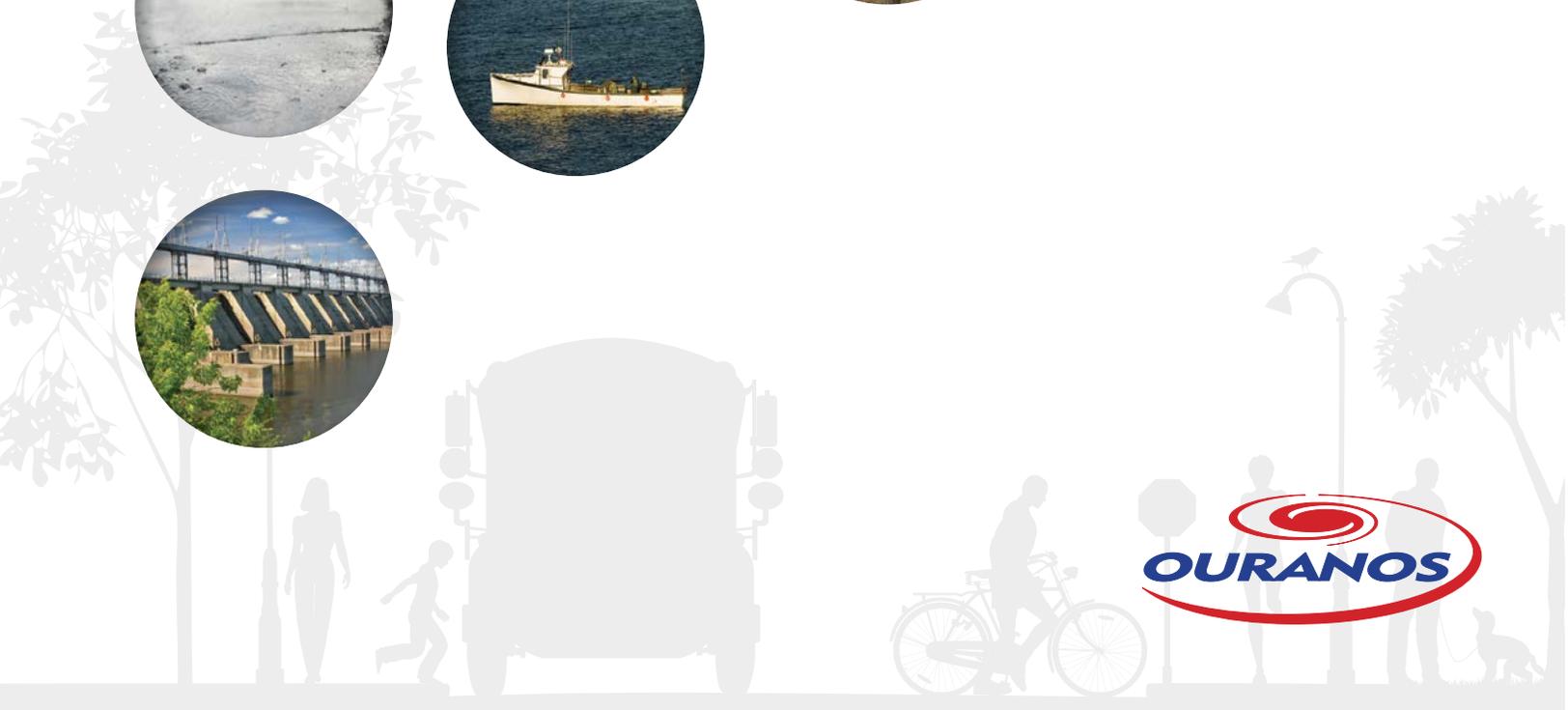
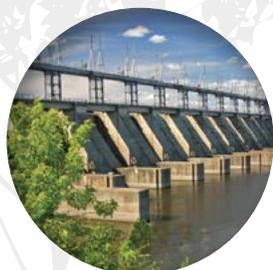


VERS L'ADAPTATION

Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec

Édition 2015



CRÉDITS ET REMERCIEMENTS

Coordination générale de la Synthèse : Liza Leclerc et Robert Siron (Ouranos)

Assistante du projet : Beatriz Osorio (Ouranos)

Responsables pour les sciences du climat : Hélène Côté et Travis Logan (Ouranos)

Révision générale : Marie-Josée Auclair (première ébauche) et Caroline Larrivée (version finale)

Révision linguistique : Anne Debrabandere, Jeanne St-Gelais et Diane Couture (Ouranos), Traduction MOT Translation

Info-graphisme : Chantal Pelletier (Pétal Communications) et Émélie Charette-Paquette

Développement et gestion du site web : Valérie Bourduas-Crouhen

Nous remercions les personnes suivantes pour la révision scientifique de certaines parties du document :

Gilles Bélanger (AAC), Jean-Pascal Bilodeau (UL), Sébastien Biner (Ouranos), Albéric Botella (U. Ottawa), Gaétan Bourgeois (AAC), Ross Brown (Environnement Canada-Ouranos), Christopher Bryant (UdM), Julie Boyer (MAPAQ), Diane Chaumont (Ouranos), Geneviève Cloutier (ESAD-UL), Laurent Da Silva (Ouranos), Ramón de Elía (Ouranos), Éric Girard (UQAM), Patrick Grenier (Ouranos), Gérard Goyette (MAPAQ), Catherine Guay (IREQ), Jean-Bernard Guidon (UQAM), Leticia Hernandez Diaz (UQAM), René Laprise (UQAM), Hervé Logé (Ville de Montréal), Alain Mailhot (INRS-ETE), Nathalie Martel (MDDELCC-Ouranos), Glenn Milne (U. Ottawa), Marc Mingelbier (MFFP), Biljana Music (Ouranos), Dominique Paquin (Ouranos), David Plummer (Environnement Canada), Simon Ricard (CEHQ), Jean-Pierre Revéret (UQAM), Gilles Rivard (Dessau), Philippe Roy (Ouranos), Julie Thériault (UQAM)

Nous remercions les personnes suivantes pour leurs commentaires lors de l'élaboration du document:

Laurène Autixier (École Polytechnique de Montréal), Daniel Bernier (UPA), Pierre Bernier (RNCAN), André Besner (Hydro-Québec), Frédéric Boivin (UQAM), Emmanuelle Bouchard-Bastien (INSPQ), Émilie Charbonneau (Ville de Montréal), Alain Cogliastro (IRBV), Steeve Côté (UL), Sabrina Courant (MDDELCC), Hélène Falardeau (MFFP), Nancy Giguère (Ville de Montréal), Julie Guicheteau (Ville de Montréal), David Huard (Ouranos), Marie Larocque (UQAM), Annick Maletto (Ville de Montréal), Pascal Marceau (MSP), Alain Olivier (UL), Jean Painchaud (MDDELCC), Alain Paquette (UQAM), Pedro Peres-Neto (UQAM), Guillaume Simonet (CDC Climat Recherche), Marie Raphoz (UQAM), David Rivest (ISFORT), Marie-Andrée Tougas-Tellier (UL), Benoît Vanier (Hydro-Québec)

Remerciements CMIP5

Nous sommes reconnaissants envers le groupe de travail sur les modèles couplés (GTMC) du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), qui est responsable de CMIP, et nous remercions les centres de modélisation climatique (figurant dans les Tableaux D.1 et D.2) pour la production et la mise à disposition de leurs sorties de modèle. Pour CMIP, le Programme de comparaison et de diagnostic des modèles climatiques du Département américain de l'Énergie a fourni le support de coordination et a mené le développement des infrastructures de logiciels en partenariat avec l'Organisation mondiale des portails pour la science du système Terre.

Citation suggérée : Ouranos (2015). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos. 415 p.

ISBN: 978-2-923292-18-2

2015

AUTEURS PAR CHAPITRES

Sommaire

Auteurs principaux : Liza Leclerc, Robert Siron, Travis Logan et Hélène Côté (Ouranos)

Portrait socioéconomique du Québec

Auteur principal : Claude Desjarlais (Ouranos)

Collaboratrice : Caroline Larrivée (Ouranos)

Partie 1. Évolution climatique du Québec

Auteurs principaux : Hélène Côté, Travis Logan et Isabelle Charron (Ouranos)

Collaborateurs : Marie-France Sottile (MDDELCC-Ouranos), Dominic Cyr (UQO)

Partie 2. Vulnérabilités, impacts et adaptation aux changements climatiques

Chapitre 1. La prospérité économique du Québec

Coordonné par Claude Desjarlais (Ouranos)

Foresterie

Auteur principal : Daniel Houle (Ouranos-MFFP)

Collaborateur : Mathieu Bélanger-Morin (Ouranos)

Agriculture

Auteure principale : Anne Blondlot (Ouranos)

Collaboratrice : Beatriz Osorio (Ouranos)

Pêches et aquaculture

Auteurs principaux : Robert Siron et Valérie Bourduas-Crouhen (Ouranos)

Énergie

Auteur principal : René Roy (Hydro-Québec-Ouranos)

Collaborateurs : Jacinthe Clavet-Gaumont, Élyse Fournier et Claude Desjarlais (Ouranos)

Tourisme et loisirs

Auteure principale : Kate Germain (Chaire de tourisme Transat ESG-UQAM)

Collaboratrice : Stéphanie Bleau (Chaire de tourisme Transat ESG-UQAM)

Chapitre 2. La santé des individus et des communautés

Auteurs principaux : Pierre Gosselin (INSPQ), Marie-Ève Levasseur (INSPQ) et Diane Bélanger (INRS-ETE)

Chapitre 3. La pérennité et la sécurité des bâtiments et des infrastructures

Auteure principale : Caroline Larrivée (Ouranos)

Collaborateurs : Stéphane O'Carroll, Jean-Pierre Savard (Ouranos)

Chapitre 4. La biodiversité et le maintien des services écologiques

Auteur principal : Robert Siron (Ouranos)

Collaborateurs : Dominique Berteaux (UQAR), Nathalie Bleau (Ouranos), Valérie Bourduas-Crouhen (Ouranos), Jean-Pierre Savard (Ouranos), Claude Villeneuve (UQAC)

Chapitre 5. Enjeux transversaux

Coordonné par Nathalie Bleau (Ouranos)

Gestion de l'eau

Auteurs principaux : Richard Turcotte (CEHQ), Jean-François Cyr (CEHQ) et Nicolas Audet (Ouranos)

Aménagement du territoire

Auteurs principaux : Nathalie Bleau et Robert Siron (Ouranos)

Collaborateurs : François Morneau (MSP- Ouranos)

Partie 3. Vers la mise en oeuvre de l'adaptation

Auteurs principaux : Liza Leclerc, Beatriz Osorio et Robert Siron (Ouranos)

Collaborateurs : Caroline Larrivée (Ouranos)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Selon les derniers rapports du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat « le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté ». Les changements climatiques se manifestent maintenant dans toutes les régions du monde, y compris au Canada et au Québec, mais de façons variées, à travers de multiples impacts et conséquences pour notre société.

Au Québec, la recherche que fait le consortium Ouranos contribue au développement des connaissances pour comprendre les changements climatiques régionaux auxquels nous faisons, et devront faire face. Ces connaissances sont fondamentales à notre compréhension du fonctionnement du climat et alimentent les scénarios d'impacts sur les divers secteurs de la société. De leur côté, les études sur la vulnérabilité des systèmes –naturels et humains– exposés aux changements climatiques fournissent les bases sur lesquelles nous pouvons développer des stratégies pour s'adapter aux changements climatiques et réduire leurs impacts. Dorénavant, la question de savoir si on doit s'investir dans l'adaptation aux changements climatiques ne se pose plus. Le moment est plutôt venu de trouver les moyens pour progresser de manière rapide et efficace vers l'adaptation.

La Partie 1 de ce document dresse un portrait de l'évolution climatique du Québec en s'appuyant sur les projections et les scénarios climatiques les plus récents, les tendances observées et projetées des températures et des précipitations, ainsi que de plusieurs autres variables climatiques (la neige, les vents, etc.) et phénomènes reliés au climat (sécheresses, feux de forêts, etc.) qui font l'objet d'intenses recherches pour répondre à un intérêt croissant des usagers. Les experts et lecteurs plus avertis y trouveront également plusieurs encadrés et annexes donnant des informations techniques sur les développements en cours dans ce domaine.

