes reprises sa grande capacité d'adaptation au changement, en particulier dans les conditions climatiques.

Les entreprises agricoles

Sur le terrain, les producteurs estiment posséder les outils et les moyens leur permettant d'adapter la gestion de leurs entreprises aux changements climatiques, du moins à moyen terme (André et Bryant, 2001 ; Bryant *et al.*, 2007). Les dates des semis et des récoltes peuvent être adaptées à l'évolution de la saison de croissance. Comme le démontre l'étude de Smit *et al.* (1997) qui a constaté que les producteurs agricoles tiennent compte des conditions climatiques de l'année précédente dans leur choix des hybrides de maïs. Les producteurs choisiront aussi des cultivars plus productifs actuellement utilisés dans les régions plus au sud. Bien que la diversification des cultures soit souvent considérée comme une stratégie de gestion des risques accrus liés aux changements climatiques, elle s'inscrit à contre-courant d'une forte tendance de spécialisation, comme le démontrent Bradshaw *et al.* (2004), qui ont conclu qu'en dépit de la diversification régionale accrue de l'agriculture des prairies canadiennes après 1994, les fermes elles-mêmes se sont spécialisées davantage.

Certaines pratiques agricoles, telles que l'établissement de bandes riveraines, la gestion des résidus au champ ainsi que les dates et les méthodes d'application des engrais, ont été élaborées afin de favoriser la production tout en respectant l'environnement. Ces pratiques seraient à réévaluer et à renforcer si l'intensité des précipitations augmentait. D'ailleurs, une saison de croissance plus longue pourrait favoriser l'établissement des cultures de couverture qui protègent le sol contre les effets de l'érosion et le lessivage des éléments nutritifs après la récolte de la culture principale.





Photo : Marc Lajoie, MAPAQ

En réponse à une disponibilité d'eau plus restreinte, une amélioration de la gestion de l'eau devient primordiale. Déjà, plusieurs projets de micro-irrigation se déroulent dans les champs de culture horticole. Cette méthode permet d'utiliser la ressource hydrique plus efficacement et représente un gain pour l'environnement.

Dans le cas des élevages, certaines recommandations sont susceptibles d'aider les producteurs à prendre soin des animaux dans les périodes de chaleur afin de diminuer leur stress (Blanchard et Pouliot, 2003). Elles portent sur la densité des animaux à l'intérieur des bâtiments, sur leur alimentation et sur la ventilation et la brumisation des bâtiments. Les élevages en plein air bénéficieraient de plus d'abris et d'abreuvoirs en été.

Du côté des institutions

Plusieurs programmes et règlements fixent les normes relatives aux pratiques agricoles. Ces règles ont toutes un lien avec les conditions climatiques attendues et concernent la contenance des ouvrages de stockage des fumiers, les dates limites pour l'ensemencement, la récolte des cultures et l'épandage des fumiers. Au moment d'une révision de ces normes, il serait opportun de tenir compte de l'évolution climatique afin de favoriser une adaptation appropriée des pratiques par les producteurs.

Grâce à l'appui des ressources gouvernementales, certaines pertes liées aux conditions climatiques problématiques peuvent être prévenues et atténuées. Ainsi, le Réseau d'avertissements phytosanitaires renseigne les producteurs sur la présence et l'évolution des ennemis des cultures ainsi que sur les stratégies d'intervention les plus appropriées, s'appuyant sur les prévisions des modèles mathématiques établis à partir de données climatiques. Bourgeois *et al.* (2004) ont souligné que l'évolution climatique nécessiterait que ces modèles soient révisés de manière à tenir compte des réponses non linéaires aux températures plus élevées. Il en va de même pour la question de l'eau, qui demande une planification et une coordination des activités au niveau régional. À cet égard, de nombreuses initiatives en ce qui concerne les bassins versants sont en cours pour encourager des pratiques favorisant une meilleure qualité de l'eau et la protection de la biodiversité en milieu rural.

Directement tributaire des conditions climatiques, le secteur agricole, c'est certain, aura à s'adapter à la nouvelle réalité climatique. Bon nombre de ces adaptations seront spontanées, surtout au sein des entreprises agricoles. Les diverses institutions du secteur agricole offrent un appui important aux producteurs face aux aléas climatiques. L'intégration de la question des changements climatiques dans leurs offres de services leur permettra d'encourager et de faciliter le processus d'adaptation aux changements climatiques dans le secteur agricole.

Les transports

Les transports sont essentiels à la vie de tous les jours. En assurant les déplacements des personnes et des biens nécessaires aux activités culturelles, sociales et économiques, ils constituent l'un des premiers moyens de communication. L'existence de systèmes de transport efficaces, fiables et sécuritaires représente un atout considérable pour l'économie du Québec, puisque leur efficacité est un élément important de productivité et de compétitivité tant pour les affaires internes que dans les échanges avec l'extérieur. Une interruption des transports, même momentanée, surtout en région éloignée, peut signifier entre autres des risques accrus pour la santé humaine, une diminution de la qualité de vie et des pertes économiques importantes pour les producteurs de biens et services tels que les productions agricoles ou les activités touristiques. Globalement, on estime que la demande finale en transport au Québec (c'est-à-dire l'ensemble des achats de biens et de services reliés au transport) représente 12 % de la valeur du produit intérieur brut.

Les impacts

Les modifications des moyennes de températures et de précipitations de même que de la fréquence et de la sévérité des événements climatiques extrêmes affecteront à la fois l'usage des moyens de transport et les infrastructures nécessaires à leur fonctionnement. Elles toucheront plus particulièrement le transport terrestre, mais aussi les transports maritime et aérien entre autres par leurs efforts sur les infrastructures.

Les transports terrestres

Sur le plan interne, les transports terrestres constituent la part la plus importante des activités de transport des personnes et des marchandises. À cet égard, le réseau routier joue le rôle principal, suivi du rail qui assure une bonne part du transport des marchandises.



Le réseau routier québécois comprend environ 185 000 km d'autoroutes, de routes nationales, de routes régionales, de rues et de chemins, dont plus de 20 000 km de routes principales qui sillonnent le vaste territoire et relient les diverses régions du Québec. On y compte aussi près de 12 000 ponts, tunnels, murs de soutènement, ponceaux et autres ouvrages d'art.

La viabilité hivernale

La conduite en hiver sur les routes du Québec représente un défi, en raison surtout des conditions difficiles et changeantes. Or, les tempêtes hivernales, bien que moins fréquentes, s'intensifieraient selon les projections faites pour l'hémisphère Nord (Cohen et Miller, 2001).

Dans leur *Analyse de simulations régionales du climat et d'indices climatiques associés au transport routier dans le Sud du Québec*, Brown et Chaumont (2009) concluent que, selon les scénarios climatiques, le climat hivernal de la période 2041-2070 serait plus chaud et plus humide avec une arrivée plus tardive de la période de gel et une arrivée plus hâtive de la période de dégel, ce qui entraînerait une diminution de la période de gel de 24 jours. Le nombre annuel d'événements de chutes de neige diminuerait alors que le nombre d'événements de pluies hivernales augmenterait, tout comme les événements de redoux. La quantité de précipitations par événement serait aussi en hausse d'environ 10 % et 20 % pour les chutes de neige et les pluies hivernales respectivement. La gestion des opérations de viabilité hivernale, qui couvre l'ensemble des mesures prises par les divers acteurs pour combattre ou s'adapter à la dégradation des conditions de circulation en hiver, deviendrait alors plus complexe, notamment en présence de mélange de plusieurs types de précipitations (pluie, neige, verglas, grésil).

La chaussée

Dans le Sud du Québec, les écarts de température peuvent atteindre 25 °C en quelques heures. Pendant plus de quatre mois, le sol gèle à des profondeurs de 1,2 m à 3,0 m, et les précipitations peuvent atteindre jusqu'à 1 000 mm par an (MTQ, 2006b). Au printemps, après avoir résisté à la déformation due au gel profond, la route doit être en mesure de supporter des charges importantes, alors que la résistance de la chaussée est réduite de 40 % (Frigon, 2003). Or, les scénarios dérivés des modèles climatiques laissent présager une augmentation de l'incidence des épisodes de redoux (MDDEP, 2006c). Les cycles de gel-dégel, la profondeur du gel et une présence accrue d'eau sur la chaussée accentuent certains phénomènes de dégradation des revêtements ; ces nouvelles conditions climatiques ont une incidence sur l'état des chaussées et, par conséquent, sur les coûts d'entretien.

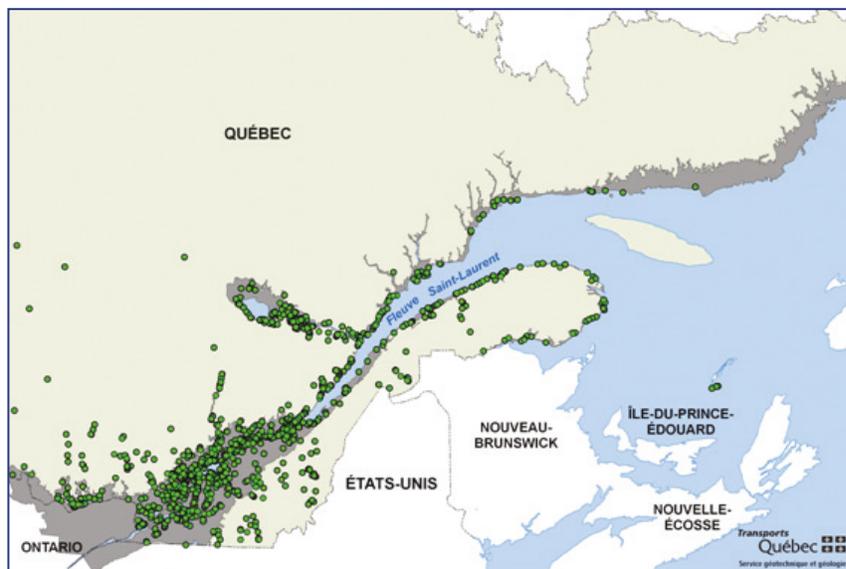


Figure 28 : Inventaire des demandes d'intervention pour des glissements de terrain au Québec, entre 1972 et 2005 (carte fournie par le MTQ, communication personnelle). La zone en gris foncé montre les limites de l'invasion marine postglaciaire à dépôts argileux.

Les glissements de terrain au Québec

Au Québec, des centaines de glissements de terrain se produisent chaque année et la plupart surviennent dans des sols argileux (voir la figure 28). Il est connu que l'infiltration de l'eau dans les sols, à la suite de la fonte des neiges printanière ou au moment des précipitations, est l'une des deux causes principales de déclenchement de glissements de terrain, l'autre étant l'érosion progressive des berges à cause de cours d'eau ou d'interventions humaines déstabilisantes. Or, les événements météorologiques extrêmes prennent souvent la forme de fortes quantités de pluie, causant fréquemment des crues importantes. Les nombreux glissements de terrain qui surviennent au printemps ou à l'occasion d'événements exceptionnels — comme les pluies diluviennes de juillet 1996 au Saguenay–Lac-Saint-Jean, où plus de 1 000 glissements de terrain ont eu lieu en moins de 36 heures (MTQ, 2000) — en sont la preuve.

Les glissements de terrain

La majeure partie du Québec habité se trouve sur des sols argileux propices aux glissements de terrain (voir l'encadré), et toute hausse du nombre des glissements aurait des conséquences importantes sur la sécurité des personnes et des biens. Bien que les connaissances sur les liens entre le climat et la géologie du Sud du Québec soient limitées, il est à craindre qu'une augmentation des précipitations intenses attribuable aux changements climatiques ne se traduise par une augmentation encore plus importante du nombre de glissements de terrain et de ruptures du réseau routier.

Les transports maritimes

Les transports maritimes jouent, pour leur part, un rôle essentiel dans le transport des marchandises et plus particulièrement dans l'approvisionnement des communautés côtières du golfe du Saint-Laurent et du Nunavik ainsi que dans les échanges internationaux.

En ce qui concerne les conditions d'approvisionnement des communautés côtières du golfe et du Nunavik, on peut raisonnablement prévoir un allongement important de la saison de navigation qui les rendra plus faciles et moins coûteuses. Il est possible cependant que la diminution du couvert de glace rende les installations portuaires plus vulnérables, ce qui nécessiterait des modifications de leur conception.

L'une des inquiétudes principales, suscitées par les changements climatiques dans le domaine des transports est liée à la baisse appréhendée des niveaux d'eau du Saint-Laurent en lien avec la baisse des niveaux d'eau des Grands Lacs. D'Arcy *et al.* (2005) ont montré que les baisses des niveaux d'eau du Saint-Laurent pourraient atteindre 1 m sous le zéro des cartes à Montréal en 2050. Ces baisses diminueraient vers l'aval et ne seraient plus perceptibles à la hauteur de Bécancour. En raison de la très faible marge entre le fond du chenal maritime dans le fleuve et la coque des navires, cette baisse des niveaux pourrait se traduire par l'obligation de réduire à court terme le tonnage des cargaisons. Une telle réduction aurait des conséquences économiques importantes en affectant la compétitivité du trafic maritime sur le fleuve par rapport à d'autres routes maritimes.

À l'inverse, on pourrait assister sur le fleuve et dans le golfe à un allongement de la saison de navigation en eaux libres, ce qui entraînerait une réduction des dommages causés aux bateaux par les glaces et une baisse des risques d'accidents ainsi qu'un recours moins grand aux brise-glaces de la Garde côtière canadienne. De même, pour la partie de la voie maritime en amont de Montréal, la durée de la saison de navigation pourrait être allongée et les frais de brise-glace réduits (Miller, 2005).

Le transport aérien

En matière de transport aérien, les impacts potentiels touchent essentiellement aux infrastructures aéroportuaires en partie construites sur du pergélisol. Dans certains villages du Nunavik, certaines infrastructures aéroportuaires présentent déjà des déformations accélérées, causées par la fonte du pergélisol. Cette question est abordée plus en détail dans la partie de ce document consacrée au Nord.

L'adaptation

Les infrastructures de transport ont des durées de vie qui, dans bien des cas, rejoignent les horizons pour lesquels les impacts des changements climatiques commenceront à se faire sentir de façon nettement perceptible. Le bon fonctionnement de ces infrastructures exige donc de prendre en compte ces derniers pour pouvoir assurer leur viabilité à moyen et à long terme. C'est particulièrement vrai pour les infrastructures ayant une très longue durée de vie telles que les ponts, les tunnels, les canalisations et les voies ferrées ainsi que les bâtiments aéroportuaires et maritimes. À cet égard, l'évolution rapide des méthodes et des connaissances en matière de conception de chaussées et l'apparition de nouvelles technologies et de nouveaux produits ont incité le MTQ à adapter diverses technologies à la réalité québécoise et à concevoir et à mettre au point de nouveaux équipements d'auscultation.

Ces activités, réalisées en collaboration avec le milieu universitaire, font l'objet de rencontres et d'échanges techniques ainsi que de projets de recherche conjoints avec plusieurs pays, dont la France (Doré et Savard, 2006) et les États-Unis.

En ce qui a trait à la viabilité hivernale, plusieurs mesures ont déjà été mises en œuvre pour améliorer la gestion du réseau routier québécois et mieux gérer les événements météorologiques induits par un climat en changement. Ainsi, un système d'aide à la décision en viabilité hivernale (DVH-6024), basé sur les données recueillies par les stations équipées de capteurs météorologiques et routiers, a été mis en place par le MTQ en 1999 (Tanguay et Roussel, 2000).

De plus, le développement et l'appropriation des technologies liées à la météo routière se poursuivent, notamment en ce qui concerne l'instrumentation fixe et mobile déployée à l'échelle du territoire.

Pour ce qui est des impacts importants d'une baisse du niveau moyen du fleuve, tel que mentionné dans la section sur les ressources en eau, plusieurs mesures d'adaptation peuvent être envisagées dans le corridor fluvial du Saint-Laurent entre Montréal et le haut estuaire, en aval (D'Arcy *et al.*, 2005). Afin d'informer adéquatement la communauté maritime sur les profondeurs prévisibles dans le chenal de navigation, des efforts accrus de suivi et de prévision des niveaux d'eau le long du Saint-Laurent pourraient être entrepris. La Commission mixte internationale des eaux du système Grands Lacs–Saint-Laurent pourrait aussi intervenir en permettant la modulation des débits sortants du lac Ontario en fonction des besoins de la navigation commerciale.

Parmi les moyens d'adaptation aux profondeurs plus faibles, on trouve la réduction des tonnages transportés, l'utilisation accrue de bateaux à plus faible tirant d'eau, et la réduction de la vitesse de circulation des navires pour minimiser l'effet de squat. Des surcreusements supplémentaires sur certaines portions du chenal de navigation pourraient être nécessaires afin de respecter les dégagements sous quille prescrits. Pour faire face à des variations à la baisse encore plus importantes, on peut penser à des travaux plus coûteux en vue de la réfection d'infrastructures existantes comme les réservoirs du delta de Sorel, de la reconfiguration d'aménagements portuaires et éventuellement de la mise en place de sections d'étranglement ou de structures mobiles afin d'accroître artificiellement les profondeurs disponibles dans le chenal de navigation.

Le tourisme et les loisirs

Sur les plans de l'économie et de l'emploi, les activités de tourisme et de loisir comptent sans aucun doute parmi les plus importantes activités économiques potentiellement touchées par les changements climatiques — les recettes touristiques dépassent les 10 milliards de dollars annuellement. En effet, le climat est un facteur déterminant des activités touristiques, sportives et de plein air, soit directement (soleil, beau temps, neige et glace), soit indirectement (paysages et végétation). Il conditionne, par exemple, la nature et la durée des activités liées à la neige et au froid (ski, motoneige), à l'eau (baignade, activités nautiques) ou encore à la couleur automnale des feuilles (randonnée), tout comme il influence les conditions de vie du gibier (chasse) ou du poisson (pêche). Il peut même influencer le nombre et la durée des séjours culturels. Malgré cette importance du climat pour le tourisme et les loisirs, les connaissances au sujet de ses impacts sur ce secteur et des capacités d'adaptation de ce dernier à la variabilité climatique demeurent limitées (Scott et Jones, 2006).

Les impacts appréhendés

Parmi les activités touristiques, seules les industries du ski et du golf ont fait l'objet d'études à ce jour et le ski est de loin l'industrie qui a été la mieux analysée. À cet égard, il peut être utile de rappeler que le Québec représente le plus grand marché régional du ski au Canada avec 80 stations, 37 % du marché national et près de 7 millions de visiteurs annuellement. De ceux-ci, environ 80 % proviennent du Québec, 11 % de l'Ontario, 6 % des États-Unis, 2 % d'outre-mer et 1 % des Maritimes (Archambault, 2008).



L'impact économique annuel total de l'industrie du ski au Québec est évalué à quelque 600 millions de dollars incluant, entre autres, les dépenses relatives à l'achat de l'équipement et des vêtements, au transport, à l'hébergement, à la restauration et à l'acquiescement de droits pour pratiquer l'activité. Au Québec, un total de 32 500 emplois sont associés à l'industrie du ski (Archambault, 2008).

Selon Singh *et al.* (2006) et Scott *et al.* (2007), l'industrie québécoise du ski devra vraisemblablement s'adapter à des conditions climatiques plus difficiles au cours des prochaines décennies. Les régions du Sud du Québec (Montréal, Estrie) verraient s'accroître des conditions douces et pluvieuses qui raccourciront la saison de ski. Certaines des périodes les plus rentables (Noël, Pâques, la semaine de relâche scolaire) pourraient aussi être touchées. Un réchauffement (moins de froid et de vent) aurait néanmoins pour effet d'augmenter le nombre de journées skiabiles et la fréquentation des pistes, surtout en janvier et en février.

Une étude plus récente (Scott et McBoyle, 2007) portant sur trois régions de ski (Québec, Sherbrooke et les Laurentides) a été réalisée en incorporant les capacités de fabrication de neige artificielle et une modélisation des décisions d'adaptation des propriétaires de centres de ski. Selon cette étude, comme on le voit au tableau 7, on estime que la saison de ski pourrait, dans un scénario de climat optimiste, n'être que très peu écourtée à l'horizon 2020 alors que, dans un scénario plus chaud ou pessimiste, elle serait amputée de 13 % à 15 % des jours skiabiles.

Tableau 7 : Changements en pourcentage de la durée de saison de ski, selon deux scénarios climatiques aux horizons 2020 et 2050, pour trois régions touristiques (tiré de Scott *et al.*, 2007).

Régions	Moyenne de référence des années 1970 en jours skiabiles	Scénarios climatiques	Changements (%) par rapport à la moyenne de référence des années 1970	
			2020	2050
Québec	160	NCARPCM-B2	-1	-5
		CCSRNIES-A1	-13	-34
Sherbrooke	152	NCARPCM-B2	-2	-7
		CCSRNIES-A1	-15	-39
Sainte-Agathe-des-Monts	163	NCARPCM-B2	0	-4
		CCSRNIES-A1	-13	-32

À l'horizon 2050 cependant, si les changements demeurent mineurs dans les trois régions étudiées selon un scénario optimiste, il pourrait y avoir, selon un scénario pessimiste, une réduction de plus de 30 % de la saison de ski pour chacune des trois régions. L'impact sur les revenus serait néanmoins nettement inférieur à ces pourcentages, car ce sont surtout les journées de ski de début et de fin de saison qui seraient perdues et non pas les jours d'opération essentiels à la rentabilité des stations (fêtes de fin d'année, mi-saison et relâche scolaire).

Ces résultats relativement rassurants supposent cependant, dans un scénario pessimiste, une augmentation de la fabrication de neige de 8 % à 24 % à Québec et de 25 % à 59 % à Sherbrooke dès 2020, et plus du double en 2050 pour les trois régions. En conséquence, les coûts de fabrication de la neige artificielle, malgré le fait que les installations nécessaires soient déjà en place, risquent d'augmenter et ainsi nuire à la rentabilité des centres de ski. Des problèmes sont également à craindre du côté de la disponibilité de l'eau nécessaire à la fabrication de la neige. Cela pourrait devenir un enjeu critique là où des prélèvements accrus, conjugués à une baisse possible des niveaux d'eau, provoqueraient ou amplifieraient des conflits d'usage (Singh *et al.*, 2006).

Sur le plan de la demande, le Québec qui conservera une large proportion de neige naturelle, pourrait être avantagé en raison de l'attrait de celle-ci et de la qualité de ski qu'elle assure, notamment dans les stations qui peuvent attirer une clientèle de l'extérieur. De plus, certaines régions concurrentes, au sud, devraient être davantage affectées par les changements climatiques. Il semble enfin que le climat puisse avoir un impact négatif sur la demande des sports d'hiver en raison de problèmes de perception (pluie en ville alors qu'il neige dans les stations de ski) ou encore en facilitant des activités de substitution (Hamilton *et al.*, 2007).



Des répercussions sérieuses sont à craindre sur d'autres activités hivernales, telles que la motoneige, le ski de randonnée et la raquette, où les moyens d'adaptation sont moins efficaces. Selon un scénario pessimiste, on a estimé (Scott *et al.*, 2002a ; Scott et Jones, 2006) que la réduction de la couverture de neige pourrait entraîner une réduction allant jusqu'à 50 % de la saison de motoneige dans plusieurs régions du Canada. Or, il s'agit d'une autre activité touristique aux retombées économiques majeures, notamment pour les régions ressources. Ici encore les impacts négatifs des changements climatiques pourraient être compensés par l'avantage concurrentiel accru sur les régions plus au sud.

La pêche sur glace présente aussi une grande vulnérabilité aux hausses des températures, qui entraînent une augmentation des risques pour la sécurité des pêcheurs. Enfin, des événements comme les festivals d'hiver seraient également touchés.

En été, 75 % de la fréquentation des terrains de golf s'étale de juillet à septembre. On estime que la saison du golf pourrait, dans un contexte de changements climatiques, être prolongée de deux à trois semaines (Singh *et al.*, 2006), essentiellement au début de la saison. L'occurrence de journées défavorables devrait cependant augmenter, avec une fréquence accrue de canicules et de journées de pluie, si une hausse des précipitations se confirme.

Les besoins accrus en irrigation découlant de l'augmentation de la chaleur représentent le principal défi pour les terrains de golf, dans la mesure où ils deviendraient problématiques et source de conflits d'usage dans le contexte d'une baisse des niveaux d'eau. Les variétés actuelles des gazons se détérioreraient plus rapidement pendant la saison estivale. Par ailleurs, les redoux hivernaux et les conditions climatiques futures favoriseraient les bactéries et autres agents pathogènes. La qualité de drainage des terrains de golf serait également touchée par l'intensité et la récurrence des précipitations, et leur entretien serait plus coûteux si l'augmentation de l'évapotranspiration devait résulter en un assèchement des terrains. Ces nouvelles contraintes climatiques seraient cruciales pour les exploitants, qui doivent également composer avec les normes environnementales liées à l'utilisation des produits d'entretien, auxquelles il faut se conformer (Singh *et al.*, 2006).

En ce qui a trait aux autres activités touristiques estivales, malgré le manque d'études, on peut présumer une augmentation des activités telles que les randonnées, la fréquentation des parcs, les activités récréatives nautiques et la navigation de plaisance (Jones et Scott, 2005 ; Scott *et al.*, 2002b). Plusieurs régions touristiques au climat plus froid seraient avantagées par un réchauffement des températures et, d'une façon générale, le Québec serait favorisé par rapport aux régions plus au sud, ce qui viendrait améliorer son bilan touristique. Les impacts négatifs proviendraient de l'accroissement des précipitations, des canicules ou de la dégradation de la qualité de l'eau, notamment en raison de la prolifération des cyanobactéries et d'autres espèces nuisibles (MDDEP, 2009a). La pêche serait perturbée, puisque les poissons sont sensibles même à de faibles variations de la température.

Les stratégies d'adaptation

L'adaptation de l'industrie touristique aux changements climatiques s'opérera à la fois par des changements dans la demande touristique et par des modifications de l'offre par les exploitants des installations touristiques. Du côté de la demande, on peut s'attendre à un déplacement des clientèles dans le temps et dans l'espace pour retrouver les conditions climatiques recherchées (Wietze et Tol, 2002). Du côté de l'offre, plusieurs stratégies peuvent être envisagées selon les différentes branches de l'industrie (Scott, 2005).

Face à une plus grande compétitivité des marchés, au renouvellement régulier des infrastructures et à la hausse des tarifs (coûts de fabrication de la neige artificielle, électricité, taxes foncières), de nombreux exploitants de stations de ski estiment que la meilleure stratégie d'adaptation consiste à mieux connaître les phénomènes climatiques futurs, pour mieux planifier leurs investissements et mieux satisfaire une clientèle toujours plus exigeante et plus sélective. Bénéficiant des progrès techniques constants, l'industrie du ski fait preuve d'une bonne capacité à s'adapter aux nouvelles habitudes de consommation, à la croissance de la concurrence, aux changements démographiques ou encore à l'accès à une information instantanée sur les prévisions climatiques qui joue un rôle croissant dans les choix d'activités.

Les solutions technologiques comprennent l'accroissement des capacités de fabrication de neige accompagné par l'aménagement de réservoirs d'eau, l'ouverture de nouvelles pistes mieux situées ou l'aménagement de pistes en pente plus douce avec couvert forestier, ou encore le ski d'intérieur.



Pour ce qui est des stratégies d'affaires qui s'offrent aux exploitants, il y a la définition de nouvelles vocations ou la diversification des activités des sites, la constitution de conglomerats interrégionaux, des efforts accrus de mise en marché, l'achat d'assurances climatiques ou encore, pour les gouvernements et les médias, le développement des prévisions météorologiques et une meilleure diffusion des conditions d'enneigement (Scott et McBoyle, 2007 ; Singh *et al.*, 2006). Pour le ski également, l'adaptation du côté de la demande se traduira par un déplacement des skieurs possiblement vers de nouvelles destinations, un achalandage de pointe accru dans les stations et sans doute une certaine baisse globale du nombre de visiteurs.

Pour l'industrie du golf, les stratégies d'adaptation portent surtout sur la gestion de l'eau, aussi bien en ce qui concerne les apports naturels que le drainage des terrains. La qualité des gazons, une exigence majeure de la part des clients, devra être mieux surveillée afin d'en éviter un dépérissement accru. L'allongement de la saison provoquerait une augmentation des revenus, d'autant plus si ceux-ci s'accompagnent de bénéfices tirés d'autres services comme la restauration ou l'hébergement.

Quant aux autres activités estivales, l'atténuation des impacts passe, par exemple, par l'aménagement d'un couvert végétal sur les berges pour la pêche sportive ou encore par la surveillance accrue de la qualité de l'eau des sites réservés à la baignade. Au sujet 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 l'attrait que celles-ci exercent l'une par rapport à l'autre dans les nouvelles conditions climatiques.

LA SANTÉ DES POPULATIONS

Les changements climatiques posent un défi pour la santé humaine. Leurs impacts sont soit directs (par exemple, mortalité due aux coups de chaleur), soit indirects (par exemple, recrudescence d'insectes pathogènes). Les paragraphes suivants décrivent ce que l'on sait des principaux impacts des changements climatiques sur la santé humaine, notamment ceux du réchauffement moyen, des vagues de chaleur et des îlots thermiques urbains, de la pollution atmosphérique, des feux de forêt ou de friche, des tempêtes estivales et hivernales ainsi que de l'exposition aux rayons ultraviolets (UV). On aborde ensuite les effets plus indirects sur la quantité et la qualité des ressources hydriques, les maladies zoonotiques et à transmission vectorielle, et enfin certains autres effets.

La deuxième partie de cette section porte sur les mesures d'adaptation pour chacune des sources de vulnérabilité énumérée précédemment. À cet égard, les populations montrent des degrés de vulnérabilité différents aux changements climatiques, ce qui complique l'instauration de ces mesures.

Les impacts et les sensibilités

Le réchauffement moyen

Au Québec, la hausse des températures moyennes pourrait, sans adaptation, entraîner une augmentation du taux annuel de mortalité (voir la figure 29). L'étude de Doyon *et al.* (2006, 2008) sur l'impact des changements climatiques sur la mortalité dans les villes de Montréal, Québec et Saguenay prévoit une hausse de la mortalité estivale de causes non traumatiques de l'ordre de 2 % à l'horizon 2020 et de 10 % à l'horizon 2080, selon le scénario A2 (GIEC, 2001a). Cette hausse ne serait pas entièrement compensée par une baisse de la mortalité en automne et en hiver. Donc, sur une base annuelle, la hausse du taux de mortalité serait de l'ordre de 0,5 % à l'horizon 2020 et de 3 % à l'horizon 2080, soit une augmentation de l'ordre de 150 décès vers 2020 et de 1 400 vers 2080 pour le Québec méridional au sud du 50^e parallèle ; ces excès n'incluent pas les décès supplémentaires pendant les canicules. L'intervalle de confiance à 95 % de ces chiffres montre cependant une grande étendue des valeurs possibles, qui varient aussi selon les scénarios climatiques. Cette augmentation toucherait la plupart des régions du Québec, à l'exception de la Côte-Nord et de la Gaspésie, avec une progression d'intensité de l'est vers l'ouest.

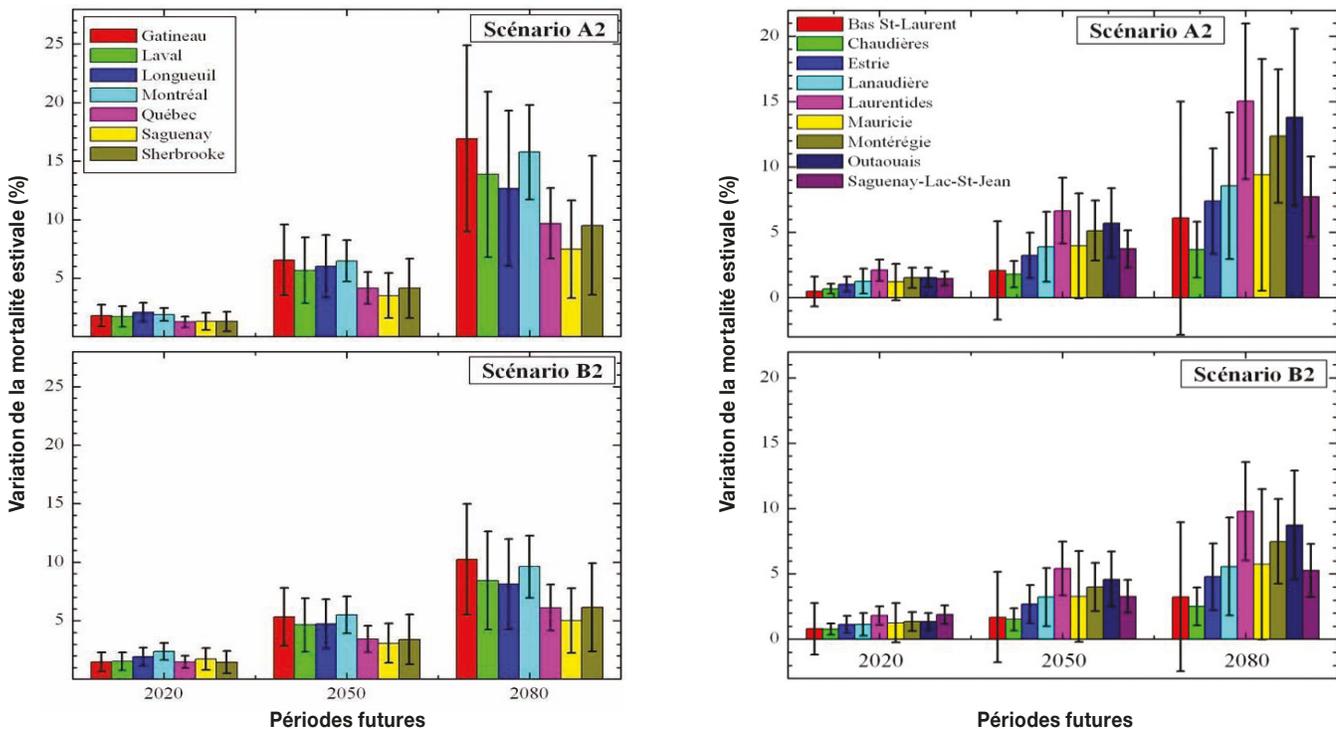


Figure 29 : Variation de la mortalité pendant l'été au Québec (villes et régions) selon divers scénarios (Doyon *et al.*, 2006.)

Ces conclusions sont similaires à celles présentées pour plusieurs villes des États-Unis par Kalkstein et Green (1997) qui estimaient le nombre de décès au cours des journées chaudes comme étant trois fois plus important qu'au cours des journées froides. Elles contredisent cependant celles de Keatinge *et al.* (2000), qui ont prévu une diminution annuelle nette de la mortalité au Royaume-Uni en raison d'une diminution de la mortalité pendant l'hiver, probablement en raison de l'adaptation au froid (chauffage abordable, isolation des logements).

Ces simulations ne considèrent ni le vieillissement de la population ni l'augmentation de la pollution atmosphérique qui peuvent élever substantiellement le taux de mortalité, ni les mesures d'adaptation qui peuvent le diminuer tout autant. Notons à cet égard qu'au Québec il y aura de plus en plus de gens âgés de 65 ans et plus, la proportion devant passer de 12 % en 2001 à environ 24 % en 2025 (ISQ, 2009), et que la mortalité pour ce groupe d'âge est de deux à trois fois plus importante que pour les personnes âgées entre 15 et 64 ans (Doyon *et al.*, 2006). D'autres aspects méthodologiques sont aussi avancés pour expliquer ces différences (Gosselin *et al.*, 2008).

Les vagues de chaleur et l'effet d'îlot thermique urbain

Des températures plus élevées, un humidex quotidien en hausse depuis les quatre dernières décennies à Montréal et à Québec ainsi que des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses représentent des risques importants pour la santé humaine (Environnement Canada, 2004a et 2004b). À ces événements, il faut ajouter l'effet d'îlot thermique urbain (EITU), généré par les recouvrements asphaltés et les matériaux des infrastructures et bâtiments qui absorbent la chaleur et rehaussent la température de l'air ambiant de 0,5 °C à 5,6 °C dans les milieux urbains (Oke, 1982). La chaleur peut provoquer de l'inconfort, allant d'une faiblesse aux troubles de la conscience, mais aussi des syncopes et des coups de chaleur pouvant s'avérer mortels (Besancenot, 2004). Indirectement, la chaleur peut également aggraver des pathologies chroniques, comme le diabète, l'insuffisance respiratoire et l'insuffisance rénale.

Les populations du Sud du pays sont plus sensibles à une fréquence accrue des épisodes de chaleur accablante, tandis que celles du Nord souffrent davantage d'une hausse des températures, n'y étant pas acclimatées (Santé Canada, 2005). Plusieurs études scientifiques (Commission de la santé et de la sécurité du travail, 2004 ; Direction de la santé publique de Montréal, 2004) ont fait mention de personnes à vulnérabilité accrue en fonction de caractéristiques environnementales (par exemple, logement, travail, accès aux lieux frais) ou individuelles (par exemple, maladie, handicap, âge).

Les études de Bélanger *et al.* (2006, 2007, 2008) ont jeté une lumière nouvelle sur la vulnérabilité de certains groupes à la chaleur. Elles ont mis en relief certains facteurs connus, et documenté de nouvelles associations pouvant aggraver l'impact des vagues de chaleur, notamment :

- 1) le fait de vivre seules pour les personnes âgées ;
- 2) la précarité économique ;
- 3) une mobilité restreinte ;
- 4) des problèmes neurologiques chroniques (épilepsie, sclérose en plaques) ;
- 5) un faible soutien social ;
- 6) le type de logement occupé (dont certains immeubles d'appartements) ;
- 7) le manque d'accès à des activités récréatives en périodes de canicule (tels que des lieux de baignade).

Le rapport entre les immeubles d'appartements comptant plusieurs étages et la hausse du taux de mortalité dans les épisodes de canicule a été établi par plusieurs chercheurs (Klinenberg, 2002 ; Dixsaut, 2005) et cette vulnérabilité a aussi été documentée dans les perceptions de la population pour l'ensemble du Québec (Bélanger *et al.*, 2006). Une étude menée à Montréal (Smargiassi *et al.*, 2009) suggère aussi que la mortalité estivale survenant à la maison ou dans un centre de soins prolongés augmente lorsque la bâtisse est localisée dans un îlot de chaleur urbain (tel que déterminé par des cartes satellitaires) ; cette augmentation était de l'ordre de 20 % quand on comparait les décès survenant les jours avec une température moyenne de 20 °C et ceux avec 26 °C, mais variait selon différents autres facteurs.

Une étude exploratoire réalisée dans la région de l'Estrie et traitant de l'usage de médicaments au cours d'épisodes de chaleur accablante a mis en évidence l'importance des mises en garde de la part des pharmaciens (Albert *et al.*, 2006). On y fait ressortir un fort pourcentage (30,2 %) de personnes âgées de 65 ans et plus prenant des médicaments dont l'effet peut être compromis par la déshydratation ou qui peuvent empêcher la perte calorique ou encore nuire à la fonction rénale.

Près de 5 % des personnes âgées avaient trois ordonnances ou plus de médicaments de ce type, à prendre simultanément. Les connaissances sur ce sujet demeurent restreintes, ce qui limite toute interprétation quant aux impacts possibles en lien avec le climat.

La pollution atmosphérique

Un deuxième ensemble d'impacts des changements climatiques sur la santé humaine est lié à l'incidence de l'augmentation des températures sur la pollution atmosphérique, notamment les pollens, l'ozone et les particules en suspension. Or, la population urbaine (80,4 % des Québécois) est particulièrement vulnérable aux problèmes de qualité de l'air, surtout dans la région de l'île de Montréal (ISQ, 2005a et 2005b). Les estimations actuelles de mortalité et de morbidité pour le Québec liées à la pollution atmosphérique sont appréciables (Bouchard et Smargiassi, 2008) : sur une base annuelle, on compte près de 2 000 décès prématurés et quelque 250 000 jours/personnes symptomatiques d'asthme liés à la pollution pour une population de 3,6 millions de personnes. La charge sanitaire totale associée à la pollution de l'air pourrait donc augmenter substantiellement dans un contexte de changements climatiques.

Les pollens

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a émis l'hypothèse qu'un climat plus chaud et plus humide augmenterait la concentration atmosphérique de certains pollens suscitant, par le fait même, une recrudescence des affections allergiques, telles que la rhinite allergique et l'asthme (McMichael *et al.*, 2003). La rhinite allergique constitue un sérieux problème de santé publique dans les pays industrialisés, altérant la qualité de vie des populations, causant absentéisme et perte de productivité et entraînant d'importants coûts d'hospitalisation, de médicaments et de consultations médicales (Breton *et al.*, 2006 ; Garneau *et al.*, 2006). La rhinite allergique se classe au 5^e rang (9,4 %) des problèmes de santé déclarés (ISQ, 2009) et touche surtout les enfants et les jeunes adultes. Sa prévalence semble avoir augmenté de 6 % depuis 1987 (Garneau *et al.*, 2006), mais plusieurs facteurs externes autres que le climat peuvent y avoir contribué. Pour les régions de Québec et de Montréal, on a documenté entre 1994 et 2002 une hausse à la fois des concentrations polliniques et de la fréquence des consultations médicales pour cause de rhinite.

L'ozone

L'ensoleillement contribue à la formation d'ozone troposphérique (O₃) dans les milieux urbains, un gaz nuisible à la santé humaine et composant principal du smog estival au Québec. La modélisation des données sur les changements climatiques au Canada soutient l'hypothèse qu'une hausse des températures favorisera l'augmentation des concentrations ambiantes d'O₃ ainsi qu'un accroissement de la durée de dépassement des normes (Lamy et Bouchet, 2008). L'ozone troposphérique est responsable de dommages aigus et chroniques au système respiratoire ; les réactions aiguës sont particulièrement préoccupantes chez les asthmatiques.



L'ozone peut provoquer l'irritation des yeux et des voies respiratoires, une réduction des fonctions respiratoires, une aggravation des maladies des voies respiratoires ou cardiaques et même une mort prématurée (Santé Canada, 2009).

Les particules

En ce qui concerne les particules, les mêmes simulations indiquent qu'elles demeureraient stables ou régresseraient légèrement. Les auteurs de ces simulations canadiennes soulignent cependant que les relations des changements climatiques avec les particules font toujours l'objet de nombreuses études et demanderaient plus de recherches. Il faut spécifier que ces simulations ne touchaient que l'été et n'incluaient donc pas le smog d'hiver, principalement lié (au Québec) aux particules fines trouvant leur source dans le chauffage au bois pour 47 % du total (MDDEP, 2002). Ces résultats sur les particules méritent en effet d'être considérés comme préliminaires si l'on consulte quelques études récentes menées aux États-Unis. Ainsi, selon Pye *et al.* (2009), le changement climatique seul (avec le modèle GEOS-Chem, sous le scénario A1B) amènerait pour 2050 une augmentation des aérosols (sulfates et ammoniums) pour le Midwest et le Nord-Est américain, alors que les niveaux décroîtraient ailleurs aux États-Unis, pour une augmentation à l'échelle nationale, avec des variations saisonnières importantes.

Une analyse des effets sur la santé menée par une modélisation historique combinant le climat et la pollution atmosphérique (Jacobson, 2008) conclut que les concentrations d'ozone et de particules se sont élevées simultanément avec les concentrations de CO₂ depuis l'ère préindustrielle, avec une augmentation de la mortalité de 1,1 % par degré Celsius, dont 60 % est attribuable à l'effet des particules, et 40 % à l'ozone.

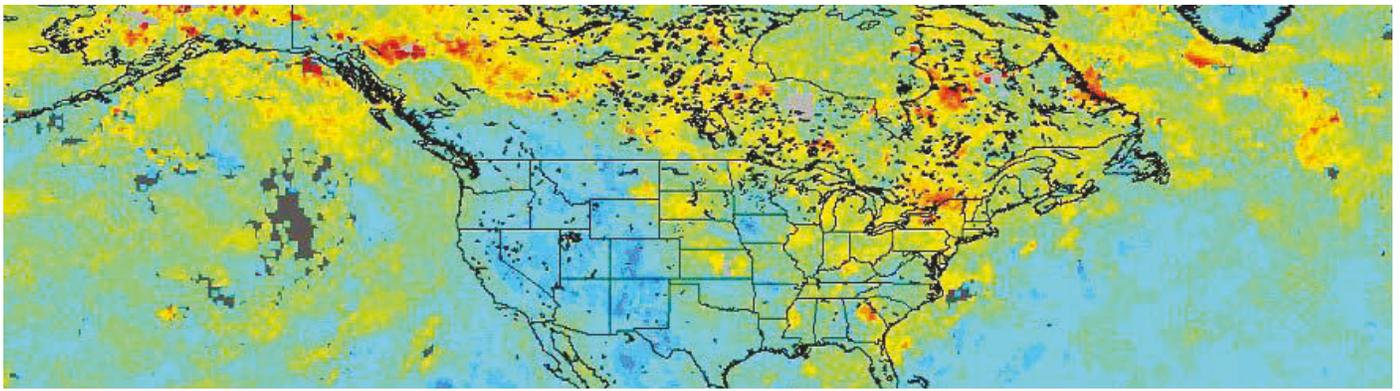


Figure 30 : Image satellitaire des particules polluantes de monoxyde de carbone émises par des feux de forêt et de friche touchant le Midwest états-unien et les Prairies canadiennes, en juillet 2004. Le niveau de pollution augmente de bleu à vert, jaune et rouge (National Center for Atmospheric Research, NASA).

Comme le signale l'évaluation états-unienne sur la santé et les changements climatiques (Ebi *et al.*, 2008), la plupart des études menées jusqu'ici ne concernaient que l'ozone, et des recherches supplémentaires sur les particules sont nécessaires avant de conclure quoi que ce soit. Ce qui est très bien connu par contre, c'est que les particules fines (d'une taille inférieure à 2,5 µm – PM2,5) sont associées à des hospitalisations et à une augmentation de la morbidité cardiorespiratoire, tout en aggravant notamment l'asthme (Dominici *et al.*, 2006 ; Goldberg *et al.*, 2001), et que l'impact nocif des vagues de chaleur est amplifié par la pollution atmosphérique, tant de l'ozone que des particules en suspension (OMS, 2008).

Ces particules sont émises par divers processus de combustion dont celle du bois de chauffage, de plus en plus populaire (Bélanger *et al.*, 2008). Ainsi, Montréal a connu à l'hiver 2008-2009 la pire saison de smog (lié aux particules) de son histoire, soit 68 jours par rapport au record précédent de 19 jours en 2005, le chauffage au bois y contribuant en grande partie. Alors que le recours à ce type de chauffage est recommandé par le ministère des Ressources naturelles du Canada en cas de panne d'électricité pour augmenter la résilience et l'indépendance énergétique des ménages, dans les faits, il constituerait une mauvaise adaptation en raison de ses impacts sanitaires importants (Bélanger *et al.*, 2008). Son usage a d'ailleurs fait récemment l'objet d'une réglementation plus stricte de la Ville de Montréal.

Les feux de forêt ou de friche

L'impact des feux de forêt sur la santé constitue une autre préoccupation majeure. En plus de leur impact économique important sur l'industrie forestière, les feux de forêt émettent dans l'atmosphère des composés chimiques, à savoir des particules, des oxydes d'azote, du monoxyde de carbone ou encore des composés organiques. Ces émissions peuvent, chez l'être humain, entraîner des problèmes d'irritation des voies respiratoires, une aggravation des maladies chroniques et des intoxications imputables à l'inhalation de fumée. Des syndromes aigus peuvent aussi survenir chez les pompiers qui combattent ces incendies et chez les travailleurs de la forêt longuement exposés à la fumée (Dost, 1991). À ces impacts directs, il faut ajouter les effets indirects sur la santé de la population et des travailleurs liés au stress post-traumatique et à toutes ses conséquences souvent sévères.

Les scénarios actuels pour la forêt boréale ne prévoient pas de modifications notables du régime des pluies et des feux de forêt au Québec, mais l'incertitude persiste (Ouranos, 2004) car le Nord-Est américain et l'Ontario semblent au contraire s'orienter plutôt vers une augmentation des feux (Lemmen *et al.*, 2008 ; Ebi *et al.*, 2008), ce qui exposerait davantage la population québécoise par le biais du transport atmosphérique transfrontalier des polluants.



Pour l'ensemble du Canada, l'évolution future des feux de forêt serait à la hausse, sauf peut-être dans certaines portions du Québec où leur nombre pourrait demeurer stable (Lemmen *et al.*, 2008). De même, on s'attend à une hausse marquée des feux de forêt dans tout l'Ouest du continent américain (Ebi *et al.*, 2008). En tenant compte du transport de longue distance dont la dominante circule d'ouest en est, les risques d'exposition aux particules provenant des feux de forêt seraient donc accrus. La figure 30 illustre un épisode de transport de longue distance de pollution provenant de feux de forêt et de friche du Midwest américain et des Prairies canadiennes en juillet 2004 (zones polluées en jaune et rouge), notamment vers le Québec.

Les tempêtes estivales et hivernales

Les tempêtes produisent aussi des effets sanitaires importants. Les tempêtes estivales de pluies violentes entraînant des inondations peuvent causer des blessures, des problèmes cardiaques et des décès par noyade. Les effets indirects prennent la forme de maladies infectieuses (conjonctivites et dermatites) causées par les contaminants présents dans l'eau des crues, de gastroentérites dues à la contamination microbiologique des sources d'eau potable et de problèmes respiratoires provoqués par les moisissures. À cause des pertes affectives ou matérielles importantes liées à ces événements (perte du domicile, de l'emploi), les sinistrés et les intervenants peuvent souffrir d'un syndrome de stress post-traumatique pouvant mener à la dépression, à l'anxiété, à des troubles psychosociaux, voire au suicide (OMS, 2005).

Les tempêtes hivernales se traduisent par des blessures, des engelures, de l'hypothermie et quelquefois des décès (100 Canadiens chaque année) (Institut de prévention des sinistres catastrophiques, 2005).



La pluie verglaçante pendant cinq jours consécutifs au Québec, en janvier 1998, a laissé plus de 3 millions de personnes sans électricité, et pour des centaines de milliers d'entre eux pendant près de 40 jours. Cet épisode a occasionné quelque 21 décès et 200 intoxications au monoxyde de carbone (Roy, 1998), principalement en Montérégie et dans l'île de Montréal. (Tremblay *et al.*, 1998). Laplante *et al.* (2004) ont mené une étude sur 224 femmes sélectionnées, qui étaient alors enceintes ou qui le sont devenues dans les trois mois suivant cette tempête. Les facteurs de stress « objectifs » (le nombre de jours sans électricité) et les réactions « subjectives » (syndrome de stress post-traumatique) ont été évalués. Les résultats montrent un lien entre un stress prénatal important chez la mère et une mortalité périnatale élevée, des différences de développement psychomoteur chez les enfants âgés de 2 à 5,5 ans et des troubles de comportement chez ceux âgés de 4 à 5,5 ans.

Le Nord du Québec

Dans le Nord du Québec, les tendances climatiques récentes ne semblent pas étrangères à la survenue de l'avalanche à Kangiqsualujjuaq en 1999, où 9 personnes ont été tuées et 25 blessées (Sécurité publique Canada, 2006). D'autres incidents, moins tragiques, se sont produits dans d'autres villages dans la même période. En plus de mettre des vies en danger, ces événements causent beaucoup d'insécurité au sein de la population.

Les effets des changements climatiques sur la quantité et la qualité des ressources hydriques

Dans le Sud, les changements climatiques pourraient entraîner une baisse des niveaux et des débits des cours d'eau, une modification du régime pluviométrique et une hausse de la salinité des eaux du Saint-Laurent (Bourgault, 2001). Il s'agit d'une projection inquiétante, car plus de 70 % de la population tire son eau potable des eaux de surface (MDDEP, 2004). Les risques de contamination microbienne, chimique et par biotoxines naturelles seraient plus élevés. La population en général serait touchée par des pénuries d'eau sur les plans physique et psychologique ; les familles déjà en situation précaire vivraient davantage d'insécurité sur le plan alimentaire, en ayant à acheter leur eau (Direction de la santé publique de la Montérégie, 2004). De plus, les pénuries d'eau, causées par la diminution de la capacité des aqueducs, présentent un risque accru en cas d'incendie, accompagné de blessures, décès et incidences psychologiques importantes pour les familles qui assistent à la destruction de leurs biens personnels (Enright, 2001).

Des maladies d'origine hydrique pourraient se manifester si des micro-organismes pathogènes migraient vers les eaux souterraines ou de surface utilisées comme sources d'approvisionnement (Conseil canadien des ministres de l'Environnement, 2005a et 2005b). Le phosphore, l'ensoleillement et la température sont les principaux facteurs responsables de la prolifération d'algues ou fleurs d'eau de cyanobactéries (MDDEP, 2009a). Au Québec, ce phénomène a déjà touché quelque 156 lacs et cours d'eau différents entre 2004 et 2008 (MDDEP, 2009b), dont certains pendant plusieurs saisons estivales, et a mené à des interdictions de consommer l'eau et de se baigner, sans provoquer toutefois de maladies humaines rapportées à ce jour.

Les cyanotoxines produites par les cyanobactéries peuvent causer une irritation de la peau, des dommages hépatiques ou nerveux sérieux, tant par contact cutané que par ingestion d'eau (American Water Works Association, 1999 ; Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2003). Les jeunes enfants, les personnes âgées et les malades chroniques risquent davantage de présenter des symptômes sévères résultant de la contamination de l'eau. Les amateurs d'activités aquatiques sont particulièrement vulnérables à la contamination par biotoxines naturelles (MSSS, 2008).

Pour ce qui est de la capacité de traitement des usines québécoises face aux cyanobactéries, par contre, il semble bien que leur état actuel et les améliorations déjà en chantier soient amplement suffisants pour se prémunir contre les risques liés aux biotoxines provenant de ces algues (Barbeau *et al.*, 2008).

Une étude récente a permis de montrer que les projections climatiques actuelles tendent vers une modification de la distribution intra-mensuelle des événements de pluie pendant l'été ainsi que, vraisemblablement, vers une augmentation des intensités de chaque événement pluvieux (Mailhot *et al.*, 2008a), fournissant un contexte susceptible d'entraîner l'éclosion de maladies infectieuses d'origine hydrique. Plusieurs études suggèrent une relation étroite entre l'émergence d'épisodes de maladies hydriques et des événements météorologiques extrêmes (MacKenzie *et al.*, 1994 ; Rose *et al.*, 2000 ; Thomas *et al.*, 2006). Curriero *et al.* (2001) ont ainsi montré, à partir de données observées aux États-Unis dans la période 1984-1994, que l'éclosion d'épisodes d'infections hydriques était précédée, dans 68 % des cas, d'événements de pluies intenses (80^e percentile et plus). Une récente étude menée dans plusieurs régions rurales du Québec arrive à la même conclusion (Febriani *et al.*, 2008). Cela suggère fortement que les épisodes pluvieux, sans être l'unique facteur en cause, jouent tout de même un rôle prépondérant (Watson *et al.*, 2005).

Il demeure à l'heure actuelle très difficile de déterminer, de façon précise, l'incidence qu'une modification, par exemple de l'occurrence des pluies extrêmes, pourra avoir sur la fréquence et l'ampleur des éclosions de maladies hydriques (Patz *et al.*, 2000 ; Benson *et al.*, 2000 ; Huntingford *et al.*, 2007). Les autres facteurs responsables de ces éclosions sont variés et peu évalués. Des variations importantes de la qualité de l'eau d'approvisionnement associées à des équipements de traitement inadéquats des usines de production d'eau potable, ou encore des conditions d'opération non optimales de ces usines sont autant de facteurs pouvant être mis en cause (Rizak et Hrudehy, 2008).

Les maladies d'origine hydrique (transmises par protozoaires, bactéries ou virus) sont aussi présentes au Nunavik, et l'on y a recensé de 1990 à 2002 un nombre proportionnellement plus élevé qu'ailleurs au Québec de certaines d'entre elles (par exemple, giardiase, salmonellose), alors que le nombre d'autres types de maladies infectieuses y est moins élevé (Furgal *et al.*, 2002). Les changements climatiques pourraient avoir une incidence sur l'approvisionnement en eau, aussi bien dans les systèmes individuels que collectifs, causer la dégradation du pergélisol et contribuer à l'infiltration d'eau salée dans les aquifères. Dans plusieurs villages, l'enfouissement des déchets dans le pergélisol en dégel polluerait les nappes phréatiques, les cours d'eau et les terrains avoisinants (Furgal et Seguin, 2005).

Au Nunavik, une personne sur cinq est âgée de moins de cinq ans ; il s'agit là d'un groupe à risque pour les maladies gastroentériques en raison de la fragilité du système immunitaire des enfants (Martin *et al.*, 2005a et 2005b). Les changements pressentis mettent en évidence l'urgence d'améliorer les systèmes de monitoring environnemental et de surveillance sanitaire pour détecter et traiter rapidement les problèmes de santé liés à la qualité de l'eau (Owens *et al.*, 2006).

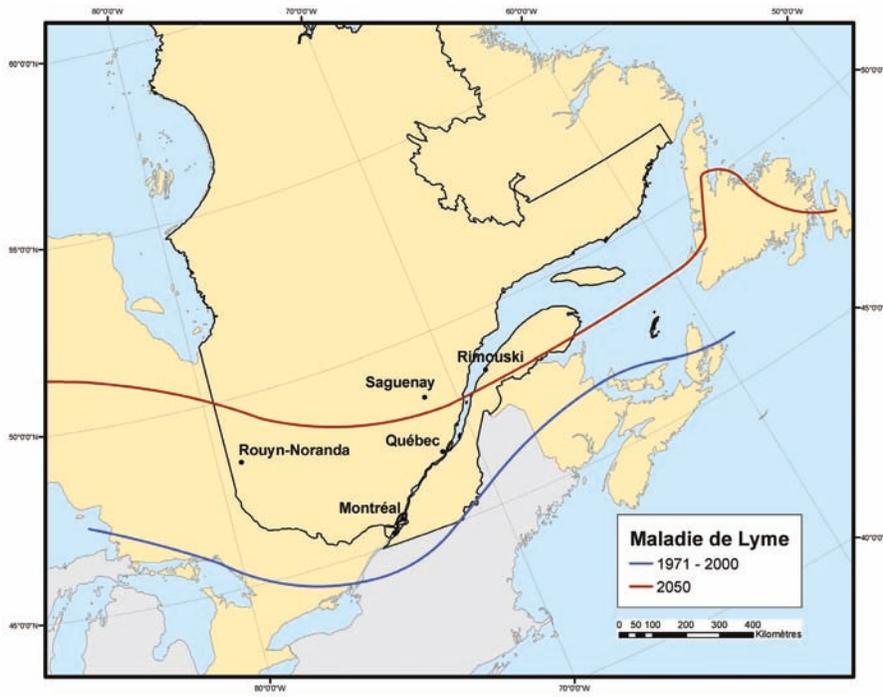


Figure 31 : Simulation de l'évolution de la présence de la maladie de Lyme au Québec, vers 2050 (Ogden, 2006).

L'émergence et l'intensification des maladies zoonotiques et à transmission vectorielle

Les changements climatiques pourraient modifier l'aire de distribution des parasites et des maladies transmises par des animaux, des insectes et des tiques, entraînant une hausse des maladies infectieuses existantes ou même l'apparition de nouvelles maladies infectieuses au Québec. Au nombre des maladies zoonotiques transmissibles à l'humain, on compte le syndrome pulmonaire à hantavirus (SPH), causé par un virus qui peut infecter certains rongeurs. Un climat plus chaud pourrait entraîner la propagation des rongeurs dans de nouvelles régions. Plusieurs rongeurs indigènes peuvent servir de vecteurs de cette maladie ; un premier cas a été rapporté au Québec en 2005 (Direction de la santé publique, 2005).

La rage est une autre maladie transmissible à l'être humain par des morsures ou des griffures d'animaux infectés. Les changements climatiques pourraient occasionner des modifications de l'habitat, de la durée d'hibernation et des conditions de reproduction des animaux-réservoirs, et avoir ainsi pour effet de propager cette maladie dans le Nord du Québec (Institut de recherche forestière de l'Ontario, 2003).

Au Québec, il existe actuellement peu d'espèces de moustiques vecteurs de maladies virales transmissibles à l'humain. Toutefois, quelques espèces présentes dans le Sud sont des vecteurs du virus du Nil, de l'encéphalite de Saint-Louis, de l'encéphalite de La Crosse et de l'encéphalite équine de l'Est (INSPQ, 2003a et 2003b).

Des hivers plus doux et des étés plus longs pourraient prolonger la durée de vie de ces moustiques, ainsi que la saison de la transmission du virus responsable de l'encéphalite de Saint-Louis, originaire des États-Unis, qui pourrait alors s'étendre au Québec. L'encéphalite de La Crosse, pour sa part, existe de façon endémique aux États-Unis, et la variété *Snowshoe Hare* (qui attaque le lièvre) de ce virus est présente au Québec. Le virus de l'encéphalite équine de l'Est a déjà été identifié au Québec, mais aucun cas n'a été rapporté chez l'humain jusqu'à présent (INSPQ, 2005a et 2005b) ; il risque par contre d'être réintroduit chaque année par les oiseaux migrateurs (Institut de recherche forestière de l'Ontario, 2003), comme cela a été le cas avec un épisode équin en septembre 2008. La maladie de Lyme est une zoonose émergente au Canada. Sa bactérie peut être transmise aux êtres humains par la morsure de tiques infectées. Selon les chercheurs de l'Université de Montréal et, comme l'illustre la figure 31, les tiques responsables de la propagation de cette maladie séviraient d'ici 10 à 20 ans dans plusieurs des régions de l'Est du Canada, dont le Québec, à mesure que le climat se réchauffera (Ogden *et al.*, 2006 ; Charron *et al.*, 2008).

Plusieurs zoonoses existent aussi chez les espèces animales arctiques, notamment : la tularémie chez les lièvres, les rats musqués et les castors ; la rage chez les renards (Dietrich, 1981) ; la brucellose chez les ongulés, les renards et les ours ; l'échinocoque chez les espèces canines (Chin, 2000). Les Inuits présentent des niveaux élevés de plusieurs zoonoses parasitaires, notamment la toxoplasmose (Tanner *et al.*, 1987 ; Anctil et Rochette, 2008). Les changements climatiques sont susceptibles d'en accroître la transmission, soit par ingestion de chair animale ou par contamination hydrique. De même, le taux de survie à l'hiver et l'aire de répartition de certains insectes progressent en raison de l'élévation des températures, ce qui peut provoquer l'apparition de nouvelles pathologies dans les régions arctiques ou accroître les risques d'infection par des agents endémiques (Parkinson et Butler, 2005).

Autres effets dans l'Arctique

Les Inuits pratiquent la chasse et la pêche, continuent de s'alimenter en grande partie de façon traditionnelle et en retirent des effets beaucoup plus bénéfiques que ne leur procurent les produits importés (MSSS, 2004). L'enquête Qanuippitaa (Anctil et Rochette, 2008) réalisée en 2004 indique que 24 % des Inuits québécois affirment avoir manqué de nourriture au cours du mois précédant l'enquête. La consommation d'aliments traditionnels, à savoir les aliments issus des activités de la chasse et de la pêche, était encore importante en 2004 (16 % de l'apport énergétique), quoique moins élevée qu'en 1992 (21 %). Si, en raison du réchauffement, les animaux étaient affectés par des maladies, des parasites, un plus grand nombre d'insectes piqueurs, des famines ou des modifications et des pertes d'habitats, les ressources alimentaires des Inuits pourraient être déplacées et leur qualité altérée. L'apport en protéines animales à haute valeur nutritive serait ainsi réduit, situation d'autant plus inquiétante que la population augmente et que les habiletés de chasse et pêche vont en diminuant (Furgal *et al.*, 2002).

Le remplacement des produits traditionnels par des produits importés, plus riches en sucres et en glucides, aurait pour effet d'engendrer des problèmes cardiovasculaires, de diabète, de déficiences vitaminiques, d'anémie, de santé dentaire et d'obésité, ainsi qu'une résistance moindre aux infections. Les Inuits présentent déjà des taux de mortalité ou de morbidité beaucoup plus élevés qu'ailleurs au Québec, pour la plupart en rapport avec l'alimentation (INSPQ, 2006), et une espérance de vie réduite, en bonne partie à cause des décès par traumatismes, des cancers et, dans une moindre mesure, des maladies cardiovasculaires.

Même si les résultats révèlent une diminution importante des concentrations sanguines des métaux lourds chez les Inuits au cours de la dernière décennie, une proportion substantielle continue d'afficher des concentrations au-dessus des niveaux acceptables, selon Santé Canada. Il importe donc de surveiller les sources potentielles de cette exposition qui pourraient subir les effets de divers processus climatiques.

Enfin, les impacts directs et indirects des conditions climatiques sur l'environnement naturel et bâti augmenteraient probablement les risques pour la santé, la sécurité et le bien-être de ces populations isolées. À titre d'exemple, la hausse importante de la quantité et de l'intensité des précipitations causerait davantage de glissements de terrain ou d'avalanches.

L'exposition aux rayons ultraviolets (UV)

Dans les régions nordiques telles que le Québec, les changements de comportements liés aux changements climatiques seraient le facteur le plus important de l'exposition future aux rayons ultraviolets (UV), plutôt que l'amincissement de la couche d'ozone (Diffey, 2004). On prévoit en effet que l'allongement de la saison chaude amène une plus grande exposition de la population aux rayons ultraviolets (Hill *et al.*, 1992). Une augmentation de l'exposition aux rayons UV signifie globalement une augmentation de l'incidence des coups de soleil, des cancers de la peau (de 4 % à 6 % d'augmentation annuelle), des cataractes et des maladies associées aux effets immunosuppresseurs des rayons UV (OMS, 2003). Diffey (2004) a montré que des températures estivales plus chaudes sous nos latitudes peuvent encourager la population à vivre davantage à l'extérieur et que le réchauffement moyen futur amènerait une augmentation de l'exposition aux UV et des cancers de la peau de l'ordre de 20 % par rapport aux niveaux actuels. Cette augmentation est deux fois plus grande que l'effet de l'amincissement de la couche d'ozone sur les cancers (environ 10 % d'augmentation) qui devrait être éliminé vers 2050 en vertu du protocole de Montréal.

Les problèmes de santé associés aux UV pourraient donc continuer de s'accroître à un rythme encore plus grand que celui des dernières décennies. Les impacts sur la santé publique sont sérieux, avec quelque 80 000 nouveaux cas de cancers de la peau (estimation) chaque année au Canada. Il s'agit de la forme de cancer la plus fréquente (Société canadienne du cancer, 2009) ; quelque 400 cas de mélanomes (la forme la plus grave, qui peut être mortelle) sont diagnostiqués chaque année au Québec. Or, il y a très peu de recherche sur ce sujet au Québec et on tient rarement compte de la composante protection contre les UV dans les mesures d'adaptation même si ce thème est une priorité canadienne (Warren *et al.*, 2004).

Les stratégies d'adaptation

Le réchauffement moyen

Des travaux sont en cours au sein du programme santé d'Ouranos pour caractériser les liens pouvant exister entre les moyennes et les extrêmes météorologiques, d'une part, et la mortalité et les taux d'hospitalisation ou de consultation à l'urgence, d'autre part. Ces travaux seront réalisés dans le cadre du volet santé du *Plan d'action 2006-2012 en changements climatiques* (MDDEP, 2006b), ci-après appelé PACC-santé.

Les vagues de chaleur et l'effet d'îlot thermique urbain

Selon Bélanger *et al.* (2006), les stratégies d'adaptation liées aux vagues de chaleur devraient s'articuler autour des activités de surveillance, recherche, diffusion d'informations et programmes d'aide. Pour ce qui est de la recherche, il s'agirait surtout de déterminer les services dont les personnes vulnérables ont besoin pour assurer leur sécurité durant ces épisodes de chaleur. Un projet à cet effet, ciblé sur le logement social, est prévu au sein du PACC-santé au cours de la période 2009-2012. Les principaux résultats devraient être communiqués à des organismes communautaires et à des intervenants de première ligne rattachés à la sécurité civile.

De plus, en 2006, sept régions sur huit possédaient déjà un plan d'intervention d'urgence en cas de vague de chaleur (MSSS, 2006a). Ces plans d'urgence, impliquant le déclenchement d'alertes et la mobilisation, sont basés sur un seuil fixé à partir d'une analyse des données sanitaires et météorologiques des 20 dernières années et plusieurs comprennent une surveillance des décès en situation d'alerte.

Des seuils d'intervention en cas de canicules spécifiques à des régions et à des villes seront bientôt établis, et pourront être modifiés de temps à autre selon l'évolution de la température ainsi que des décès et des maladies. D'autres initiatives portant sur les risques de la chaleur accablante ont été mises en œuvre pour informer la population et les groupes plus vulnérables (MSSS, 2006c) et le personnel de mesures d'urgence et de santé.

Par ailleurs, des projets de recherche concernant les vagues de chaleur et les effets d'îlot thermique urbain (EITU) ont été planifiés ou entrepris par Ouranos (2006). L'étude de Vescovi *et al.* (2005) a permis de cartographier des zones qui présentent un risque lié au réchauffement climatique, et un projet d'atlas Internet traitant de certaines vulnérabilités de santé publique est en voie de réalisation à l'échelle du Québec au sein du PACC-santé sur la base de projets antérieurs (Gosselin, 2005 ; Kosatsky *et al.*, 2005). Pour lutter contre l'EITU, la plantation d'arbres, l'installation de toits verts ou construits avec des matériaux à albédo élevé, de même que l'utilisation et la disponibilité du transport collectif dans certaines régions font l'objet d'un intérêt grandissant (Ducas, 2004 ; Ville de Montréal, 2005).

Certaines directions régionales de santé publique commencent à promouvoir de telles approches en milieu urbain. Plusieurs initiatives supplémentaires pourraient être mises en œuvre, incluant la formation des professionnels de la santé, des projets d'éducation publique pour la protection personnelle et la lutte contre l'EITU ou encore des mesures économiques incitatives favorisant l'atténuation de la chaleur accablante (Giguère et Gosselin, 2006d). Le Plan d'action 2006-2012 du gouvernement du Québec (MDDEP, 2006b) prévoit la promotion d'îlots de fraîcheur et la formation du personnel aux pratiques adaptées aux changements climatiques au cours des prochaines années, sous la supervision du MSSS.