La Partie 2 présente les résultats les plus récents sur les impacts et les vulnérabilités aux changements climatiques. Ses chapitres s'articulent autour des quatre grands enjeux et orientations thématiques de la Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013–2020 : maintenir la santé des individus et des communautés, préserver la prospérité économique, renforcer la pérennité et la sécurité des bâtiments et des infrastructures, et conserver la biodiversité et les bénéfices offerts par les écosystèmes. Le dernier chapitre de cette partie est consacré à deux enjeux transversaux : la gestion de l'eau et l'aménagement du territoire.

La Partie 3 détaille les divers aspects du processus d'adaptation et identifie les besoins et les défis communs aux différents secteurs pour les aider dans leurs démarches d'adaptation. Les publications sur ce sujet de recherche émergent ont doublé depuis 2007, autant à l'échelle internationale qu'au Québec. Même si le besoin de s'adapter est maintenant bien reconnu, il y a encore peu d'exemples sur la mise en oeuvre concrète de l'adaptation, et encore moins d'études sur le succès des mesures mises en place. Pourtant plusieurs options d'adaptation existent mais il y a aussi des barrières à leur mise en oeuvre ; celles-ci sont identifiées dans cette partie, tout comme les occasions à saisir.

Cette synthèse des connaissances est le résultat d'un effort sans précédent de la part d'Ouranos qui a mobilisé l'ensemble de son réseau de partenaires pour rassembler des expertises dans tous les domaines concernés. Elle fait suite et met à jour le document précédent publié par Ouranos en 2010. L'emphase a donc été mise sur les nouvelles connaissances acquises depuis, grâce notamment aux recherches soutenues par le consortium, mais aussi à celles réalisées ailleurs, au Canada et dans le monde, et dont les résultats sont pertinents pour la mise en oeuvre de l'adaptation au Québec. L'objectif de ce document est d'apporter un ancrage scientifique et des pistes de réflexion aux experts et praticiens de l'adaptation pour qui les changements climatiques représentent un enjeu important dans leurs mandats et leurs activités. Ces connaissances sont le point de départ pour appuyer la prise de décisions en adaptation et agir afin de rendre le Québec plus résilient aux changements climatiques, actuels et futurs.

Bonne lecture !

Liza Leclerc et Robert Siron

Chargés de la coordination de la Synthèse d'Ouranos

SOMMAIRE

VERS L'ADAPTATION

Synthèse des connaissances sur les
changements climatiques au Québec

Édition 2015





SOMMAIRE

Le réchauffement du système climatique, mesuré sur toute la planète durant les dernières décennies, est sans équivoque. L'influence humaine dans l'émission de gaz à effet de serre (GES), responsables des changements climatiques est clairement établie. Au Québec, la société et l'environnement naturel sont adaptés au climat dans lequel nous vivons. Des changements rapides du climat comportent des risques pour le bien-être de la société et le développement durable si le Québec ne s'ajustait pas à cette nouvelle réalité. Le rapport complet inclut plus de 1 000 références et sa réalisation a impliqué près d'une centaine d'experts de tous les domaines concernés pour la coordination, la rédaction, la révision, la consultation et la collecte de données. Ce document est un sommaire du rapport complet disponible sur le site web d'Ouranos. Les numéros entre parenthèses renvoient aux chapitres et aux sections du rapport.

L'évolution du climat et ses impacts au Québec

1. La température : comment le réchauffement nous affecte-t-il?

Les conséquences de la hausse des températures sur l'économie et le bien-être des populations seront ressenties dans toutes les régions et dans tous les secteurs d'activités, par exemple :

- ▶ **Santé** : l'augmentation des températures contribue à rallonger la saison des pollens et des feux de forêt et occasionnera des problèmes respiratoires et cardiovasculaires. La hausse de la température aura aussi des impacts négatifs sur la mortalité et la morbidité, notamment en raison des îlots de chaleur urbains. (2.2)
- ▶ **Biodiversité** : sous l'effet du réchauffement, les aires de répartition de certaines d'espèces pourraient se déplacer vers le nord de 45 à 70 km par décennie. À la fin du siècle, le Québec devrait ainsi présenter des conditions climatiques favorables à l'arrivée de nombreuses nouvelles espèces, tandis que certaines espèces indigènes n'auront probablement pas la capacité de suivre le rythme accéléré des changements climatiques. (2.4)
- ▶ **Foresterie et Agriculture** : l'allongement de la saison de croissance causé par le réchauffement des températures pourrait augmenter la productivité des forêts (2.1.1) et des cultures (2.1.2). Toutefois, en forêt, ces gains pourraient être annulés lorsque les arbres seront acclimatés aux nouvelles concentrations de CO₂, ou encore limités par le manque d'éléments nutritifs dans le sol et par leur assèchement. Dans le cas de l'agriculture, le risque d'établissement de nouveaux ennemis des cultures (insectes ravageurs, mauvaises herbes et maladies) serait amplifié avec les changements climatiques, de même que la pression exercée par certains ennemis déjà présents au Québec et qui pourraient étendre leur territoire. (2.1.2)
- ▶ **Espèces envahissantes et nuisibles** : les conditions climatiques futures vont être favorables à la prolifération de ces espèces. Ce sont des organismes qui ont le potentiel de nuire aux espèces indigènes, de modifier la structure des écosystèmes (2.4), mais aussi d'affecter l'exploitation forestière (2.1.1) et l'agriculture (2.1.2). Plusieurs cas sont bien documentés au Québec, notamment celui des plantes envahissantes – comme la renouée japonaise et le roseau envahisseur – et celui des espèces vectrices de la maladie de Lyme, déjà en progression rapide dans le Sud du Québec (2.2 et 2.4). Des espèces introduites dans les écosystèmes aquatiques pourraient aussi affecter l'habitat du poisson et l'aquaculture (2.1.3).
- ▶ **Énergie** : une augmentation des températures en hiver aura pour conséquence une baisse de la demande en énergie pour le chauffage, qui ne sera compensée que partiellement en été par une augmentation de la demande pour la climatisation. Globalement, la demande en énergie dans l'ensemble des secteurs (résidentiel, industriel, commercial et institutionnel) serait réduite selon le scénario médian à l'horizon 2050 de 2,7 % par rapport à ce qu'elle serait sans changement climatique. (2.1.4)

Les températures (1.2) On observe des tendances à la hausse d'environ 1 à 3 degrés des températures moyennes annuelles sur une période de 62 ans (1950-2011). On s'attend à ce que cette tendance se poursuive de façon à ce que les températures annuelles se réchauffent d'environ 2 à 4 degrés pour la période 2041-2070 et de 4 à 7 degrés pour la période 2071-2100. Selon le scénario de fortes émissions, ce réchauffement pourrait atteindre jusqu'à près de 15 degrés en hiver dans le Nord québécois vers la fin du siècle.

On projette de fortes augmentations pour la température maximale de la journée la plus chaude de l'année. Selon la région, les résultats montrent des augmentations médianes de l'ordre de 3 à 5 degrés pour un scénario d'émissions modérées et de 4 à 7 degrés pour un scénario de fortes émissions. On projette également de fortes augmentations dans la durée des vagues de chaleur, ainsi que la fréquence de nuits plus chaudes. Les projections climatiques indiquent également un fort réchauffement pour la température minimale de la journée la plus froide de l'année.

2. Les précipitations : quelles sont les conséquences des variations des précipitations sur la population?

Les précipitations (1.3) Dans le Sud du Québec, les données historiques de la période 1950-2010 indiquent des tendances à la hausse pour les pluies printanières et automnales. C'est aussi le cas pour certaines stations en été. La tendance à la baisse des précipitations sous forme de neige est significative pour plusieurs stations du Sud du Québec. La quantité maximale de précipitations lors d'un épisode de 5 jours consécutifs montre une tendance significative à la hausse pendant l'automne, augmentant les risques d'inondations.

Les changements projetés des précipitations varient selon les saisons et les régions. Par contre, partout au Québec, les modèles climatiques s'entendent sur des hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations, ainsi que sur des augmentations estivales et automnales pour le Nord et le Centre. Les plages de valeurs de changements attendues pour le Sud et le golfe du Saint-Laurent en été et en automne varient entre de faibles diminutions et de faibles augmentations.

Toutes les régions du Québec peuvent s'attendre à des augmentations de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les durées et pour toutes les périodes de retour. Les périodes de retour des maximums annuels du cumul quotidien de précipitations seraient raccourcies de façon significative. En effet, un maximum annuel dont la période de retour est de 20 ans sur l'horizon 1986-2005 pourrait avoir une période de retour autour de 7 à 10 ans vers 2046-2065, et ce, pour l'ensemble du Québec. On s'attend à des hausses significatives pour tous les indices de précipitations abondantes et extrêmes dans toutes les régions du Québec. Les augmentations seront généralement plus substantielles dans le Nord que dans le Sud.

- ▶ **Environnement bâti** : en milieu urbain, des pluies fréquentes et plus intenses provoquent des inondations localisées et des épisodes de surverses, une tendance appelée à s'accroître avec les changements climatiques. La gestion des eaux de pluie passe par un portfolio de mesures qui permet de les gérer de manière plus efficace : des mesures de contrôle à la source, le recours aux réseaux mineur (infrastructures en souterrain) et majeur (routes, parcs) et des bassins de rétention en aval des réseaux. (2.3)
- ▶ **Gestion de l'eau** : les changements climatiques auront des effets sur les sources d'eau souterraines et de surface tant sur le plan de la disponibilité que de la qualité (2.5.1). La protection des sources d'eau et des écosystèmes naturels, comme les milieux humides (2.4), et une meilleure gestion de la demande, comme des mesures de conservation d'eau (2.5.1), sont des options d'adaptation « sans regret ».

Le régime hydrique : les débits (1.7) On s'attend à une augmentation des débits hivernaux moyens des rivières pour l'ensemble du Québec pour l'horizon 2041-2070. Le consensus est élevé (supérieur à 90 %) parmi l'ensemble de projections hydrologiques utilisées.

Dans le Nord du Québec, on anticipe des augmentations des débits moyens des rivières au printemps et en automne pour le même horizon (consensus modéré). Dans le Sud du Québec, pour la plupart des rivières, on peut s'attendre à une baisse des débits moyens en été, au printemps et en automne (consensus modéré).

► Gestion de l'eau :

- Le changement dans la fréquence des événements de précipitations ou de crues intenses, l'augmentation de la sévérité des étiages et l'augmentation de la température de l'eau risquent d'avoir une incidence négative sur la qualité de l'eau (2.5.1) et sur l'habitat du poisson. (2.1.3)
- Il est très probable que les débits d'étiage soient plus sévères et plus longs à l'horizon 2050. (2.5.1)
- Il reste plusieurs améliorations à apporter aux projections avant de pouvoir évaluer, avec un niveau de confiance élevé, l'impact des changements climatiques sur les crues les plus fortes. La connaissance de l'impact des changements climatiques sur la recharge et l'évolution des nappes d'eau souterraine est à développer. (2.5.1)
- **Énergie** : à l'horizon 2050, des augmentations (très probables) des débits moyens de l'ordre de 12 % sont anticipées dans la portion Nord du Québec, alors que pour le Sud, les augmentations (probables) sont de l'ordre de 5%. (2.1.4)
- **Foresterie** : l'assèchement des sols dans les écosystèmes forestiers d'érablière, de sapinière et de pessière diminuera de 20-40 % pendant l'été en 2041-2070 alors que la température des sols augmentera de 3-4°C. Cela pourrait potentiellement réduire le rendement forestier. (2.1.1)

Les sécheresses (1.9.1) Pour le Sud du Québec, les observations montrent une légère tendance à la baisse des indices de sécheresses météorologiques (épisodes de jours consécutifs sans précipitation).

À l'horizon 2081-2100, on projette une réduction du maximum du nombre de jours consécutifs sans précipitation à l'échelle annuelle et hivernale, mais un allongement de la durée de ces épisodes pour la saison estivale.