En parallèle, comme l'illustre la figure 32, l'utilisation de la climatisation dans les résidences croît de façon importante au Québec, et à un rythme qui s'accélère, surtout depuis une dizaine d'années (Gosselin *et al.*, 2008).

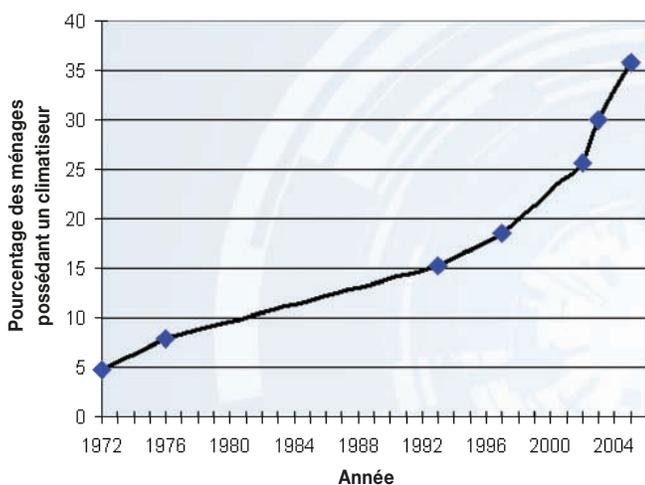


Figure 32 : Prévalence de la climatisation au Québec de 1972 à 2005 (INSPQ, 2005b ; Bélanger *et al.*, 2006).

La pollution atmosphérique

Selon Garneau *et al.* (2006), un peu comme pour les vagues de chaleur, il faudrait établir des seuils polliniques critiques et émettre des avis de protection lorsque ces seuils sont dépassés. Il faudrait aussi continuer d'appliquer les méthodes de contrôle d'*Ambrosia spp.* dont le pollen est associé au plus grand pourcentage de symptômes allergiques, et amener les principaux acteurs à renforcer leurs interventions. Une Table québécoise sur l'herbe à poux existe d'ailleurs depuis 1999 pour soutenir les actions sur le terrain des partenaires municipaux, privés et non gouvernementaux en vue de contrôler ce risque (Agence de la santé et des services sociaux de la Montérégie, 2007).

Il reste aussi à établir un véritable réseau de monitoring des bioaérosols au Québec, à l'exemple de certains pays européens, et notamment de la France qui possède un Réseau national de surveillance aérobiologique (voir <http://www.pollens.fr/accueil.php>) pouvant guider et évaluer adéquatement les interventions correctrices et les mises en garde. Divers avis de santé publique visant à réduire l'étalement urbain et la circulation automobile ont été émis ces dernières années (Direction de la santé publique de Québec, 2004; King *et al.*, 2005), mais sans effet mesurable jusqu'à ce jour. Le programme Info-smog est maintenant disponible pour tout le Québec méridional, et ce, à longueur d'année (MSSS, 2006b), mais les premières études d'évaluation (Bélanger *et al.*, 2006, 2008 et 2009; Tardif *et al.*, 2006) ne démontrent pas jusqu'ici d'impact significatif sur les changements de comportements. Au cours des dernières années, le gouvernement du Québec a mis en œuvre diverses mesures de réduction des émissions atmosphériques dont notamment l'adoption de réglementations sur les émissions des véhicules lourds et légers (MDDEP, 2010). Comme une part importante des contaminants atmosphériques qui affectent le territoire québécois est d'origine transfrontalière, le Québec participe en outre à diverses initiatives intergouvernementales.



Les récentes interventions gouvernementales et municipales sur l'usage des moteurs à l'arrêt et sur la réglementation des poêles à bois constituent également un pas dans la bonne direction s'ajoutant aux autres mesures beaucoup plus importantes visant la réduction des émissions (Bélanger *et al.*, 2008, 2009) telle que la réglementation des émissions des véhicules, la réglementation des émissions du secteur industriel ainsi que la promotion de l'achat des véhicules peu énergivores, des déplacements à bicyclette ou à pied, ou encore la promotion des transports en commun. En outre, le transport collectif ainsi que la marche et le vélo ont une incidence directe sur la qualité de vie des citoyens et la santé publique. En réduisant l'utilisation de l'automobile, le transport collectif permet de diminuer les émissions polluantes liées à la combustion des carburants (MTQ, 2006c). Il existe un lien direct entre le taux d'utilisation des automobiles et les épisodes de smog dans les grandes agglomérations urbaines.

Les tempêtes hivernales et estivales

Le Québec dispose de bons mécanismes de réaction aux cas d'urgence, et la plupart des initiatives actuelles d'adaptation sanitaire consistent en des activités de surveillance et de monitoring, de formation et d'éducation ainsi qu'en des modifications de lois et de politiques. Pour ce qui est de la surveillance et du monitoring, il semble toutefois nécessaire, selon divers observateurs (Giguère et Gosselin, 2006a), d'étendre et de renforcer le rôle des systèmes d'information géographique (SIG) et des nouvelles technologies dans la gestion des risques, ce qui est en voie d'être réalisé présentement au sein du PACC-santé. Différents ministères du Québec (MSP, MSSS), Sécurité publique Canada et des organismes comme la Croix-Rouge mettent à la disposition du public des guides de mesures à prendre au moment d'événements extrêmes de différentes natures. La création d'Ouranos et de son volet santé (en collaboration avec Santé Canada, le MSSS et l'INSPQ) s'inscrit dans la stratégie du Québec sur l'adaptation aux changements climatiques (INSPQ, 2005a et 2005b).

La gestion par bassins versants, actuellement en voie de réalisation, permettra d'assurer une approche écosystémique de la gestion de l'eau incluant les acteurs de santé publique (MDDEP, 2004). D'autre part, il serait souhaitable pour plusieurs d'élaborer et d'encourager de nombreuses autres initiatives d'adaptation aux événements météorologiques extrêmes (Giguère et Gosselin, 2006a), notamment :

- la valorisation de la planification préventive ;
- la modélisation et la communication des risques sur les différents types d'événements ;
- la recherche en matière d'impacts sur la santé à court et à long terme ;
- la recherche sur le perfectionnement des mesures d'urgence dans le domaine sanitaire.

Le MSSS (MDDEP, 2006b) a annoncé son intention de mettre sur pied d'ici 2012 un système de surveillance et de suivi épidémiologique des conséquences des événements météorologiques extrêmes, et ces travaux sont en cours.

La quantité et la qualité des ressources hydriques

Dans le contexte des changements climatiques, plusieurs initiatives majeures d'adaptation visant à préserver la quantité et à la qualité des ressources hydriques du Québec sont déjà instaurées, ou en voie de l'être sous peu (Giguère et Gosselin, 2006c).

Ainsi, des programmes de suivi de la qualité de l'eau de surface sur une partie des sites permettent de bénéficier d'activités aquatiques sécuritaires. La réglementation québécoise sur la qualité de l'eau (MDDEP, 2005a) prescrit une surveillance rigoureuse et oblige le personnel superviseur ou contrôleur de la qualité de l'eau potable et responsable de l'entretien des infrastructures de traitement de l'eau à suivre une formation adéquate. Toutefois, bien que les normes soient parmi les plus élevées en Amérique du Nord, aucune ne s'applique aux cyanotoxines, toxiques pour l'humain, dont la prolifération pourrait s'accroître dans un contexte de réchauffement climatique.

Une recommandation pan-canadienne sur la microcystine est maintenant disponible de sorte qu'une nouvelle norme à cet effet pourrait être adoptée. De plus, tous les nouveaux traitements de l'eau prélevée dans des lacs ou cours d'eau à risque potentiel sont conçus pour se prémunir contre une dégradation ultérieure de cette eau. Enfin, des programmes de recherche et de développement sur les méthodes de traitement de l'eau potable sont en cours depuis déjà quelques années dans plusieurs universités québécoises.

Des recherches sur les liens entre le climat, la santé et la qualité de l'eau sont aussi en cours. Selon Charron *et al.* (2005), les maladies d'origine hydrique et alimentaire représentent sans doute le plus important problème sanitaire de la planète (GIEC, 2008). Le Centre de prévention et de contrôle des maladies infectieuses de l'Agence de la santé publique du Canada collabore présentement avec l'INSPQ, dans une étude sur les déterminants de la gastroentérite, notamment les écosystèmes, la population, les collectivités et les individus, afin de définir la vulnérabilité aux maladies d'origine hydrique et alimentaire découlant des changements climatiques dans le milieu rural du Québec. Enfin, une amélioration des moyens de détection des épidémies et des maladies infectieuses en fonction de variables climatiques est prévue dans le Plan d'action 2006-2012 du gouvernement du Québec (MDDEP, 2006b).

Les zoonoses et les maladies à transmission vectorielle

Au Québec, les zoonoses et les maladies à transmission vectorielle semblent être le domaine où s'est pris le plus d'initiatives d'adaptation aux changements climatiques, même si les risques y semblent relativement peu élevés. L'INSPQ coordonne les activités en matière de détection précoce, de surveillance en temps réel (voir la figure 33) et de recherche sur le virus du Nil occidental (Bouden *et al.*, 2005 ; Gosselin *et al.*, 2005 ; INSPQ, 2005a et 2005b).

De plus, des documents d'information sur les maladies zoonotiques et à transmission vectorielle ainsi que sur les façons de s'en protéger ont été mis à la disposition du public. Enfin, certains experts ont proposé diverses initiatives (Giguère et Gosselin, 2006b), comme l'intégration d'indicateurs d'impacts des changements climatiques à la surveillance des maladies zoonotiques et à transmission vectorielle et l'intensification des recherches sur les moyens de contrôle de ces maladies. Une révision en profondeur des systèmes de surveillance dans ce domaine est en cours au sein du PACC-santé. Le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (2006) a, pour sa part, investi d'importantes sommes dans la recherche en vue de mieux surveiller et de contrer les maladies zoonotiques.

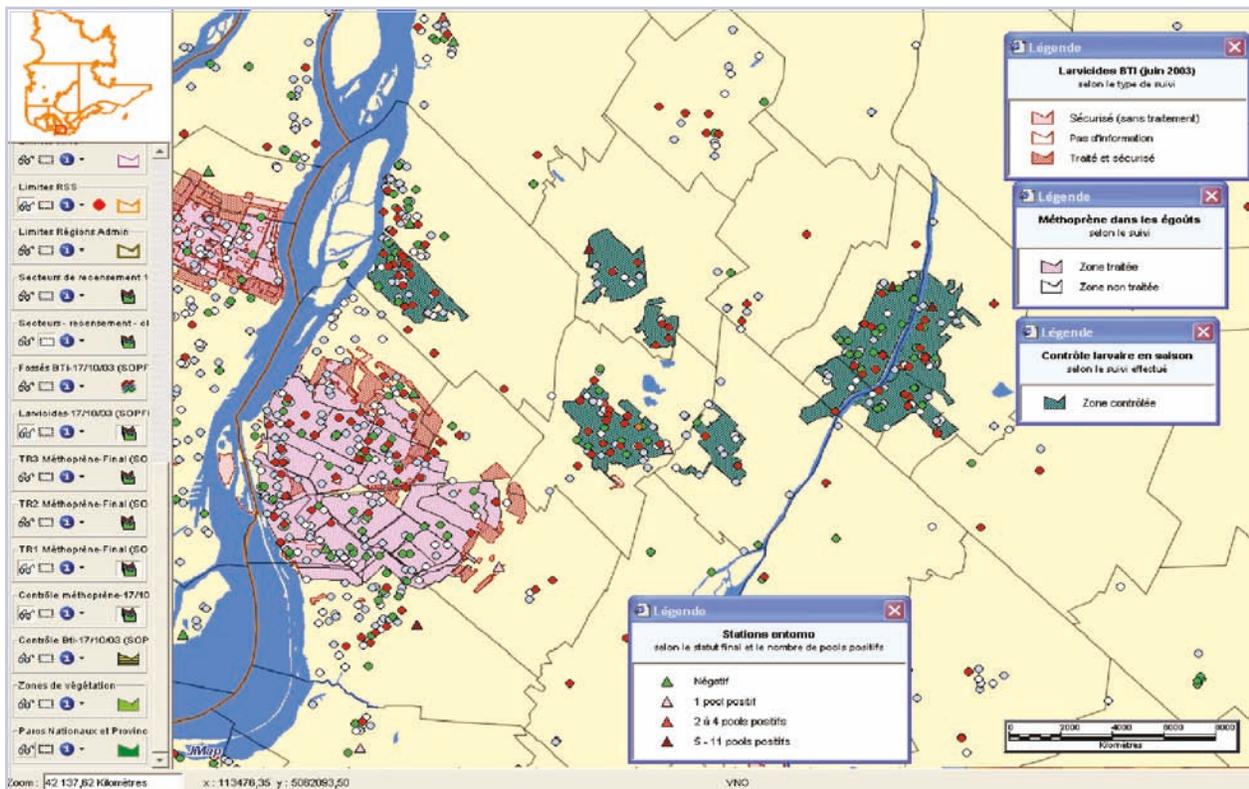


Figure 33 : Exemple de carte thématique provenant du système de surveillance en temps réel de l'Institut national de santé publique du Québec (Système intégré des données de vigilance sanitaire-Virus du Nil occidental [SIDVS-VN0]). Elle montre où ont été faits divers traitements préventifs d'insecticides (zones foncées) contre les larves des moustiques vecteurs du virus du Nil occidental sur la rive sud de Montréal, en 2003 (voir Gosselin *et al.*, 2005).

Les rayons ultraviolets (UV)

Les impacts sanitaires associés aux UV sont évitables par la modification des comportements de protection personnelle et en favorisant certains facteurs environnementaux pour créer de l'ombre. Sur une base individuelle, on peut avoir recours à l'indice UV émis par Environnement Canada, largement accessible à la population, ainsi qu'aux recommandations canadiennes sur les vêtements appropriés et l'utilisation des écrans solaires efficaces (Waller *et al.*, 2008). L'effet des changements climatiques sur ce thème reste encore à documenter pour le Québec (Institut de recherche en santé du Canada, 2002), mais on considère déjà que des mesures préventives afin de créer de l'ombre pour se protéger du soleil s'avèreraient utiles (MDDEP, 2006b), comme le propose le Programme national de santé publique du Québec (2003-2012), dans sa mise à jour récente (MSSS, 2008).

Il a été démontré que les impacts sanitaires associés aux UV sont en grande partie évitables (Mills *et al.*, 1997), entre autres par l'aménagement de zones ombragées dans les lieux fréquentés par les jeunes (et les moins jeunes). En effet, des études récentes (Thieden *et al.*, 2004a et 2004b) montrent que l'exposition aux UV se cumule toute la vie durant, et non pas surtout pendant le jeune âge, comme on le pensait autrefois. Un exemple intéressant d'interventions menées en Nouvelle-Zélande (Stoneham *et al.*, 2001 ; Greenwood *et al.*, 2000) consiste à évaluer, par le biais d'audits, l'aménagement de zones ombragées dans les milieux extérieurs fréquentés par les 0-18 ans (et leurs parents et amis) comme mesure d'adaptation pour réduire l'exposition aux rayons UV et simultanément aux chaleurs accablantes. De plus, les programmes de sensibilisation aux risques des UV sont rentables et efficaces. Par exemple, en Australie, la prévention des impacts négatifs des UV a coûté en moyenne 0,08 \$ US par personne, alors que les coûts liés au traitement du cancer sont de 5,70 \$ US par personne (OMS, 2003).

ÉCOSYSTÈMES ET BIODIVERSITÉ

Le climat est le principal facteur agissant sur la structure et la productivité végétale ainsi que sur la répartition des espèces animales et végétales à l'échelle mondiale (GIEC, 2002). Il est certain que les changements climatiques prévus sur le territoire du Québec auront des effets que l'on pourra constater à l'échelle locale, sur des populations ou des écosystèmes sensibles. Dans certains cas, les impacts des changements climatiques se traduiront par la réduction d'effectifs ou la disparition de certaines populations ; dans d'autres cas, ils permettront d'accroître les effectifs et d'étendre l'aire de répartition des populations. Ils modifieront les dynamiques écologiques des écosystèmes et, à moyen et long terme, les paysages (McCarty, 2001 ; Root et Schneider, 2002 ; Scott *et al.*, 2002b ; Walther *et al.*, 2002, Rodenhouse *et al.*, 2009).

Une biodiversité dynamique

Ces transformations ne sont pas déterministes ; les êtres vivants sont soumis à de multiples pressions et les changements climatiques ne constituent qu'un des éléments de l'équation. En effet, chaque écosystème a une structure et un fonctionnement propres qui se maintiennent dans le temps de manière dynamique, en fonction de l'évolution des paramètres du milieu (Di Castri et Younes, 1990). C'est cette dynamique et cette évolution qui ont permis de maintenir la diversité biologique (ou biodiversité) que nous connaissons. La biodiversité se décline sur trois plans : diversité des gènes, diversité des espèces et diversité des écosystèmes (Nations Unies, 1993 ; Di Castri et Younes, 1996).

C'est du côté des populations que les enjeux autour de la biodiversité peuvent être appréhendés de la manière la plus concrète. Une population est un groupe d'individus de la même espèce qui tente de maintenir ses effectifs de génération en génération ; elle est l'unité sur laquelle s'exercent les pressions d'adaptation. À chaque nouvelle génération, les individus doivent s'adapter à un ensemble de facteurs écologiques et engendrer une descendance fertile pour le maintien de l'espèce. Les écosystèmes présentent une multitude de biens et services essentiels à la survie humaine, comme l'attestent certaines collectivités autochtones ou rurales particulièrement dépendantes de ces ressources (GIEC, 2002).

Les organismes vivants réagissent directement aux facteurs écologiques et survivent selon leur tolérance. Ils peuvent aussi être affectés indirectement par des variations du climat qui modifient par exemple la disponibilité de leur alimentation. Ainsi, le nombre d'individus d'une population dans un écosystème est un indicateur de leur adaptation aux facteurs biophysiques et climatiques (Dajoz, 2000). Plus leur tolérance est élevée, meilleure est leur adaptation, comme l'ont démontré Albanese *et al.* (2004) chez les poissons. Par exemple, une espèce envahissante agrandit rapidement son aire de répartition dans un nouvel écosystème, soit parce qu'elle n'est plus limitée par un facteur écologique qui agissait autrefois, soit parce qu'elle profite de nouvelles conditions créées par une perturbation agissant sur les espèces dominantes du milieu et avec lesquelles elle entre en compétition, que ce soit en termes de nourriture ou d'habitats (Bagon *et al.*, 1996).

Plusieurs modifications phénologiques ont été constatées au XX^e siècle, et cette tendance, déclenchée par des modifications de température, des précipitations, de la photopériode ou d'une combinaison d'événements, devrait s'accélérer (GIEC, 2002). Ainsi, des modifications phénologiques ont été déjà observées chez des populations de petits mammifères nordiques, comme l'écureuil (Réale *et al.*, 2003 ; Berteaux *et al.*, 2004). Des observations indiquent que les oiseaux arrivent plus tôt au printemps au Québec, ce qui semble confirmer une tendance claire observée ailleurs dans le monde (Berteaux, communication personnelle).

Visser et Both (2005) ont démontré que la plupart des espèces n'arrivent pas à coordonner les modifications de leur phénologie de façon optimale avec celles de leur nourriture. Par exemple, la date d'une migration déclenchée par une photopériode précise ne changera pas avec l'augmentation de la température, mais celle-ci pourrait influencer le comportement de l'espèce ou le comportement de proies. Cette absence de coordination risque de réduire en particulier les effectifs de prédateurs migrants (Jones *et al.*, 2003 ; Strode, 2003).



Les enjeux régionaux

Les impacts des changements climatiques sur les espèces et les écosystèmes du Québec seront très différents selon la région considérée et, d'une façon générale, on peut s'attendre à une progression des espèces du sud vers le nord en réaction au réchauffement des températures et au déplacement vers le nord des isothermes (Berteaux, 2008). Sur le plan de la diversité spécifique, l'effet du réchauffement climatique n'aurait pas forcément que des impacts négatifs, puisque des espèces actuellement menacées pourraient trouver un refuge salutaire en migrant dans certaines régions au rythme de l'évolution du climat (Berteaux, 2009). Pour d'autres espèces, par contre, les changements climatiques seront synonymes de déclin. Les modifications de précipitations ainsi que le devancement des crues et des étiages auront aussi des impacts variés selon les espèces concernées. Cela s'appliquera en particulier aux insectes, qui devraient connaître des changements dans leurs aires de distribution géographique, entraînant localement des modifications de la biodiversité (Rodenhouse *et al.*, 2009).

L'impact des changements climatiques sur la distribution des espèces au Québec et le déplacement potentiel des niches écologiques dans de nouvelles régions biogéographiques font d'ailleurs l'objet d'un important projet de recherche qui s'étend de 2007 à 2010, regroupant des chercheurs de plusieurs universités et utilisant l'expertise d'Ouranos en climatologie régionale (voir <http://cc-bio.uqar.ca>). Cette étude devrait jeter une lumière nouvelle sur l'état actuel de la biodiversité au Québec et sur l'impact prévisible des changements climatiques.

La région sud

Le Sud, région qui abrite la majeure partie des espèces et des écosystèmes menacés ou vulnérables (Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue, 2003), sera entre autres touchée par la hausse des températures moyennes, la modification du régime des crues et les redoux hivernaux (Kling *et al.*, 2003).

En raison principalement des impacts des changements climatiques sur les Grands Lacs, les modifications du régime des crues et des débits et niveaux moyens du Saint-Laurent amèneront un réajustement géomorphologique des embouchures des tributaires. Celui-ci se traduira par l'incision et la déstabilisation des lits et des berges, touchant de nombreuses espèces fauniques et floristiques, reliées ou non aux terres humides, qui subissent déjà les effets de l'activité humaine (Mortsch *et al.*, 2000 ; Morin *et al.*, 2005).

Des travaux sur deux deltas du lac Saint-Pierre indiquent des processus d'ajustements rapides s'accompagnant d'une progradation de ces formes dans le fleuve (Boyer *et al.*, 2004). Les espèces dépendantes du régime des crues du Saint-Laurent, comme le grand brochet (*Esox lucius*) et la perchaude (*Perca flavescens*), seront touchées (Casselman, 2002 ; Chu *et al.*, 2005 ; Brodeur *et al.*, 2006).

L'approche combinant des modèles d'habitat multivariés avec la modélisation bidimensionnelle de la physique (Morin *et al.*, 2003 ; Mingelbier *et al.*, 2004 et 2005) permet de mesurer les impacts des changements climatiques sur les surfaces d'habitat disponibles pour plusieurs espèces de poissons dans les périodes cruciales de leur vie. La température de l'eau, la vitesse du courant et le niveau d'eau sont des variables clés pour comprendre quel effet les changements climatiques auront sur les poissons. Déjà, des données indiquent un réchauffement de l'eau à certains endroits (Hudon, 2004), et les températures atypiques de l'été 2001 ont entraîné une mortalité massive de carpes (*Cyprinus carpio*) dans le Saint-Laurent fluvial et ses affluents (Mingelbier *et al.*, 2001, Monette *et al.*, 2006).

Pour leur part, les amphibiens sont très dépendants des mares d'eau temporaires qui résultent de la fonte des neiges ou des crues printanières et ils risquent d'être affectés par une réduction des précipitations neigeuses et par des périodes de sécheresse qui diminueraient leur succès reproductif (Brooks et Hayashi, 2002). En revanche, le réchauffement des températures pourrait permettre à certaines espèces d'amphibiens d'étendre leur aire de répartition vers le nord (Araujo *et al.*, 2006).

Les modifications projetées des crues printanières entraîneront une baisse de reproduction comme celle constatée chez les oiseaux palustres et la sauvagine de la plaine du Saint-Laurent, qui comprennent quelques espèces en péril (Giguère *et al.*, 2005 ; Lehoux *et al.*, 2005 ; Desgranges *et al.*, 2006). Dans la plaine inondable du fleuve, le rat musqué (*Ondatra zibethica*) est particulièrement sensible aux fluctuations hivernales du niveau de l'eau et les changements le toucheront profondément (Ouellet *et al.*, 2005).

Dans l'extrême sud, des espèces de mammifères de petite taille qui hibernent, comme les chauves-souris, recherchent une température hivernale stable. Des fluctuations à la hausse, telles qu'on peut en observer en période de redoux, amènent les animaux à se réveiller, ce qui comporte un coût énergétique important.

Une augmentation de la fréquence des redoux hivernaux pourrait causer des décès dans les colonies de la petite chauve-souris brune (*Myotis lucifugus*) (Rodenhous *et al.*, 2009). Par ailleurs, les changements dans le régime des crues et les périodes de sécheresse peuvent réduire l'abondance des insectes dont elles se nourrissent, ce qui pourrait limiter la capacité de plusieurs espèces de chauve-souris à s'alimenter adéquatement.

Les populations de poissons d'eau froide du sud seront touchées par une eutrophisation accélérée ainsi que par des crues subites, potentiellement plus fréquentes, qui entraîneront une érosion du bassin versant et le transport de sédiments dans les lacs, tendance d'ailleurs déjà renforcée par l'activité humaine comme l'agriculture, l'urbanisation et l'exploitation forestière (Shuter *et al.*, 1998). L'augmentation des températures des lacs du Sud du Québec causerait de plus longues périodes de stratification thermique, entraînant des conditions anoxiques dans l'hypolimnion pendant une partie de l'année. Le touladi (*Salvelinus namaycush*), par exemple, est sensible à ces deux derniers stress (Hesslein *et al.*, 2001).

Les altérations des débits du fleuve Saint-Laurent vont également modifier la distribution spatiotemporelle des masses d'eau et les propriétés physicochimiques caractéristiques (Frenette *et al.*, 2003 et 2006). Ces changements risquent d'avoir une incidence sur la qualité nutritive des algues (Huggins *et al.*, 2004) et la structure des communautés algales (micro- et macrophytes). La baisse de profondeur devrait se traduire par une augmentation de lumière près du fond et, donc, par une augmentation concomitante de la quantité de plantes submergées, ainsi que par des modifications des propriétés de la matière organique dissoute dans l'eau et des particules (Martin *et al.*, 2005a).

Les terres humides de toutes les régions sont sensibles aux changements climatiques en raison de la variation amplifiée des crues et des étiages annuels ou interannuels associée aux précipitations violentes ou aux sécheresses. Turgeon *et al.* (2005) ont démontré qu'il existait des liens fondamentaux entre l'hydrologie et la distribution spatiale des grandes classes de terres humides. Plusieurs espèces fauniques utilisant les terres humides seraient perturbées, ce qui représente un enjeu important pour l'écosystème du Saint-Laurent, tout comme pour les marais du lac Saint-Pierre (Hudon *et al.*, 2005). De plus, d'autres pressions, notamment l'agriculture et le développement industriel et urbain, s'y exerceront (Bernier *et al.*, 1998 ; Robichaud et Drolet, 1998 ; Jean *et al.*, 2002 ; Ouranos, 2004) et entraîneront un fractionnement néfaste des habitats (Root et Schneider, 2002 ; Villeneuve, 2008).

La région centre

Les espèces végétales et animales de la région centre ont une grande résilience, et les communautés, issues du retrait postglaciaire terminé il y a moins de 10 000 ans, sont écologiquement jeunes. Ces espèces adaptées à une importante variation climatique annuelle et à une récurrence des catastrophes, constituant de grands effectifs sur un territoire immense, seraient affectées essentiellement dans les zones de transition, c'est-à-dire les zones montagneuses et les zones ripariennes. Des changements peuvent se produire aussi au sein de la forêt dense. En fait, on s'attend à une augmentation des superficies forestières touchées par les deux principaux agents perturbateurs naturels de la forêt boréale d'ici à la fin du présent siècle, en l'occurrence les feux et les épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) (Flannigan *et al.*, 2005 ; Kurz *et al.*, 2008). La conjonction des deux types de perturbation risque de rendre encore plus vulnérables certains écosystèmes boréaux, notamment les forêts d'épinettes noires à mousses (Jasinsky et Payette, 2005 ; Girard *et al.*, 2008), le plus fréquent des écosystèmes de la forêt boréale continue, et de créer un effet de rétroaction de réchauffement climatique (Kurz *et al.*, 2008). Les écosystèmes boréaux ne devraient cependant pas connaître d'importantes modifications de leur composition spécifique bien que la fréquence des feux de forêt et l'activité humaine puissent favoriser certaines formations végétales à l'échelle locale, en accélérant le processus d'ouverture du territoire forestier (Payette, 1992 ; Jasinski et Payette, 2005 ; Girard *et al.*, 2008).



L'orignal (*Alces alces*) est un grand mammifère bien adapté au froid, mais il tolère mal le temps chaud en été et en hiver. Ainsi, ses dépenses métaboliques liées à la thermo-régulation augmentent lorsque la température excède 14 °C en été et -5,1 °C en hiver (Renecker et Hudson, 1986). Rodenhouse *et al.* (2009) estiment que l'orignal pourrait disparaître des zones les plus au sud de son aire de répartition dans l'Est de l'Amérique du Nord. L'orignal peut aussi être affecté indirectement par des hivers plus doux et une moindre épaisseur de neige, par des parasites qui lui sont transmis par le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*). Rodenhouse mentionne à cet effet le ver des méninges (*Parelaphostrongylus tenuis*), qui peut être mortel pour l'orignal alors qu'il est inoffensif pour le cerf de Virginie, et la tique (*Dermacentor albipictus*) qui peut atteindre des niveaux d'infestation qui affaiblissent l'orignal.

La région maritime

Les rivages maritimes sont en général des milieux fragiles qui jouent un rôle clé dans les processus écologiques, car ils assurent l'interface entre les milieux marin et terrestre. En particulier, les côtes du golfe du Saint-Laurent, et les écosystèmes et populations qu'elles abritent, sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques (Savard *et al.*, 2008).

L'érosion des côtes est en progression partout dans le golfe du Saint-Laurent et est corrélée avec des modifications de plusieurs variables climatiques comme la fréquence des tempêtes hivernales ou le recul des glaces (Bernatchez *et al.*, 2008). La hausse du niveau de la mer dans le golfe du Saint-Laurent, qui suit la tendance observée à l'échelle mondiale (Forbes *et al.*, 2004), affecte aussi directement les écosystèmes côtiers et estuariens les plus à risque et entraîne la réduction des aires de reproduction et d'alimentation de nombreuses espèces résidentes ou migratrices (Harvell *et al.*, 2002 ; Jackson et Mandrak, 2002 ; Kennedy *et al.*, 2002).

Les réseaux hydrographiques et les lacs de cette région présentent une sensibilité particulière, compte tenu de leur effet de cloisonnement pour la migration des espèces de poissons (Hauer *et al.*, 1997). Ainsi, des espèces comme le saumon de l'Atlantique (*Salmo salar*) seront perturbées à cause de la hausse de la température de l'eau qui atteindrait des valeurs à la limite de leur possibilité de survie (Swansberg et El-Jabi, 2001). Les nouvelles conditions de température favoriseront les espèces plus tolérantes aux températures élevées. En outre, des changements phénologiques des espèces sont envisageables, ainsi qu'une extension des aires de répartition des espèces limitées par des facteurs de températures moyennes ou minimales (Edwards et Richardson, 2004 ; Rodenhouse *et al.*, 2009).



La région arctique

La région arctique sera possiblement la plus touchée par l'ampleur du changement climatique (Flanagan *et al.*, 2003). Les changements écologiques se feront au détriment d'espèces adaptées aux conditions extrêmes de cette région (Rizzo et Wilken, 1992 ; Payette *et al.*, 2001). L'expansion nordique d'espèces végétales typiques de la forêt boréale se fera à partir d'individus sur place, produisant plus facilement des graines viables. On note déjà une certaine adaptation de l'épinette noire (*Picea mariana*) (Gamache et Payette, 2004 et 2005). La vitesse de migration des isothermes sera toutefois beaucoup plus rapide que celle des plantes.

Dans la région arctique, l'ours blanc (*Ursus maritimus*) qui est dépendant de la glace de mer et le renard arctique (*Alopex lagopus*) qui subit l'extension de l'aire du renard roux (*Vulpes vulpes*), à la recherche des mêmes ressources alimentaires, seraient particulièrement menacés par les changements climatiques (Hersteinsson et MacDonald, 1992 ; Stirling, 1999 ; Walther *et al.*, 2002 ; Derocher *et al.*, 2004 ; Berteaux, 2008).

Les espèces marines de l'Arctique vivent aussi dans un environnement physique et climatique particulièrement exigeant. D'une façon générale, cette biodiversité, en termes de nombre d'espèces, est plus faible dans l'Arctique que dans les zones plus méridionales. De plus, un nombre relativement faible d'espèces marines ayant une large distribution dominent la plus grande partie de l'écosystème marin arctique et les quelques espèces dominantes, très bien adaptées à ces conditions extrêmes — par exemple : la morue franche (*Gadus morhua*), le saïda imberbe (*Arctogadus glacialis*), le béluga (*Delphinapterus leucas*), le narval (*Monodon monoceros*), le morse (*Odobenus rosmarus*), le macareux moine (*Fratercula arctica*) —, présentent une grande variabilité à l'intérieur d'une même espèce (Siron *et al.*, 2008). Ce patron de biodiversité qui semble caractériser le milieu marin arctique pourrait être un facteur clé dans l'adaptation aux changements climatiques en cas de bouleversement des conditions environnementales dans lesquelles ces espèces dominantes se sont développées.

Les stratégies d'adaptation

Pour s'adapter aux changements climatiques et en réduire les impacts sur la biodiversité, plusieurs actions essentielles s'imposent dans la planification des mesures de conservation des écosystèmes et de la biodiversité.

• Diminuer la fragmentation des écosystèmes

Parmi les actions qui semblent être efficaces pour soutenir la diversité génétique, s'inscrit en premier lieu la diminution de la fragmentation entre les écosystèmes. À titre d'exemple, le boisement (afforestation) de terrains dénudés boréaux visant en premier lieu l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (Gaboury *et al.*, 2009), s'avérerait également une option augmentant l'adaptation des écosystèmes forestiers boréaux aux changements climatiques (Boucher *et al.*, 2008).

En effet, la tendance actuelle montre une fragmentation progressive de la forêt boréale causée par la régression des pessières noires à mousses au profit de pessières ouvertes à lichens (Payette, 1992 ; Gagnon et Morin, 2001 ; Jasinsky et Payette, 2005). De plus, l'augmentation, attribuable aux changements climatiques, de la superficie forestière brûlée ou attaquée par les épidémies d'insectes (Flannigan *et al.*, 2005 ; Kurz *et al.*, 2008) pourrait résulter en une fragmentation accrue de la forêt boréale continue, à l'instar de celle constatée au cours des dernières décennies (Girard *et al.*, 2008). Dans ces circonstances, le boisement des terrains dénudés boréaux pourrait constituer un rempart contre cette perte d'écosystèmes forestiers au couvert arborescent dense.

Puisque les changements climatiques risquent d'induire une migration faunique vers le nord (Berteaux, 2008 et 2009), le boisement des terrains dénudés pourrait permettre la restauration d'une partie des forêts denses et maintenir des habitats plus accueillants pour ces espèces davantage méridionales. De plus, les couverts forestiers denses offrent généralement un meilleur effet tampon que les couverts clairsemés contre les événements météorologiques plus intenses attendus (Buckley *et al.*, 1998 ; Noss, 2001).

Il convient ici de noter que la résilience des écosystèmes est aussi garante de la résilience des populations humaines qui vivent dans ces écosystèmes et qui en dépendent pour leur survie. Cette résilience, tant humaine que de l'environnement naturel, est maintenant considérée comme un facteur essentiel pour assurer l'adaptation de ces populations aux changements climatiques (The Secretariat of CBD and Nature Conservancy, 2008 ; Nature Conservancy, 2009).

• Faire le suivi des espèces sensibles

La Stratégie québécoise sur la diversité biologique 2004-2007 a incité chaque ministère à déterminer un ensemble d'actions et à faire rapport régulièrement de l'état d'avancement de celles-ci au ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP, 2008b). Toutefois, comme le faisaient remarquer Gérardin *et al.* (2002), l'information sur la flore et la faune présente des lacunes, notamment sur la question des espaces non forestiers (par exemples territoires forestiers non productifs, terres humides, flores subarctique et alpine), qui pourrait nuire à la capacité des autorités gouvernementales de faire un suivi des espèces sensibles au changement climatique.

L'Atlas de la biodiversité du Québec nordique, un projet piloté par le MDDEP en collaboration avec la Fondation Prince Albert II de Monaco et Ouranos, devrait venir combler en partie cette lacune. Cette nouvelle étude combinera à la fois des données sur la biodiversité (bases de données sur l'occurrence et la répartition des espèces dans des zones représentatives de certaines biorégions du Nord du Québec) et des données sur les changements climatiques projetés à l'aide de scénarios climatiques. L'objectif de ce projet est d'améliorer les connaissances sur la biodiversité afin d'aider à situer les futures aires protégées et d'améliorer les outils de conservation de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques. À terme, le projet viendra compléter des documents de référence tels que *L'Atlas de la biodiversité du Québec* qui se concentrait sur les espèces menacées ou vulnérables et ne tenait pas compte de l'évolution du climat (MDDEP, 2005b).

• Poursuivre la mise en place des aires protégées

Les aires protégées et les territoires où certaines, voire toutes les activités humaines sont interdites, servent à assurer la conservation d'écosystèmes naturels représentatifs ou rares (voir la figure 34). Les aires protégées et leur regroupement en réseau pour améliorer la connectivité des écosystèmes, représentent l'un des outils de conservation les plus efficaces à la disposition des gouvernements pour conserver la biodiversité et l'intégrité des écosystèmes dont ils sont les responsables sur leurs territoires (Jaffreux, 2008).

À cet égard, dans le cadre de la Stratégie québécoise sur la diversité biologique 2004-2007, le gouvernement du Québec décrit la consolidation d'un réseau d'aires protégées comme un axe d'intervention prioritaire, au même titre que la protection des espèces menacées ou vulnérables, pour contribuer à la mise en œuvre de la Convention sur la diversité biologique (Ministère de l'Environnement du Québec, 2004).

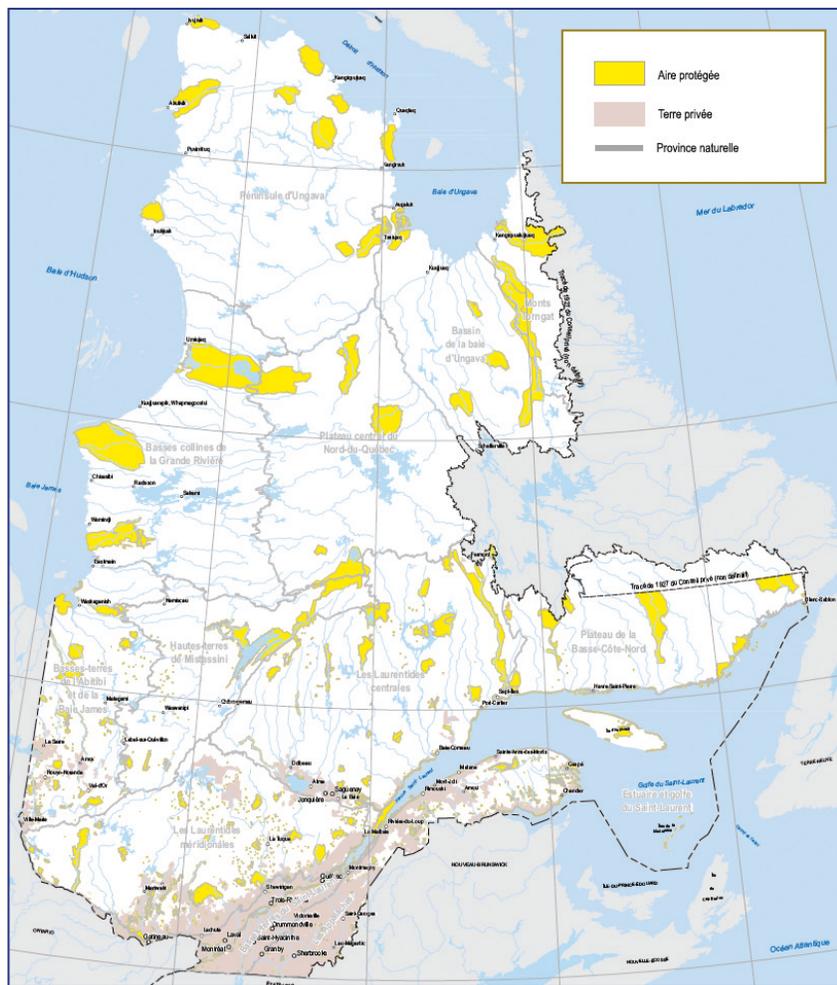


Figure 34 : Carte des aires protégées au Québec. Le Québec comporte des aires protégées de juridiction fédérale, provinciale et municipale ainsi que des aires protégées à caractère privé. Le réseau d'aires protégées couvre environ 8 % du territoire (MDDEP, 2009c).

L'approche actuelle (Stratégie des aires protégées) pour le choix des nouvelles aires protégées sous-tend « une vision holistique du territoire où l'écosystème est considéré comme une entité spatiale et où apparaît la notion de filtre brut » (Gérardin *et al.*, 2002). Toutefois, cette méthode, qui accorde une valeur prépondérante aux éléments physiques de l'écosystème (climat, géologie, topographie, hydrologie et sols) risque de fragiliser le futur réseau d'aires protégées et son rôle dans la protection des espèces et des écosystèmes, car le climat et l'hydrologie sont appelés à changer à moyen terme. Il conviendrait donc de prendre en compte ces variables dans les plans de conservation futurs.

De son côté, Parcs Canada a élaboré une stratégie qui tient compte des changements climatiques dans son approche de gestion de la biodiversité des parcs existants (Wrona *et al.*, 2005). La coordination de la mise en place d'un vaste réseau de zones de protection marines par Pêches et Océans Canada (Landry *et al.*, 2008), en collaboration avec tous les paliers de gouvernements impliqués, s'inscrit également dans cette action de protection de la biodiversité et de la productivité des écosystèmes marins, propriétés essentielles pour en assurer la résilience, face aux impacts combinés des activités humaines et des changements climatiques (Siron *et al.*, 2008).

Aux niveaux municipal et privé, il ne semble pas exister encore de tels mécanismes concertés pour l'établissement d'aires protégées. Quelles que soient la portée et l'échelle des stratégies de conservation mises en place, il serait pertinent de considérer les aires protégées comme des aires témoins des régions naturelles et de leur évolution, et de les situer et de les gérer en tenant compte des changements climatiques à venir.

Ainsi, pour favoriser l'adaptation, il conviendrait de compléter dès que possible le réseau d'aires protégées terrestres et maritimes afin de conserver des secteurs représentatifs de chacune des régions naturelles. Il faudrait aussi favoriser la gestion scientifique des aires protégées, en disposant de programmes d'inventaire, de recherches, de suivi et de points de comparaison avec les territoires adjacents afin de pouvoir suivre l'évolution des espèces et des écosystèmes dans le contexte des changements climatiques.

Prendre en considération les biens et services écologiques

Les écosystèmes fournissent un ensemble de biens et de services à la société, qui vont de l'eau pour la consommation jusqu'à l'épuration de l'air ou de l'eau, en passant par la pollinisation des cultures, pour n'en citer que quelques exemples (Limoges, 2009). Tout comme les écosystèmes qui les produisent, les services écologiques seront perturbés par les changements climatiques et l'on peut craindre des conséquences importantes pour le bien-être de l'être humain. Les écosystèmes soutiennent la vie sur Terre par le biais des biens et des services qu'ils nous procurent. Nul doute qu'avec l'émergence de ce qu'il est maintenant convenu d'appeler l'économie des écosystèmes et de la biodiversité, qui consiste à mettre un prix sur les différents éléments de la biodiversité et de l'environnement naturel (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009 ; Jones-Walters et Mulder, 2009), ces concepts vont jouer un rôle fondamental dans la façon de percevoir la biodiversité et d'évaluer plus justement les impacts des activités humaines sur l'environnement naturel, y compris les changements climatiques.

• Modifier les règles d'exploitation des ressources vivantes

Les changements attendus dans les effectifs de certaines populations fauniques recherchées par les chasseurs et les pêcheurs commerciaux et sportifs nécessiteront un suivi plus serré afin d'éviter des pressions supplémentaires sur les espèces fragilisées ou de ralentir l'expansion de certaines espèces vers des zones où elles étaient historiquement absentes, mettant ainsi en péril d'autres espèces.

• Intégrer les changements climatiques aux activités de gestion du territoire

Il s'agit d'étendre la responsabilité du suivi et de la gestion de la biodiversité aux gestionnaires du territoire, qui pourraient ainsi mieux comprendre cet enjeu et mieux adapter leurs pratiques afin de favoriser l'adaptation des espèces aux nouvelles conditions (Génot et Barbault, 2005). Les mesures soutenues par Ouranos afin d'enrichir les connaissances sur la biodiversité du Québec décrites précédemment permettront de faciliter cet arrimage.

Agir le plus tôt possible pour aider l'environnement à s'adapter aux changements climatiques

Depuis des millions d'années, les écosystèmes et leur biodiversité s'adaptent à la variabilité naturelle du climat. Cependant, nous ne connaissons pas tous les mécanismes par lesquels les organismes vivants, même les plus évolués, s'adaptent aux variations climatiques (Berteaux et Stenseth, 2006).

Les changements climatiques posent par ailleurs un défi supplémentaire, dans la mesure où le rythme auquel se modifie le climat est au-delà de sa variabilité historique. Dans ce contexte, il est difficile de savoir si les écosystèmes, les habitats et les espèces seront capables de suivre ce rythme, comment ils se recomposeront et à quoi ils ressembleront dans 30, 50 ou 100 ans.

Au fur et à mesure que nous nous rapprochons de l'échéance, il est de plus en plus clair que l'objectif de 2010 pour le maintien de la diversité biologique ne sera pas complètement atteint (Secrétariat de la CBD, 2006). Les changements climatiques vont venir s'ajouter aux autres pressions exercées par les activités humaines sur les écosystèmes et la biodiversité. Il convient par conséquent de commencer immédiatement le recensement des éléments les plus vulnérables de l'environnement naturel et l'élaboration de mesures d'adaptation visant à minimiser cette pression sur les écosystèmes pour optimiser leurs conditions d'adaptation aux changements climatiques. En plus de contribuer à sauvegarder le capital naturel de la planète, cela permettra de préserver les services écologiques essentiels à la survie et au bien-être de l'humanité.



SOMMAIRE ET CONCLUSION

De tout temps, les conditions climatiques ont eu une influence déterminante à la fois sur les écosystèmes et sur les sociétés humaines. Pour les premiers, le climat constitue un des facteurs principaux influençant la nature et l'ampleur des effectifs des différentes espèces végétales et animales composant un écosystème donné. Pour les secondes, malgré les progrès de la technologie, les caractéristiques climatiques demeurent souvent à la base de plusieurs des activités économiques ainsi qu'à la source de nombreux aspects culturels et de particularités du patrimoine bâti d'une région.

L'ampleur des changements climatiques envisagés par suite de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre viendra bouleverser les équilibres patiemment construits tant dans l'environnement naturel que dans le milieu humain, en jouant à la fois pour ce dernier sur l'environnement bâti, les activités économiques et la santé des populations.

Les changements climatiques récents et prévisibles

Déjà, plusieurs changements climatiques ont été observés. Ainsi, au cours des dernières décennies, les températures journalières moyennes dans le Sud du Québec ont augmenté de 0,2 °C à 0,4 °C par décennie, le réchauffement étant plus important pour les températures minimales que maximales. Cette hausse observée des températures s'est manifestée aussi par le raccourcissement de la saison de gel, l'augmentation du nombre de degrés-jours de croissance et la diminution du nombre de degrés-jours de chauffage. Du côté des précipitations, on a remarqué une augmentation du nombre de jours avec précipitations de faible intensité ainsi qu'une diminution des précipitations de neige dans le Sud du Québec et une augmentation dans le Nord.

Dans les prochaines décennies, on s'attend à ce que le climat se réchauffe sur l'ensemble du territoire québécois, et de façon plus marquée en hiver qu'en été. Ainsi, en hiver à l'horizon 2050, on anticipe des augmentations de températures se situant entre 2,5 °C et 3,8 °C dans le Sud du Québec et entre 4,5 °C et 6,5 °C dans le Nord. En été, les hausses de température se situeraient entre 1,9 °C et 3,0 °C au Sud et entre 1,6 °C et 2,8 °C au Nord.



Des augmentations de précipitations — de 16,8 % à 29,4 % au Nord et de 8,6 % à 18,1 % au Sud — sont attendues en saison hivernale à l'horizon 2050. La hausse des précipitations hivernales entraînera une augmentation de l'accumulation de la neige au sol dans le Nord. Par contre, dans le Sud du Québec une diminution de l'accumulation de neige au sol est projetée, en raison de la hausse des températures et du raccourcissement de la saison froide. En saison estivale, la hausse des précipitations serait de 3,0 % à 12,1 % dans le Nord alors que dans le Sud, aucun changement significatif des précipitations n'est attendu.

La vulnérabilité des écosystèmes

Déjà, dans le Nord, les écosystèmes terrestres et aquatiques ont commencé à changer avec la dégradation du pergélisol qui provoque la formation de cuvettes et de mares de thermokarst ainsi qu'avec l'expansion des populations arbustives. La région arctique sera possiblement la plus touchée par l'ampleur du changement climatique, et les espèces adaptées aux conditions extrêmes de cette région subiront la compétition d'espèces provenant du Sud.

Dans le Sud, un adoucissement des hivers et une « tropicalisation » des étés signifieraient une évaporation accrue des eaux naturelles, entraînant une fragilisation des milieux humides dépendants du régime des crues. Plusieurs espèces menacées, aux habitats fragmentés et à faible capacité migratoire, déjà soumises à divers stress, courent également de grands risques.

Les changements climatiques modifieront les dynamiques écologiques des écosystèmes, tout comme la distribution et l'abondance relative des espèces de la flore et de la faune. Dans certains cas, cela se traduira par la réduction des effectifs ou la disparition de certaines populations alors que, dans d'autres cas, il y aura accroissement des effectifs et des aires de répartition. En dehors du simple déplacement d'écosystèmes vers le nord, il est à craindre que plusieurs espèces menacées et habitats rares disparaissent, surtout dans les territoires où l'activité humaine est intense. Les changements climatiques vont venir s'ajouter aux autres pressions exercées par les activités humaines sur les écosystèmes et la biodiversité.

Déterminer les éléments les plus vulnérables de l'environnement naturel et prendre des mesures d'adaptation afin de minimiser les pressions de l'activité humaine sur les écosystèmes s'imposent afin de contribuer à la sauvegarde du capital naturel de la planète pour ainsi préserver les services écologiques essentiels à la survie et au bien-être de l'humanité.

Les changements climatiques affecteront directement les infrastructures de toutes les régions du Québec.

Dans l'Arctique québécois, le réchauffement très rapide et marqué des températures entraînera une fonte accélérée du pergélisol qui exposera les infrastructures et les bâtiments à des risques d'affaissement et de déformation. En particulier, les pistes d'aéroport de plusieurs villages, essentielles aux communications et aux approvisionnements, pourraient être sévèrement endommagées et requérir des travaux d'entretien plus fréquents.

Dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, de nombreux bâtiments privés et publics et plusieurs infrastructures seront exposés à une accentuation de l'érosion des berges. La hausse du niveau de la mer, la diminution de l'englacement, la géologie de certaines côtes et les changements dans les régimes de tempêtes semblent se conjuguer pour entraîner cette intensification du processus naturel d'érosion.

Dans le Sud, l'augmentation de la fréquence, de l'intensité ou de la durée des événements climatiques extrêmes tels que les précipitations représente des risques accrus pour des infrastructures vieillissantes, se traduisant par une perte d'efficacité, une usure accélérée, voire la perte totale. De plus, des événements météorologiques récents ont démontré la forte dépendance des communautés urbaines et rurales à l'égard des infrastructures de transport et d'approvisionnement en eau et en énergie exposées aux aléas climatiques.

Des stratégies d'adaptation portant en priorité sur les infrastructures essentielles sont indispensables si on veut limiter l'ampleur des impacts appréhendés, notamment dans l'Arctique québécois et les zones côtières. D'une façon plus générale, il serait aussi crucial d'investir dans la réhabilitation, la mise à niveau et la construction de nouvelles infrastructures afin de prévenir les risques, plutôt que de réagir aux événements. Le renouvellement des infrastructures vieillissantes offre à cet égard une occasion unique de s'adapter aux conditions climatiques futures. En effet, il convient dans ce contexte de revoir les critères de conception, qui en général reposent sur des données historiques. Cette pratique que sous-tend une hypothèse de climat historiquement stable devra être revue en fonction de l'évolution attendue des données climatiques.

Plusieurs activités économiques seront directement touchées.

En raison des horizons relativement lointains des changements climatiques les plus importants, il est particulièrement difficile d'évaluer leurs impacts sur les activités socio-économiques. Ceux-ci dépendront d'une part d'impacts biophysiques encore mal connus ou chiffrés, d'autre part d'évolutions commerciales et technologiques aussi importantes sinon plus que celle du climat. Toutes choses étant égales par ailleurs, des changements climatiques modérés et graduels pourraient être favorables à plusieurs activités et possiblement à l'ensemble de l'économie québécoise ; cependant, des changements plus importants ou encore plus rapides ainsi qu'une hausse du nombre des événements climatiques extrêmes pourraient s'avérer nettement défavorables.

L'exploitation forestière, la production hydroélectrique, l'agriculture, le tourisme et plusieurs autres activités économiques seront directement touchés par les changements de températures et de précipitations. Dans de nombreux cas, ces modifications climatiques et leurs effets indirects auront des impacts négatifs sur ces activités qui sont au cœur même de l'existence de nombreuses communautés du Québec. À l'inverse, certaines modifications du climat présentent des aspects positifs dont l'économie québécoise pourrait tirer profit.

Pour la production hydroélectrique, les résultats tendent à montrer, en dépit de ces incertitudes, que le Québec n'a pas vraiment à craindre les effets des changements climatiques sur la capacité de production hydroélectrique annuelle. Globalement, on estime que les changements climatiques se traduiront par une augmentation des précipitations de neige et de pluie dans l'ensemble des bassins versants, avec cependant des différences importantes selon les régions et des modifications dans la répartition saisonnière. Du côté de la demande d'énergie, malgré une hausse substantielle des besoins en climatisation, la hausse des températures réduirait encore plus les besoins en chauffage et diminuerait ainsi la consommation annuelle.



De même, bien que les recherches ne permettent pas à ce jour de le déterminer avec certitude, l'impact net sur la productivité forestière pourrait être positif à moyen terme en raison à la fois de l'augmentation des températures et des précipitations ainsi que des concentrations en CO₂. Toutefois, la fréquence et l'intensité des perturbations naturelles comme la prolifération d'agents pathogènes et d'insectes ravageurs, augmenteraient, de même que la fréquence d'événements climatiques extrêmes, et pourraient se traduire par des impacts globalement négatifs.

Les conditions climatiques pourraient aussi se révéler plus favorables à la production agricole, actuellement limitée au Québec par une saison de croissance courte et un cumul de chaleur restreint. Ce serait le cas pour certaines cultures telles que le maïs et le soya, qui pourraient s'étendre dans de nouvelles régions. L'augmentation de la concentration atmosphérique du CO₂ pourrait aussi être à l'avantage de l'agriculture. Cependant, d'autres facteurs liés au climat, tels que la multiplication des ravageurs des cultures et la vulnérabilité des sols à l'érosion, pourraient se montrer plus problématiques dans le futur. De plus, il existe une probabilité accrue de stress hydrique due à l'augmentation de l'évapotranspiration occasionnée par les températures plus élevées. L'effet net, soit positif soit négatif, dépendra des interactions complexes et parfois imprévisibles de tous ces facteurs.

Le tourisme est une autre industrie importante où le climat constitue un facteur déterminant, que l'on pense au ski, à la motoneige, à la baignade, à la navigation de plaisance ou encore aux randonnées en nature ainsi qu'indirectement la chasse et la pêche. Les études dont on dispose indiquent que dans certaines des localités les plus au sud du Québec, le ski et les autres sports d'hiver verraient leur saison amputée de plusieurs jours. L'accélération de l'érosion côtière pourrait également être préjudiciable à plusieurs régions touristiques. Ici encore, des mesures d'adaptation technologiques ou de diversification pourront permettre à l'industrie de réduire les impacts de ces changements.

Pour l'ensemble du Québec, les changements climatiques pourraient donc s'avérer modestement positifs. Cependant, dans plusieurs régions et communautés fortement dépendantes de ces activités, les impacts pourraient être majeurs. À titre d'exemple, dans l'Arctique québécois, qui devrait connaître les changements climatiques les plus importants en valeur absolue, l'accès aux ressources tirées de la chasse et de la pêche sera fortement compromis.

Cela viendra ajouter à la complexité des enjeux culturels et démographiques auxquels cette région fait face à l'heure actuelle, associés entre autres à la forte exposition des communautés aux risques naturels et à leur dépendance envers de nombreuses infrastructures essentielles. À l'inverse, des occasions de développement liées à la navigation, à la production d'énergie, au secteur minier dans des conditions hivernales moins froides et à une diversification de la faune et de la flore sont possibles. Ailleurs au Québec, la vie de plusieurs communautés dont l'économie est axée sur le tourisme, la forêt ou encore la chasse et la pêche pourraient être bouleversée.

Les changements climatiques représentent un défi pour la santé humaine.

Les impacts des changements climatiques sur la santé humaine sont nombreux et divers. Ils vont des effets directs du réchauffement moyen, des vagues de chaleur et des îlots thermiques urbains, de la pollution atmosphérique, des feux de forêt ou de friche, des tempêtes estivales et hivernales et de l'exposition aux rayons UV, jusqu'aux effets indirects des changements dans la quantité et la qualité des ressources hydriques et des maladies zoonotiques.

En particulier, des températures plus élevées associées à un haut taux d'humidité ainsi que des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses représentent des risques importants pour la santé humaine. Un deuxième ensemble d'impacts importants est lié à l'incidence de l'augmentation des températures sur la pollution atmosphérique, notamment les pollens, l'ozone et les particules en suspension.

Les impacts indirects issus des réactions de l'environnement naturel et bâti entraîneraient une hausse des risques sur les plans de la santé, de la sécurité et du bien-être. Les changements appréhendés du cycle de l'eau et les impacts sur les nombreux usages de la ressource hydrique soulèvent quant à eux des préoccupations au sujet de la qualité et de la quantité de la disponibilité de l'eau, de même qu'à propos de la sécurité des populations face aux inondations.

L'application de mesures d'adaptation, surtout préventives et priorisées pour les populations à risque ou en voie de l'être, minimiserait l'ampleur des impacts négatifs. Parmi ces mesures, il y a des actions visant à modifier les comportements à risque, une aide aux populations vulnérables et un aménagement du territoire réduisant les risques climatiques.



L'adaptation aux changements climatiques permet d'envisager de nombreuses solutions afin d'en atténuer substantiellement les impacts négatifs.

Au fil des générations, les sociétés humaines ont fait preuve d'une grande capacité d'adaptation à différents climats, dont la gamme s'étend de l'atmosphère chaude et humide des tropiques à l'environnement froid et sec des étendues désertiques de l'Arctique. Depuis des siècles, les systèmes humains ont eu tendance à réagir aux impacts de la variabilité naturelle du système climatique de manière à diminuer leur exposition aux aléas du climat et à augmenter leur capacité d'adaptation et leur résilience. De même, les composantes de l'environnement naturel s'adaptent à la variabilité du climat.

Néanmoins, ces adaptations ne se font pas sans difficulté et s'accompagnent souvent de pertes et de coûts importants. La préparation et la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation visent justement à réduire ces pertes et ces coûts et, si possible, à tirer parti des situations nouvelles. L'adaptation planifiée repose sur les éléments suivants :

- déterminer et comprendre les enjeux prioritaires ;
- tenir compte des incertitudes émergentes dans la prise de décision ;
- concevoir et mettre en œuvre les techniques ou les technologies optimales ;
- acquérir et communiquer les données et les informations dont ont besoin les acteurs de l'adaptation ;
- modifier ou adapter les politiques et les normes ainsi que les structures organisationnelles.

L'étendue des enjeux de l'adaptation et le grand nombre de décideurs impliquent l'utilisation d'une vaste panoplie d'outils qui vont de la sensibilisation et de l'information jusqu'à l'intégration des changements dans les variables climatiques aux lois, aux normes de construction et aux politiques organisationnelles.

Il faudra, pour relever le défi des changements climatiques, développer ou avoir à sa disposition plusieurs outils et habiletés tels que :

- davantage de données pertinentes et de qualité, pour comprendre ;
- une interdisciplinarité entre les sciences du climat et les sciences des impacts biophysiques, économiques, sociaux et de la santé, pour intégrer l'ensemble des connaissances ;
- un meilleur suivi et un meilleur système d'avertissement, pour se préparer ;
- une interaction accrue entre les chercheurs et les acteurs politiques et opérationnels, pour faciliter la prise de décision ;
- du leadership et de l'ouverture d'esprit dans l'ensemble de la société, pour déterminer et prioriser les problèmes.

Le tableau 8 résume une variété de stratégies d'adaptation existantes ou à l'étude, appliquées et applicables à des communautés, à des activités socioéconomiques ou encore à l'environnement naturel. On peut observer à quel point les acteurs sont nombreux — individus, communautés, industries, instances provinciales, fédérales et internationales —, comprendre combien est grande la distribution des temps d'intervention — décision à court terme, planification à long terme — et apprécier la multiplicité des enjeux ciblés par les mesures d'adaptation. Les perceptions et les comportements, les processus et les facteurs menant aux prises de décision de même que les aspirations et les convictions des individus et des communautés apparaissent comme des éléments fondamentaux de l'adaptation des systèmes humains.

Le Québec, qui devra relever au même titre que l'ensemble des habitants de la planète ce genre de défis, dispose d'une grande capacité d'adaptation, notamment grâce à son économie diversifiée et ses nombreuses institutions de recherche. À ce propos, Ouranos joue un rôle essentiel de catalyseur dans la mise au service de la société des capacités de recherche existantes.

Rappelons en terminant que, même si l'adaptation est une option incontournable, elle doit impérativement s'accompagner de réductions des émissions de gaz à effet de serre afin d'attaquer le problème à sa source. En effet, s'il est possible de réduire les impacts négatifs des changements climatiques à moyen terme par une saine adaptation, seule la réduction des émissions des gaz à effet de serre peut en limiter les coûts, beaucoup plus grands et potentiellement désastreux à long terme. La fonction des solutions d'adaptation est de s'ajouter aux efforts investis dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour résoudre les défis que posent les changements climatiques aux générations actuelles et futures.

Tableau 8 : Types de mesures d'adaptation aux changements climatiques (d'après Bourque et Simonet, 2008).
Les numéros entre parenthèses renvoient aux documents en référence aux pages 115 à 117.

	Développer et comprendre Acquisition d'informations et développement de savoir-faire	Communiquer et sensibiliser Sensibilisation et modifications des comportements	Intervenir et légiférer Modification des lois, règlements et normes	Appliquer des technologies Utilisation de techniques, produits, matériaux	Appliquer/recommander des directives ou façons de faire Ajustement des pratiques et politiques
COMMUNAUTÉS					
Isolées	Cartographier les zones sensibles pour le développement d'infrastructures (1)	Diffuser l'information relative aux conditions des réseaux de transport (2)	Établir des normes d'aménagement du territoire en fonction des zones sensibles (2-3)	Appliquer des techniques de réduction du dégel du pergélisol (4)	Réaliser un guide de bonnes pratiques pour la construction sur pergélisol (5)
Dépendantes des ressources naturelles	Déterminer les meilleures sources de graines/génotypes (6)	Informar les communautés des risques de feux au moyen de l'indice forêt-météo (7)	Réglementer la pêche (date d'ouverture et de clôture, lieux, etc.) (8)	Gérer la pêche en fonction des habitats pour assurer la viabilité des ressources (8)	Mettre en place un programme de diversification économique des communautés à risque (9)
Côtières	Concevoir un projet scientifique intégré à un volet participatif afin de répondre aux besoins des régions côtières (10)	Préparer par des exercices de simulation les citoyens, municipalités, gouvernements et autres acteurs (11)	Réglementer la construction en zones inondables, zonages, règlement de contrôle intérimaire (12)	Suivi des ouvrages de protection (13)	Établir une gestion intégrée des zones côtières (14)
Rurales	Identifier les cultivars utilisés plus au sud (analogues) et appropriés à la région (15)	Sensibiliser le public à l'économie d'eau en période de sécheresse (16)	Mettre en place un programme de stabilisation des revenus, d'assurances privées et d'incitatifs pour tenir compte des changements climatiques (17)	Généraliser l'irrigation goutte-à-goutte et les technologies combinées de drainage superficiel et d'écoulement (18)	Installer des systèmes d'aération efficaces ou des gicleurs pour rafraîchir le bétail (19)
Urbaines	Identifier les terrains propices aux espèces allergènes et cartographier les sources d'émissions allergènes (20)	Informar sur les mesures d'urgence de la municipalité (21-22)	Réglementer les normes de résistance dans la construction (23), code du bâtiment en matière d'énergie (24)	Favoriser l'usage de surfaces et de revêtements réfléchissants (toitures, peinture de façades, etc.) (25)	Mettre en place des systèmes d'alerte locale chaleur-santé-canicule (26)
DOMAINES					
Santé	Analyser le lien morbidité-mortalité et climat (27-28)	Sensibiliser la population aux périodes de smog et de canicule et donner des conseils (29)	Prendre des mesures préventives de limitation des émissions polluantes (en début de période anticyclonique) (30)	Procéder à des campagnes d'arrachage de l'herbe à poux et à la plantation d'espèces compétitrices (20)	Privilégier les toitures vertes ou à matériaux à albédo élevé (12-25). Mettre en place des guides de soins adaptés aux clientèles de soins à domicile en cas d'événements extrêmes.
Infrastructures	Analyser par diachronie des photos aériennes du trait de côte et calculer le taux d'érosion (12)	Mettre sur pied des systèmes de prédiction et d'alerte, éducation du public (23)	<i>Loi sur la sécurité civile</i> (L.R.Q., c. S-2.3) adoptée en 2001 à la suite de la crise du verglas de 1998 (31)	Concevoir des bâtiments plus résistants (12) ou mieux adaptés aux nouvelles moyennes (32)	Ajout de 1 m au pont de la Confédération en vue de la hausse attendue du niveau de la mer (38)
Secteur primaire de l'économie	Développer la lutte biologique pour contrôler les propagations (6)	Sensibiliser à une gestion des récoltes et des champs adaptée aux conditions climatiques présentes et à venir (15)	Modifier la Loi sur les forêts pour évaluer le concept dépassé du rendement soutenu en volume (34)	Choisir des espèces et cultivars adaptés à différentes conditions climatiques (15)	Prévoir en constituant sa propre réserve financière de secours (35)
Secteur tertiaire de l'économie	Concevoir des outils d'évaluation économique (39-36)	Diversifier l'offre récréotouristique afin de minimiser le risque climatique (37)	S'assurer contre les pertes dues au mauvais temps, produits dérivés climatiques (22)	Mettre en place des plans d'urgence, d'intervention et d'évacuation (22)	Rehausser les critères de conception des ponts et ponceaux de 10 % (génie civil, MTQ) (38)
Eau	Mettre à jour les courbes IDF (40-41)	Diffuser les pratiques de gestion de récupération des eaux de pluie (42)	Mettre en œuvre l'entente internationale sur les ressources en eau du bassin des Grands Lacs (48)	Réhabiliter les ressources dégradées (22)	Tester, revoir les règles de gestion en se basant sur divers scénarios climatiques possibles (42)
Écosystèmes	Cartographier les niches écologiques et évaluer les changements (42)	Organiser des colloques de vulgarisation scientifique (44)	Maintenir une représentation faunique et floristique régional (aires protégées) (45)	Restaurer et préserver les zones humides (46)	Protéger les espèces et les habitats et adopter une approche écosystémique (47)



RÉFÉRENCES

Agence canadienne d'évaluation environnementale. *Examen des facteurs de changement climatique dans des évaluations environnementales antérieures choisies. Annexe D. Pont de la Confédération*, Agence canadienne d'évaluation environnementale, 2000, <http://www.ceaa-acee.gc.ca/015/001/005/index_f.htm> [consultation : 14 août 2009].

Agence de la santé et des services sociaux de la Montérégie. *Table québécoise sur l'herbe à poux*, Agence de la santé et des services sociaux de la Montérégie, 2007, <<http://www.santemonteregie.qc.ca/agence/sante publique/directiondesantepublique/herbeapoux.fr.html>> [consultation : 11 juin 2009].

Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Les algues, les cyanobactéries et la qualité de l'eau*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2003, <<http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficherdo?id=1189714026543&lang=fra>> [consultation : 11 juin 2009].

Ainsworth, E.A. et S.P. Long. « What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂ », *New Phytologist*, vol. 165, n° 2, 2005, p. 337-653.

Aitken, S.N., S. Yeaman, J.A. Holliday, T. Wang et S. Curtis-McLane. « Adaptation, migration or extirpation : Climate change outcomes for tree populations », *Evolutionary Applications*, vol. 1, 2008, p. 95-111.

Albanese, B., P.L. Andermeier et S. Dorai-Raj. « Ecological correlates of fish movement in a network of Virginia streams », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 61, 2004, p. 857-869.

Albert, C., R. Roulx et P. Richard. *Chaleur accablante et usage de médicaments : étude exploratoire en Estrie*, Institut national de santé publique du Québec, Bulletin d'information en santé environnementale, vol. 17, n° 3, 2006, p. 5-8, <<http://www.inspq.qc.ca/pdf/bulletins/bise/BISE-17-3.pdf>> [consultation : 11 juin 2009].

Allard, M. et M.K. Seguin. « Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 41, n° 1, 1987, p. 141-152.