Les projections d'anomalies d'humidité du sol montrent des conditions plus sèches annuellement et surtout pour la saison estivale pour 2081-2100.

3. La mer : quels risques posent l'augmentation du niveau de la mer, la diminution des glaces marines et l'acidification des océans pour le Québec?

La hausse du niveau de la mer (1.9.3) Dans le golfe du Saint-Laurent, la projection médiane de l'ensemble du GIEC, basée sur le scénario de fortes émissions de GES, laisse entrevoir une hausse du niveau relatif de la mer de 30 à 75 cm. Les dernières projections du GIEC indiquent une baisse du niveau relatif de la mer de 0,3 à 1,5 m selon les scénarios d'émissions de GES fortes et modérées le long des côtes du détroit et de la baie d'Hudson.

Les glaces marines (1.8)

On s'attend à ce que vers 2041-2070, la période, pendant laquelle la baie d'Hudson est libre de glace, s'allonge de plus de deux mois. Pour le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, on projette un englacement plus tardif de l'ordre de 10 à 20 jours tandis que la fonte des glaces pourrait être devancée de 20 à 30 jours pour 2041-2070 par rapport à la période 1982-2011. De plus, la concentration de glace maximale annuelle est appelée à diminuer de 67% dans cette région. L'océan Arctique sera essentiellement sans glace en septembre avant 2050 selon le scénario de fortes émissions.

- ▶ **Zones côtières** : la diminution de l'englacement le long des côtes expose davantage le littoral aux événements extrêmes comme les vagues de tempêtes et favorise l'érosion côtière, avec des risques accrus pour les bâtiments et les infrastructures. (2.3)
- ▶ **Biodiversité** : dans le golfe du Saint-Laurent, les écosystèmes côtiers à pente faible sont maintenant menacés directement par la submersion et l'érosion marines dues aux changements climatiques. Or, ces écosystèmes littoraux jouent un rôle important dans la dynamique de la zone côtière et fournissent des services écologiques essentiels pour le développement durable des régions maritimes. (2.4)
- ▶ **Environnement bâti** : l'érosion du littoral en milieu marin est une problématique majeure pour les régions de la Côte-Nord, du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine. Au cours des dernières décennies, elle a suscité des déboursés considérables qui ont servi à des déplacements de routes et à la construction d'ouvrages de protection. (2.3 et 2.5.2)
- ▶ **Pêches et aquaculture** : certains mollusques et crustacés économiquement importants au Québec sont sensibles à l'acidification des océans, qui est due à l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'eau. (2.1.3)

4. Les événements météorologiques extrêmes : affecteront-ils notre mode de vie?

Foudre, verglas, orages et tempêtes. *L'état actuel des connaissances sur la foudre et le verglas ne permet pas encore d'effectuer des projections pour ces phénomènes. En ce qui a trait aux orages, quelques études préliminaires laissent entrevoir une hausse de leur fréquence et de leur intensité au fur et à mesure que l'on s'approche de l'année 2100 sans toutefois pouvoir établir un niveau de confiance dans ces projections (1.3.3). Il n'est pas encore possible d'établir si la fréquence et l'intensité des cyclones post-tropicaux (« restes d'ouragan »), qui causent des épisodes de temps sévères (pluies torrentielles, vents violents, fortes vagues et surcotes) au Québec, changeront dans les prochaines décennies (1.6). Il est toutefois possible d'affirmer que les cyclones post-tropicaux apporteront de plus grandes quantités de précipitations et que ceux qui atteindront le golfe du Saint-Laurent frapperont des régions côtières ayant subi une hausse du niveau de la mer, augmentant ainsi les risques d'érosion et de submersion. L'analyse des systèmes dépressionnaires (1.6.2) n'a pas permis de détecter de tendance significative pour la période 1951-2010.*

- ▶ **Agriculture** : l'accentuation de la fréquence et de l'intensité des conditions climatiques extrêmes serait dommageable pour les cultures, les élevages et la qualité de l'eau de surface. (2.1.2)
- ▶ **Pêches et aquaculture** : les aléas climatiques comme les tempêtes, les vents violents ou le verglas représentent une menace pour les équipements de pêche et les installations portuaires et aquacoles. (2.1.3)
- ▶ **Énergie** : la fréquence et l'intensité de certains événements climatiques extrêmes pourraient avoir des conséquences importantes pour les infrastructures de transport et de distribution d'électricité exposées à ces aléas. (2.1.4)
- ▶ **Santé** : l'adaptation aux événements météorologiques extrêmes reste encore un défi important pour réduire les impacts sur la santé des populations, en termes de connaissances des risques, de préparation aux urgences, de prévention et d'aménagement urbain, tant pour les organisations que pour les individus et les ménages. (2.2)
- ▶ **Aménagement du territoire** : les problématiques associées aux événements météorologiques extrêmes sont en croissance au Québec et au Canada. L'aléa inondation constitue le principal risque naturel au Québec et engendre des déboursés importants en indemnités entre autres, pour le gouvernement. Les sinistres associés aux crues sont en augmentation et surviennent maintenant en toutes saisons, alors que par le passé, les inondations au Québec concernaient essentiellement les crues printanières, le plus souvent associées aux débâcles. (2.5.2)

5. Effets en cascade et risques cumulatifs des changements climatiques

- ▶ **Pêches et aquaculture** : les changements climatiques modifient les propriétés physico-chimiques de l'eau et la qualité de l'habitat du poisson. Ils ont également des impacts directs sur la physiologie, la phénologie et la répartition des espèces aquatiques. On anticipe donc des conséquences sur la dynamique des populations et la composition des communautés ichthyologiques et ultimement sur la productivité des pêches (tant récréative que commerciale) et de l'aquaculture. (2.1.3)
- ▶ **Dans l'écosystème fluvial du Saint-Laurent**, l'augmentation des températures, les bas niveaux d'eau et l'expansion de certaines plantes envahissantes, en particulier le roseau envahisseur, vont causer la perte d'habitats riverains de qualité pour la faune et entraîneront des pertes significatives de frayères, notamment dans le Lac Saint-Pierre (2.4), ce qui pourrait se répercuter sur les populations de poissons et sur les activités de pêches. (2.1.3)
- ▶ **Dans l'estuaire d'eau douce**, plusieurs facteurs écologiques, géomorphologiques, météorologiques et hydrodynamiques, sous l'influence directe des changements climatiques, pourraient intervenir de manière simultanée sur l'érosion des hauts marais et ainsi mettre en péril certaines plantes menacées ou vulnérables pour lesquelles il s'agit d'un habitat essentiel. (2.4)
- ▶ **Dans le Nord du Québec**, la dégradation du pergélisol et le tassement du sol qui en résulte, les modifications du couvert de glace de même que les changements du régime de tempêtes affectent les bâtiments ainsi que les infrastructures industrielles et de transport. Une cartographie caractérisant les zones à risque dans les villages nordiques aide à mieux planifier leur développement (2.3). Les changements climatiques affecteront davantage les populations autochtones, notamment en raison des difficultés grandissantes d'accès au territoire (dégel du pergélisol et modification des chemins hivernaux) et à leur nourriture traditionnelle. (2.3 et 2.4)
- ▶ **Les écosystèmes nordiques** sont très vulnérables aux changements climatiques et ils en subissent déjà les effets : L'augmentation des températures et la modification dans le régime des précipitations et du cycle gel-dégel ont un impact cumulatif sur le comportement des espèces, leur cycle biologique et l'utilisation de leurs habitats; c'est le cas notamment du caribou migrateur et des salmonidés. Or, ces espèces et bien d'autres fournissent de nombreux services écologiques sur lesquels reposent entièrement le mode de vie traditionnel et la culture des populations autochtones. (2.4)
- ▶ **En zone boréale**, les changements climatiques vont aussi avoir des impacts sur l'écosystème forestier puisque des changements dans les températures, les précipitations et les concentrations en CO₂ influencent directement la croissance des arbres et la composition spécifique de la forêt boréale (2.1.1). Ces impacts vont se rajouter aux modifications dans le régime des feux et aux épidémies d'insectes et de maladies anticipées avec les changements climatiques, qui ont donc le potentiel d'influencer la gravité, la fréquence et l'étendue de ces perturbations sur les activités forestières. (2.1.1)
- ▶ **Aménagement du territoire** : compte tenu des effets attendus des changements climatiques sur les précipitations et les crues (2.5.1), et en raison du développement urbain dans des zones sensibles aux glissements de terrain, les pertes et dommages consécutifs à des glissements de terrain sont susceptibles de s'accroître. (2.5.2)
- ▶ **Tourisme et loisirs** : très peu d'informations existent actuellement au sujet des impacts des changements climatiques et leurs conséquences pour les PME touristiques du Québec, en dépit des effets en cascade qu'on peut anticiper sur cette industrie. Selon les projections pour 2020, les régions des Cantons de l'Est et des Laurentides profiteront de gains économiques estivaux tandis que l'on anticipe des pertes pour les activités hivernales. Toutefois, en l'absence de mesures d'adaptation, les gains estivaux risqueraient de ne pas être suffisants pour compenser les pertes hivernales dans ces deux régions. (2.1.5)



Un Québec plus résilient :

Vers la mise en œuvre de l'adaptation aux changements climatiques

Cette partie s'appuie sur de nombreux exemples tirés des travaux de recherche récents (informations sectorielles décrites dans la partie précédente) pour faire une analyse transversale et intégrée des solutions et des options d'adaptation qui rendront le Québec moins vulnérable aux changements climatiques .

Les impacts des changements climatiques viennent s'ajouter aux vulnérabilités environnementales, sociales et économiques existantes de la société.

- ▶ **Environnement bâti** : la méconnaissance de l'état des infrastructures de même que les pratiques de gestion et d'entretien parfois défailtantes apparaissent comme des sources de vulnérabilités importantes pour les infrastructures. (2.3)
- ▶ **Aménagement du territoire** : en milieu urbanisé, la vulnérabilité est liée à l'interdépendance complexe de ses infrastructures et à la densité de sa population. L'analyse de cette vulnérabilité est essentielle pour déceler les secteurs à risque. (2.3 et 2.5.2)

Le Québec possède déjà une quantité importante d'outils pour supporter la mise en œuvre de l'adaptation. Cette capacité s'appuie sur plusieurs éléments, incluant des études fondamentales, l'identification des stratégies d'adaptation pour divers enjeux et secteurs d'activité, des outils de communication, ainsi que des plans d'adaptation gouvernementaux aux niveaux municipal, provincial et fédéral.

De la science à l'action : globalement, il y a eu beaucoup d'évaluations portant sur la vulnérabilité, les impacts et l'adaptation aux changements climatiques, mais celles-ci n'ont pas nécessairement conduit à la mise en œuvre de l'adaptation. Les chercheurs travaillent actuellement à comprendre les barrières à l'adaptation et la transition de la science à l'action. C'est pourquoi le rôle des organisations « frontières » comme Ouranos est de plus en plus valorisé internationalement. (3.1)

Les solutions d'adaptation peuvent prendre une multitude de formes (3.3). Les plus souvent identifiées sont les solutions qui entraînent des modifications dans les propriétés physiques ou la structure d'un système, avec l'objectif d'augmenter sa résilience. L'adaptation physique et structurelle fait appel à l'ingénierie, aux technologies ainsi qu'à des approches basées sur les écosystèmes.

Les options d'ingénierie et technologiques demeurent importantes, mais le développement des solutions d'adaptation, qui offrent de la flexibilité pour répondre aux différents types de risques est essentiel et fait maintenant partie des nouvelles pistes de recherche. Associé à cette approche, l'apprentissage continu, qui inclut les systèmes de suivi et d'évaluation du progrès (3.4.5), permet d'assurer une adaptation continue.