Allard, M., R. Fortier, C. Duguay et N. Barrette. *A new trend of fast climate warming in Northern Quebec since 1993. Impacts on permafrost and man-made infrastructures*, réunion d'automne 2002 de l'American Geophysical Union, Moscone Center, San Francisco (Californie), 2002a.

Allard, M., R. Fortier et O. Gagnon. *Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik, Québec*, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 2002b, 121 p.

Allard, M., R. Fortier, O. Gagnon et Y. Michaud. *Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik. Une communauté en croissance sur un terrain sensible au changement climatique*, rapport final, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 2004, 101 p. <<http://www.assnat.qc.ca/fra/37legislature2/commissions/Cte/depot-rechauffement.html>> [consultation : 17 septembre 2009].

Allard, M., R. Fortier, D. Sarrazin, F. Calmels, D. Fortier, D., D. Chaumont, J.-P. Savard et A. Tarussov. *L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes*, Centre d'études nordiques, Université Laval, rapport soumis à Ouranos, Ressources Naturelles Canada et Transports Québec, 2007a, 184 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/13_Rapport_Allard2_nord_2007.pdf> [consultation : 17 septembre 2009].

Allard, M., F. Calmels, D. Fortier, C. Laurent, E. L'Hérault et F. Vinet, F. *Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique*, Centre d'études nordiques, Université Laval, rapport soumis à Ouranos et Ressources Naturelles Canada, 2007b, 42 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/14_Rapport_Allard_nord_2007.pdf> [consultation : 17 septembre 2009].

Allard, M., D. Sarrazin et C. Marchildon. « Evidences of impacts of climate warming on permafrost in Nunavik (Northern Quebec) », actes du symposium sur l'environnement et les mines tenu du 2 au 5 novembre 2008 à Rouyn-Noranda (Québec), 2008, 16 p.

American Water Works Association. *Manual of Water Supply Practices – M48 : Waterborne Pathogens*, 1^{re} édition, Denver (Colorado), 1999, 285 p.

- Anctil, M. et L. Rochette. *Enquête de santé auprès des Inuits du Nunavik 2004, Qanuippitaa ? Comment allons-nous ? Les faits saillants de l'enquête*, Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) et Régie régionale de la santé et des services sociaux du Nunavik (RRSSSN), 2008, 7 p.
- Andalo, C., J. Beaulieu et J. Bousquet. « The impact of climate change on growth of local white spruce populations in Quebec, Canada », *Forest Ecology and Management*, vol. 205, 2005, p. 169-182.
- André, P. et C.R. Bryant. *Évaluation environnementale des stratégies d'investissement des producteurs agricoles de la région de Montréal en regard des changements climatiques*, rapport soumis au Fonds d'action pour le changement climatique, Ressources naturelles Canada, mai 2001.
- Araujo, M.B., W. Thuillier et R.G. Pearson. « Climate warming and the decline of Amphibians and Reptiles in Europe », *Journal of Bio-Geography*, vol. 33, 2006, p. 1712-1728.
- Archambault, M. *Étude économique et financière des stations de ski du Québec. Le portrait de la saison 2007-2008 des stations de ski alpin du Québec*, Chaire de tourisme Transat, Université du Québec à Montréal, Montréal, 2008, <<http://www.chairedetourisme.uqam.ca/pdf/sommaire%20ex%e9cutif%20ski%2007-08.pdf>> [consultation 18 juin 2009].
- Ashmore, P. et M. Church. *The Impact of Climate Change on Rivers and River Processes in Canada*, Commission géologique du Canada, bulletin 555, 2001.
- Auld, H. et D. MacIver. « Cities and communities : the changing climate and increasing vulnerability of infrastructure », dans *Climate Change : Building the Adaptive Capacity*, A. Fenech, D. MacIver, H. Auld, B. Rong et Y.Y. Yin (éd.), Meteorological Service of Canada, Environment Canada, 2004, Toronto, p. 289-305.
- Ayres, M.P. et M.J. Lombardero. « Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens », *Science of the Total Environment*, vol. 262, n° 3, 2000, p. 263-286.
- Bagon, M., J.L. Harper et C.R. Townsend. *Ecology. Individuals, Populations and Communities*, 3^e édition, Blackwell Science, Oxford (Royaume-Uni), 1996, 1068 p.
- Banque mondiale. *Addressing Climate Change-Driven Increased Hydrological Variability in Environmental Assessments for Hydropower Projects – A Scoping Study*, Banque mondiale, 2007, 37 p.
- Barbeau, B., A. Carrière, M. Prévost, A. Zamyadi et P. Chevalier. *Changements climatiques au Québec méridional – Analyse de la vulnérabilité des installations québécoises de production d'eau potable aux cyanobactéries toxiques – Résumé*, Institut national de santé publique du Québec, 2008, 16 p., <<http://www.inspq.qc.ca/publications/notice.asp?E=p&NumPublication=867>> [consultation : 11 juin 2009].
- Beaudet, P., I. Beaudin, A. Michaud et M. Giroux. *Le transport du phosphore, Fiche technique n° 3*, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2008, 11 p., <<http://www.craaq.qc.ca/Publications?p=32&f=fr&IdDoc=1997>> [consultation : 24 avril 2008].
- Beaulac, I. et G. Doré. *Impacts du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptations – état des connaissances*, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, 2005, 141 p.
- Beaulieu, J. et A. Rainville. « Adaptation to climate change : Genetic variation is both a short- and a long-term solution », *The Forestry Chronicle*, vol. 81, 2005, p. 704-709.
- Bégin, Y. *Le changement climatique en cours dans le nord du Québec*, mémoire du Centre d'études nordiques déposé à la Commission parlementaire sur les transports et l'environnement, 2006, <www.cen.ulaval.ca/documents/Memoire-2006CommissionParlementaire.pdf> [consultation : 17 septembre 2009].
- Bélanger, D., P. Gosselin, P. Valois et B. Abdous. *Vagues de chaleur au Québec méridional : adaptations actuelles et suggestions d'adaptations futures*, Institut national de santé publique du Québec, 2006, <<http://www.inspq.qc.ca/publications/default.asp?E=p&NumPublication=538>> [consultation : 11 juin 2009].
- Bélanger, D. et P. Gosselin. *Changements climatiques au Québec méridional : perceptions de la population générale et suggestions d'adaptations futures*, Institut national de santé publique du Québec, 2007, 49 p., <<http://www.inspq.qc.ca/publications/notice.asp?E=p&NumPublication=618>> [consultation : 11 juin 2009].
- Bélanger, D., P. Gosselin, P. Valois et B. Abdous. « Use of residential wood heating in a context of climate change : a population survey in Quebec (Canada) », *BMC Public Health*, vol. 8, n° 184, 2008, <<http://www.biomedcentral.com/1471-2458/8/184/abstract>> [consultation : 11 juin 2009].

- Bélanger, D., P. Gosselin, P. Valois, S. Germain et B. Abdous. « Use of a remote car starter in relation to smog and climate change perceptions : A population survey in Québec (Canada) », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 6, n° 2, 2009, p. 694-709.
- Bélanger, G., P. Rochette, Y. Castonguay, A. Bootsma, D. Mongrain et D.A.J. Ryan. « Climate change and winter survival of perennial forage crops in Eastern Canada », *Agronomy Journal*, vol. 94, 2002, p. 1120-1130.
- Benson, K., P. Kocagil et J. Shortle. « Climate change and health in the Mid-Atlantic Region », *Climate Research*, vol. 14, 2000, p. 245-253.
- Bergeron, Y., M. Flannigan, S. Gauthier, A. Leduc et P. Lefort. « Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest : Implications for sustainable forest management », *Ambio*, vol. 33, n° 6, 2004, p. 356-360.
- Bernatchez, P. et J.-M. M. Dubois. « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, n° 1, 2004, p. 45-71.
- Bernatchez, P. et J.-M. M. Dubois. « Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on fine sediments shoreline in a cold temperate climate, North Shore of the St. Lawrence Estuary, Québec », *Journal of Coastal Research*, vol. 24, n° 1A, 2008, p. 169-180.
- Bernatchez, P., C. Fraser, S. Friesinger, Y. Jolivet, S. Dugas, S. Drejza et A. Morissette. *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*, rapport sectoriel, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 2008, 256 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/145_Bernatchezetal2008.pdf> [consultation : 28 juillet 2009].
- Bernier, L., P. Lachance, L. Quilliam et D. Gingras. Rapport sur l'état du Saint-Laurent — *La contribution des activités urbaines à la détérioration du Saint-Laurent*, Équipe conjointe bilan, composée de représentants d'Environnement Canada, de Pêches et Océans Canada et du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Sainte-Foy (Québec), rapport technique, 1998.
- Berteaux, D. « Le renard arctique : un exemple concret de la modification de l'écosystème nordique », *Francvert*, vol. 5, n° 1, 2008, <<http://www.francvert.org/pages/51dossierlerenardarctique.asp>> [consultation : 4 septembre 2009].
- Berteaux, D. « Les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec », *In Vivo*, sous presse, vol. 29, n° 2, 2009, p. 8 -10.
- Berteaux, D., D. Réale, A.G. McAdam et S. Boutin. « Keeping pace with fast climate change : Can arctic life count on evolution? », *Integrative and Comparative Biology*, vol. 44, 2004, p. 140 -151.
- Berteaux, D. et N.C. Stenseth. « Measuring, understanding and projecting the effects of large-scale climatic variability on mammals », *Climate Research*, vol. 32, 2006, p. 95-97.
- Besancenot, J.-P. « Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines », *Environnement, Risques et Santé*, vol. 1, n° 4, 2004, p. 229-240.
- Blanchard, D. et F. Pouliot. « Comment diminuer l'impact des températures chaudes durant l'été », *Porc Québec*, vol. 14, n° 1, 2003, p. 75-76.
- Boisvenue, C. et S. Running. « Impact of climate change on natural forest productivity — Evidence since the middle of the 20th century », *Global Change Biology*, vol. 12, 2006, p. 862-882.
- Bootsma, A., D. Anderson et S. Gameda. *Indices potentiels du changement climatique sur les indices agroclimatiques dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec*, Centre de recherches de l'Est sur les céréales et les oléagineux, Agriculture et Agroalimentaire Canada, bulletin technique n° 03-284, 2004.
- Bootsma, A., S. Gameda et D.W. McKenny. « Impacts of potential climate change on selected agroclimatic indices in Atlantic Canada », *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 85, 2005a, p. 329-343.
- Bootsma, A., S. Gameda et D.W. McKenney. « Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada », *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 85, 2005b, p. 345-357.
- Bouchard, M. et A. Smargiassi. *Estimation des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique au Québec : essai d'utilisation du Air Quality Benefits Assessment Tool (AQBAT)*, Institut de santé publique du Québec, 2008, p. 30, <<http://www.inspq.qc.ca/publications/notice.asp?E=p&NumPublication=817>> [consultation : 11 juin 2009].

- Boucher, J.-F., S. Gaboury, D. Lord et C. Villeneuve. « Potentiel et enjeux à propos de la création de puits de carbone en forêt boréale », *Liaison Énergie-Francophonie*, 2008, n° spécial septembre 2008, 148 p.
- Bouden, M., B. Moulin, P. Gosselin, C. Back, B. Doyon, D. Gingras et G. Lebel. « La géo-simulation de l'infection au virus du Nil occidental en fonction du climat : un outil de gestion du risque en santé publique », dans *S'adapter aux changements climatiques au Canada en 2005 : comprendre les risques et renforcer nos capacités*, conférence du Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation (C-CIARN) tenu du 4 au 7 mai 2005 à Montréal, 2005, <http://www.adaptation2005.ca/posters/bouden_f.html> [consultation : 11 juin 2009].
- Bourgault, D. *Circulation and mixing in the St. Lawrence estuary*, thèse de doctorat, Department of atmospheric and oceanic sciences et Center for climate and global change research, Université McGill, Montréal, 2001, 127 p.
- Bourgeois, G., A. Bourque et G. Deaudelin. « Modelling the impact of climate change on disease incidence : a bioclimatic challenge », *Revue canadienne de phytopathologie*, vol. 26, 2004, p. 284-290.
- Bourque, A. et G. Simonet. « Québec », dans Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 171-226.
- Boutin, R. et G. Robitaille. « Increased soil nitrate losses under mature sugar maple trees affected by experimentally induced deep frost », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 25, 1995, p. 588-602.
- Boyer C., V. Bondue, P. Biron, M. Lamothe, A.G. Roy et J. Morin. « Modélisation des effets des fluctuations du niveau d'eau du fleuve St-Laurent sur les ajustements des tributaires et le transport des sédiments », dans *Eau et Changements Climatiques : comprendre pour mieux s'adapter / Water and Climate Change: Knowledge For Better Adaptation*, 57^e congrès annuel 2004 de l'Association canadienne des ressources hydriques, programme et résumés sur papier, comptes rendus sur cédéroms, 2004.
- Bradshaw, B., H. Dolan et B. Smit. « Farm-level adaptation to climatic variability and change : Crop diversification in the Canadian Prairies », *Climatic Change*, vol. 67, 2004, p. 119-141.
- Breton, M.-C., M. Gameau, I. Fortier, F. Guay et J. Louise. « Relationship between climate, pollen concentrations of *Ambrosia* and medical consultations for allergic rhinitis in Montreal, 1994–2002 », *Science of the Total Environment*, vol. 370, n° 1, 2006, p. 39-50.
- Brissette, F., R. Leconte, C. Marche et J. Rousselle. « Historical evolution of flooding damage on a USA/Quebec river basin », *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 39, n° 6, 2003, p. 1385-1396.
- Brodeur, P., M. Mingelbier et J. Morin. « Impact de la régularisation du débit des Grands Lacs sur l'habitat de reproduction des poissons dans la plaine inondable du fleuve Saint-Laurent », *Naturaliste canadien*, vol. 130, n° 1, 2006, p. 60-68.
- Brooks, R.T. et M. Hayashi. « Depth-area-volume and hydroperiod relationships in ephemeral (vernal) forest pools in Southern New England », *Wetlands*, vol. 22, 2002, p. 247-255.
- Brown, R.D. « Analysis of snow cover variability and change in Quebec, 1948-2005 », *Hydrological Processes*, sous presse.
- Brown, R.D. et Chaumont, D. *Analyse de simulations régionales du climat et d'indices climatiques associés au transport routier dans le sud du Québec*, 2009, XIII^e congrès international de la viabilité hivernale qui doit se tenir du 8 au 11 février 2010 à Québec.
- Bruce, J., I. Burton et I. Egener. *Mesures d'atténuation des catastrophes et protection civile dans un monde au climat changeant*, Protection civile Canada, Environnement Canada et Bureau des assurances du Canada, 1999, 43 p.
- Bryant, C.R., B. Singh, S. DesRoches, P. Thomassin, L. Baker, C. Madramootoo, K. Delusca et M. Savoie. *Climate Variability and Quebec : Lessons for Farm Adaptation from an Analysis of the Temporal and Spatial patterns of Crop Insurance Claims in Quebec*, communication présentée au Congrès national sur l'adaptation aux changements climatiques, Montréal, mai 2005.
- Bryant, C., B. Singh, P. Thomassin et L. Baker. *Vulnérabilités et adaptation aux changements climatiques au Québec au niveau de la ferme : leçons tirées de la gestion du risque et de l'adaptation à la variabilité climatique par les agriculteurs*, Ouranos, 2007, 49 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/149_Bryant1.pdf> [consultation : 24 avril 2009].
- Buckley, D.S., T.L. Sharik et J.G. Isebrands. « Regeneration of Northern Red Oak : positive and negative effects of competitor removal », *Ecology*, vol. 79, 1998, p. 65-78.
- Budyko, M.I. « Climate and life », dans *International Geographic Series*, D.H. Miller (éd.), Academic Press, New York, 1974, 508 p.

- Bunce, J.A. « Carbon dioxide effects on stomatal responses to the environment and water use by crops under field conditions », *Oecologia*, vol. 140, 2004, p. 1-10.
- Carroll, A.L., S.W. Taylor, J. Régnière et L. Safranyik. « Effects of climate change on range expansion by the Mountain Pine Beetle in British Columbia », *Mountain pine beetle symposium : Challenges and solution*, tenu les 30 et 31 octobre 2003 à Kelowna (C.-B.), 2003.
- Caron, A. *Calibration et validation d'un générateur de climat dans le contexte des changements climatiques*, mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, 2005, 135 p.
- Case, T. « Climate change and infrastructure issues », *Drinking Water Research*, édition spéciale, vol. 18, n° 2, Awwa Research Foundation, 2008, p. 15-17.
- Casselman, J.M. « Effects of temperature, global extremes, and climate change on year-class production of warmwater, coolwater, and coldwater fishes in the Great Lakes Basin », *American Fisheries Society Symposium*, vol. 32, 2002, p. 39-60.
- Caya, D. et R. Laprise. « A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model : the Canadian RCM », *The Monthly Weather Review*, vol. 127, n° 3, 1999, p. 341-362.
- Chang, S.E., T.L. McDaniels, J. Mikawoz et K. Peterson. « Infrastructure failure interdependencies in extreme events : Power outage consequences in the 1998 ice storm », *Natural Hazards*, vol. 41, 2007, p. 337-358.
- Charron, D., C. Schuster-Wallace et D. Noble. *La vulnérabilité des Canadiens aux maladies d'origine hydrique et alimentaire*, 2005, <http://adaptation2005.ca/abstracts/charron_f.html> [consultation : 11 juin 2009].
- Charron D., M. Fleury, L.R. Lindsay, N.H. Ogden et C.J. Shuster. « Répercussions des changements climatiques sur les maladies transmises par l'eau, les aliments, les vecteurs et les rongeurs », chap. 5 dans J. Séguin (éd.), *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa, 2008, 558 p.
- Chaumont, D. et I. Chartier. *Développement de scénarios hydrologiques à des fins de modélisation de la dynamique sédimentaire des tributaires du Saint-Laurent dans un contexte de changements climatiques*, rapport technique, Ouranos, 2005, 37 p.
- Chevassus-au-Louis, B., J.-M. Salles, S. Bielsa, D. Richard, G. Martin et J.-L. Pujol. *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes*, contribution à la décision publique, Centre d'analyse stratégique, République française, 2009, 376 p.
- Chin, J. *Control of Communicable Diseases in Man*, American Public Health Association, Washington, DC, 2000.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, S. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magana Rueda, L. Mearns, C.G. Menendez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr et P. Whetton. « Regional Climate Projections », dans *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Salomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignot et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge et New York, 2007, p. 847-940.
- Chu, C., N.E. Mandrak et C.K. Minns. « Potential impacts of climate change on the distributions of several common and rare freshwater fishes in Canada », *Diversity & Distributions*, vol. 11, n° 4, 2005, p. 299-310.
- Cohen, S. et K. Miller. « North America », dans *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (éd.), Cambridge University Press, Cambridge New York, 2001, p. 735-800.
- Commission de la santé et de la sécurité du travail. *Travailler à la chaleur – attention !*, Commission de la santé et de la sécurité du travail, 2004, <<http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/1615AED8-EC4E-4AC3-AA95-02246E91EE19/4431/DC200161845.pdf>> [consultation : 11 juin 2009].
- Commission mixte internationale. *Avis aux gouvernements concernant l'examen de l'accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs*, Commission mixte internationale, 2006, <<http://www.ijc.org/rel/pdf/advice-finalfrwc.pdf>> [consultation : 11 mai 2009].
- Conseil canadien des ministres de l'environnement. *De la source au robinet : guide d'application de l'approche à barrières multiples pour une eau saine*, Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2005a, <<http://www.ccme.ca/source-totap/mba.fr.html>> [consultation : 11 juin 2009].

Conseil canadien des ministres de l'environnement. *Fiches d'information sur les contaminants*, Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2005b, <<http://www.cmce.ca/sourcetotap/infosheets.fr.html>> [consultation : 11 juin 2009].

Conseil régional des ressources en eau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. *Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent*, Conseil régional des ressources en eau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, 2005, <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/grandslacs/2005/Entente.pdf>> [consultation : 11 mai 2009].

Côté, M., J. Lachance, C. Lamontagne, M. Nastev, R. Plamondon et N. Roy. *Atlas du bassin versant de la rivière Châteauguay*, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, en collaboration étroite avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique, Eau, Terre et Environnement, 2006, 64 p.

Croley, T.E. *Great Lakes Climate Change Hydrologic Assessment, I.J.C. Lake Ontario – St-Lawrence River Regulation Study*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Technical Memorandum GLERL-126, 2003.

Curriero, F.C., J.A. Patz, J.B. Rose et S. Lele. « The association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948-1994 », *American Journal of Public Health*, vol. 91, n° 8, 2001, p. 1194-1199.

Daigle, R., D. Forbes, L. Vasseur, S. Nichols, D. Bérubé, K. Thompson, H. Ritchie, A. Hanson, É. Tremblay, G. Parkes, K. Murphy et T. Webster. « Impacts de l'élévation du niveau de la mer et des changements climatiques sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick », dans *S'adapter aux changements climatiques au Canada en 2005 : comprendre les risques et renforcer nos capacités*, conférence tenue du 4 au 7 mai 2005 à Montréal et parrainée par le Programme sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada et le Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation (C-CIARN), 2005, <http://www.adaptation2005.ca/abstracts/daigle_e.html> [consultation : 28 juillet 2009].

Dajoz, R. *Précis d'écologie*, 7^e édition, Dunod, Paris, 2000, 615 p.

D'Arcy, P., J.-F. Bibeault et R. Raffa. *Changements climatiques et transport maritime sur le Saint-Laurent. Étude exploratoire d'options d'adaptation*, rapport rédigé pour le Comité de concertation navigation du Plan d'action Saint-Laurent, 2005, 140 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/21_Rapport_Darcy_eau_2005.pdf> [consultation : 11 mai 2009].

Davis, M.B. « Quaternary history and stability of forest communities », dans D.C. West et H.H. Shugart (éd.), *Forest Succession*, Springer-Verlag, New York, 1981, p. 132-153.

De Elía, R. et H. Côté. *Sensitivity study of CRCM-simulated climate change projections over North America*, 2nd Lund Regional-scale Climate Modelling Workshop : 21st Century Challenges in Regional-scale Climate Modelling, tenu du 4 au 8 mai 2009 à Lund (Suède), 2009, <http://www.baltex-research.eu/RCM2009/Material/RCM2009_Proceedings_print.pdf> [consultation : 6 novembre 2009].

DeLucia, E.H., J.G. Hamilton, S.L. Naidu, R.B. Thomas, J.A. Andrews, A. Finzi, M. Lavine, R. Matamala, J.E. Mohan, G.R. Hendrey et W.H. Schlesinger. « Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO₂ enrichment », *Science*, vol. 284, 1999, p. 1177-1179.

Derocher, A.F., N.J. Lunn et I. Stirling. « Polar bear in a changing climate », *Integrative Comparative Biology*, vol. 44, 2004, p. 163-176

Desgranges, J.-L., J. Ingram, B. Drolet, J. Morin, C. Savage et D. Borcard. « Modeling the bird response to water level changes in the Lake Ontario – St. Lawrence River hydrosystem », *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 113, 2006, p. 329-365.

Desrochers, G.É., G. Pacher, F. Guay, L. Roy, R. Roy, D. Tapsoba et I. Chartier. *Impacts des changements climatiques sur les apports en eau des bassins versants du Québec*, affiche présentée au 3^e symposium scientifique Ouranos tenu les 19 et 20 novembre à Montréal, 2008.

Diaconesco, R., P. Gachon et A. St-Hilaire. *Analyse de la variabilité des vents dans le golfe du Saint-Laurent : tendances climatiques et de nature non climatique*, Ouranos, rapport de recherche, 2007.

Di Castri, F. et T. Younes (éd.). « Ecosystem function of Biological diversity », *Biology International*, édition spéciale, n° 22, International Union of Biological Sciences, Paris, 1990.

Di Castri, F. et T. Younes. « Biodiversity, the emergence of a new scientific field – Its perspectives and constraints », dans F. Di Castri et T. Younes (éd.), *Biodiversity, Science and Development, Towards a New Partnership*, International Union of Biological Sciences CAB International, Wallingford (Royaume-Uni), 1996, p. 1-11.

- Dietrich, R.A. *Alaskan Wildlife Diseases*, Institute of Arctic Biology, University of Alaska, Fairbanks, 1981.
- Diffey, B. « Climate change, ozone depletion and the impact on ultraviolet exposure of human skin », *Physics in Medicine and Biology*, vol. 49, n° 1, 2004, p. R1-11.
- Direction de la santé publique de la Montérégie. *Plan d'urgence spécifique : mesures accablantes*, édition 2004, Direction de la santé publique de la Montérégie, version préliminaire, 2004.
- Direction de la santé publique de Montréal. *Plan de mesures d'urgence : épisode de chaleur accablante 2004*, Unité Santé au travail et environnementale, document-synthèse, 2004.
- Direction de la santé publique de Québec. *Mémoire déposé au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement sur le Projet de prolongement de l'axe du Vallon (ville de Québec)*, Direction de la santé publique de Québec, 1^{er} juin 2004, 29 p., <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/du_vallon/documents/DM65.pdf> [consultation : 11 juin 2009].
- Direction de la santé publique du Québec. *Les souris sylvestres dans les chalets : un risque sérieux pour la santé*, Agence de développement de réseaux locaux de services de santé et de services sociaux de la Mauricie et du Centre-du-Québec, 2005, <[http://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/O1/PER/830397/2005/Vol_14_no_2_\(juil_2005\).pdf](http://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/O1/PER/830397/2005/Vol_14_no_2_(juil_2005).pdf)> [consultation : 11 juin 2009].
- Dixsaut, G. « Vague de chaleur et climatisation : revue bibliographique », *Bise*, vol. 16, n° 4, 2005, p. 1-6.
- Dominici, F., R.D. Peng, M.L. Bell, L. Pham, A. McDermott et S.L. Zeger. « Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases », *The Journal of the American Medical Association*, vol. 295, n° 10, 2006, p. 1127-1134.
- Doré, G. et Y. Savard. « Vérification des méthodes de dimensionnement des chaussées au gel-dégel (coopération Québec-France) : suivi des comportements des planches d'essais après trois ans et cinq ans », dans *Répertoire des projets de recherche et développement*, Ministère des Transports du Québec, 2006.
- Dost, F.N. « Acute toxicology of components of vegetation smoke », *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 119, 1991, p. 1-46.
- Doyon, B., D. Bélanger et P. Gosselin. *Effets du climat sur la mortalité au Québec méridional de 1981 à 1999 et simulations pour des scénarios climatiques futurs*, Institut national de santé publique du Québec, 2006, 75 p. <<http://www.inspq.qc.ca/publications/default.asp?E=p&NumPublication=538>> [consultation : 11 juin 2009].
- Doyon, B., D. Bélanger et P. Gosselin. « The potential impact of climate change on annual and seasonal mortality for three cities in Quebec, Canada », *International Journal of Health Geographics*, vol. 7, n° 23, 2008, <<http://www.ij-healthgeographics.com/content/7/1/23>> [consultation : 11 juin 2009].
- Drake, B.G., M.A. Gonzalez-Meler et S.P. Long. « More efficient plants : A consequence of rising atmospheric CO₂? », *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, vol. 48, 1997, p. 609-639.
- Drejza, S., P. Bernatchez et C. Dugas. *Coastal hazard zoning plan in a climate change context*, Percé, Canada, Ancient Landscapes – Modern Perspectives, 7th International Conference on Geomorphology, tenu du 6 au 11 juillet 2009 à Melbourne (Australie), 2009, <<http://cggr.geog.uvic.ca/abstracts/DrejzaCoastalBecause.html>> [consultation : 9 novembre 2009].
- Dubois, J.-M. M. *Dynamique de l'érosion littorale sur la Côte-Nord du Saint-Laurent*, compte rendu du Colloque régional sur l'érosion des berges : vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin, Comité de la zone d'intervention prioritaire de la rive nord de l'estuaire, MRC de Manicouagan (éd.), Baie-Comeau, 1999.
- Dubois, J.-M. M., P. Bernatchez, J.-D. Bouchard, B. Daigneault, D. Cayer et S. Dugas. *Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du St-Laurent pour la période de 1996 à 2003*, Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, rapport présenté au Comité interministériel sur l'érosion des berges de la Côte-Nord, 2006, 291 p. <http://www.crecotenord.qc.ca/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=97&Itemid=278> [consultation : 28 juillet 2009].
- Ducas, S. « Conférence sur le plan d'urbanisme de la Ville de Montréal », dans *8^e Journées annuelles de la santé publique*, 30 novembre 2004.
- Duchesne, L., D. Houle, M.-A. Côté et T. Logan. « Modelling the effect of climate on maple syrup production in Quebec, Canada », *Forest Ecology and Management*, vol. 258, n° 12, 2009, p. 2683-2689.

Duchesne, S., A. Mailhot et E. Levesque. « Impacts et adaptations liés aux changements climatiques en matière de drainage urbain au Québec : évaluation de la performance historique des réseaux », dans *S'adapter aux changements climatiques au Canada en 2005 : comprendre les risques et renforcer nos capacités*, conférence tenue du 4 au 7 mai 2005 à Montréal et parrainée par le Programme sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada et le Réseau canadien de recherche sur les impacts et l'adaptation (C-CIARN), 2005.

Edwards, M. et A. Richardson. « Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch », *Nature*, vol. 430, 2004, 3 p. 881-884.

Ebi, K.L., J. Balbus, P.L. Kinney, E. Lipp, D. Mills, M.S. O'Neill et M. Wilson. « Effects of global change on human health », chap. 2 dans *Analyses of the Effects of Global Change on Human Health and Welfare and Human Systems*, rapport du U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, J.L. Gamble (éd.), U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2008, p. 2-1 à 2-78.

Enright, W. *Changement d'habitudes, changement climatique : analyse de base*, Institut canadien de la santé infantile, 2001, 129 p.

Environnement Canada. *Les dix principaux événements météorologiques canadiens de 2000*, Environnement Canada, 2002, <http://www.msc.ec.gc.ca/media/top10/2000_f.html> [consultation : 24 avril 2009].

Environnement Canada. *Avertissements météo publics pour le Canada*, Environnement Canada, 2004a, <http://www.weatheroffice.ec.gc.ca/warnings/warnings_f.html> [consultation : 11 juin 2009].

Environnement Canada. *Fiche d'information sur le smog*, Environnement Canada, 2004b, <http://www.msc.ec.gc.ca/cd/factsheets/smog/index_f.cfm> [consultation : 11 juin 2009].

Environnement Canada, *Atlas des vents*, Environnement Canada, 2007a, <<http://www.atlaseolien.ca/fr/maps.php>> [consultation : 17 septembre 2009].

Environnement Canada. *Atlas des glaces*, Environnement Canada, 2007b, <<http://ice-glaces.ec.gc.ca/>> [consultation : 28 juillet 2009].

Fagherazzi, L., R. Guay et T. Sassi. *Climate Change Analysis of the Ottawa River System*, rapport remis à la Commission mixte internationale – Lake Ontario-St. Lawrence River study on discharge regulation, 2005, 72 p.

Febriani, Y., P. Levallois, S. Gingras, P. Gosselin et S. E. Majowicz. *The Prevalence of Acute Gastrointestinal Illness in Quebec Farming Municipalities and Its Association with Farming Activities and Climate Factors*, affiche, 3^e Symposium scientifique Ouranos, tenu les 19 et 20 novembre 2008 à l'École de technologie supérieure, Montréal, 2008.

Fédération canadienne des municipalités. *Final report on Federation of Canadian Municipalities Municipal Infrastructure Risk Project : Adapting to Climate Change*, rapport préparé pour Fonds d'Action pour le Changement Climatique, Ressources Naturelles Canada, 2002, 29 p.

Field, C.B., L.D. Mortsch, M. Brklacich, D.L. Forbes, P. Kovacs, J.A. Patz, R. S.W. et M.J. Scott. « North America », dans *Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, 2007, p. 617-652.

Flanagan, K., E. McCauley, F. Wrona et T. Prowse. « Climate change : The potential for latitudinal effects on algal biomass in aquatic ecosystems », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 60, 2003, p. 635-639.

Flannigan, M., K. Logan, B. Amiro, W. Skinner et B. Stocks. « Future area burned in Canada », *Climatic Change*, vol. 72, n^{os} 1-2, 2005, p. 1-16.

Forbes, D.L., G.S. Parkes, G.K. Manson et L.A. Ketch. « Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence », *Marine Geology*, vol. 210, 2004, p. 169-204.

Fortier, R. et M. Allard. *Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik. Rapport d'étape 2, Conditions du pergélisol et mollisol*, compte rendu des campagnes de terrain été 2002 et hiver 2003, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 2003a.

Fortier, R. et M. Allard. *Les impacts d'un réchauffement récent sur le pergélisol au Nunavik*, présentation faite en décembre 2003 au 24^e colloque annuel du Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 2003b.

Fortin, L.G., R. Turcotte, S. Pugin, J.-F. Cyr et F. Picard. « Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des réservoirs Saint-François et Aylmer au Sud du Québec », *Revue canadienne de génie civil*, vol. 34, n^o 8, 2007, p. 934-945.