L'adaptation physique et structurelle (3.3.1)

Exemples d'options d'ingénierie :

Secteurs ⁽¹⁾	Mesures d'adaptation
Foresterie (2.1.1.3)	Modification des infrastructures forestières (p.ex. augmenter la taille des ponceaux pour s'adapter à l'augmentation des précipitations)
Agriculture (2.1.2.3)	Conception d'ouvrages hydroagricoles et de structures d'entreposage du fumier et des lisiers selon des critères qui tiennent compte des changements climatiques
Énergie (2.1.4.2)	Modification de la dimension des canaux d'amenée d'eau ou des conduites
	Augmentation de la capacité des évacuateurs de crue
Bâtiments et infrastructures (2.3)	Modification de la géométrie et de la conception des chaussées pour faire face à l'augmentation des précipitations
	Construction d'ouvrages de protection rigides (p.ex. murs, enrochements, déflecteurs de vagues) pour contrer la hausse du niveau de la mer et l'érosion côtière
	Recharge des plages en sable pour contrer l'érosion côtière
	Implantation de systèmes de gestion des eaux pluviales
	Utilisation de matériaux réfléchissants (à fort albédo) sur les infrastructures urbaines (toits, parois murales, pavés)
	Favoriser l'architecture bioclimatique (construction d'infrastructures dites intelligentes)
Ressources en eau (2.5.1.2)	Utilisation de thermosiphons pour maintenir le pergélisol gelé dans les régions nordiques
	Mise à niveau des infrastructures de gestion de l'eau (p.ex. redimensionnement des ouvrages, relocalisation des prises d'eau, mécanisation des vannes) pour intégrer divers scénarios de changements climatiques

Exemples d'options technologiques :

Secteurs ⁽¹⁾	Mesures d'adaptation
Foresterie (2.1.1.3)	Modification de la machinerie forestière (p.ex. en équipant la machinerie avec des pneus à portance élevée quand le sol n'est pas suffisamment gelé)
Agriculture (2.1.2.3)	Installation de systèmes de ventilation dans les bâtiments d'élevage ou autres technologies (brumisation) pour faire face aux périodes de chaleur intense
	Micro-irrigation (système d'irrigation de précision, systèmes d'irrigation goutte à goutte)
	Développement de variétés végétales/cultivars/hybrides adaptées aux nouvelles conditions climatiques
Pêches et aquaculture (2.1.3.4)	Suivi en temps réel et d'autres technologies qui contribuent à accroître le rendement de l'agriculture irriguée
	Élevage de nouvelles espèces adaptées aux nouvelles conditions climatiques
Énergie (2.1.4.2)	Modification des caractéristiques des composantes électriques (générateurs, transformateurs, lignes de transport, etc)
Tourisme (2.1.5.4)	Utilisation de systèmes de distribution hydrique efficaces (brumisation automatique sur les terrains de golf)
	Production de neige artificielle
Bâtiments et infrastructures (2.3.2.3)	Application de traitements (chaux, ciment, émulsions) sur les sols et les matériaux des chaussées pour les rendre moins sensibles à l'eau
Biodiversité et services écologiques (2.4.2.2)	Introduction de technologies de communication (GPS, téléphones satellites) et de nouveaux moyens de transport dans les activités de chasse et de pêche assurant la subsistance des communautés autochtones
	Utilisation d'outils géomatiques pour cartographier les milieux humides en appui à la prise de décision, à l'évaluation diagnostique et à l'intervention locale
Aménagement du territoire (2.5.2.1)	Utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) pour mieux cerner les vulnérabilités climatiques (p.ex. : élaboration de cartes de risque)
Tous les secteurs	Utilisation des technologies de l'information pour développer des systèmes d'alerte précoce et de prévisions météorologiques spécifiques, p. ex. en santé (vagues de chaleur), dans la gestion des ressources en eau (crues, étiages) ou en agriculture (sécheresses)

L'adaptation basée sur les écosystèmes « a recours à la biodiversité et aux services écosystémiques dans le cadre d'une stratégie d'adaptation globale, aux fins d'aider les populations à s'adapter aux effets négatifs des changements climatiques » selon le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique. Une prise de conscience croissante pour l'adaptation basée sur les écosystèmes s'observe au Québec, comme partout dans le monde. Il est parfois difficile de différencier l'adaptation basée sur les écosystèmes (3.3.1.3) des mesures d'adaptation visant la conservation et la gestion de la biodiversité, comme p. ex. la planification de corridors écologiques ou d'un réseau d'aires protégées (2.4.2.4 et 2.5.2.2). L'adaptation basée sur les écosystèmes s'articule autour de la mise en place de « mesures vertes » ou « d'infrastructures vertes » qui visent d'autres objectifs que la stricte conservation, comme p. ex. la réduction des îlots de chaleur ou la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Les deux approches sont très complémentaires et, dans les deux cas, le principe sous-jacent d'utiliser les services écologiques pour l'adaptation multisectorielle vient renforcer l'importance de protéger notre capital naturel (2.4).

Exemples d'options basées sur les écosystèmes :

Secteurs ⁽¹⁾	Mesures d'adaptation	Co-bénéfices
Foresterie (2.1.1.3) Aménagement du territoire en milieu naturel (2.5.2.2)	Aménagement forestier écosystémique (AFÉ) Mise en place d'aires protégées multi-catégories combinant des aires de conservation stricte et des aires polyvalentes pour une exploitation durable des ressources naturelles	Gestion durable des ressources forestières; Conservation de grands écosystèmes; Maintien de la connectivité des paysages; Maintien des services écologiques
Agriculture (2.1.2.3)	Établissement ou préservation de bandes riveraines le long des cours d'eau en zones agricoles	Protection des habitats; Maintien de la qualité de l'eau; Création de refuges thermiques pour les poissons en rivières
Santé (2.2.2.1)	Plantation d'arbres à grand déploiement	Protection de la population contre les rayons UV; Création d'ombrage; Lutte contre les îlots de chaleurs urbains
Santé (2.2.2.1) Aménagement du territoire en milieu urbain (2.5.2.1)	Aménagement d'infrastructures vertes dans les villes (parcs, ruelles vertes, toits verts, murs végétaux, systèmes végétalisés)	Santé et bien-être de la population; Lutte contre les îlots de chaleur urbains; Gestion des eaux pluviales
Gestion de l'eau (2.5.1.1) Biodiversité et services écologiques (2.4.2)	Régulation du débit des cours d'eau en fonction des espaces de liberté Évaluations écologique et économique des milieux humides	Protection des habitats riverains; Conservation des milieux humides; Maintien d'habitats de qualité pour la flore et la faune; Maintien de la qualité et de la quantité d'eau

Finalement, les options d'adaptation basées sur les écosystèmes offrent des co-bénéfices à la population et à la société en général qui vont bien au-delà de l'adaptation aux changements climatiques, ou de la stricte conservation de la biodiversité, ce qui rend donc ces options particulièrement attrayantes dans le contexte du développement durable.

Les leviers institutionnels (3.3.2)

L'adaptation aux changements climatiques doit également s'appuyer sur d'autres avenues et outils comme les leviers institutionnels. Plusieurs de ces outils ont été développés ou étudiés au Québec: plans d'adaptation gouvernementaux provinciaux et municipaux ; guides et normes traitant de l'adaptation ; outils économiques et financiers (assurances, taxes et subventions). Dans plusieurs cas, l'intégration des mesures d'adaptation et de réductions des gaz à effet de serre est visée pour atteindre plusieurs objectifs à la fois.

- ▶ **Santé** : une forte convergence existe entre plusieurs adaptations en milieu urbain qui visent la lutte contre les effets de la chaleur intense. Ainsi, le verdissement urbain, la promotion du transport actif, la gestion des précipitations localement sur les terrains et la lutte contre la pollution atmosphérique améliorent la santé physique et mentale de la population, alors que ces mesures contribuent simultanément à la réduction des GES. Leur intégration dans les réglementations municipales et fiscales ou dans la pratique quotidienne doit encore se renforcer pour être efficace. (2.2)
- ▶ **Environnement bâti** : une analyse des normes et standards tend à montrer qu'ils demeurent des outils très efficaces pour promouvoir et mettre en œuvre des pratiques robustes face aux changements climatiques, mais le défi est d'appliquer ces normes et ces standards dans un contexte de risque évolutif. (2.3)
- ▶ **Tourisme** : la diversification des activités avec une programmation étendue sur les quatre saisons, plutôt que concentrée en été et en hiver, est une mesure d'adaptation souvent employée par l'industrie touristique (2.1.5).

Le savoir et l'information (3.3.3)

Selon le contexte d'utilisation et le public-cible, cette information peut prendre différentes formes : information spécialisée pour soutenir la prise de décision en adaptation; connaissances hybrides combinant les savoirs scientifique et traditionnel; éducation et sensibilisation pour changer les comportements. Produire davantage d'informations de meilleure qualité ne garantit pas pour autant leur utilisation. Au Canada et ailleurs, un grand nombre d'outils pour appuyer l'adaptation aux changements climatiques ont été développés dans les dernières années, mais la façon dont ils ont été appliqués par les usagers ciblés reste encore peu documentée.

Les savoirs locaux et traditionnels peuvent apporter des éclaircissements sur les variables climatiques et compléter les données scientifiques, en appui à la mise en œuvre des systèmes de surveillance et de prédiction environnementaux ainsi que pour formuler des mesures d'adaptation appropriées, surtout quand la rareté de certaines données constitue un frein au processus d'adaptation. (3.3.3.2)

Le niveau des connaissances sur les changements climatiques des professionnels, des entreprises et des communautés québécoises est diversifié et inégal. Des efforts sont encore nécessaires pour sensibiliser les secteurs publics et privés. La sensibilisation contribue à augmenter la capacité d'adaptation. (3.3.3.3)

Les barrières à l'adaptation (3.4.1) et l'adaptation transformationnelle (3.4.2)

En général, les barrières (ou obstacles) à l'adaptation peuvent être classées dans les catégories suivantes : technologiques, physiques, biologiques, économiques, financières, sociales, culturelles, institutionnelles et de gouvernance. Au Québec, quelques études montrent que les barrières généralisables à l'adaptation seraient liées à l'accès aux informations pertinentes et à leur communication, au manque de compétences, à des difficultés dans la gouvernance et à la perception des gens d'avoir une capacité d'adaptation élevée. Des barrières propres aux différents secteurs existent aussi.

Le rôle du secteur privé n'est pas bien saisi dans la recherche, mais il est important pour la mise en œuvre de l'adaptation. La réponse à un besoin à court terme et le sentiment d'indépendance climatique constituent des freins à l'intégration de l'adaptation dans la gestion des entreprises et également sur le plan individuel (3.4.1).

De leur côté les limites sont des obstacles absolus, c'est-à-dire des seuils au-dessus desquels l'état d'un système ne peut pas être soutenu, ce qui mène à une perte irréversible ou à un changement radical pour s'adapter aux nouvelles conditions (3.4.1). L'adaptation transformationnelle permet justement d'y faire face dans des contextes précis. Au Québec, les études abordent rarement les options transformationnelles (3.4.2).

La maladaptation (3.4.3) et la gestion adaptative (3.4.4)

Cinq dimensions de la maladaptation ont été identifiées : l'augmentation des émissions de GES, les coûts d'opportunité élevés, l'augmentation de l'iniquité, les actions qui diminuent la motivation à s'adapter et les schémas de développement qui limitent les capacités d'adaptation futures.

Il est important d'examiner les liens entre les divers secteurs pour éviter la maladaptation trans-sectorielle et le transfert de la vulnérabilité. De plus, il ne faut pas oublier que les objectifs et les valeurs varient d'une institution à l'autre, d'un groupe à l'autre et d'un secteur à l'autre. Par conséquent, il est nécessaire de trouver les compromis entre les divers acteurs, ce qui peut représenter un défi pour les gestionnaires de l'adaptation.

► **Environnement bâti et aménagement du territoire** : alors que la conception des bâtiments et des infrastructures, mais aussi tous les aspects d'opération, d'entretien, de gestion et de réhabilitation, sont et seront affectés par les changements climatiques, l'interdépendance entre les infrastructures rend plus complexe les enjeux associés aux changements climatiques. (2.3 et 2.5.2)

Finalement, l'adoption de la gestion adaptative, une approche plus souple et itérative, dans la mise en place des stratégies d'adaptation favorisera les ajustements et permettra de répondre de manière plus appropriée aux besoins et aux objectifs des parties prenantes au fur et à mesure que la situation évoluera. En outre, la gestion adaptative permet d'intégrer de nouvelles informations ou de nouveaux scénarios lorsque ceux-ci deviennent disponibles. Il est important de noter qu'une gamme de mesures de différents types sera souvent nécessaire pour renforcer la résilience.