- Frenette, J.-J., M. Arts et J. Morin. « Spectral gradient of downwelling light in a fluvial lake (Lake Saint-Pierre, St. Lawrence River) », *Aquatic Ecology*, vol. 37, 2003, p. 77-85.
- Frenette, J.-J., M. Arts, J. Morin, D. Gratton et C. Martin. « Hydrodynamic control of the underwater light climate in fluvial Lac Saint-Pierre », *Limnology and Oceanography*, vol. 51, 2006, p. 2632-2645.
- Frigon, M. « L'entretien du réseau routier québécois : une industrie comprenant plusieurs acteurs », *Magazine Circuit industriel*, juin 2003, <<http://www.magazinemci.com/articles/dossiers/2003/06/quebec7.htm>> [10 octobre 2009].
- Furgal, C.M. et J. Seguin. « Climate change health impacts, vulnerabilities and the capacity to respond in Canadian Northern Aboriginal communities », dans *S'adapter aux changements climatiques au Canada en 2005 : comprendre les risques et renforcer nos capacités*, conférence tenue du 4 au 7 mai 2005 à Montréal et parrainée par le Programme sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada et le Réseau canadien de recherche sur les impacts et l'adaptation (C-CIARN), 2005.
- Furgal, C.M., D. Martin, P. Gosselin et A. Viau. *Climate Change and Health in Nunavik and Labrador : What We Know from Science and Inuit Knowledge*, Nunavik Regional Board of Health and Social Services/Nunavik Nutrition and Health Committee, Labrador Inuit Association, Labrador Inuit Health Commission, rapport scientifique final d'un projet subventionné par le Fonds d'action pour le changement climatique, 2002, 139 p.
- Gaboury, S., J.-F. Boucher, C. Villeneuve, D. Lord et R. Gagnon. « Estimating the net carbon balance of boreal open woodland afforestation : A case-study in Québec's closed-crown boreal forest », *Forest Ecology and Management*, vol. 257, 2009, p. 483-494.
- Gagnon, R. et H. Morin. « Les forêts d'épinettes noires du Québec : dynamique, perturbations et biodiversité », *Le Naturaliste canadien*, vol. 125, n° 3, 2001, p. 26-35.
- Gamache, I. et S. Payette. « Height growth response of tree line black spruce to recent climate warming across the forest-tundra of eastern Canada », *Journal of Ecology*, vol. 92, 2004, p. 835-845.
- Gamache, I. et S. Payette. « Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in Eastern Canada », *Journal of Biogeography*, vol. 32, 2005, p. 849-862.
- Gameau, M., M.C. Breton, F. Guay, I. Fortier, M.F. Sottile et D. Chaumont. *Hausse des concentrations des particules organiques (pollens) causée par le changement climatique et ses conséquences sur les maladies respiratoires des populations vulnérables en milieu urbain*, Fonds d'action pour le changement climatique – sous-composante Impacts et Adaptation, projet A571, 2006, <http://www.ouranos.ca/media/publication/34_Rapport_Gameau_sante_2006.pdf> [consultation : 11 juin 2009].
- Génot, J.C. et R. Barbault. « Quelle politique de conservation ? », dans R. Barbault et B. Chavassus-au-Louis, *Biodiversité et changements globaux enjeux de société et défis pour la recherche*, Association pour la diffusion de la pensée française, 2005, p. 162-191.
- Gerardin, V., J.-P. Dubruc et P. Beauchesne. « Planification du réseau d'aires protégées du Québec : principes et méthodes de l'analyse écologique du territoire », Ministère de l'Environnement, Direction du patrimoine écologique et du développement durable, *Vertigo*, vol. 3, n° 1, 2002, 10 p.
- Gielen, B. et R. Ceulemans. « The likely impact of rising atmospheric CO₂ on natural and managed Populus : A literature review », *Environmental Pollution*, vol. 115, 2001, p. 335-358.
- Giguère, M. et P. Gosselin. *Impacts des événements climatiques extrêmes sur la santé : examen des initiatives d'adaptation actuelles au Québec*, Institut national de santé publique, 2006a, 27 p., <www.ouranos.ca/media/publication/41_Feuillet_INSPQ_Evenements20Extremes_Adaptations_Oct_2006.pdf> [consultation : 11 juin 2009].
- Giguère, M. et P. Gosselin. *Les impacts du changement climatique sur l'émergence et l'intensification des maladies zoonotiques et des maladies transmission vectorielle au Québec : examen des initiatives d'adaptation actuelles*, Institut national de santé publique, 2006b, 27 p., <<http://www.inspq.qc.ca/publications/notice.asp?E=p&NumPublication=519>> [consultation : 11 juin 2009].
- Giguère, M. et P. Gosselin. *Les impacts du changement climatique sur les ressources hydriques et ses conséquences sur la santé, examen des initiatives d'adaptation actuelles au Québec*, Institut national de santé publique, 2006c, <<http://www.inspq.qc.ca/publications/notice.asp?E=p&NumPublication=516>> [consultation : 11 juin 2009].

- Giguère, M. et P. Gosselin. *Les impacts des vagues de chaleur et de l'effet d'îlot thermique urbain sur la santé : examen des initiatives d'adaptation actuelles au Québec*, Institut national de santé publique, 2006d, <<http://www.inspq.qc.ca/publications/notice.asp?E=p&NumPublication=515>> [consultation : 11 juin 2009].
- Giguère, S., J. Morin, P. Laporte et M. Mingelbier. « Évaluation des impacts des fluctuations hydrologiques sur les espèces en péril, tronçon fluvial du Saint-Laurent (Cornwall à Trois-Rivières) », dans *Étude internationale sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent*, rapport final rédigé pour la Commission mixte internationale, Environnement Canada, Service canadien de la faune et Service météorologique du Canada et Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche sur la faune, Québec, 2005, 71 p.
- Gillett, N.P., A.J. Weaver, F.W. Zwiers et M.D. Flannigan. « Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires », *Geophysical Research Letters*, vol. 31, 2004.
- Girard, F., S. Payette et R. Gagnon. « Rapid expansion of lichen woodlands within the closed-crown boreal forest zone over the last 50 years caused by stand disturbances in Eastern Canada », *Journal of Biogeography*, vol. 35, 2008, p. 529-537.
- Gitz, D.C., J.C. Ritchie, D.T. Krizek, T.L. Springer, J.B. Reeves III et V. Reddy. « Effect of temperature and CO₂ on forage nutritive value of 'pete' eastern gamagrass », dans *Proceedings of the Fifth Eastern Native Grass Symposium* tenu du 10 au 13 octobre 2006 à Harrisburg (Pennsylvanie), Sanderson, M.A., P. Adler, S. Goslee, J.C. Ritchie, H. Skinner et K. Soder (éd.), 2006, p. 107-114.
- Godbout, L., P. Fortin, M. Arseneau et S. St-Cerny. *Oser choisir maintenant. Des pistes de solutions pour protéger les services publics et assurer l'équité entre les générations*, Presses de l'Université Laval, Québec, 2007, 150 p.
- Goldberg, M.S., R.T. Burnett, J.C. Bailar III, R. Tamblyn, P. Ernst, K. Flegel, J. Brook, Y. Bonvalot, R. Singh, M.F. Valois et R. Vincent. « Identification of persons with cardiorespiratory conditions who are at risk of dying from the acute effects of ambient air particles », *Environmental Health Perspectives*, vol. 109, suppl. 4, 2001, p. 487-494.
- Gosselin, P. *Développement d'un outil Web interactif pour mieux comprendre les impacts des changements climatiques sur la santé publique*, Projet GEOIDE Initiative stratégique, 2005, <http://www.geoide.ulaval.ca/files/41_F.jpg> [consultation : 11 juin 2009].
- Gosselin, P., G. Lebel, S. Rivest et M. Douville-Fradet. « The Integrated System for Public Health Monitoring of West Nile Virus (ISPHM-WNV) : a real-time GIS for surveillance and decision-making », *International Journal of Health Geographics*, 2005, vol. 4, n° 21, <<http://www.ij-healthgeographics.com/content/4/1/21>> [consultation : 11 juin 2009].
- Gosselin, P., C. Furgal et S. Owen. *Surveillance and management of climate change impacts in the North : Implications for Northern public health policy and infrastructure*, rapport scientifique annuel, ArcticNet, 2005.
- Gosselin, P., D. Bélanger et B. Doyon. « Les impacts santé des changements climatiques au Québec », chap. 6 dans J. Séguin (éd.), *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa, 2008, 558 p., <http://www.ouranos.ca/fr/pdf/ouranos_chapitre-6.pdf> [consultation : 11 juin 2009].
- Graham, L.P., J. Andréasson et B. Carlsson. « Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River Basin », *Climatic Change*, vol. 81, 2007, p. 293-307.
- Gray, D.R. « The gypsy moth life stage model : Landscape-wide estimates of gypsy moth establishment using a multi-generational phenology model », *Ecological Modelling*, vol. 176, 2004, p. 155-171.
- Gray, D.R. « The relationship between climate and outbreak characteristics of the spruce budworm in Eastern Canada », *Climatic Change*, vol. 87, 2008, p. 361-383.
- Greenwood, J.S., G.P. Soulos et N.D. Thomas. *Undercover : guidelines for shade planning and design*, Cancer Council South Australia, 2000, 188 p., <http://www.cancersa.org.au/asp/Under_Cover_Guidelines.aspx> [consultation : 11 juin 2009].
- Grondin, G. et A. Guimond. « Impact du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier du ministère des Transports du Québec au Nunavik », *Route-Roads*, vol. 326, 2005, p. 42-49.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques*, contribution du Groupe de travail I au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge et New York, 2001a, p. 1-20.

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Les changements climatiques et la biodiversité*, document technique V du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, H. Gitay, A. Suarez, R.T. Watson et D.J. Dokken (éd.), Genève, 2002, 75 p.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Salomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignot et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge et New York, 2007a, 996 p.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Bilan 2007 des changements climatiques : conséquences, adaptation et vulnérabilité*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge et New York, 2007b, 976 p.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Le changement climatique et l'eau*, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, B.C. Bates, Z.W. Kundzewicz, S. Wu et J.P. Palutikof (éd.), Secrétariat du GIEC, Genève, 2008, 236 p.
- Hamilton, L.C., C. Brown et B.D. Keim. « Ski areas, weather and climate : Time series models for New England case studies », *International Journal of Climatology*, vol. 27, 2007, p. 2113-2124.
- Hansen, A.J., R.R. Neilson, V.H. Dale, C.H. Flather, L.R. Iverson, D.J. Currie, S. Shafer, R. Cook et P.J. Bartlein. « Global change in forests : Responses of species, communities, and biomes », *Bioscience*, vol. 51, 2001, p. 765-779.
- Harvell, C.D., C.E. Mitchell, J.R. Ward, S. Altizer, A.P. Dobson, R.S. Ostfeld et M.D. Samuel. « Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota », *Science*, vol. 296, 2002, p. 2158-2162.
- Hauer, F.R., J.S. Baron, D.H. Campbell, K.D. Fausch, S.W. Hostetler, G.H. Leavesley, P.R. Leavitt, D.M. McKnight et J.A. Stanford. « Assessment of climate change and freshwater ecosystems of the Rocky Mountains, USA and Canada », *Hydrological Processes*, vol. 11, n° 8, 1997, p. 903-924.
- Hersteinsson, P. et D.W. MacDonald. « Interspecific competition and the geographical distribution of red and arctic foxes *Vulpes vulpes* and *Alopex lagopus* », *Oikos*, vol. 64, 1992, p. 505-515.
- Hesslein, R. H., M.A. Turner, S.E.M. Kasian et D. Guss. *The Potential for Climate Change to Interact with the Recovery of Boreal Lakes from Acidification – A Preliminary Investigation Using ELA's Database*, rapport préparé pour le Fonds d'action pour le changement climatique, 2001.
- Hill, D., V. White, R. Marks, T. Theobald, R. Borland et C. Roy. « Melanoma prevention : Behavioral and nonbehavioral factors in sunburn among an Australian urban population », *Preventive Medicine*, vol. 21, n° 5, 1992, p. 654-669.
- Hudon, C. Le lac St-Louis est-il à risque ? *Les niveaux d'eau et l'eau potable*, Environnement Canada, 2004, <http://www.qc.ec.gc.ca/csl/inf/inf040_f.html> [consultation : 4 septembre 2009].
- Hudon, C., P. Gagnon, J.-P. Amyot, G. Létourneau, M. Jean, C. Plante, D. Rioux et M. Deschênes. « Historical changes in herbaceous wetland distribution induced by hydrological conditions in Lake Saint-Pierre (St. Lawrence River, Quebec, Canada) », *Hydrobiologia*, vol. 539, 2005, p. 205-224.
- Huggins K., J.-J. Frenette et M.T. Arts. « Nutritional quality of biofilms with respect to light regime in Lake Saint-Pierre (Québec, Canada) », *Freshwater Biology*, vol. 49, 2004, p. 945-959.
- Huntingford, C., D. Hemming, J.H.C. Gash, N. Gedney et P.A. Nuttall. « Impact of climate change on health : What is required of climate modellers? », *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 101, 2007, p. 97-103.
- Huntley, B. et H.J.B. Birks. *An Atlas of Past and Present Pollen Maps for Europe : 0-13,000 Years Ago*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, 667 p.
- Hydro-Québec. *Plan stratégique 2006-2010*, Hydro-Québec, 2006, 54 p., <http://www.hydroquebec.com/publications/fr/plan_strategique/> [consultation : 22 septembre 2009].
- Infrastructure Canada. *L'évaluation des besoins en infrastructure du Canada : une analyse d'études clés*, Infrastructure Canada, 2004, 14 p.
- Infrastructure Canada. *L'adaptation des infrastructures du Canada aux changements climatiques dans les villes et les collectivités : une analyse documentaire*, Infrastructure Canada, 2006, 25 p.

Ingénieurs Canada. *Adaptation aux changements climatiques. Première évaluation nationale de la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques au Canada*, Ingénieurs Canada, 2008, 76 p.

Institut canadien des urbanistes. *Promotion de l'adaptation aux changements climatiques auprès des urbanistes*, Institut canadien des urbanistes, 2007, <http://www.cip-icu.ca/web/la/en/fi/8F1018CE46964FB0844AB79CA10546F8/get_file.asp> [consultation : 11 août 2009].

Institut de la statistique du Québec. *Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2001-2051 édition 2003*, Institut de la statistique du Québec, 2003.

Institut de la statistique du Québec. *Bulletin statistique régional, Montréal*, Institut de la statistique du Québec, 2005a, <http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/profils/bulletins/06_Montreal.pdf> [consultation : 11 juin 2009].

Institut de la statistique du Québec. *Population et occupation du territoire, régions administratives de Montréal et de Laval, 2001*, Institut de la statistique du Québec, 2005b, <http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/recens2001_06/population06/occuper06.htm> [consultation : 11 juin 2009].

Institut de la statistique du Québec. *Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2006-2056 édition 2009*, Institut de la statistique du Québec, 2009a, 133 p., <http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/demograp/pdf2009/perspectives2006_2056.pdf> [consultation : 20 octobre 2009].

Institut de la statistique du Québec. *Produit intérieur brut aux prix de base, par activité économique, Québec, 2002-2007*, Institut de la statistique du Québec, 2009b, <http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/conjn_econm/compt_econm/cea4_1.htm> [consultation : 20 octobre 2009].

Institut de la statistique du Québec et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. *Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire du Québec, édition 2008*, Institut de la statistique du Québec et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2009, 122 p.

Institut de prévention des sinistres catastrophiques. *Tempêtes hivernales*, Institut de prévention des sinistres catastrophiques, 2005, <<http://www.iclr.org/french/hazards/tempete.htm>> [consultation : 11 juin 2009].

Instituts de recherche en santé du Canada. *Déterminer les priorités de recherche nationales sur les influences de l'environnement sur la santé. Contexte et options*, Instituts de recherche en santé du Canada, 2002, <http://www.cihr-irsc.gc.ca/ff/pdf_14818.htm> [consultation : 11 juin 2009].

Institut de recherche forestière de l'Ontario. *A Synopsis of Known and Potential Diseases and Parasites Associated with Climate Change*, Forest Research Information Paper n° 154, Institut de recherche forestière de l'Ontario, Imprimeur de la Reine pour l'Ontario, 2003, 185 p.

Institut national de santé publique du Québec. *Les pneus hors d'usage et le risque de transmission de maladies infectieuses par les moustiques. Résumé*, Institut national de santé publique du Québec 2003a, <<http://www.inspq.qc.ca/publications/environnement/doc/text7.asp?E=p/>> [consultation : 11 juin 2009].

Institut national de santé publique du Québec. *Virus du Nil occidental : évaluation des attitudes, des comportements et des connaissances populaires*, Institut national de santé publique du Québec, 2003b, <<http://www.inspq.qc.ca/publications/notice.asp?E=p&NumPublication=262>> [consultation : 11 juin 2009].

Institut national de santé publique du Québec. *Mesures individuelles et collectives pour prévenir la transmission du virus du Nil occidental – Éléments pour un plan global d'intervention*, Institut national de santé publique du Québec, 2005a, <<http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/403-PlanGlobalInterventionVNO.pdf>> [consultation : 11 juin 2009].

Institut national de santé publique du Québec. *Épidémiologie et effets de l'infection par le virus du Nil occidental sur la santé humaine – Mise à jour 2004*, Institut national de santé publique du Québec, 2005b, <<http://www.inspq.qc.ca/publications/notice.asp?E=p&NumPublication=408>> [consultation : 11 juin 2009].

Institut national de santé publique du Québec. *Portrait de santé du Québec et de ses régions 2006. Les analyses*, Institut national de santé publique du Québec, 2006, 131 p., <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/portrait_de_sante.asp?E=p> [consultation : 11 juin 2009].

Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue. *Changements climatiques : impacts sur les forêts québécoises*, revue de littérature, Institut québécois d'aménagement de la forêt feuillue, 2003, 48 p.

Jackson, D.A. et N.E. Mandrak. « Changing fish biodiversity : Predicting the loss of cyprinid biodiversity due to global climate change », dans N.A. McGinn (éd.), *Fisheries in a Changing Climate*, American Fisheries Society, 2002, 319 p.

- Jacobson, M.Z. « On the causal link between carbon dioxide and air pollution mortality », *Geophysical Research Letter*, vol. 35, 2008.
- Jaffreux, H. « Un réseau écologique pour préserver la diversité biologique du continent européen », *Liaison Énergie-Francophonie*, édition spéciale, septembre, 2008, p. 58-62.
- Jasinski, J.P. et S. Payette. « The creation of alternative stable states in the southern boreal forest, Quebec, Canada », *Ecological Monographs*, vol. 75, n° 4, 2005, p. 561-583.
- Jean, M., G. Létourneau, C. Lavoie et F. Delisle. « Les milieux humides et les plantes exotiques en eau douce », fiche d'information dans *Suivi de l'état du Saint-Laurent, Environnement Canada – Région du Québec*, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent et Centre de recherche en aménagement et développement de l'Université Laval, 2002, 8 p.
- Jones, N.K. « On the impact of recent climate change on seasonal floods – a case study from a river basin in Southern Québec », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 33, n° 1, 2008, p. 55-72.
- Jones, B. et D. Scott. « Climate change, seasonality and visitation to Canada's National Parks », *Journal of Parks and Recreation Administration*, vol. 23, n° 4, 2005.
- Jones, J., P.J. Doran et R.T. Holmes. « Climate and food synchronize regional forest birds abundance », *Ecology*, vol. 84, n° 11, 2003, p. 3024-3032.
- Jones-Walters, L. et I. Mulder. « Valuing nature : The economics of biodiversity », *Journal for Nature Conservation*, 2009, sous presse.
- Julien, Y. et J.A. Sobrino. « Global land surface phenology trends from GIMMS database », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, n° 13, 2009, p. 3495-3513.
- Kalkstein, L. et J. Green. « An evaluation of climate/mortality relationship in large U.S. cities and the possible impacts of a climate change », *Environmental Health Perspectives*, vol. 105, 1997, p. 84-93.
- Keatinge, W.R., G.C. Donaldson, E. Cordioli, M. Martinelli, A.E. Kunst, J.P. Mackenbach, S. Nayha et I. Vuori. « Heat related mortality in warm and cold regions of Europe : Observational study », *British Medical Journal*, vol. 321, n° 7262, 2000, p. 670-673.
- Kennedy, V.S., R.R. Twilley, J.A. Kleypas, J.H. Cowan Jr. et S.R. Hare. *Coastal and Marine Ecosystems and Global Climate Change : Potential Effects on U.S. Resources*, rapport rédigé pour le Pew Center on Global Climate Change, Arlington (Virginie), 2002, 52 p.
- King, N., P. Morency et L. Lapierre. « Les impacts du transport sur la santé publique », dans *Rapport synthèse : faits saillants des principaux travaux de la Direction*, Direction de santé publique de Montréal, vol. 8, n° 3, 2005, <<http://www.santepub-mtl.qc.ca/Publication/synthese/rapv8n3.pdf>> [consultation : 11 juin 2009].
- Kirschbaum, M.U.F. « The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage », *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 27, 1995, p. 753-760.
- Kirschbaum, M.U.F. « Forest growth and species distribution in a changing climate », *Tree Physiology*, vol. 20, 2000, p. 309-322.
- Kirshen, P., M. Ruth et W. Anderson. « Interdependencies of urban climate change impacts and adaptation strategies : A case study of Metropolitan Boston USA », *Climatic Change*, vol. 86, 2007, p. 105-122.
- Klinenberg, E. *A Social Autopsy of Disaster in Chicago : Heat Wave*, The University of Chicago Press, Chicago, 2002, 305 p.
- Kling, G.W., K. Hayhoe, L.B. Johnson, J.J. Magnuson, S. Polasky, S.K. Robinson, B.J. Shuter, M.M. Wander, D.J. Wuebbles et D.R. Zak. *Confronting Climate Change in the Great Lakes Region, Impacts on Our Communities and Ecosystems*, The Union of Concerned Scientists et The Ecological Society of America, 2003, 104 p.
- Koch, I., C. Vogel et Z. Patel. « Institutional dynamics and climate change adaptation in South Africa », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 12, n° 8, 2007, p. 1323-1339.
- Kosatsky, T., N. King et B. Henry. *How Toronto and Montreal Respond to Heat*, Extreme Weather Events and Public Health Responses, 2005, p. 167-171.

Kurz, W.A., G. Stinson, G.J. Rampley, C.C. Dymond et E.T. Neilson. « Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, 2008, p. 1551-1555.

La Financière agricole du Québec. Statistiques annuelles, *Assurance récolte*, La Financière agricole du Québec, 2006, <<http://www.fadq.qc.ca/index.php?id=826>> [consultation : 24 avril 2009].

Laforce, S. *Évolution d'une zone inondable sous l'effet des changements climatiques : étude de la rivière du Nord à Lachute*, mémoire de maîtrise, École des technologies supérieures, Montréal, 2008, 318 p.

Lafortune, V., C. Furgal, E. Angiyou, T. Annanack, N. Einish, B. Etiddloie, P. Tookalook et J.-P. Savard. « Adapting to climate change in Nunavik and Northern Québec : Using traditional and scientific knowledge to enhance local capacity and cope with changing ice conditions », dans *S'adapter aux changements climatiques au Canada en 2005 : comprendre les risques et renforcer nos capacités*, conférence tenue du 4 au 7 mai 2005 à Montréal et parrainée par le Programme sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada et le Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation (C-CIARN), 2005.

Lafrance, G. et C. DesJarlais. *Impact socio-économique du changement climatique sur la demande d'énergie*, rapport de recherche, Ouranos, 2006, 79 p., <<http://www.ouranos.ca/fr/publications/resultats.php?q=lafrance&t=>> [consultation : 1^{er} mai 2009].

Lamy, S. et V. Bouchet. « Qualité de l'air, changements climatiques et santé », chap. 4 dans J. Séguin (éd.), *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa, 2008, 558 p.

Landry, M., R. Siron et F. Mercier. « La santé des écosystèmes — c'est dans notre intérêt à tous ! », *Franc Vert*, vol. 5, n° 2, 2008.

Laplante, D.P., R.G. Barr, A. Brunet, G. Galbaud du Fort, M.L. Meaney, J.F. Saucier, P.R. Zelazo et S. King. « Stress during pregnancy affects general intellectual and language functioning in human toddlers », *Pediatric Research*, vol. 56, n° 3, 2004, p. 400-410.

Larouche, W., R. Turcotte, J.-F. Cyr et L.G. Fortin. *Étude sur les tendances des débits journaliers moyens aux stations hydrométriques du Québec*, rapport interne, Centre d'expertise hydrique du Québec, 2008, 13 p. + annexes.

Larrivée, C. et G. Simonet. « Testing the assumptions : assessing infrastructures vulnerability to climate change », *Municipal World*, vol. 117, n° 6, 2007, p. 27-28, 44.

Larsen, P.H., S. Goldsmith, O. Smith, M.L. Wilson, K. Strzepak, P. Chinowsky et B. Saylor. « Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change », *Global Environmental Change*, vol. 18, n° 3, 2008, p. 442-457.

Lawrence, D.M. et A.G. Slater. « A projection of severe near surface permafrost degradation during the 21st Century », *Geophysical Research Letters*, vol. 32, n° 17, 2005.

Lease, N., A. Pichette et D. Chaumont. *Projet d'étude sur l'adaptation aux changements climatiques du secteur de la pomme au Québec*, rapport de recherche, Ouranos, 2009, 52 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/154_adaptationauxCCpomiculture_154_NancyLease_18nov2009.pdf> [consultation : 26 janvier 2010].

Lebuis, J., J.-M. Robert et P. Rissmann. *Regional Mapping of Landslide Hazard in Quebec, Symposium on Slopes on Soft Clays*, Institut géotechnique de Suède, Linköping (Suède), rapport n° 17, 1983.

Lederc, M., P. Boudreau, N. Roy, Y. Secretan, S. El Adlouni, T. Ouarda, D. Chaumont, I. Falardeau et F. Morneau. *Contribution à la recherche d'une solution intégrée au risque d'inondation à Châteauguay*, rapport commandé par la Ville de Châteauguay, en collaboration avec le ministère de la Sécurité publique, rapport de recherche n° R841, 2006, 280 p.

Lefavre, D. *Effet des changements climatiques sur les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Québec, Projections pour les années 2050*, rapport préparé pour le Comité de concertation navigation du Plan d'action Saint-Laurent phase 4, Institut Maurice-Lamontagne, Direction des Sciences océaniques, 2005, 34 p.

Lehoux, D., D. Dauphin, P. Laporte, J. Morin et O. Champoux. *Recommendation of Water Plans and Final Management Criteria Less Detrimental to Breeding and Migrating Waterfowl Along the St. Lawrence River Within the Lake St. Louis and the Lake St. Pierre Area*, rapport final remis à Environment Canada, 2005, 22 p.

Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, 448 p.

- Lenderink, G., A. Buishand et W. van Deursen. « Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies : Direct versus delta approach », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, 2007, p. 1145-1159.
- Lied, K. et U. Domaas. *Avalanche Hazard Assessment in Nunavik and on Côte-Nord, Québec, Canada*, Norwegian Geotechnical Institute, 2000.
- Ligeti, E., J. Penney et I. Wieditz. *Cities Preparing for Climate Change : A Study of Six Urban Regions*, Clean Air Partnership, 2007, 90 p.
- Limoges, B. « Biodiversité, services écologiques et bien-être humain », *Le Naturaliste canadien*, vol. 133, n° 2, 2009, p. 15-19.
- Logan, J.A., J. Régnière et J.A. Powell. « Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 1, n° 3, 2003, p. 130-137.
- Long, S.P., E.A. Ainsworth, A.D.B. Leakey, J. Nösberger et D.R. Ort. « Food for thought : Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations », *Science*, vol. 312, 2006, p. 1918-1921.
- Ludwig, R., I. May, R. Turcotte, L. Vescovi, M. Braun, J.-F. Cyr, L.G. Fortin, D. Chaumont, S. Biner, I. Chartier et W. Mauser. « The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment », soumis à *Advances in Geosciences*, 2009.
- Luo, Y., B. Su, W.S. Currie, J.S. Dukes, A. Finzi, U. Hartwig, B. Hungate, R.E. McMurtrie, R. Oren, W.J. Parton, D.E. Pataki, M.R. Shaw, D.R. Zak et C.B. Field. « Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide », *Bioscience*, vol. 54, 2004, p. 731-739.
- Luxmoore, R.J., S.D. Wullschlegel et P.J. Hanson. « Forest responses to CO₂ enrichment and climate warming », *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 70, 1993, p. 309-323.
- MacDonald, N.W., D.R. Zak et K.S. Pregitzer. « Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 59, 1995, p. 233-240.
- MacKenzie, W.R., N.J. Hoxie, M.E. Proctor, S. Gradus, K.A. Blair, D.E. Peterson, J.J. Kazmierczak, D.G. Addiss, K.R. Fox, J.B. Rose et J.P. Davis. « A massive outbreak in Milwaukee of cryptosporidium infection transmitted through the public water supply », *The New England Journal of Medicine*, vol. 331, 1994, p. 161-167.
- Mailhot, A., A.N. Rousseau, B. Lacroix-Vachon, E. Nantel et J.-P. Villeneuve. « Approvisionnement en eau au Québec : cartographie des sites et estimation des volumes d'eau de surface prélevés alimentant les réseaux d'aqueduc municipaux », dans *Eau et changement climatique : comprendre pour mieux s'adapter*, 57^e Congrès annuel de l'Association canadienne des ressources hydriques, tenu du 16 au 18 juin 2004 à Montréal, 2004.
- Mailhot, A., G. Rivard, S. Duchesne et J.-P. Villeneuve. *Impacts et adaptation aux changements climatiques en matière de drainage urbain au Québec*, Institut national de recherche scientifique Eau, Terre et Environnement, 2007a, 144 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/17_Rapport_Mailhot_infras_2007.pdf> [consultation : 11 mai 2009].
- Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya et G. Talbot. « Assessment of future change in intensity-duration-frequency curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model », *Journal of Hydrology*, vol. 347, n°s 1-2, 2007b, p. 197-210.
- Mailhot, A., S. Duchesne, G. Talbot, A.N. Rousseau et D. Chaumont. *Approvisionnement en eau potable et santé publique : projections climatiques en matière de précipitations et d'écoulements pour le sud du Québec*, rapport de recherche n° R-977 présenté à l'Institut de santé publique du Québec, Institut national de la recherche scientifique Eau, Terre et Environnement, Québec, 2008a, 164 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/35_Rapport_Mailhot_sante_2008.pdf> [consultation : 11 juin 2009].
- Mailhot, A., S. Duchesne, C. Larrivée, G. Pelletier, S. Bolduc, F. Rondeau, A. Kingumbi et G. Talbot. *Conception et planification des interventions de renouvellement des infrastructures de drainage urbain dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques*, Ressources naturelles Canada, 2008b, 170 p.
- Malcolm, J.R., A. Markham, R.P. Neilson et M. Garaci. « Estimated migration rates under scenarios of global climate change », *Journal of Biogeography*, vol. 29, 2002, p. 835-849.
- Mareuil, A. *Impacts des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières : cas de la rivière Châteauguay*, mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, 2005, 125 p.

- Martin, C., J.-J. Frenette et J. Morin. « Changes in the spectral and chemical properties of a water mass passing through extensive macrophyte beds in a large fluvial lake (Lake Saint-Pierre, Québec, Canada) », *Aquatic Sciences*, vol. 67, 2005, p. 196-209.
- Martin, D., D. Bélanger, P. Gosselin, J. Brazeau, C. Furgal et S. Déry. *Les changements climatiques, l'eau potable et la santé humaine au Nunavik : stratégies d'adaptation*, rapport préparé pour le Fonds d'action pour le changement climatique, projet A563, 2005a, 80 p.
- Martin, D., B. Lévesque, J.S. Maguire, A. Maheux, C. Furgal, J.L. Bernier et E. Dewailly. *Drinking Water Quality in Nunavik : Health Impacts in a Climate Change Context*, rapport final du projet subventionné par ArcticNet et ACADRE (Nasivik), 2005b, 87 p.
- Mausser, W. et R. Ludwig. « GLOWA-DANUBE — A research concept to develop integrative techniques, scenarios and strategies regarding global changes of the water cycle », dans M. Beniston (éd.), *Climatic Change : Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management, Advances in Global Change Research*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht et Boston, 2002, p. 171-188.
- McBean, G. et D. Henstra. *Climate Change, Natural Hazards and Cities*, Institute for Catastrophic Loss Reduction Research, 2003, 16 p.
- McCarty, J. P. « Ecological consequences of recent climate change », *Conservation Biology*, vol. 15, n° 2, 2001, p. 320-331.
- McMichael, A.J., D.H. Campbell-Lendrum, C.F. Corvalan, K.L. Ebi, A. Githeko, J.D. Scheraga et A. Woodward. *Climate Change and Human Health : Risk and responses*, *Organisation mondiale de la Santé*, Organisation météorologique mondiale et Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Genève, 2003, 322 p.
- Meehl, G.A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J.F.B. Mitchell, R.J. Stouffer et K.E. Taylor. « The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset, a new era in climate change research », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 88, n° 9, 2007, p. 1383-1394.
- Millerd, F. « The economic impact of climate change on Canadian commercial navigation on the Great Lakes », *Journal canadien des ressources hydriques*, vol. 30, n° 4, 2005, p. 269-280.
- Mills, C.J., K. Trouton et L. Gibbons. « Symposium Report : Second symposium on ultraviolet radiation related diseases », *Chronic Disease in Canada*, vol. 18, n° 1, 1997, <http://www.phac-aspc.gc.ca/publicat/cdic-mcc/18-1/e_e.html> [consultation : 11 juin 2009].
- Mingelbier, M., G. Trencia, R. Dumas, B. Dumas, Y. Mailhot, C. Bouchard, D.C. Manolesco, P. Brodeur, C. Hudon et G. Ouellette. *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 du Québec, Biodôme de Montréal, Environnement Canada, 2001, 22 p.
- Mingelbier, M., P. Brodeur et J. Morin. « Impacts de la régularisation du débit des Grands Lacs et des changements climatiques sur l'habitat des poissons du fleuve Saint-Laurent », *Vecteur Environnement*, vol. 37, n° 6, 2004, p. 34-43.
- Mingelbier, M., P. Brodeur et J. Morin. *Recommandations concernant les poissons et leurs habitats dans le Saint-Laurent fluvial et évaluation des critères de régularisation du système lac Ontario — Saint-Laurent*, rapport soumis à la Commission mixte internationale, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction de la recherche sur la faune, 2005, 141 p.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. *Surveillance de la santé animale*, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2006, <<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Productions/sante animale/surveillance/>> [consultation : 11 juin 2009].
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. *Profil régional de l'industrie bioalimentaire du Québec — estimations pour 2007*, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2008a, 164 p., <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/4213E035-D644-42B5-A184-EF3D877AB7AA/0/Profilregionalbioalimentaire_Complet.pdf> [consultation : 24 avril 2009].
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. *Statistiques économiques de l'industrie bioalimentaire du Québec*, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2008b, <<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/md/statistiques/>> [consultation : 24 avril 2009].

Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec et Institut national de santé publique du Québec. *Enquête sur la santé au Nunavik (2004)*, Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec et Institut national de santé publique du Québec, 2004, <<http://qanuippitaa.com/fr/what.aspx>> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec. *Chaleur accablante et rayons UV. Liste des initiatives, guides et plans*, Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2006a, <http://www.msss.gouv.qc.ca/sujets/santepub/environnement/index.php?chaleur_accablante_rayons_uv> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec. *Smog*, Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2006b, <<http://www.msss.gouv.qc.ca/SUJETS/SANTEPUB/environnement/index.php?qualite-de-lair-outils>> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec, *Programme national de santé publique 2003-2012 : mise à jour 2008*, Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec, 2008, 103p., <<http://publications.msss.gouv.qc.ca/acrobat/f/documentation/2008/08-216-01.pdf>> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère de la Sécurité publique du Québec. *Rapport de la commission Nicolet sur le déluge du Saguenay*, Ministère de la Sécurité publique du Québec, 1996.

Ministère de la Sécurité publique du Québec. *Rapport de la commission Nicolet sur la tempête de verglas de janvier 1998*, Ministère de la Sécurité publique du Québec, 1999.

Ministère de la Sécurité publique. *Cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans les dépôts meubles. Guide d'utilisation des cartes de zones de contraintes et d'application du cadre normatif – Saguenay–Lac-Saint-Jean*, Ministère de la Sécurité publique, 2005, 68 p., <http://www.msp.gouv.qc.ca/secivile/publications/cartes_zones_contraintes/glissements_terrain_2.pdf> [consultation : 10 octobre 2009].

Ministère de l'Environnement du Québec. *Stratégie québécoise sur la diversité biologique 2004-2007*, Ministère de l'Environnement du Québec, 2004, 109 p.

Ministère des Finances du Québec. *Impacts des changements démographiques sur l'économie, le marché du travail et les finances du Québec*, Ministère des Finances, document de recherche, 2005, 33 p., <http://www.finances.gouv.qc.ca/documents/Autres/fr/Impacts_demographiques2005.pdf> [consultation : 20 octobre 2009].

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. *Évolution de la demande d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre au Québec : scénario de référence 1996-2021*, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2001, <<http://www.mrmf.gouv.qc.ca/publications/energie/energie/20014012.pdf>> [consultation : 19 juin 2009].

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. *Évolution de la demande d'énergie, scénario de référence, horizon 2016*, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2005, <<http://www.mrmf.gouv.qc.ca/publications/energie/energie/horizon-2016.pdf>> [consultation : 19 juin 2009].

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. *Gros plan sur l'énergie : stratégie énergétique*, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2006a, <<http://www.mrmf.gouv.qc.ca/energie/strategie/index.jsp>> [consultation : 29 octobre 2009].

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. *Ressources et industrie forestière, portrait statistique, édition 2005-2006*, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2006b.

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. *Gros plan sur l'énergie*, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2009a, <<http://www.mrmf.gouv.qc.ca/publications/energie/statistiques/consommation-secteur.xls>> [consultation : 1^{er} mai 2009].

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. *Ressources et industries forestières : portrait statistique, édition 2009*, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2009b, 483 p., <<http://www.mrmf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques-complete.jsp>> [consultation : 20 octobre 2009].

Ministère des Transports du Québec. *Gestion des risques de glissements de terrain liés aux pluies des 19 et 20 juillet 1996 au Saguenay–Lac-St-Jean, bilan de la collaboration du Service de la géotechnique et de la géologie*, Direction du Laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec, 2000, 141 p.

Ministère des Transports du Québec. *Mandat d'initiative sur l'impact du réchauffement climatique dans le Nord du Québec*, mémoire présenté à la Commission parlementaire sur les transports et l'environnement, Ministère des Transports du Québec, 2006a.

Ministère des Transports du Québec. *Les chaussées au Québec : un contexte particulier*, fiche, 2006b, <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grand_public/vehicules_promenade/reseau_routier/chaussees/contexte_particulier_des_chaussees_au_quebec> [consultation : 10 octobre 2009].

Ministère des Transports du Québec. *La politique québécoise du transport collectif*, Ministère des Transports du Québec, 2006c, <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/transport_collectif/compl_polit_collectif2006.pdf> [consultation : 19 avril 2010].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Le chauffage au bois*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2002, <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/air/chauf-bois/index.htm>> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2004, <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/sept-bassins/index.htm>> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Publication du Règlement modifiant le Règlement sur la qualité de l'eau potable*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2005a, <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/rqep.htm>> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Atlas de la biodiversité du Québec – Les espèces menacées ou vulnérables*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2005b, 60 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Loi sur le développement durable L.R.Q. chapitre D-8.1.1*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Éditeur officiel du Québec, 2006a, <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/developpement/loi.htm>> [consultation : 20 octobre 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir, Plan d'actions 2006-2012*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2006b, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/2006-2012_fr.pdf> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Cadre de prévention des risques naturels*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2006c, <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/infuseur/communiquer.asp?no=1029>> [consultation : 10 octobre 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. *Programme d'acquisition de connaissances des eaux souterraines*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2008a, <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>> [consultation : 11 mai 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Rapport annuel 2005-2006 sur la mise en œuvre de la Stratégie et du Plan d'action québécois sur la diversité biologique*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2008b, 128 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Fleurs d'eau de cyanobactéries*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2009a, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/cyanobacteries/> [consultation : 1^{er} mai 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Bilan des lacs et cours d'eau touchés par une fleur d'eau d'algues bleu-vert au Québec de 2004 à 2008*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2009b, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/algues-bv/bilan/liste_comparative.asp> [consultation : 11 juin 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Registre des aires protégées*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2009c, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/registre/index.htm> [consultation : 4 septembre 2009].

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. *Règlement sur les émissions de gaz à effet de serre des véhicules automobiles*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2010, <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R6_001.htm> [consultation : 19 avril 2010].

- Mirville, M., F. Brissette, S. Krau et R. Leconte. « Adaptation to climate change in the management of a Nordic water-resources system exploited for hydropower », *Water Resources Management*, vol. 23, n° 4, 2009, p. 2965-2986.
- Mirza, S. *Danger ahead : The Coming Collapse of Canada's Municipal Infrastructure*, Fédération canadienne des municipalités, 2007, 7 p.
- Monette S., A.D. Dallaire, M. Mingelbier, D. Groman, C. Uhland, J.-P. Richard, G. Paillard, L.M. Johansson, D.P. Chivers, H.W. Ferguson, F.A. Leighton et E. Simko. « Massive mortality of common carp (*Cyprinus carpio carpio*) in the St. Lawrence River in 2001 : Diagnostic investigation and experimental reproduction of a lymphocytic encephalitis », *Veterinary Pathology*, vol. 43, 2006, p. 302-310.
- Morin, J. et A. Bouchard. *Les bases de la modélisation du tronçon Montréal–Trois-Rivières*, rapport scientifique RS-100, Environnement Canada – Région du Québec, Service météorologique du Canada, Section Hydrométrie, Sainte-Foy, 2000, 56 p.
- Morin, J., M. Mingelbier, J.A. Bechara, O. Champoux, Y. Secretan, M. Jean et J.-J. Frenette. « Emergence of new explanatory variable for 2D habitat modelling in large rivers : The St. Lawrence experience », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 28, 2003, p. 249-272.
- Morin, J., O. Champoux, S. Martin et K. Turgeon. *Modélisation intégrée de la réponse de l'écosystème dans le fleuve Saint-Laurent : rapport final des activités entreprises dans le cadre du Plan d'étude sur la régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent*, rapport scientifique, Service météorologique du Canada, Québec – Section Hydrologie RS-108, Environnement Canada, 2005, 139 p.
- Morin, X., M.J. Lechowicz, C. Augspurger, J. O' Keefe, D. Viner et I. Chuine. « Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century », *Global Change Biology*, vol. 15, n° 4, 2009, p. 961-975.
- Morneau, F., M. Michaud, F. Lecours, L. Côté et D. Roy. *Étude d'impact sur l'environnement : projets de protection des berges le long de la route 132 autour de la péninsule gaspésienne*, Ministère des Transports du Québec, 2001, 84 p.
- Mortsch, L., H. Hengeveld, M. Lister, B. Lofgren, F.H. Quinn, M. Slivitzky et L. Wenger. « Climate change impacts on the hydrology of the Great Lakes St. Lawrence system », *Revue canadienne des ressources en eau*, vol. 25, n° 2, 2000, p. 153-179.
- Music, B. et D. Caya. « Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM) », *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, n° 5, 2007, p. 969-988.
- Music, B., A. Musy et R. Roy. *The Impact of Climate Change on Hydroelectricity Generation*, rapport scientifique préparé pour CEATI International Inc., 2008, <www.ouranos.ca/media/publication/147_hydroelectricity_BMusic.pdf> [consultation : 28 septembre 2009].
- Music, B., A. Frigon, M. Slivitzky, A. Musy, D. Caya et R. Roy. « Runoff modelling within the Canadian Regional Climate Model (CRCM) : Analysis over the Quebec/Labrador watersheds », *IAHS Publications*, vol. 333, 2009, p. 183-194.
- Nantel, E., A. Mailhot, A.N. Rousseau et J.-P. Villeneuve. « A methodology to assess historical and current municipal water supply vulnerabilities : An application to Quebec municipalities », dans *Computing and Control for the Water Industry*, 8^e Conférence internationale tenue du 5 au 7 septembre 2005 à l'Université d'Exeter, Royaume-Uni, vol. 2, 2005, 185 p.
- Nations Unies. *Convention sur la diversité biologique*, Nations Unies, Recueil des Traités, vol. 1760, n° I-30169, 1993, p. 169-382, <<http://www.cbd.int/convention/convention.shtml>> [consultation : 04 septembre 2009].
- Nature Conservancy (The). *Adapting to Climate Change – Ecosystem-Based Approaches for People and Nature*, The Nature Conservancy, 2009, 10 p.
- Nearing, M.A., F.F. Pruski et M.R. O Neal. « Expected climate change impacts on soil erosion rates : A review », *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 59, n° 1, 2004, p. 43-50.
- Neilson, R.P., L.F. Pitelka, A.M. Solomon, R. Nathan, G.F. Midgley, J.M.V. Fragoso, H. Lischke et K. Thompson. « Forecasting regional to global plant migration in response to climate change », *Bioscience*, vol. 55, 2005, p. 749-759.
- Nemani, R.R., C.D. Keeling, H. Hashimoto, W.M. Jolly, S.C. Piper, C.J. Tucker, R.B. Myneni et S.W. Running. « Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 », *Science*, vol. 300, 2003, p. 1560-1563.
- Nicault, A., Y. Begin, C. Begin, J. Guiot, M.M. Savard et J. Marion. *Multiproxy Hydro-Climatic Reconstructions Over La Grande Hydro-Power Complex in James Bay Area, Northern Québec*, 62^e congrès annuel ACRH, tenu du 9 au 12 juin 2009 à Québec, 2009.

Nickels, S., C. Furgal, M. Buell et H. Moquin. Unikkaaqatigiit – *Putting the Human Face on Climate Change : Perspectives from Inuit in Canada*, publication conjointe de l'Inuit Tapiriit Kanatami, du Centre pour la santé des Inuits et les changements environnementaux Nasiwik à l'Université Laval et de l'Ajunnginiq Centre à la National Aboriginal Health Organization, 2005.

Norby, R.J., E.H. DeLucia, B. Gielen, C. Calfapietra, C.P. Giardina, J.S. King, J. Ledford, H.R. McCarthy, D.J.P. Moore, R. Ceulemans, P. De Angelis, A.C. Finzi, D.F. Karnosky, M.E. Kubiske, M. Lukac, K.S. Pregitzer, G.E. Scarascia-Mugnozza, W.H. Schlesinger et R. Oren. « Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 102, 2005, p. 18052-18056.

Noss, R.F. « Beyond Kyoto : Forest management in a time of rapid climate change », *Conservation Biology*, vol. 15, 2001, p. 578-590.

Oke, T.R. « The energetic basis of urban heat island », *Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, n° 455, 1982, p. 1-24.

Ogden, N.H., A. Maarouf, I.K. Barker, M. Bigras-Poulin, L.R. Lindsay, M.G. Morshed, C.J. O'Callaghan, F. Ramay, D. Waltner-Toews et D.F. Charron. « Climate change and the potential for range expansion of the Lyme disease vector Ixodes scapularis in Canada », *International Journal for Parasitology*, vol. 36, 2006, p. 63-70.

Organisation mondiale de la Santé. *Climate change and human health : risks and responses*, Organisation mondiale de la Santé, 2003, <<http://www.who.int/globalchange/publications/cchsummary/en/>> [consultation : 11 juin 2009].

Organisation mondiale de la Santé. *Climat et santé*, Organisation mondiale de la Santé, 2005, <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/fr/>> [consultation : 11 juin 2009].

Organisation mondiale de la Santé. *Plans d'action sanitaire contre la chaleur*, F. Matthies et al. (éd.), Organisation mondiale de la Santé – bureau régional de l'Europe, 2008, 58 p.

Ouellet, V., O. Champoux et J. Morin. *Modèle d'impacts des fluctuations de niveau d'eau sur la survie hivernale du rat musqué : rapport final des activités entreprises dans le cadre du Plan d'étude sur la régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent*, rapport technique, Service météorologique du Canada – Section Hydrologie RT-139, Environnement Canada, préparé pour le Groupe de travail technique sur l'environnement du Groupe d'étude international sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent, 2005, 75 p.

Ouranos. *S'adapter aux changements climatiques*, Ouranos, Montréal, 2004, 91 p., <http://www.ouranos.ca/fr/pdf/ouranos_sadaptauxcc_fr.pdf> [consultation : 11 mai 2009].

Ouranos, *Programmation scientifique*, Ouranos, Montréal, 2006, <<http://www.ouranos.ca/fr/programmation-scientifique/impacts-et-adaptation/impacts-societaux-environnementaux/sante.php>> [consultation : 11 juin 2009].

Owens, S., P. Gosselin, C. Furgal, J.-F. Proulx et L. Château-Degat. *Nunavik's Public Health Surveillance in Response to a Changing Climate : A Baseline Study*, ArcticNet et Centre hospitalier universitaire de Québec, 2006, 113 p.

Pacher, G., M. Minville, A. Frigon, R. Roy et M. Slivitzky. « Climate change and water resources : An approach to adaptive management : The role of hydrology in water resources management », *IAHS Publication*, vol. 327, 2009, p. 136-143.

Parker, W.C., S. Colombo, M.L. Cherry, M.D. Flannigan, S. Greifenhagen, R.S. McAlpine, C. Papadopol et T. Scarr. « Third millennium forestry : What climate change might mean to forests and forest management in Ontario », *The Forestry Chronicle*, vol. 76, 2000, p. 445-463.

Parkinson, A.J. et J.C. Butler. « Potential impacts of climate change on infectious diseases in the Arctic », *International Journal of Circumpolar Health*, vol. 64, n° 5, 2005, p. 478-486.

Patz, J.A., M.A. McGeehin, S.M. Bernard, K.L. Ebi, P.R. Epstein, A. Grambsch, D.J. Gubler, P. Reiter, I. Romieu, J.B. Rose, J.M. Samet et J. Trtanj. « The potential health impacts of climate variability and change for the United States : Executive summary of the report of the health sector of the U.S. National Assessment », *Environmental Health Perspectives*, vol. 108, n° 4, 2000, p. 367-376.

Payette, S. « Fire as a controlling process in the North American boreal forest », dans *A Systems Analysis of the Global Boreal Forest*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992, p. 144-169.

Payette, S., M.J. Fortin et I. Gamache. « The sub-arctic forest-tundra : The structure of a biome under changing climate », *Bioscience*, vol. 51, n° 9, 2001, p. 709-718.

- Payette, S., A. Delwaide, M. Caccianiga et M. Beauchemin. « Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years », *Geophysical Research Letters*, vol. 31, n° L18208, 2004, p. 1-4.
- Peixoto, J. P. et A.H. Oort. *Physics of Climate*, American Institute of Physics, 1992, 520 p.
- Peterson, A.T. et R. Scachetti-Pereira. « Potential geographic distribution of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera : Cerambycidae) in North America », *The American Midland Naturalist*, vol. 151, n° 1, 2004, p. 170-178.
- Pfeffer, W. T., J. T. Harper et S. O'Neel. « Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise », *Science*, vol. 321, n° 5894, 2008, p. 1340-1343.
- Plummer, D.A., D. Caya, A. Frigon, H. Côté, M. Giguère, D. Paquin, S. Biner, R. Harvey et R. de Elía. « Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM », *Journal of Climate*, vol. 19, n° 13, 2006, p. 3112-3132.
- Podur, J., D.L. Martell et K. Knight. « Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada », *Canadian Journal of Forest Research—Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 32, 2002, p. 195-205.
- Price, D.T., D.H. Halliwell, M.J. Apps et C.H. Peng. « Adapting a patch model to simulate the sensitivity of Central-Canadian boreal ecosystems to climate variability », *Journal of Biogeography*, vol. 26, 1999, p. 1101-1113.
- Price, D., N. Zimmermann, P. van der Meer, M. Lexer, P. Leadley, I. Jorritsma, J. Schaber, D. Clark, P. Lasch, S. McNulty, J. Wu et B. Smith. « Regeneration in gap models : Priority issues for studying forest responses to climate change », *Climatic Change*, vol. 51, 2001, p. 475-508.
- Price, D.T. et D. Scott. *Large Scale Modelling of Canada's Forest Ecosystem Responses to Climate Change*, rapport final fait au Gouvernement du Canada : Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, 2006, 53 p.
- Pugin, S., J.-F. Cyr, L.G. Fortin et R. Turcotte. *Une approche par bassin versant pour évaluer l'impact des changements climatiques et la capacité d'adaptation — Développements méthodologiques pour un bassin agricole du Québec méridional*, rapport technique, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, 2006.
- Pye, H.O.T., H. Liao, S. Wu, L.J. Mickley, D.J. Jacob, D.K. Henze et J.H. Seinfeld. « Effect of changes in climate and emissions on future sulfate-nitrate-ammonium aerosol levels in the United States », *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 114, 2009.
- Quilbé, R., A.N. Rousseau, J.-S. Moquet, N.B. Trinh, Y. Dibike, P. Gachon et D. Chaumont. « Assessing the effect of climate change on river flow using general circulation models and hydrological modelling — Application to the Chaudière River (Québec, Canada) », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 33, n° 1, 2008a, p. 73-93.
- Quilbé, R., A.N. Rousseau, J.-S. Moquet, S. Savary, S. Ricard et M.S. Garbouj. « Hydrological response of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 12, 2008b, p. 101-110.
- Raulier, F., P.Y. Bernier. « Predicting the date of leaf emergence for sugar maple (*Acer saccharum* Marsh) across its native range », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 30, 2000, p. 1429-1435.
- Réale, D., A.G. McAdam, S. Boutin et D. Berteaux. « Genetic and plastic responses of a northern mammal to climate change », *Proceedings of the Royal Society of London Series B — biological sciences*, vol. 270, 2003, p. 591-596.
- Régie régionale de la santé et des services sociaux de Chaudière-Appalaches. *Avis de santé publique portant sur les risques à la santé associés aux activités de production animale en Chaudière-Appalaches*, Régie régionale de la santé et des services sociaux de Chaudière-Appalaches, 2001, <http://www.rsss12.gouv.qc.ca/pdf/Avis-Production_animales-mars_01.pdf> [consultation : 11 mai 2009].
- Régie régionale de la santé et des services sociaux du Nunavik. *Qanuippitaa ? L'enquête de santé du Nunavik*, Régie régionale de la santé et des services sociaux du Nunavik, 2004, <<http://qanuippitaa.com/fr/index.aspx>> [consultation : 2 mai 2007].
- Régnière, J., B.J. Cooke, J.A. Logan, A.L. Carroll et L. Safranyik. *Les changements climatiques et les ravageurs indigènes et exotiques : une nouvelle réalité ?*, colloque Changements climatiques et foresterie : impacts et adaptation, tenu les 20 et 21 avril 2005 à Baie-Comeau (Québec), 2005.
- Renecker, I.A. et R.J. Hudson. « Seasonal energy expenditures and thermoregulatory response of moose », *Canadian Journal of Zoology*, vol. 64, 1986, p. 322-327.

- Rivard, C., J. Marion, Y. Michaud, S. Benhammane, A. Morin, R. Lefebvre et A. Rivera. *Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada*, Commission géologique du Canada, dossier public 1577, 2003, 39 p.
- Rivard, C., H. Vigneault, A.R. Piggott, M. Larocque, F. Ancil, L. Tremblay et A.N. Rousseau. *Examining the Impacts of Climate Change and Human Activities on Groundwater Recharge in Canada Using Historical Data*, GeoEdmonton 2008 : 61^e conférence géotechnique canadienne et 9^e conférence conjointe SCG/AIH-SNC sur les eaux souterraines, tenu du 21 au 24 septembre 2008 à Edmonton (Alberta), 2008.
- Rizak, S. et E. Hrudehy. « Drinking water safety — Challenges for community-managed systems », *Journal of Water and Health*, vol. 6, suppl. 1, 2008, p. 33-41.
- Rizzo, B. et E. Wilken. « Assessing the sensitivity of Canada's ecosystems to climatic change », *Climatic Change*, vol. 21, n° 1, 1992, p. 37-56.
- Robichaud, A. et R. Drolet. *Rapport sur l'état du Saint-Laurent — les fluctuations des niveaux d'eau du Saint-Laurent*, Équipe conjointe bilan, composée de représentants d'Environnement Canada, de Pêches et Océans Canada et du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, rapport technique, 1998.
- Rochette, P., G. Bélanger, Y. Castonguay, A. Bootsma et D. Mongrain. « Climate change and winter damage to fruit trees in Eastern Canada », *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 84, 2004, p. 1113-1125.
- Rodenhouse, N.L., L.M. Christeson, D. Parry et L.E. Green. « Climate change effects on native fauna of northeastern forests », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 39, 2009, p. 249-263.
- Root, T.L. et S.H. Schneider. « Climate change : Overview and implications for wildlife », dans S.H. Schneider et T.L. Root (éd.), *Wildlife Responses to Climate Change : North American Case Studies*, Island Press, Washington, DC, 2002, 437 p.
- Rosberg, J. et J. Andréasson. *From Delta Change to Scaling and Direct Use of RCM Output*, compte rendu de la European Conference on Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources, tenue du 5 au 9 juin 2006 à Reykjavik (Islande), 2006, p. 121-124.
- Rose, J.B., S. Daeschner, D.R. Easterling, F.C. Curriero, S. Lele et A.J. Patz. « Climate and waterborne disease outbreaks », *Journal of American Water Works Association*, vol. 92, n° 9, 2000, p. 77-87.
- Rounsevell, M.D.A., P.M. Berry et P.A. Harrison. « Future environmental change impacts on rural land use and biodiversity : A synthesis of the ACCELERATES project », *Environmental Science and Policy*, vol. 9, 2006, p. 93-100.
- Rousseau, A.N., A. Mailhot et J.-P. Villeneuve. *Connaissons-nous bien la capacité des bassins versants et aquifères régionaux à fournir de l'eau potable à la population du Québec sous de nouvelles conditions climatiques ?*, 26^e Symposium sur les eaux usées et 15^e Atelier sur l'eau potable, tenu les 17 et 18 septembre 2003 à Laval (Québec), 2003.
- Rousseau, A.N., A. Mailhot, M. Slivitzky, J.-P. Villeneuve, M.J. Rodriguez et A. Bourque. « Usages et approvisionnement en eau dans le Sud du Québec. Niveau des connaissances et axes de recherche à privilégier dans une perspective de changements climatiques », *Revue canadienne des ressources hydriques*, vol. 29, n° 2, 2004, p. 125-138.
- Roy, L.A. « Le verglas de 1998 dans le Nord-Est de l'Amérique du Nord », *Bulletin d'information en santé environnementale (BISE)*, Institut national de santé publique du Québec, vol. 9, n° 6, novembre-décembre 1998, <http://www.inspq.qc.ca/bulletin/bise/1998/bise_9_6.asp?Annee=1998#article2> [consultation : 11 juin 2009].
- Roy, R., G. Pacher, P. Adamson, L. Roy et R. Silver. *Adaptive Resources Management for Water Resources Planning and Operations*, rapport scientifique et technique commandé par la Banque mondiale, 2008a, 96 p.
- Roy, R., I. Chartier, G. Desrochers, F. Guay, M. Mirville, G. Pacher, L. Roy et D. Tapsoba. *Impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique au nord du Québec et mesures d'adaptation envisageables*, présentation aux 21^e Entretiens Jacques-Cartier, Québec, 2008b.
- Rustad, L.E., J.M. Melillo, M.J. Mitchell, I.J. Fernandez, P.A. Steudler et P.J. McHale. « Effects of soil warming on C and N cycling in Northern U.S. forest soils », dans R. Mickler, R. Birsdey et J. Hom (éd.), *Responses of Northern U.S. Forests to Environmental Change*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 2000, p. 357-381.
- Rustad, L.E., J.L. Campbell, G.M. Marion, R.J. Norby, M.J. Mitchell, A.E. Hartley, J.H.C. Cornelissen, J. Gurevitch et GCTE-NEWS. « A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming », *Oecologia*, vol. 126, 2001, p. 543-562.

- Ruth, M. *Modelling Infrastructure Vulnerabilities and Adaptation to Climate Change in Urban Systems : Methodology and Application to Metropolitan Boston*, European Regional Science Association Meetings, tenu en août 2003 à Jyväskylä (Finlande), 2003.
- Santé Canada. *Exercice de chaleur accablante*, rapport DDH Environnement ltée, n° 05-044, Montréal, 2005, 48 p.
- Santé Canada. *Qualité de l'air et ses effets sur la santé*, Santé Canada, 2009, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/out-ext/effe/health_effects-effets_sante-fra.php> [consultation : 11 juin 2009].
- Savard, J.-P., P. Bernatchez, F. Momeau, F. Saucier, P. Gachon, S. Senneville, C. Fraser et Y. Jolivet. *Étude de la sensibilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques, synthèses des résultats*, 2008, 48 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/20_Rapport_Savard_maritime_2008.pdf> [consultation : 4 septembre 2009].
- Savary, S., A.N. Rousseau et R. Quilbé. « Assessing the effects of historical landcover changes on runoff using remote sensing and hydrological modelling », *Journal of Hydrological Engineering*, vol. 14, n° 6, 2009, p. 575-587.
- Scherm, H. « Climate change : Can we predict the impacts on plant pathology and pest management? », *Canadian Journal of Plant Pathology*, vol. 26, 2004, p. 267-273.
- Schwartz, M.W. « Modeling effects of habitat fragmentation on the ability of trees to respond to climatic warming », *Biodiversity and Conservation*, vol. 2, 1992, p. 51-61.
- Scinocca, J.F. et N.A. McFarlane. « The variability of modelled tropical precipitation », *Journal of Atmospheric sciences*, vol. 61, 2004, p. 1993-2015.
- Scott, D. « Ski industry adaptation to climate change », dans S. Gössling et M. C. Hall (éd.), *Tourism and Global Environmental Change*, Routledge, 2005, 344 p.
- Scott, D., B. Jones, C. Lemieux, G. McBoyle, B. Mills, S. Svenson et G. Wall. *The Vulnerability of Winter Recreation to Climate Change in Ontario's Lakelands Tourism Region*, Department of Geography Publication Series, occasional paper 18, University of Waterloo, Waterloo (Canada), 2002a, <http://www.fes.uwaterloo.ca/geography/faculty/danielscott/PDFFiles/Winterrecreation_Scott-good%20quality.pdf> [consultation : 19 juin 2009].
- Scott, D., J.R. Malcom et C. Lemieux. « Climate change and modelled biome representation in Canada's national park mandates », *Global Ecology & Biogeography*, vol. 11, 2002b, p. 475-484.
- Scott, D. et B. Jones. *Climate Change Seasonality in Canadian Outdoor Recreation and Tourism*, Department of Geography, University of Waterloo, Waterloo (Canada) 2006, <http://www.fes.uwaterloo.ca/geography/faculty/danielscott/PDFFiles/SEASONS_Final%20copy.pdf> [consultation : 19 juin 2009].
- Scott, D. et G. McBoyle. « Climate change adaptation in the ski industry », *Mitigation and Adaptation Strategies to global Environmental Change*, vol. 12, n° 8, 2007 p. 1411-1431.
- Scott, D., G. McBoyle et A. Minogue. « The implication of climate change for the Quebec ski industry », *Global Environmental Change*, vol. 17, n° 2, 2007, p. 181-190.
- Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique. *Perspectives mondiales de la diversité biologique, deuxième édition*, Secrétariat de la convention sur la diversité biologique, Montréal, 2006, 83 p.
- Secrétariat aux affaires autochtones. *La population autochtone au Québec*, Secrétariat aux affaires autochtones, 2007, <<http://www.autochtones.gouv.qc.ca/nations/population.htm>> [consultation : 20 octobre 2009].
- Secretariat of the CBD et The Nature Conservancy. *Ecosystem-Based Adaptation : An Introduction to Benefits and Key Principles*, Secretariat of the CBD et The Nature Conservancy, 2008.
- Sécurité publique Canada. *Glissements de terrain et avalanches importants des XIX^e et XX^e siècles*, Sécurité publique Canada, 2006, <<http://www.psepc-sppcc.gc.ca/res/em/nh/lisa/lisa-sig-fr.asp>> [consultation : 11 juin 2009].
- Seguin, M.K. et M. Allard. « Le pergélisol et les processus thermokarstiques de la région de la rivière Nastapoca, Nouveau-Québec », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 38, 1984, p. 11-25.
- Senneville, S. et F.J. Saucier. *Étude de sensibilité de la glace de mer au réchauffement climatique dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent*, Rapport préparé pour Ouranos, 2007, 28 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/146_SennevilleetSaucier2007.pdf> [consultation : 9 novembre 2009].

Shuter, B.J., C.K. Minns, H.A. Regier et J.D. Reist. « Étude pancanadienne sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatique — secteur des pêches », dans G. Koshida et W. Avis (éd.), *Impacts et adaptation à la variabilité et au changement du climat : questions sectorielles*, Environment Canada, Étude pancanadienne sur l'adaptation à la variabilité au changement climatique, vol. VII, 1998, p. 277-344.

Singh, B., C. Bryant, P. André et J.-P. Thouez. *Impact et adaptation aux changements climatiques pour les activités de ski et de golf et l'industrie touristique : le cas du Québec*, rapport final, projet Ouranos, 2006, <<http://www.ouranos.ca/fr/publications/resultats.php?q=singh&t=>> [consultation : 1 mai 2009].

Siron, R., K. Sherman, H.-R. Skjoldal et E. Hiltz. « Ecosystem-based management in the Arctic Ocean : A multi-level spatial approach », *Arctic*, vol. 61, suppl. 1, 2008, p. 86-102.

Smargiassi, A., M.S. Goldberg, C. Plante, M. Fournier, Y. Baudouin et T. Kosatsky. « Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands », *Journal of Epidemiology and Community Health*, vol. 63, 2009, p. 659-664, <<http://jech.bmj.com/cgi/content/full/63/8/659>> [consultation : 11 juin 2009].

Smit, B., R. Blain et P. Keddie. « Corn hybrid selection and climatic variability : Gambling with nature? », *Le géographe canadien*, vol. 41, 1997, p. 429-438.

Société canadienne du cancer. *Statistiques canadiennes sur le cancer 2009*, Société canadienne du cancer, 2009, 132 p., <http://www.cancer.ca/Canada-wide/About%20cancer/Cancer%20statistics/Canadian%20Cancer%20Statistics.aspx?sc_lang=fr-CA> [consultation : 11 juin 2009].

Solomon-Côté, P. *Élaboration d'une classification de terrain en milieu de pergélisol à l'aide d'un SIG, en vue de l'aménagement du territoire : le cas de Salluit au Nunavik*, mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université Laval, Québec, 2004, 113 p.

Sottile, M.-F. *Changements climatiques pour la révision des normes d'efficacité énergétique dans les nouveaux bâtiments*, étude réalisée pour l'Agence de l'efficacité énergétique, 2006, 20 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/44_Rapport_Sottile_Climat_2006.pdf> [consultation : 1^{er} mai 2009].

Spittlehouse, D.L. et R.B. Stewart. « Adaptation to climate change in forest management », *BC Journal of Ecosystems and Management*, vol. 4, 2004, p. 7-17.

Stankey, G.H., R.N. Clark et B.T. Bormann. *Adaptive Management of Natural Resources : Theory, Concepts and Management Institutions*, rapport technique général PNW-GTR-654, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland (Oregon), 2005, 73 p.

Statistique Canada. *Bulletin d'analyse — régions rurales et petites villes du Canada*, Statistique Canada, 2005, vol. 6, n° 6.

Statistique Canada. *L'âge de l'infrastructure publique au Canada*, analyse en bref, V. Gaudreau et P. Lemire, Division de l'investissement et du stock de capital, Statistique Canada, 2006, 13 p.

Statistique Canada. *Recensement de l'agriculture, section 1 — un portrait statistique de l'agriculture, Canada et provinces : années de recensement 1921 à 2006*, Statistique Canada, 2007, <<http://www.statcan.gc.ca/pub/95-632-x/2007000/t/4185570-fra.htm#24>> [consultation : 24 avril 2009].

Stoneham, M., C. Earl et L. Baldwin. *Creating Shade at Public Facilities : Policy and Guidelines for Local Government*, 2^e édition, Australian Institute of environmental health, 2001, 101 p., <www.health.qld.gov.au/ph/documents/hpu/20267.pdf> [consultation : 11 juin 2009].

Stirling, I., N.J. Lunn et J. Iacozza. « Long-term trends in the population ecology of polar bears in western Hudson Bay in relation to climatic change », *Arctic*, vol. 52, n° 3, 1999, p. 294-306.

Strode, P.K. « Implications of climate change for North American wood warblers (*Parulidae*) », *Global Change Biology*, vol. 9, 2003, p. 1137-1144.

Swansberg, E. et N. El-Jabi. *Impact of Climate Change on River Water Temperatures and Fish Growth*, rapport rédigé pour le Programme sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 2001.

Tanguay, J. et J.-J. Roussel. « Un système d'aide aux décisions hivernales », *Innovation Transport, bulletin scientifique et technique*, n° 9, 2000.

Tanner, C.E., M. Staudt, R. Adamowski, M. Lussier, S. Bertrand et R.K. Prichard. « Seroepidemiological study for five different zoonotic parasites in Northern Quebec », *Revue canadienne de santé publique*, 1987, vol. 78, n° 4, p. 262-266.

- Tarasov, L. et W.R. Peltier. « A geophysically constrained large ensemble analysis of the deglacial history of the North American ice-sheet complex », *Quaternary Science Reviews*, vol. 23, n^{os} 3-4, 2004, p. 359-388.
- Tardif, I., C. Bellerose et E. Masson. « Environnements et santé : le point de vue des Montérégiens », *Bulletin d'information en santé environnementale (BISE)*, Institut national de santé publique du Québec, vol. 17, n^o 6, novembre-décembre 2006, p. 1-6, <<http://www.inspq.qc.ca/pdf/bulletins/bise/BISE-17-6.pdf>> [consultation : 11 juin 2009].
- Tecsult. *Analyse coûts-avantages de solutions d'adaptation à l'érosion côtière pour la Ville de Sept-Îles*, rapport d'étude réalisé pour la Ville de Sept-Îles, 2008, 90 p.
- Thieden, E., P.A. Philipsen, J. Heydenreich et H.C. Wulf. « UV radiation exposure related to age, sex, occupation and sun behaviour based on time-stamped personal dosimeter readings », *Archives of Dermatology*, vol. 140, 2004a, p. 197-203.
- Thieden, E., P.A. Philipsen, J. Sandby-Moller, J. Heydenreich et H.C. Wulf. « Proportion of lifetime UV dose received by children, teenagers », *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 123, 2004b, p. 1147-1150.
- Thomas, M.K., D.F. Charron, D. Waltner-Toews, C. Schuster, A.R. Maarouf et J.D. Holt. « A role of high impact weather events in waterborne disease outbreaks in Canada, 1975-2001 », *International Journal of Environmental Health Research*, vol. 16, n^o 3, 2006, p. 167-180.
- Tremblay, C., L. Jacques, C. Prévost, M. Noiseux, M. Blackburn et L. Boileau. « Les impacts du verglas de 1998 sur la santé des Montérégiens », *Bulletin d'information en santé environnementale (BISE)*, Institut national de santé publique du Québec, vol. 9, n^o 6, novembre-décembre 1998, <http://www.inspq.qc.ca/bulletin/bise/1998/bise_9_6.asp?Annee=1998#article1> [consultation : 11 juin 2009].
- Tremblay, M., C. Furgal, V. Lafortune, C. Larrivée, J.-P. Savard, M. Barrett, T. Annanack, N. Enish, P. Tookalook et B. Etidloie. « Climate change, communities and ice : Bringing together traditional and scientific knowledge for adaptation in the North », dans R. Riewe et J. Oakes (ed.), *Climate Change : Linking Traditional and Scientific Knowledge*, Aboriginal Issues Press, University of Manitoba, Winnipeg, 2006, p. 185-201.
- Turcotte, R., L.G. Fortin, S. Pugin et J.-F. Cyr. *Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des réservoirs Saint-François et Aylmer : résultats préliminaires*, compte rendu du Congrès annuel de l'Association canadienne des barrages tenu de 3 au 5 octobre 2005 à Calgary, 2005.
- Turgeon, K., O. Champoux, S. Martin et J. Morin. *Modélisation des grandes classes de milieux humides de la plaine inondable du fleuve Saint-Laurent : considération de la succession des communautés végétales*, rapport scientifique, Service météorologique du Canada, Québec — Section Hydrologie RS-107, Environnement Canada, 2005, 89 p.
- Van Cleve, K., W.C. Oechel et J.L. Hom. « Response of black spruce (*Picea mariana*) ecosystems to soil temperature modification in interior Alaska », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 20, 1990, p. 1530-1535.
- Verburg, P.S.J. « Soil solution and extractable soil nitrogen response to climate change in two boreal forest ecosystems », *Biology and Fertility of Soils*, vol. 41, 2005, p. 257-261.
- Verhaar, P.M., R. Biron, I. Ferguson et T. B. Hoey. « Numerical modeling of climate change impacts on the morphology of Saint-Lawrence River tributaries », soumis à *Water Resources Research*, 2009.
- Vescovi, L., M. Rebetez et F. Rong. « Assessing public health risk due to extremely high temperature events : climate and social parameters », *Climate Research*, vol. 30, 2005, p. 71-78.
- Vescovi, L., J.-F. Cyr, R. Turcotte, R. Ludwig, M. Braun, L.G. Fortin et D. Chaumont. « A multi-model experiment to assess and cope with climate change impacts on the Chateauguay watershed in Southern Quebec », accepté pour publication dans *The 3rd UN World Water Development Report : Water in a Changing World*, 2009.
- Ville de Montréal. *Le plan stratégique de développement durable de Montréal*, Ville de Montréal, 2005, <http://www2.ville.montreal.qc.ca/cmsprod/fr/developpement_durable/plan_strategique> [consultation : 11 juin 2009].
- Villeneuve, C. « La grande inconnue », *Revue des sciences de l'eau*, vol. 21, n^o 2, 2008, p. 129-133.
- Villeneuve, J.P., D. Fougères, M. Gaudreau, P.-J. Hamel, C. Poitras, G. Sénécal, M. Trépanier, N. Vachon, R. Veillette, S. Duchesne, A. Mailhot, E. Musso et G. Pelletier. *Synthèse des rapports INRS-Urbanisation et INRS-Eau sur les besoins des municipalités québécoises en réfection et construction d'infrastructures d'eaux*, INRS-Urbanisation et INRS-Eau, rapport de recherche n^o R517-b, 1998, 50 p., <<http://www.inrs-ete.quebec.ca/pub/r517b.pdf>> [consultation : 20 octobre 2009].