► **Énergie** : il est important de considérer les avantages d'adapter le mode de gestion et/ou de conception des centrales et réservoirs hydroélectriques à l'évolution des régimes hydrologiques. Par ex., tant les mesures non structurelles (adaptation des règles de gestion) que structurelles (ajout de turbines ou redimensionnement d'équipements) pourraient permettre de tirer avantage des conditions hydroclimatiques à venir. (2.1.4)

Les possibilités créées par les changements climatiques (3.4.6)

S'adapter implique aussi de tirer profit des opportunités liées aux effets positifs des changements climatiques. Le secteur agricole, par exemple, pourrait bénéficier d'un accroissement des rendements de certaines cultures grâce à l'allongement de la saison de croissance et à l'augmentation des unités thermiques (2.1.2). Des gains potentiels en richesse spécifique sont aussi attendus en raison du déplacement nordique des aires de répartition de plusieurs espèces de flore et de faune (2.4). Dans le secteur forestier, l'augmentation anticipée de l'activité des feux pourrait améliorer la productivité des forêts là où la croissance des arbres est actuellement limitée par l'épaisseur de la matière organique (2.1.1).

Toutefois, les études récentes montrent que même si les changements climatiques pourraient être à l'origine d'opportunités économiques pour les secteurs agricole et forestier au Québec, ils viennent aussi accroître certains risques sans qu'il soit possible d'affirmer, à ce jour si le bilan économique sera globalement positif ou négatif pour ces deux secteurs importants au Québec (2.1.1, 2.1.2). Quant à l'augmentation de la richesse spécifique, celle-ci inclut aussi l'arrivée d'espèces envahissantes ou nuisibles qui s'accompagnera de conséquences négatives sur la flore et la faune indigènes (2.4). Par ailleurs, la performance des réseaux routiers est elle aussi fortement influencée par les facteurs climatiques qui comptent pour environ 50% des dommages. Le bilan net des effets pour les infrastructures routières dans la partie sud du Québec n'est toutefois pas clair car les changements climatiques auront à la fois des effets positifs et négatifs qui affecteront différemment les coûts de construction et la durée de vie des infrastructures (2.3).

Finalement, c'est le secteur de l'énergie et de la production hydro-électrique qui pourrait bénéficier le plus des opportunités créées par les changements climatiques au Québec, puisque la baisse anticipée de la demande en énergie pour le chauffage ne sera que partiellement compensée par la demande énergétique pour les besoins en climatisation durant été. (2.1.4)

Conclusion

Les connaissances scientifiques au Québec ont beaucoup évolué depuis la dernière synthèse d'Ouranos publiée en 2010. Les études sur l'adaptation aux changements climatiques sont en forte croissance et elles permettent d'appuyer les efforts de toutes les parties prenantes pour réduire les vulnérabilités et de prendre des décisions d'adaptation fondées sur les connaissances les plus à jour. Les informations disponibles indiquent que le Québec possède une forte capacité d'adaptation, car il peut s'appuyer sur beaucoup d'expertises et un niveau technologique élevé pour pouvoir s'adapter au climat actuel ainsi qu'aux conditions climatiques projetées pour les décennies à venir. En revanche, les défis potentiels en matière d'adaptation à plus long terme demeurent entiers et devront être abordés dans les futures recherches en impacts et adaptation. Parallèlement aux progrès scientifiques, une adaptation planifiée et proactive, s'appuyant sur une approche de gestion adaptative, aiderait grandement le Québec à relever tous ces défis et à faire face efficacement aux changements climatiques et à leurs conséquences dans tous les domaines et secteurs de la société.

PARTIE 1

Évolution climatique au Québec

VERS L'ADAPTATION

Synthèse des connaissances sur les
changements climatiques au Québec

Édition 2015



TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	III
Liste des tableaux	V
Liste des encadrés	VI

1.1 Introduction 1

1.1.1	<i>Les concepts clés de la modélisation climatique</i>	1
1.1.2	<i>Les modèles climatiques</i>	2
1.1.3	<i>Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre</i>	3
1.1.4	<i>Une nouvelle génération de simulations climatiques</i>	4
1.1.5	<i>Les incertitudes</i>	6

1.2 Les températures 7

1.2.1	<i>Les observations</i>	7
1.2.2	<i>Les projections et les scénarios climatiques</i>	9
1.2.3	<i>Les divers indicateurs thermiques</i>	13

1.3 Les précipitations 16

1.3.1	<i>Les observations</i>	16
1.3.1.1	<i>Les normales et la variabilité interannuelle observées</i>	17
1.3.1.2	<i>Les tendances historiques observées</i>	17
1.3.2	<i>Les projections et les scénarios climatiques</i>	22
1.3.3	<i>Les processus et les phénomènes liés aux précipitations</i>	26
1.3.3.1	<i>Les orages, les tornades et la foudre</i>	26
1.3.3.2	<i>Le verglas</i>	27

1.4 La neige 29

1.4.1	<i>L'équivalent en eau de la neige</i>	30
1.4.1.1	<i>Les observations</i>	30
1.4.1.2	<i>Les projections et les scénarios climatiques</i>	31
1.4.2	<i>La durée de l'enneigement</i>	33

1.5 Les nuages 35

1.5.1	<i>Les observations</i>	35
1.5.2	<i>Les projections et les scénarios climatiques</i>	36
1.5.3	<i>Les processus et les phénomènes liés aux nuages : les rayons UV</i>	37

1.6 La circulation atmosphérique : vents, dépressions et tempêtes **38**

1.6.1	<i>Les vents</i>	38
	1.6.1.1 <i>Les observations</i>	39
	1.6.1.2 <i>Les projections et les scénarios climatiques</i>	39
1.6.2	<i>Les dépressions et les tempêtes</i>	40
1.6.3	<i>Les ouragans</i>	43

1.7 Le régime hydrique : les débits de rivières **45**

1.8 Les glaces marines **48**

1.8.1.	<i>Les observations</i>	48
1.8.2	<i>Les projections et les scénarios climatiques</i>	51

1.9 Les phénomènes liés au climat **54**

1.9.1	<i>Les sécheresses</i>	54
	1.9.1.1 <i>Les observations</i>	54
	1.9.1.2 <i>Les projections et les scénarios climatiques</i>	55
1.9.2	<i>Les feux de forêt</i>	57
	1.9.2.1 <i>Les observations</i>	57
	1.9.2.2 <i>Les projections et les scénarios climatiques</i>	58
1.9.3	<i>La hausse du niveau de la mer</i>	58
1.9.4	<i>La salinité de la mer</i>	62
1.9.5	<i>La qualité de l'air</i>	63
	1.9.5.1 <i>Les observations</i>	64
	1.9.5.2 <i>Les projections futures</i>	64
	<i>Le rôle des émissions</i>	65
	<i>Le rôle du changement climatique physique</i>	65

1.10 Conclusion **66**

Références **70**

Annexe A Scénarios climatiques - Cartographie

Annexe B Scénarios climatiques - Évolution des anomalies (1900-2100)

Annexe C Tendances observées 1950-2011

Annexe D Simulations globales CMIP5

LISTE DES FIGURES

- Figure 1-1** Les quatre régions de référence utilisées dans ce document synthèse. **2**
- Figure 1-2** Changement moyen de température simulé avec l'ensemble des scénarios de GES SRES A2 (avec la génération de modèles globaux CMIP3) et les RCP (avec la génération de modèles CMIP5) de 1900 à 2100, par rapport au climat moyen actuel (1986-2005). Notez que le RCP2.6 n'a pas d'équivalent SRES. **4**
- Figure 1-3** Changements moyens relatifs pour a) les températures en °C et b) les précipitations totales en %, pour les saisons de décembre, janvier, février (DJF) et de juin, juillet, août (JJA), simulés par les ensembles CMIP5 (RCP 8.5) et CMIP3 (SRES A2) Les changements pour les deux horizons futurs, 2016-2035 et 2081-2100, sont calculés par rapport au climat moyen de 1986-2005. **5**
- Figure 1-4** Tendances des températures moyennes annuelles pour la période 1950-2011 pour les Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées d'Environnement Canada (DCCA; Vincent et al., 2012). Les triangles vers le haut (rouge) et vers le bas (violet) indiquent, respectivement, des tendances à la hausse et à la baisse. Les triangles pleins correspondent aux tendances significatives ($\alpha = 0,05$). Les tendances et les niveaux de signification statistique sont calculés selon la méthodologie de Vincent et al. (2012). **8**
- Figure 1-5** Températures moyennes annuelles observées pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projetées (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données CRU TS 3.21. Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 29 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (RCP8.5). **9**
- Figure 1-6** Évolution des anomalies de températures moyennes annuelles observées (1950-2012) et simulées (1900-2100), pour la période historique (gris) et selon les RCP4.5 (bleu; n = 33) et RCP8.5 (rouge; n = 29). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne 1971-2000 et sont présentées pour les quatre sous-régions du Québec a) Sud b) Centre c) golfe et d) Nord. **11**
- Figure 1-7** Précipitations totales annuelles observées pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projetées (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données CRU TS 3.21. Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 29 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (RCP8.5). **16**
- Figure 1-8** Évolution des anomalies (%) des précipitations totales annuelles observées (1950-2012) et simulées (1900-2100), pour la période historique (gris) et selon les RCP4.5 (bleu; n = 33) et RCP8.5 (rouge; n = 29). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne 1971-2000 et sont présentées pour les quatre sous-régions du Québec a) Sud b) Centre c) golfe et d) Nord. **19**
- Figure 1-9** Tendances observées des précipitations annuelles totales pour la période 1950-2011 pour les Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées d'Environnement Canada (DCCA; Mekis et Vincent (2011). Les triangles vers le haut (bleu) et vers le bas (brun) indiquent respectivement des tendances à la hausse et à la baisse. Les triangles pleins correspondent aux tendances significatives ($\alpha = 0,05$). Les tendances et les niveaux de signification statistique sont calculés selon la méthodologie de Mekis et Vincent (2011). **20**
- Figure 1-10** Maximum de l'équivalent en eau de la neige entre février et mai observé pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projeté (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données interpolées d'Hydro-Québec (Tapsoba et al., 2005). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 22 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (RCP8.5). **31**
- Figure 1-11** Durée de l'enneigement observée pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projetée (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données IMS 24 (National Ice Center, 2008). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 19 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (RCP8.5). **34**
- Figure 1-12** Changement projeté des débits moyens saisonniers sur l'horizon 2041-2070 par rapport à 1971-2000. La colonne de gauche présente le changement médian d'après les scénarios hydroclimatiques (cQ)². La colonne de droite fournit le pourcentage de scénarios qui indiquent une hausse des débits moyens. Les résultats sont présentés pour le régime a) hivernal, b) printanier, c) estival et d) automnal. **46**

Figure 1-13 (a) Plots of decadal averages of daily sea ice extent in the Arctic (1979 to 1988 in red, 1989 to 1998 in blue, 1999 to 2008 in gold) and a 4-year average daily ice extent from 2009 to 2012 in black. Maps indicate ice concentration trends (1979–2012) in (b) winter, (c) spring, (d) summer and (e) autumn (updated from Comiso, 2010). **49**

Figure 1-14 Ice extent in the Arctic from 1870 to 2011. (a) Annual ice extent and (b) seasonal ice extent using averages of mid-month values derived from in situ and other sources including observations from the Danish meteorological stations from 1870 to 1978 (updated from Walsh et Chapman (2001)). Ice extent from a joint Hadley and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) project (called HADISST1_Ice) from 1900 to 2011 is also shown. The yearly and seasonal averages for the period from 1979 to 2011 are shown as derived from Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) and Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) passive microwave data using the Bootstrap Algorithm (SBA) and National Aeronautics and Space Administration (NASA) Team Algorithm, Version 1 (NT1), using procedures described in Comiso et Nishio (2008), and Cavalieri et al. (1984), respectively; and from Advanced Microwave Scanning Radiometer, Version 2 (AMSR2) using algorithms called AMSR Bootstrap Algorithm (ABA) and NASA Team Algorithm, Version 2 (NT2), described in Comiso et Nishio (2008) and Markus et Cavalieri (2000). In (b), data from the different seasons are shown in different colours to illustrate variation between seasons, with SBA data from the procedure in Comiso et Nishio (2008) shown in black. **50**

Figure 1-15 Réduction du couvert de glace (% par décennie) pour la période 1968-2010 dans l'Arctique canadien. Seulement les tendances statistiquement significatives ($\alpha = 0,05$) sont montrées (adapté de Tapsoba et al., 2005). **50**

Figure 1-16 Changes in sea ice extent as simulated by CMIP5 models over the second half of the 20th century and the whole 21st century under RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 for (a) Northern Hemisphere February, (b) Northern Hemisphere September, (c) Southern Hemisphere February and (d) Southern Hemisphere September. The solid curves show the multi-model means and the shading denotes the 5 to 95% range of the ensemble. The vertical line marks the end of CMIP5 historical climate change simulations. One ensemble member per model is taken into account in the analysis. Sea ice extent is defined as the total ocean area where sea ice concentration exceeds 15% and is calculated on the original model grids. Changes are relative to the reference period 1986–2005. The number of models available for each RCP is given in the legend. Also plotted (solid green curves) are the satellite data of Comiso et Nishio (2008, updated 2012) over 1979–2012. **52**

Figure 1-17 Changement relatif de l'épaisseur de glace hivernale (janvier à avril) projeté entre les périodes futures (2041-2070) et référence (1961-1990). **53**

Figure 1-18 Changements projetés du contenu en eau pour les trois sites de l'étude (Houle et al., 2012) : érable à sucre (BVC), sapin baumier (BVL) et épinette noire (BVT). Les changements (exprimés en ratio des valeurs futures sur valeurs présentes) sont projetés pour les couches d'humus et de l'horizon B, pour les horizons 2050 (2041-2070) et 2080 (2071-2100) par rapport à la période 1971-2000. La ligne rouge représente les changements projetés utilisant un scénario produit avec le Modèle régional canadien du climat (MRCC 4.2.3). L'enveloppe grise donne un intervalle d'incertitude construit à partir de cinq simulations globales de CMIP3 sélectionnées de manière à bien couvrir l'ensemble CMIP3 au complet. **56**

Figure 1-19 Contribution au changement du niveau relatif de la mer (a) due à la variation de l'ajustement isostatique (m) entre la moyenne de la période 1985-2006 et celle de la période 2081-2100 calculée en moyennant la variation obtenue du modèle ANU (Lambeck et al., 1998) et celle du modèle ICE-5G (Peltier, 2004). En (b) l'écart-type entre les modèles. Les valeurs négatives (positives) indiquent une baisse (hausse) du niveau relatif de la mer causée par le mouvement ascendant (descendant) correspondant de la croûte terrestre. **60**

Figure 1-20 Hausse du niveau relatif de la mer obtenue par la différence entre les moyennes des périodes 2081-2100 et 1985-2006. Les cartes représentent la valeur médiane de l'ensemble des projections du GIEC basées sur le scénario de GES RCP8.5 (a) et RCP4.5 (b). Le calcul du niveau relatif de la mer inclut les contributions des glaciers, des calottes glaciaires (bilan de masse en surface et dynamique), du stockage terrestre, de l'expansion thermique, de l'effet de baromètre inverse et de l'ajustement isostatique. Les détails méthodologiques relatifs à ce calcul sont décrits à la section Church et al. (2013b) **61**

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1-1** Caractéristiques des scénarios RCP. **3**
- Tableau 1-2** Sommaire des valeurs observées 1971-2000 (CRU 3.21 TS) et changements relatifs projetés des températures moyennes pour les quatre régions d'intérêt pour l'horizon 2020 (2011 à 2040), l'horizon 2050 (2041 à 2070) et l'horizon 2080 (2071 à 2100). Les changements sont présentés pour les saisons : annuel (ANN); décembre, janvier, février (DJF); mars, avril, mai (MAM); juin, juillet, août (JJA); et septembre, octobre, novembre (SON). L'intervalle dans les Δ indique les 10^e et 90^e percentiles des simulations climatiques (n = 33 RCP 4.5; n = 29 RCP 8.5 de CMIP5). **10**
- Tableau 1-3** Résumé des tendances observées et des projections climatiques de divers indices thermiques d'intérêt pour le Québec. **14**
- Tableau 1-4** Sommaire des valeurs observées 1971-2000 (CRU 3.21 TS) et changements relatifs projetés des précipitations totales pour les quatre régions d'intérêt pour l'horizon 2020 (2011 à 2040), l'horizon 2050 (2041 à 2070) et l'horizon 2080 (2071 à 2100). Les changements sont présentés pour les saisons : annuel (ANN); décembre, janvier, février (DJF); mars, avril, mai (MAM); juin, juillet, août (JJA); et septembre, octobre, novembre (SON). L'intervalle dans les Δ indique les 10^e et 90^e percentiles des simulations climatiques (n = 33 RCP 4.5; n = 29 RCP 8.5 de CMIP5). **18**
- Tableau 1-5** Tendances historiques pour divers indices de précipitations abondantes ou extrêmes pour la période 1950-2010. Adapté des résultats de Donat et al. (2013) qui ne sont pas disponibles pour le Nord du Québec et la moitié nord de la région du Centre du Québec. L'indice R95p est calculé à partir des mêmes données, mais par Hartmann et al. (2013). **21**
- Tableau 1-6** Projections climatiques de l'ensemble des simulations CMIP5 pour des indices de précipitations totales de même qu'abondantes et extrêmes colligées à partir des figures 12,13 (Sillmann et al., 2013a) et S4 (Sillmann et al., 2013b) de pour la période 2081-2100 par rapport à 1981-2000. Tous les résultats présentés dans le tableau sont significatifs à un degré de 5%. **25**
- Tableau 1-7** Sommaire des connaissances du portrait climatique du Québec **67**

LISTE DES ENCADRÉS

Encadré 1-1 <i>D'où viennent les dépressions qui affectent le Québec?</i>	42
Encadré 1-2 <i>Le frasil</i>	45
Encadré 1-3 <i>Les projections hydrologiques (cQ)2</i>	47
Encadré 1-4 <i>Qu'entend-on au juste par niveau de la mer?</i>	59



1.1 Introduction

Auteurs : Isabelle Charron (Ouranos) et Travis Logan (Ouranos)

Révisseurs : Diane Chaumont (Ouranos), Ramón de Elía (Ouranos), Patrick Grenier (Ouranos) et Philippe Roy (Ouranos)

Le réchauffement du système climatique mesuré sur toute la planète durant les dernières décennies est sans équivoque, et l'influence humaine dans l'émission de gaz à effet de serre (GES) est clairement établie (Collins *et al.*, 2013). Par contre, les changements, ainsi que les répercussions de ces changements, ne seront pas uniformes sur le globe. Ce chapitre vise à présenter une synthèse de l'évolution du climat passé et des principaux changements attendus au cours des prochaines décennies, particulièrement pour le Québec.

L'environnement naturel du Québec est, entre autres, caractérisé par l'immensité du territoire. D'une superficie de 1 667 441 km², le Québec s'étend sur environ 2 000 km du sud au nord et sur environ 1 500 km d'est en ouest. De plus, le relief du territoire peut atteindre 1 652 m d'altitude (mont D'Iberville), créant ainsi différents climats. En raison de cette grande étendue, le Québec regroupe plusieurs zones climatiques et écosystèmes distincts. On note, entre autres, que l'extrême nord est caractérisé par la toundra et par le pergélisol. Plus au sud, la forêt boréale domine, abritant une faune diversifiée. Sur les basses terres du Saint-Laurent, la forêt mixte, un mélange de conifères et de feuillus, présente une importante biodiversité végétale et animale. Le Québec possède une grande façade maritime sur le golfe du Saint-Laurent, ainsi que sur les baies James, d'Hudson et d'Ungava. Enfin, près d'un tiers du territoire fait partie du bassin versant du fleuve Saint-Laurent.

Afin de tenir compte de cette importante diversité, lorsque les résultats le permettent, le portrait climatique qui suit est divisé en quatre régions de référence (figure 1-1). Ces régions permettent de mieux dresser un bilan des changements attendus et d'y associer des résultats d'études de vulnérabilité, d'impacts et d'adaptation liées à différents secteurs économiques. Le portrait présente un grand nombre de variables, d'indices et de phénomènes climatiques d'intérêt comme la température et indices dérivés (p.ex. degrés-jours de croissance), les précipitations, le couvert de neige, les glaces marines, les nuages, la circulation atmosphérique ainsi que la sécheresse et d'autres phénomènes liés au climat. Le portrait détaille, autant que possible, les tendances passées ainsi que les projections de ces variables par région et par saison.

1.1.1 Les concepts clés de la modélisation climatique

Afin de mieux comprendre les détails de ce portrait climatique, une brève introduction de plusieurs concepts clés de la modélisation climatique est présentée. Ces informations proviennent en grande partie d'un récent guide pour décideurs sur les scénarios climatiques (Charron, 2014) produit par Ouranos. Pour les lecteurs désirant davantage d'information, cet outil fournit des explications, plus détaillées que celles présentées ici, sur l'utilisation des scénarios climatiques ainsi que sur la modélisation climatique.