- Vincent, L.A. et É. Mekis. « Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century », *Atmosphere Ocean*, vol. 44, n° 2, 2006, p. 177-193.
- Visser, M.E. et C. Both. « Shifts in phenology due to global climate change : The need for a yardstick », *Proceedings of the Royal Society of London Series B – biological sciences*, vol. 272, 2005, p. 2561-2569, <<http://www.rug.nl/biologie/onderzoek/onderzoekgroepen/dieroecologie/publications/2Visser05.pdf>> [consultation : 4 septembre 2009].
- Wall, E., B. Smit et J. Wandel. *Canadian Agri-Food Sector Adaptation to Risks and Opportunities from Climate Change – position paper*, Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation 9C-CIARN – Agriculture, 2004, 68 p.
- Waller, B., E. Pichora et L. Marrett. « Deuxième enquête sur l'exposition au soleil : rapport de l'atelier », *Maladies chroniques au Canada*, vol. 20, n° 1, 2008, p. 43-46.
- Walther, G.-R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T.J. Beebee, J.-M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg et F. Bairlein. « Ecological response to recent climate change », *Nature*, vol. 416, 2002, p. 389-395.
- Warren, F., E. Barrow, R. Schwartz, J. Audrey, B. Mills et D. Riedel. *Impacts et adaptations liés aux changements climatiques : perspective canadienne*, Ressources naturelles Canada, 2004.
- Watson, R.T., J. Patz, D.J. Gubler, E.A. Parson et J.H. Vincent. « Environmental health implications of global climate change », *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 7, 2005, p. 834-843.
- Weber, M.G. et M.D. Flannigan. « Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate : Impact on fire regimes », *Environmental Reviews*, vol. 5, 1997, p. 145-166.
- Wietze L. et R.S.J. Tol. « Impact of climate on tourist demand », *Climatic Change*, vol. 55, n° 4, 2002, p. 429-449.
- Williamson, T., S. Colombo, P. Duinker, P. Gray, R. Hennessey, D. Houle, M. Johnston, A. Ogden et D. Spittlehouse. *Les changements climatiques et les forêts du Canada : des impacts à l'adaptation*, Réseau de gestion durable des forêts et Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, 2009, 112 p.
- Wotton, B.M. et M.D. Flannigan. « Length of the fire season in a changing climate », *The Forestry Chronicle*, vol. 69, 1993, p. 187-192.
- Wrona, F., T. Prowse, J. Reist, R. Beamish, J.J. Gibson, J. Hobbie, E. Jeppesen, J. King, A. Korhola, R. Macdonald, M. Power, V. Skvortsov, G. Keock, W. Vincent et L. Levesque. « Freshwater Arctic ecosystems », chap. 7 dans *Arctic Climate Impact Assessment*, Cambridge University Press, Londres, 2005, p. 353-452.
- Yagouti, A., G. Boulet, L.A. Vincent, L. Vescovi et É. Mekis. « Observed changes in daily temperature and precipitation indices for Southern Québec, 1960-2005 », *Atmosphere Ocean*, vol. 46, n° 2, 2008, p. 243-256.
- Zhang, X., L.A. Vincent, W.D. Hogg et A. Niitsoo. « Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century », *Atmosphere-Ocean*, vol. 38, n° 3, 2000, p. 395-429.
- Ziska, L.H. et E.W. Goins. « Elevated atmospheric carbon dioxide and weed populations in glyphosate treated soybean », *Crop Science*, vol. 46, 2006, p. 1354-1359.
- Ziska, L.H. et A.M. McClung. « Differential response of cultivated and weedy (red) rice to recent and projected increases in atmospheric carbon dioxide », *Agronomy Journal*, vol. 100, 2008, p. 1259-1263.

RÉFÉRENCES DU TABLEAU 8

- (1) Ministère des Transports du Québec. *Adapter les transports aux changements climatiques. Dégel du pergélisol*, Ministère des Transports du Québec, 2005.
- (2) Ouranos. *Le changement climatique au Québec nordique et ses enjeux*, journée technique tenue le 3 mai 2005 à Montréal, 2005.
- (3) Karstein, L. et Y. Domaas. *Évaluation des risques d'avalanche au Nunavik et sur la Côte-Nord du Québec*, Canada, Institut géotechnique de Norvège, rapport réalisé pour le Ministère de la Sécurité publique du Québec, 2000, 35 p.
- (4) Beaulac, I. et G. Doré. *Impacts du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptations – état des connaissances*, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, 2005, 141 p.
- (5) Allard, M., R. Fortier et O. Gagnon. *Problématique du développement du village de Salluit*, Nunavik, Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 2002, 121 p.
- (6) Beaulieu, J. et A. Rainville. « Adaptation to climate change : Genetic variation is both a short- and a long-term solution », *The Forestry Chronicle*, vol. 81, 2005, p. 704-709.
- (7) Environnement Canada, site Internet d'Environnement Canada, 1997, <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/fr/current/cc_fw_f.php> [consultation : 2 mai 2007].
- (8) Irvine, J. *Climate Change, Adaptation, and « Endangered » Salmon in Canada*, compte rendu de la conférence Species at Risk 2004 Pathways to Recovery, tenu du 2 au 6 mars 2004 à Victoria (Colombie-Britannique), 2004.
- (9) Développement Économique Canada. *Section Programme développement économique Canada-Régions du Québec*, Développement Économique Canada, 2007.
- (10) Ouranos. *Programme Environnement maritime*, Ouranos, 2007, <<http://www.ouranos.ca>> [consultation : 2 mai 2007].
- (11) Ouranos. *Changement climatique et usages de l'eau dans le bassin versant de la Châteauguay*, journée technique tenue à Montréal, 2007.
- (12) Mehdi, B., C. Mrena et A. Douglas. *S'adapter aux changements climatiques : une introduction à l'intention des municipalités canadiennes*, Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation (C-CIARN), 2005, 35 p.
- (13) Morneau, F., M. Michaud, F. Lecours, L. Côté et D. Roy. *Étude d'impact sur l'environnement : projets de protection des berges le long de la route 132 autour de la péninsule gaspésienne*, rapport principal, Ministère des Transports du Québec, 2001, 84 p.
- (14) Dubois, J.-M. M., P. Bernatchez, J.-D. Bouchard, B. Daigneault, D. Cayer et S. Dugas. *Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du St-Laurent pour la période de 1996 à 2003*, Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, rapport présenté au Comité interministériel sur l'érosion des berges de la Côte-Nord, 2006, 291 p. <http://www.crecotenord.qc.ca/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=97&Itemid=278> [consultation : 28 juillet 2009].
- (15) Bélanger, G., P. Rochette, Y. Castonguay, A. Bootsma, D. Mongrain et D.A.J. Ryan. « Climate change and winter survival of perennial forage crops in Eastern Canada », *Agronomy Journal*, vol. 94, 2002, p. 1120-1130.
- (16) Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Monitoring Drought on the Canadian Agricultural Landscape*, Prairie Agroclimate Unit/National Agroclimate Information Service, atelier agrométéorologique tenu les 9 et 10 décembre 2002 à Dorval (Québec), Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2002.
- (17) Smit, B. et E. Wall. *Adaptation to Climate Change Challenges and Opportunities : Implications and Recommendations for the Canadian Agri Food Sector*, Comité permanent du Sénat sur la foresterie et l'agriculture, Ottawa, 2003.
- (18) Cyr, J.-F. et R. Turcotte. *Bassin de la rivière Châteauguay : projet du CEHQ et Hydrotel*, atelier technique tenu à Montréal, 24 février 2005.
- (19) Lemmen, D.S. et F.J. Warren. « Agriculture », dans *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*, Gouvernement du Canada, 2004, p. 59-69.

- (20) Gameau, M., M.C. Breton, F. Guay, I. Fortier, M.F. Sottile et D. Chaumont. *Hausse des concentrations des particules organiques (pollens) causée par le changement climatique et ses conséquences sur les maladies respiratoires des populations vulnérables en milieu urbain*, Fonds d'aciton pour le changement climatique – sous-composante Impacts et Adaptation, projet A571, 2006, <http://www.ouranos.ca/media/publication/34_Rapport_Gameau_sante_2006.pdf> [consultation : 11 juin 2009].
- (21) *Heatwave Plan for England Reducing Harm from Protecting Health and Extreme Heat and Heatwaves*, National Health Service, 2005, 16 p.
- (22) ONERC. *Un climat à la dérive : comment s'adapter ?*, rapport présenté au Premier ministre et au Parlement, ONERC, 2005, <<http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/onerdocfrancaise.pdf>> [consultation : 2 mai 2007].
- (23) McBean, G. et D. Henstra. *Climate Change, Natural Hazards and Cities*, Institute for Catastrophic Loss Reduction Research, 2003, 16 p.
- (24) Kirshen, P., M. Ruth et W. Anderson. *Integrated Impacts of Climate Change on and Adaptation Strategies for Metropolitan Areas : A Case Study of Metropolitan Boston*, World Water & Environmental Resources Congress, 2005, *Impacts of Global Climate Change*, Anchorage, 2005.
- (25) Ducas, S. « Conférence sur le plan d'urbanisme de la Ville de Montréal », dans *les Journées annuelles de la santé publique*, 30 novembre 2004.
- (26) Ebi, K.L., T. J. Teisberg, L.S. Kalkstein, L. Robinson et R.F. Weiher. « Heat Watch/Warning Systems save lives – Estimated costs and benefits for Philadelphia 1995-98 », *Bulletin of American Meteorological Society*, vol. 85, 2004, p. 1067-1073.
- (27) Doyon, B., D. Bélanger et P. Gosselin. *Effets du climat sur la mortalité au Québec méridional de 1981 à 1999 et simulations pour des scénarios climatiques futurs*, Institut national de santé publique du Québec, 2006, 75 p. <<http://www.inspq.qc.ca/publications/default.asp?E=p&NumPublication=538>> [consultation : 11 juin 2009].
- (28) Giguère, M. et P. Gosselin. *Impacts des événements climatiques extrêmes sur la santé : examen des initiatives d'adaptation actuelles au Québec*, Institut national de santé publique, 2006, 27 p., <www.ouranos.ca/media/publication/41_Feuillet_INSPQ_Evenements20Extremes_Adaptations_Oct_2006.pdf> [consultation : 11 juin 2009].
- (29) Ministère de la Santé et des Services sociaux. *Quand il fait chaud pour mourir*, Ministère de la Santé et des Services sociaux, 2004, <<http://publications.msss.gouv.qc.ca/acrobat/f/documentation/2004/04-269-01.pdf>> [consultation : 2 mai 2007].
- (30) ONERC. *Collectivités locales et changement climatique : êtes-vous prêt ? Un guide pour l'adaptation à l'attention des collectivités locales*, ONERC, 2005, <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/guide_adaptation_2e_ed.pdf> [consultation : 2 mai 2007].
- (31) Gouvernement du Québec. *Loi provinciale sur la sécurité civile*, Gouvernement du Québec, <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S_2_3/S2_3.htm> [consultation : 2 mai 2007].
- (32) Revue des critères des projets de l'Agence d'efficacité énergétique, communication personnelle.
- (33) Réseau canadien de recherche sur les impacts des changements climatiques et l'adaptation,
- (34) Actes du colloque sur le changement climatique et la foresterie : impacts et adaptation, tenu les 20 et 21 avril 2005 à Baie-Comeau, 2005.
- (35) Bryant, C., B. Singh, P. Thomassin et L. Baker. *Vulnérabilités et adaptation aux changements climatiques au Québec au niveau de la ferme : leçons tirées de la gestion du risque et de l'adaptation à la variabilité climatique par les agriculteurs*, Ouranos, 2007, 49 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/149_Bryant1.pdf> [consultation : 24 avril 2009].
- (36) DesJarlais, C. *Guide pour décideurs sur l'adaptation aux changements climatiques*, projet Ouranos, sous presse. Voir également les outils d'évaluation économique par UKCIP, <<http://www.ukcip.org.uk/resources/tools/>> [consultation : 2 mai 2007].
- (37) Singh, B., C. Bryant, P. André et J.-P. Thouez. *Impact et adaptation aux changements climatiques pour les activités de ski et de golf et l'industrie touristique : le cas du Québec*, rapport final, projet Ouranos, 2006, <<http://www.ouranos.ca/fr/publications/resultats.php?q=singh&t=>>> [consultation : 1^{er} mai 2009].

- (38) Ministère des Transports du Québec. Présentation faite le 2 juin 2006 à Sept-Îles, Ministère des Transports du Québec, 2006.
- (39) Dore, M.H.I. et I. Burton. *The Costs of Adaptation to Climate Change in Canada : A Stratified Estimate by Sectors and Regions*, rapport préparé pour le Fonds d'action pour le changement climatique, Ressources naturelles Canada, 2001.
- (40) Milton, J., K.-H. Lam, S. Trentin et N. Jean-Grégoire. « Vers une réduction de la vulnérabilité des municipalités aux phénomènes atmosphériques extrêmes » dans *S'adapter aux changements climatiques au Canada en 2005 : comprendre les risques et renforcer nos capacités*, conférence du Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation (C-ClARN), tenu du 4 au 7 mai 2005 à Montréal, 2005.
- (41) Mailhot, A., G. Rivard, S. Duchesne et J.-P. Villeneuve. *Impacts et adaptation aux changements climatiques en matière de drainage urbain au Québec*, Institut national de recherche scientifique Eau, Terre et Environnement, 2007, 144 p., <http://www.ouranos.ca/media/publication/17_Rapport_Mailhot_infras_2007.pdf> [consultation : 11 mai 2009].
- (42) Fortin, L.G., R. Turcotte, S. Pugin, J.-F. Cyr et F. Picard. « Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des réservoirs Saint-François et Aylmer au Sud du Québec », *Revue canadienne de génie civil*, vol. 34, n° 8, 2007, p. 934-945.
- (43) Thuiller, W. « BIOMOD : Optimising predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change », *Global Change Biology*, vol. 9, 2003, p. 1353-1362.
- (44) Ouranos. *Biodiversité et changement climatique*, atelier de l'association canadienne-française pour l'avancement des sciences tenu le 13 mai 2005, Université McGill, Montréal, 2005.
- (45) Gerardin, V. et D.I. McKenney. *Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec*, Direction du patrimoine écologique et du développement durable, Ministère de l'Environnement, contribution du service de la cartographie écologique, 2001.
- (46) Klein, J.T., J. Aston, E.N. Buckley, M. Capobianco, N. Mizutani, R.J. Nicholls, P.D. Nunn et S. Ragoonaden. « Coastal-adaptation technologies », chap. 15 dans *Special Report on Technology Transfer*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, 2000.
- (47) Wrona, F., T. Prowse, J. Reist, R. Beamish, J.J. Gibson, J. Hobbie, E. Jeppesen, J. King, A. Korhola, R. Macdonald, M. Power, V. Skvortsov, G. Keock, W. Vincent et L. Levesque. « Freshwater Arctic ecosystems », chap. 7 dans *Arctic Climate Impact Assessment*, Cambridge University Press, Londres, 2005, p. 353-52.
- (48) Conseil régional des ressources en eau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. *Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent*, Conseil régional des ressources en eau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, 2005, <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/grandslacs/2005/Entente.pdf>> [consultation : 11 mai 2009].

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 : Moyennes des températures (haut) et des précipitations (bas) hivernales et estivales observées (1961-1990). D'après la banque de données du Service national d'information sur les terres et les eaux (SNITE) d'Agriculture et Agro-alimentaire Canada, qui se base sur les observations aux stations des archives d'Environnement Canada interpolées sur une grille d'une résolution de 10 km.	6
Figure 2 : Scénarios des températures (haut) et des précipitations (bas) hivernales et estivales (2041-2070). Les scénarios reposent sur les normales climatiques 1961-1990 des données du SNITE, sur lesquelles on applique le changement saisonnier moyen projeté (2041-2070 vs 1961-1990) par un ensemble de 17 simulations du Modèle régional canadien du climat (MRCC) (de Elía et Côté, 2009).	8
Figure 3 : Changement moyen (gauche) (2041-2070 vs 1961-1990) et écart-type des changements (droite) de l'équivalent en eau de la neige cumulée au sol en mars. Les changements sont estimés d'après un ensemble de 5 simulations du MRCC pilotées par 5 membres différents du modèle couplé climatique global (MCCG3) selon le scénario d'émissions de gaz à effet de serre A2 (SRES A2).	8
Figure 4 : Limite des régions décrites au tableau 1.	9
Figure 5 : Distributions hivernales (DJF) (haut) et estivales (JJA) (bas) des températures quotidiennes moyennes simulées en climat actuel (1971-2000) et projetées dans le futur (2041-2070) par un ensemble de 5 simulations MRCC4.2.3 pilotées par 5 différents membres de MCCG3 sur la base du scénario A2. Les zones hachurées représentent les 10 ^e et 90 ^e percentiles basés sur le climat actuel. \bar{X} et S réfèrent respectivement à la moyenne et à l'écart-type de la distribution.	10
Figure 6 : Scénarios d'évolution de la population totale du Québec jusqu'en 2056, en millions (ISQ, 2009a).	11
Figure 7 : Effectifs de la population selon les groupes d'âge, scénario A - Référence, Québec, 2006-2056, en millions (ISQ, 2009a).	12
Figure 8 : Impacts directs et indirects du climat, de sa variabilité et de ses extrêmes sur l'environnement naturel et bâti, les populations et les activités socioéconomiques.	18
Figure 9 : Part de certaines activités économiques sensibles au climat dans le produit intérieur brut (PIB), à partir du PIB aux prix de base du Québec, en 2007 (ISQ, 2009b).	19
Figure 10 : Le pergélisol (Allard et Seguin, 1987).	20
Figure 11 : Carte de la vulnérabilité et de la capacité d'accueil du terrain en ce qui a trait à la construction d'infrastructures : l'exemple de Salluit (Nunavik, Québec) (Solomon-Côté, 2004).	23
Figure 12 : Distribution géographique des tendances linéaires à court terme pour le niveau moyen de la mer, dans la période 1993-2003 (mm/an), sur la base des données altimétriques du satellite Topex-Poséidon (GIEC, 2007a).	24
Figure 13 : Carte de zonage du risque d'érosion et des mesures de gestion du littoral sur la Côte-Nord (Dubois <i>et al.</i> , 2006).	27
Figure 14 : Schéma de différentes catégories de mesures d'adaptation dans le cycle de vie d'une infrastructure (adapté de Larrivée et Simonet, 2007).	30
Figure 15 : a) Évolution des conditions du régime hydrologique à l'horizon 2050 ; b) Dispersion entre les différentes projections de l'évolution du régime hydrologique à l'horizon 2050 (Desrochers <i>et al.</i> , 2008).	31
Figure 16 : Hydrogrammes moyens reconstitués et futurs pour chacune des 90 simulations - bassins versants du Nord québécois (Roy <i>et al.</i> , 2008b).	32

Figure 17 : Analyse de sensibilité du bénéfice net prévu pour 2008 en fonction de différents risques (en millions de dollars) (Hydro-Québec, 2006).	33
Figure 18 : Distribution hivernale (DJF) des températures quotidiennes moyennes au sud du 48 ^e parallèle simulées en climat actuel (1971-2000) et projetées dans le futur (2041-2070) par un ensemble de 5 simulations MRCC4.2.3 pilotées par 5 différents membres de MCGG3 sur la base du scénario A2. Les zones hachurées représentent les 10 ^e et 90 ^e percentiles basés sur le climat actuel. X et S réfèrent respectivement à la moyenne et à l'écart-type de la distribution.	39
Figure 19 : Hydrogrammes moyens annuels simulés par les modèles hydrologiques HYDROTEL (en haut) et HSAMI (en bas) à l'exutoire de la rivière des Anglais. Les simulations ont été réalisées pour la période de référence 1961-1990 et les décennies 2040-2069 (Chaumont et Chartier, 2005).	42
Figure 20 : Débit du Saint-Laurent à Sorel, 1 ^{er} janvier 1932 au 1 ^{er} janvier 2007 (Morin et Bouchard, 2000 ; J.-F. Cantin, communication personnelle).	43
Figure 21 : Simulations du plan de gestion actuel des réservoirs Saint-François et Aylmer dans un contexte de changements climatiques à l'horizon 2050, selon les modèles et les scénarios ECHAM4 A2 et HadCM3 A2b. Les chiffres du tableau correspondent au nombre de jours sur 30 ans (1961-1990) pendant lesquels des contraintes du plan de gestion (pour des usages spécifiques) ne sont pas respectées. Ces contraintes sont des niveaux d'eau des réservoirs ou des débits en rivière (Fortin <i>et al.</i> , 2007).	45
Figure 22 : Zones et sous-zones de végétation au Québec. Le Québec est partagé en trois zones de végétation : la zone tempérée nordique, dominée par des peuplements feuillus et mélangés, la zone boréale, caractérisée par des peuplements de conifères sempervirents, et la zone arctique, marquée par une végétation arbustive et herbacée (MRNF, 2009b).	47
Figure 23 : Résultats des simulations des écarts de degrés-jours de croissance de la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000, à partir de deux simulations du modèle régional canadien (MRCC version 4.2.0) et du scénario SRES A2 (Music et Caya, 2007).	48
Figure 24 : Médiane des écarts de degrés-jours de croissance selon plusieurs modèles globaux (à gauche) et écarts-types associés (à droite), à partir de 70 simulations utilisant les scénarios SRES A1b, A2 et B1 (adapté de Logan <i>et al.</i> , en préparation).	49
Figure 25 : Résultats des simulations des précipitations pendant la saison de croissance, pour la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000, utilisant deux simulations du modèle régional canadien (MRCC version 4.2.0) et le scénario SRES A2 (Music et Caya, 2007).	49
Figure 26 : Résultats des simulations des précipitations pendant la saison de croissance, pour la période 2041-2070 par rapport à la période 1971-2000 (médiane à gauche et écarts-types à droite), à partir de 127 simulations utilisant plusieurs modèles globaux et les scénarios SRES A1b, A2 et B1 (adapté de Logan <i>et al.</i> , en préparation).	50
Figure 27 : L'évolution des rendements du maïs-grain tels qu'ils ont été rapportés par les agriculteurs dans leurs déclarations pour des indemnités, 1987-2001, pour les différentes régions agricoles du Québec (Bryant <i>et al.</i> , 2007).	54
Figure 28 : Inventaire des demandes d'intervention pour des glissements de terrain au Québec, entre 1972 et 2005 (carte fournie par le MTQ, communication personnelle). La zone en gris foncé montre les limites de l'invasion marine postglaciaire à dépôts argileux.	59
Figure 29 : Variation de la mortalité pendant l'été au Québec (villes et régions) selon divers scénarios (Doyon <i>et al.</i> , 2006).	64

Figure 30 : Image satellitaire des particules polluantes de monoxyde de carbone émises par des feux de forêt et de friche touchant le Midwest états-unien et les Prairies canadiennes, en juillet 2004. Le niveau de pollution augmente de bleu à vert, jaune et rouge (National Center for Atmospheric Research, NASA).	67
Figure 31 : Simulation de l'évolution de la présence de la maladie de Lyme au Québec, vers 2050 (Ogden, 2006).	70
Figure 32 : Prévalence de la climatisation au Québec de 1972 à 2005 (INSPQ, 2005b ; Bélanger <i>et al.</i> , 2006).	72
Figure 33 : Exemple de carte thématique provenant du système de surveillance en temps réel de l'Institut national de santé publique du Québec (Système intégré des données de vigie sanitaire-Virus du Nil occidental [SIDVS-VNO]). Elle montre où ont été faits divers traitements préventifs d'insecticides (zones foncées) contre les larves des moustiques vecteurs du virus du Nil occidental sur la rive sud de Montréal, en 2003 (Gosselin <i>et al.</i> , 2005).	75
Figure 34 : Carte des aires protégées au Québec. Le Québec comporte des aires protégées de juridiction fédérale, provinciale et municipale ainsi que des aires protégées à caractère privé. Le réseau d'aires protégées couvre environ 8 % du territoire (MDDEP, 2009c).	81
Tableau 1 : Changements saisonniers de températures et de précipitations pour 4 régions du Québec évalués à partir d'un ensemble de 126 simulations climatiques globales. Les changements sont calculés par rapport au climat de 1961-1990 ; les valeurs correspondent aux 25 ^e et 75 ^e quantiles des changements projetés. L'ensemble inclut 3 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (SRES A1B, A2 et B1), 20 modèles de climat globaux (MCGs) et plusieurs membres en combinaison MCG/SRES (Meehl <i>et al.</i> , 2007).	9
Tableau 2 : Produit intérieur brut aux prix de base, par activité économique, Québec, 2002-2007, en millions de dollars (ISQ, 2009b).	13
Tableau 3 : Instruments d'adaptation des ouvrages hydrauliques aux conditions hydroclimatiques en évolution (adapté de Roy <i>et al.</i> , 2008a).	34
Tableau 4 : Impact (%) des changements climatiques sur le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel (Lafrance et Desjarlais, 2006).	37
Tableau 5 : Économies potentielles (millions de dollars de 2003, sans taxe) (Lafrance et Desjarlais, 2006)	38
Tableau 6 : Superficie en culture et nombre de fermes au Québec, de 1931 à 2006 (Statistique Canada, 2007)	53
Tableau 7 : Changements en pourcentage de la durée de saison de ski, selon deux scénarios climatiques aux horizons 2020 et 2050, pour trois régions touristiques (tiré de Scott <i>et al.</i> , 2007).	61
Tableau 8 : Types de mesures d'adaptation aux changements climatiques.	87

GLOSSAIRE

Acclimatation

Processus d'adaptation d'une espèce à un nouveau climat.

Adaptation

Ajustement des systèmes naturels ou des systèmes humains aux stimuli climatiques et à leurs effets afin d'en atténuer les inconvénients ou d'en exploiter les avantages. On distingue l'adaptation spontanée, autonome, anticipée et planifiée.

Ajustement isostatique postglaciaire

Remontée des terres due à l'ajustement isostatique, à la suite de la fonte des glaces qui recouvraient le continent à la dernière ère glaciaire. Dans la vallée du Saint-Laurent, le taux de remontée est d'environ 2 mm/an.

Albédo

Mesure de la lumière réfléchiée par un objet. Les objets clairs ont un albédo élevé, et les objets sombres, un albédo plus faible.

Anoxie

Manque d'oxygène dissous d'un milieu aquatique ou d'un sédiment immergé (adjectif : anoxique).

Anthropique

Résultant des activités humaines ou produit par les êtres humains.

Barchois

Petit port situé derrière un banc de sable émergé.

Capacité d'adaptation

Ensemble des ressources humaines, technologiques, sociales et financières qui peuvent être mobilisées pour mettre en œuvre des mesures efficaces d'adaptation.

Communautés dépendantes des ressources naturelles

Se dit des communautés où l'exploitation des ressources naturelles représente une part modérément ou très importante de l'emploi et des revenus.

Cultivar

Variété d'une espèce végétale obtenue artificiellement et dont les caractères communs sont intéressants pour l'agriculture, la foresterie ou l'horticulture.

Degrés-jours de chauffage

Mesure de la différence entre la température moyenne d'un jour donné par rapport à une température de référence (de 15 °C à 18 °C) et qui exprime les besoins de chauffage.

Degrés-jours de climatisation

Mesure de la différence entre la température moyenne d'un jour donné par rapport à une température de référence (de 22 °C à 25 °C) et qui exprime les besoins de climatisation.

Degrés-jours de croissance

Mesure de la différence entre la température moyenne d'un jour donné par rapport à une température de référence minimale de croissance variant selon les plantes et qui exprime la quantité de chaleur disponible à la croissance.

Équivalent en eau de la neige (EEN)

Hauteur d'eau obtenue si une épaisseur de neige a complètement fondu, exprimée en millimètres sur une surface horizontale correspondante. Selon la densité de la neige, la quantité d'eau obtenue sera plus ou moins élevée. On utilise souvent un rapport de 10 cm de neige pour 10 mm d'eau ou 10:1, soit la densité d'une neige légère.

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 10^e ou 90^e percentiles.

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).

Hypolimnion

Couche thermique la plus profonde d'un lac ou d'une mer fermée, toujours froide et à température peu variable.

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.

Nunavik

Partie du territoire du Québec située au nord du 55^e parallèle.

Oscillation nord-atlantique (ONA)

Désigne un phénomène météorologique de l'Atlantique Nord (en anglais, North Atlantic Oscillation ou NAO est souvent utilisé dans la littérature). L'indice ONA mesure la différence de pression atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande.

Pergélisol

Tout sol ou toute roche dont la température se maintient sous 0 °C pendant au moins deux années consécutives.

Pessière

Forêt composée majoritairement d'épinettes.

Phénologie

Étude des variations, en fonction du climat, des phénomènes périodiques de la vie végétale et animale, comme la date de migration, le déclenchement du comportement reproductif, la mue, la date de floraison ou de chute foliaire (adjectif : phénologique).

Phyto-sanitaire

Relatif à la santé des végétaux.

Progradation

Avancée d'une construction sédimentaire (par exemple, plage) en raison d'un bilan positif de sédimentation dans lequel les sédiments se déposent en avant les uns des autres plutôt qu'au-dessus des autres.

Régularisation

Action d'aménager un cours d'eau en réduisant les écarts entre périodes de crues et d'étiages.

Réseau SILA

En inuktitut, *sila* signifie « le climat et tout l'environnement autour de nous ». Le réseau SILA désigne 75 stations météorologiques qui enregistrent à l'année des informations météorologiques telles que la température de l'air, la température à la surface du sol et dans le sol, l'humidité, la direction et la vitesse des vents ainsi que de certaines concentrations d'ozone et de mercure dans l'air, le rayonnement ultraviolet et la croissance des épinettes.

Risque

Combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement et des conséquences de cet événement (par exemple, la probabilité d'une forte pluie multipliée par l'ampleur des inondations associée à une telle pluie).

Saison de croissance

Période où les conditions de température, d'humidité et de luminosité sont adéquates pour la croissance de la forêt ou d'une culture donnée, celle-ci variant selon l'espèce ou le cultivar.

Scénario

Description de ce qui peut se produire fondée sur un ensemble cohérent d'hypothèses. On parle de scénarios climatiques pour désigner une évolution potentielle de l'ensemble des variables climatiques. On parle aussi de scénarios socioéconomiques pour décrire l'évolution de la société sur les plans démographiques économiques et sociaux.

Sensibilité

Degré auquel un système est touché, de façon favorable ou défavorable, par la variabilité du climat ou les changements climatiques.

Smog

Terme provenant de la contraction des mots anglais *smoke* (« fumée ») et *fog* (« brouillard »). Pollution étendue de l'atmosphère par des aérosols, due en partie à des phénomènes naturels et en partie aux activités humaines.

Squat

Surenfoncement dans l'eau d'un navire dû à la vitesse de déplacement.

Stress hydrique

Stress causé aux plantes ou aux animaux en raison d'un manque d'eau.

Thermokarst

Dépressions, affaissements de terrain dus aux vides laissés dans le sol par la fonte de la glace du pergélisol.

Tundra

Territoire nordique caractérisé par l'absence d'arbres et la présence d'arbustes, de lichens et de mousses.

Viabilité hivernale

Concerné l'ensemble des moyens mis en œuvre pour assurer la sécurité routière d'une route humide. Consiste à lutter contre les accumulations de neige, de verglas ou de givre afin de conserver le maximum d'adhérence aux véhicules circulant sur la chaussée.

Vulnérabilité

Mesure dans laquelle un système est sensible et incapable de faire face aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité et les événements extrêmes.

LISTE DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CDB	Convention sur la diversité biologique
CMI	Commission mixte internationale
FCM	Fédération canadienne des municipalités
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICU	Institut canadien des urbanistes
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
ISQ	Institut de la statistique du Québec
MAMROT	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire du Québec
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MCGs	Modèles de climat globaux
MCCG	Modèle couplé climatique global du CCmaC
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec
MFQ	Ministère des Finances du Québec
MRCC	Modèle régional canadien du climat
MRNF	Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec
MSP	Ministère de la Sécurité publique du Québec
MSSS	Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec
MTQ	Ministère des Transports du Québec
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PIB	Produit intérieur brut
SNITE	Service national d'information sur les terres et les eaux
SRES	Special Report on Emission Scenarios

Zone de garde
Zone de garde
Zone de garde
Zone de garde
Pour
positionnement
seulement



CONSORTIUM SUR LA CLIMATOLOGIE RÉGIONALE
ET L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

www.ouranos.ca

550, rue Sherbrooke Ouest, Tour Ouest, 19^e étage
Montréal (Québec) H3A 1B9, Canada
Tél. : (514) 282-6464 • Fax : (514) 282-7131