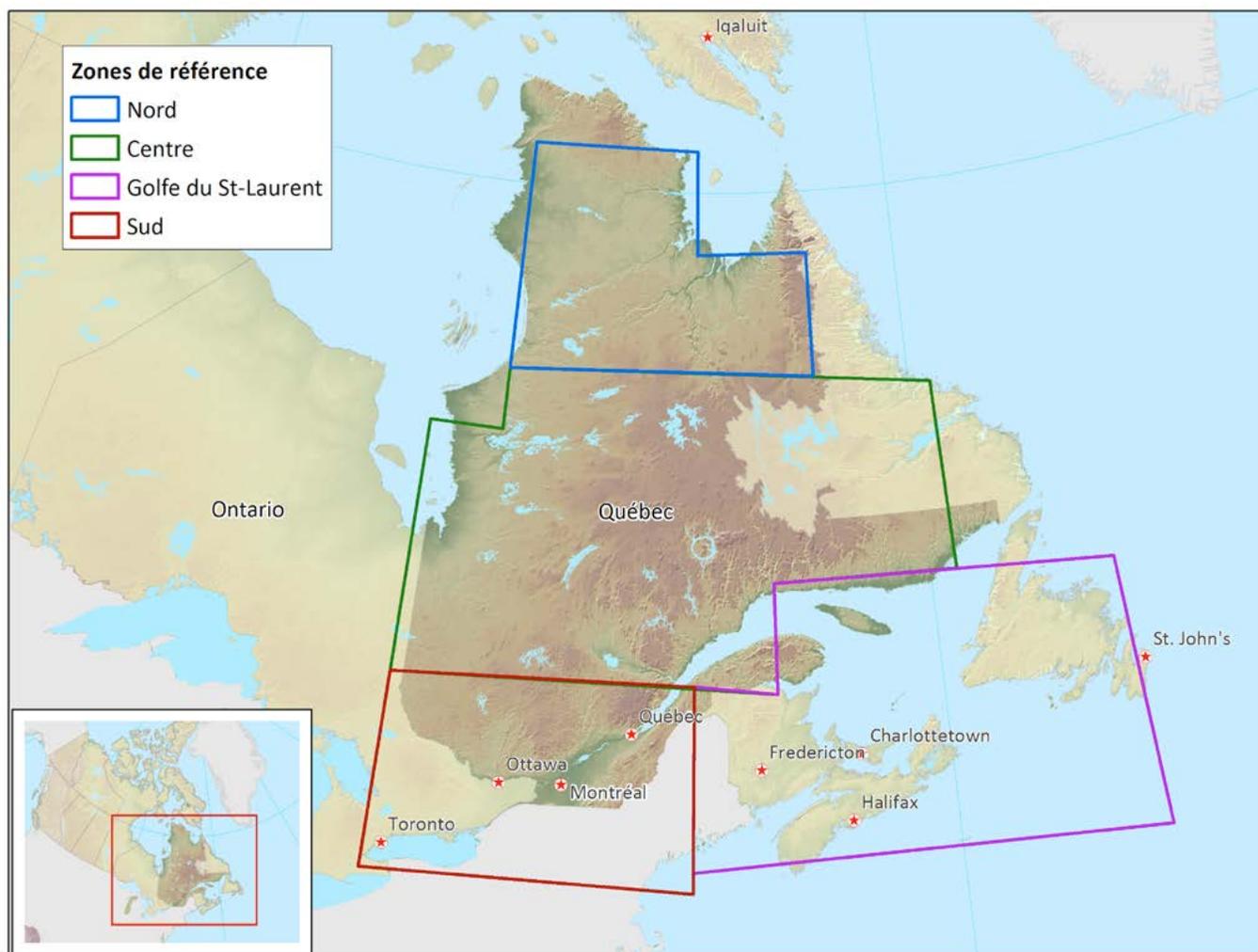


Figure 1-1 Les quatre régions de référence utilisées dans ce document synthèse

1.1.2 Les modèles climatiques

Les modèles climatiques sont des logiciels d'une grande complexité utilisés afin de représenter l'évolution du climat dans le futur, et constituent le seul outil pour y arriver. Ces modèles sont basés sur des équations mathématiques de physique et de chimie, et reproduisent les principaux phénomènes météorologiques, hydrologiques, cryogéniques, lithographiques, océanographiques et biologiques. Deux principales catégories de modèles sont régulièrement utilisées : les modèles globaux du climat (MGC) (ou plus récemment appelés des « modèles du système terrestre ») dont l'étendue de la grille de calcul couvre l'ensemble du globe et les modèles régionaux du climat (MRC) qui couvrent seulement une partie du globe. Les MGC ont une résolution spatiale plus grossière, soit de l'ordre de 200 à 300 km, tandis que les MRC ont une grille de résolution de 50 km ou moins.

Un point important à connaître quant à l'utilisation de modèles climatiques est qu'il est fortement recommandé d'en utiliser plusieurs dans les études de vulnérabilité, d'impacts et d'adaptation (VI&A) aux changements climatiques. En effet, chaque modèle (et type de modèle) a ses forces et ses faiblesses, et peut donner des résultats différents. La combinaison de modèles donne des résultats plus fiables.

1.1.3 Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre

Une des principales entrées des modèles climatiques est la concentration des gaz à effet de serre (GES) et des aérosols dans l'atmosphère. Pour la période historique, les valeurs de concentration proviennent des observations, mais pour les projections, les valeurs sont fournies par des scénarios d'émissions. Ces scénarios décrivent différents futurs plausibles en termes d'émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols et d'autres gaz dans l'atmosphère. Puisque les évolutions dépendent des facteurs socio-économiques et des décisions politiques de la société, elles sont donc intrinsèquement incertaines au point où choisir la plus probable est à ce jour impossible. Par conséquent, plus d'un scénario d'émissions de gaz à effet de serre est généralement utilisé dans l'élaboration d'un ensemble de simulations climatiques.

Les scénarios d'émissions sont soumis à des changements lorsque de nouvelles données ou méthodes se dégagent. Un tel changement est survenu avec la production d'une nouvelle mouture de scénarios d'émissions entre la publication du quatrième rapport du GIEC parue en 2007 et le cinquième rapport qui a été publié en 2013. Tandis que l'évolution des GES était décrite par des scénarios de type SRES (IPCC, 2000) dans les troisième et quatrième rapports du GIEC, elle est maintenant décrite au moyen de quatre profils, appelés RCP pour Representative Concentration Pathways (van Vuuren *et al.*, 2011), dans le plus récent rapport. L'adoption de l'approche RCP permet, entre autres, une amélioration de l'efficacité dans les échanges d'information entre les différentes communautés de recherche impliquées dans la production et l'utilisation des scénarios d'émissions ainsi que des simulations climatiques (Moss *et al.*, 2010).

Les quatre RCP développés par la communauté scientifique ont été nommés selon leur forçage radiatif autour de l'année 2100. Une description qualitative de leurs trajectoires, de leur contenu en CO₂, des températures projetées en 2100 ainsi que des scénarios SRES qui leur correspondent le plus est présentée au tableau 1-1.

Tableau 1-1 Caractéristiques des scénarios RCP

Nom	Forçage radiatif vers 2100 (W/m ²)	Évolution	Équivalent CO ₂ (ppm)	Réchauffement moyen global vers 2100 p/r 1850 (°C)	Équivalent SRES approximatif (en termes de changement de température globale)
RCP8.5	8.5	Émissions fortes et continues	1370	4.9	A1FI
RCP6.0	6.0	Stabilisation sans dépassement	850	3.0	B2
RCP4.5	4.5	Stabilisation sans dépassement	650	2.4	B1
RCP2.6	2.6	Pic avant 2050 et réduction	490	1.5	Aucun

Source : Adapté de Rogelj *et al.* (2012)

1.1.4 Une nouvelle génération de simulations climatiques

Afin de partager les résultats des différents centres de modélisation, un projet nommé Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) a été établi en 1995. Ce projet permet, entre autres, de fournir un grand ensemble de simulations climatiques à la communauté scientifique. Les modèles climatiques sont raffinés au fur et à mesure que la science du climat fait des progrès et que la puissance informatique augmente. Par conséquent, les ensembles CMIP3 (produits avec des scénarios d'émissions SRES A1b, A2 et B1) et CMIP5 (produits avec des émissions RCP) sont, respectivement, à la base des résultats du 4^e et du 5^e rapport synthèse du GIEC.

La figure 1-2 montre les changements de température simulés avec les deux ensembles (CMIP3 sur le panneau gauche et CMIP5 sur le panneau droit). On observe que la plus grande différence entre les changements des deux ensembles à l'échelle globale réside dans les changements projetés utilisant un scénario de fortes émissions (ex. RCP 8.5 par rapport à SRES A2). Dans le tableau 1-1, l'équivalent approximatif de RCP 8.5 correspond au SRES A1FI. Par contre, SRES A1FI n'a pas été retenu pour la création de l'ensemble CMIP3 (qui a utilisé en priorité les émissions SRES A1b, A2 et B1). RCP 8.5 représente alors un forçage radiatif en 2100 plus élevé que tous les scénarios d'émissions de CMIP3. Néanmoins, la figure 1-2 montre que cet effet du forçage plus élevé sur les changements de température est surtout présent à la fin du siècle (changement moyen d'environ +3,5 °C pour CMIP3 avec SRES A2 et +4 °C pour CMIP5 avec RCP 8.5). De plus, Knutti and Sedláček (2012) montrent des résultats comparables pour les ensembles CMIP3 et CMIP5 quant aux patrons spatiaux et à l'ampleur des changements moyens saisonniers pour les variables de température et de précipitations

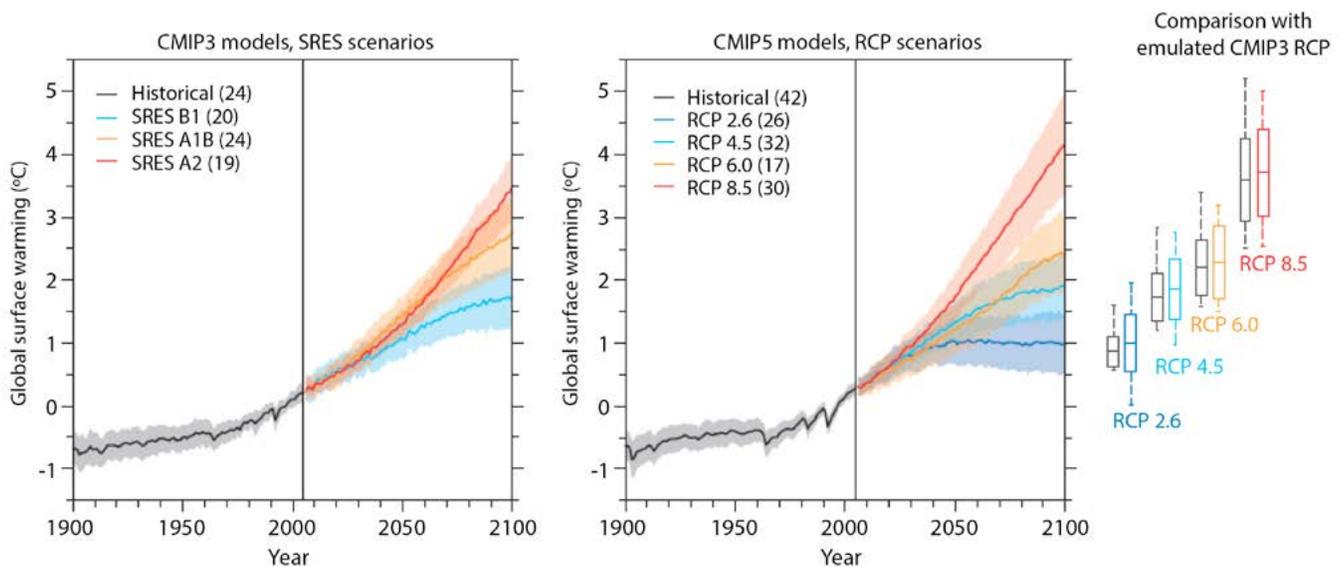


Figure 1-2 Changement moyen de température simulé avec l'ensemble des scénarios de GES SRES A2 (avec la génération de modèles globaux CMIP3) et les RCP (avec la génération de modèles CMIP5) de 1900 à 2100, par rapport au climat moyen actuel (1986-2005). Notez que le RCP2.6 n'a pas d'équivalent SRES. Source : Knutti et Sedláček (2012)

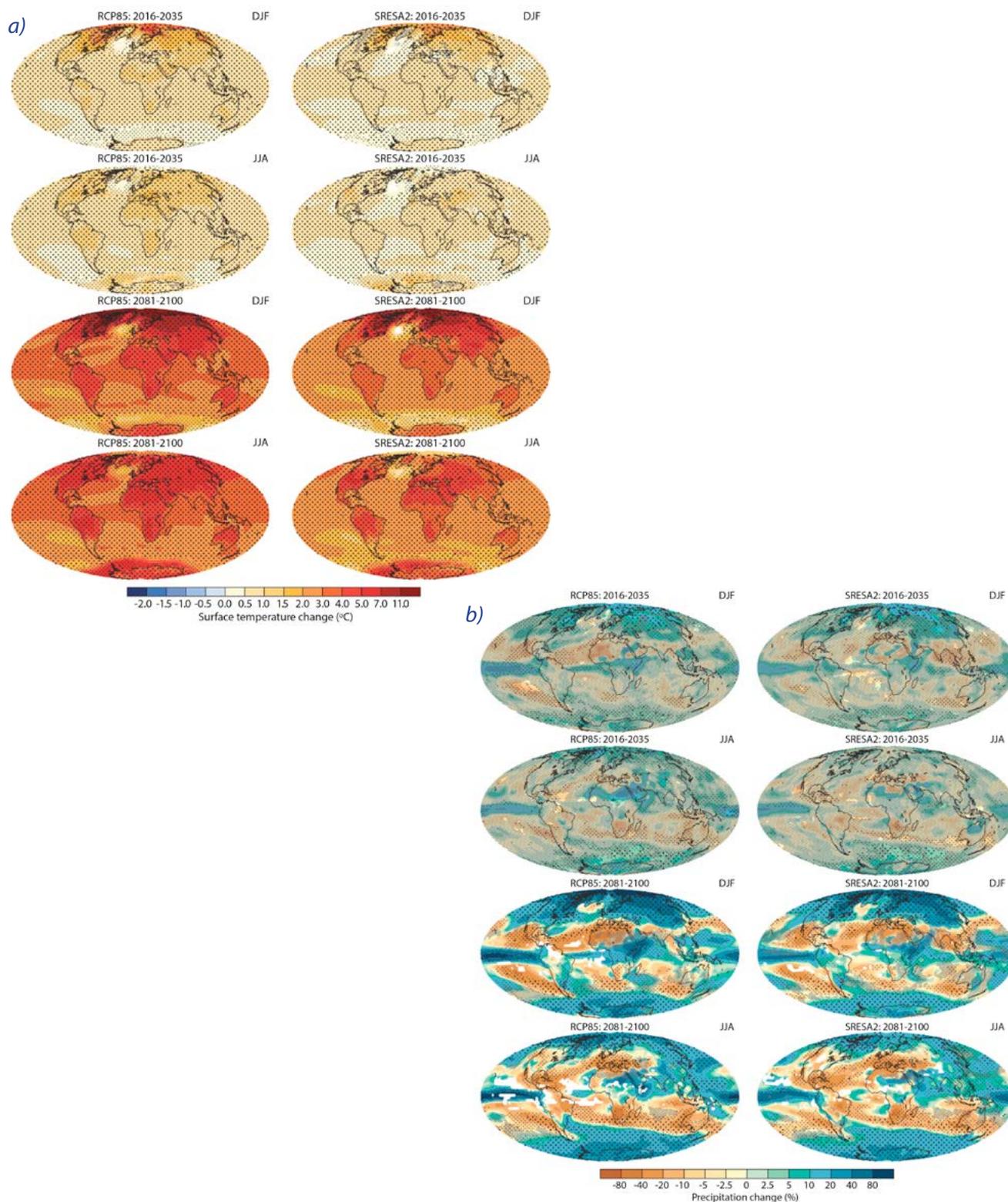


Figure 1-3 Changements moyens relatifs pour a) les températures en °C et b) les précipitations totales en %, pour les saisons de décembre, janvier, février (DJF) et de juin, juillet, août (JJA), simulés par les ensembles CMIP5 (RCP 8.5) et CMIP3 (SRES A2) Les changements pour les deux horizons futurs, 2016-2035 et 2081-2100, sont calculés par rapport au climat moyen de 1986-2005. Source : adapté de Knutti et Sedláček (2012).

(figures 1-3a et b). D'autres études récentes montrent également que les moyennes des modèles CMIP3 et CMIP5 (avec des forçages similaires) sont comparables en termes de projections de température et de précipitations (Markovic *et al.*, 2013; Sheffield *et al.*, 2013a; Sheffield *et al.*, 2013b).

Ces conclusions servent à rassurer les usagers que l'information provenant des études VI&A utilisant des scénarios futurs construits avec l'ensemble CMIP3 demeure valable même avec ce changement graduel vers l'utilisation de l'ensemble CMIP5. Ce point est particulièrement important pour cette synthèse sur le Québec. En effet, les résultats présentés dans ce premier chapitre (portrait climatique du Québec) sont issus majoritairement de l'ensemble CMIP5 et ont été obtenus au courant de la dernière année. Par contre, les résultats et discussions présentés dans les sections sur les conséquences des changements climatiques sur le Québec (partie 2) proviennent de projets souvent basés sur l'ensemble CMIP3. De plus, il est important de noter que le portrait des changements attendus pour le Québec présente principalement des résultats des simulations forcées par RCP 4.5 et 8.5 qui sont priorisées pour le projet CMIP5.

1.1.5. Les incertitudes

Un ensemble de simulations climatiques (comme CMIP5 ou CMIP3) constitue notre meilleure représentation du climat futur. Cependant, le fait d'utiliser plusieurs simulations implique une plage de futurs plausibles, souvent appelée l'incertitude des projections climatiques. Étant donné qu'il est impossible de fournir le « meilleur » scénario futur, l'incertitude dans les projections doit être prise en compte dans les études VI&A. Il existe trois composantes principales d'incertitude : la variabilité naturelle du climat, les émissions futures de gaz à effet de serre, ainsi que les imprécisions des modèles climatiques. L'importance relative des sources d'incertitude dépend de la période future considérée. Par exemple, sur une période de quelques décennies, la variabilité naturelle du climat est généralement la source d'incertitude la plus importante. Aussi, sur des horizons de temps rapprochés, le choix de scénarios d'émissions est relativement peu important. Cependant, sur des horizons temporels plus longs, le choix d'un scénario d'émissions devient très important alors que l'incertitude associée au modèle demeure relativement constante, peu importe l'échelle du temps. Plus d'informations sur l'importance de l'incertitude dans les scénarios climatiques pour les études VI&A sont disponibles dans Charron (2014).



1.2 Les températures

Auteurs : Travis Logan (Ouranos) et Isabelle Charron (Ouranos)

Collaboratrice : Marie-France Sottile (MDDELCC - Ouranos)

Réviseurs : Diane Chaumont (Ouranos), Ramón de Elía (Ouranos), Patrick Grenier (Ouranos) et Philippe Roy (Ouranos).

La température est sans contredit la variable climatique la plus souvent utilisée pour décrire les changements climatiques. Plusieurs raisons expliquent cette utilisation fréquente. D'abord, les températures sont plus directement liées à l'effet de serre que ne le sont d'autres variables telles que les précipitations, les vents ou l'humidité. Ce lien physique plus direct renforce d'ailleurs la confiance des climatologues dans le signe du changement à venir pour les températures. Ensuite, les données de température sont relativement simples à obtenir, et ce, souvent sur de longues périodes, ce qui fait en sorte que la fiabilité des analyses de cette variable est plus élevée. De plus, la variable de la température est l'une des plus faciles à comprendre et à visualiser, ce qui peut simplifier la communication en ce qui concerne les changements climatiques.

Au Québec, des changements de température auront des conséquences certaines sur plusieurs secteurs d'activités. Toutefois, les changements déjà perçus de même que ceux projetés dans le futur varient d'une région à l'autre.

1.2.1 Les observations

Faits saillants

- Les températures montrent une tendance à la hausse pour la période d'observation entre 1950 et 2011 pour toutes les régions du Québec.
- Les tendances de températures moyennes sont cohérentes avec les tendances des températures minimales et maximales. Depuis 1960, on note une hausse des températures minimales et maximales.

On observe des tendances à la hausse d'environ 1 à 3°C dans les températures moyennes annuelles sur une période de 62 ans (1950-2011) pour toutes les régions du Québec (figure 1-4). La majorité des stations météo analysées montrent des changements significatifs (testés avec $\alpha = 0,05$). De plus, très peu d'endroits montrent des tendances à la baisse sur la période 1950-2011, et parmi celles-ci aucune tendance n'est statistiquement significative (figure 1-4). Les tendances de températures moyennes sont reflétées dans les tendances des températures minimales et maximales¹, où l'on note une hausse des températures quotidiennes minimales et maximales depuis 1960 (Vincent *et al.*, 2012). Un point intéressant à noter est le fait que les températures minimales ont connu des augmentations légèrement plus importantes que les températures maximales.

Un important gradient nord-sud caractérise les températures moyennes annuelles sur le territoire québécois. Le Sud du Québec bénéficie de températures plus élevées que les autres régions, tandis que la région du Nord est confrontée à des températures plus froides tout au long de l'année (figure 1-5). Sur une base saisonnière² (tableau 1-2), les températures hivernales au Nord du Québec sont en moyenne autour de -22 °C alors qu'elles

¹ Notez que les résultats des températures minimales et maximales observées ne sont pas détaillés dans ce portrait, car ils suivent, de façon générale, des tendances similaires aux températures moyennes. Par contre, des analyses des tendances observées de ces deux variables sont disponibles dans (Vincent *et al.*, 2012). De plus, les cartes de normales climatiques observées ainsi que les informations sur les scénarios futurs sont détaillées dans plusieurs documents tels que l'Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise (Logan *et al.*, 2011), l'Atlas de la Biodiversité du Québec nordique (Rapaic, 2012) et l'Atlas agroclimatique du Québec (Audet *et al.*, 2012).

² Pour les informations saisonnières voir également figure A.1 et A.2 (Annexe A) et figures B.1 à B.4 (Annexe B)

Température moyenne à 2 m (ANN) : Tendances observées 1950 à 2011

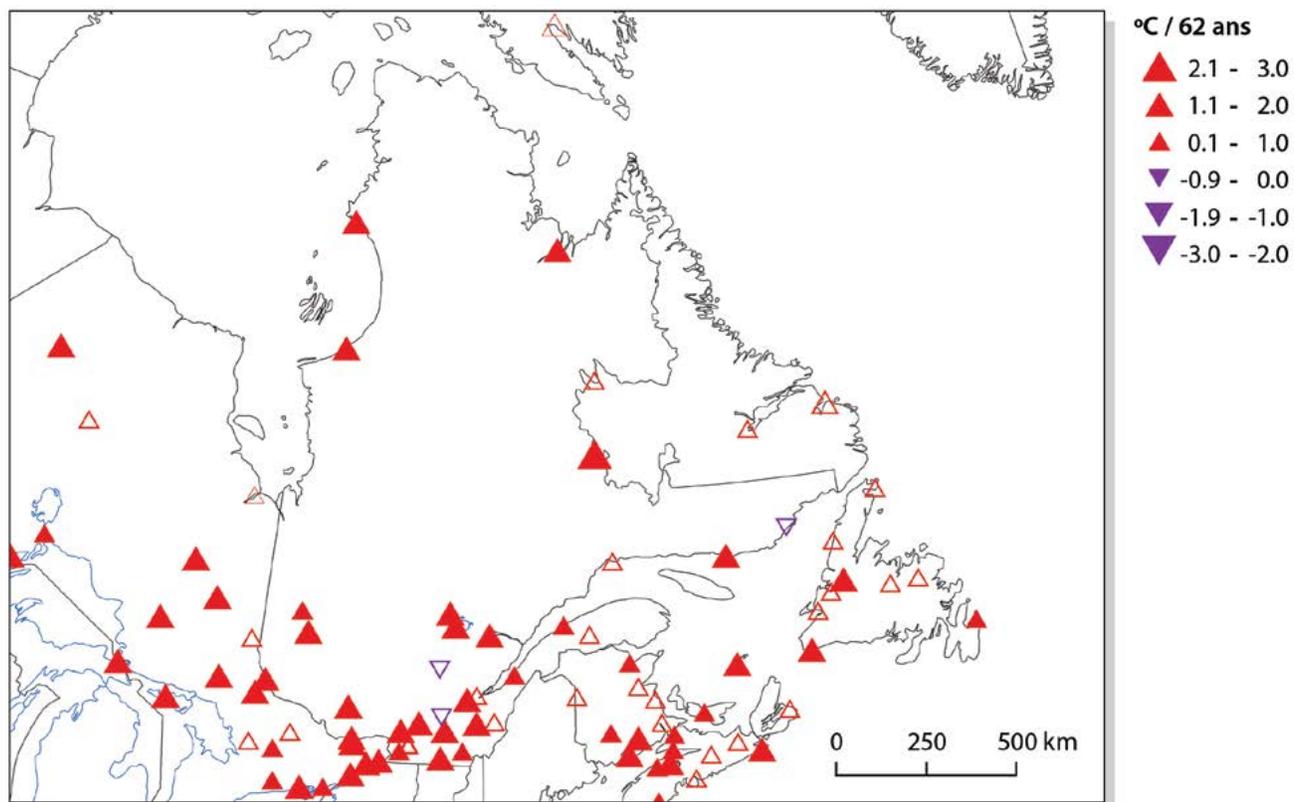


Figure 1-4 Tendances des températures moyennes annuelles pour la période 1950-2011 pour les Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées d'Environnement Canada (DCCAHC; Vincent et al., 2012)³. Les triangles vers le haut (rouge) et vers le bas (violet) indiquent, respectivement, des tendances à la hausse et à la baisse. Les triangles pleins correspondent aux tendances significatives ($\alpha = 0,05$). Les tendances et les niveaux de signification statistique sont calculés selon la méthodologie de Vincent et al. (2012). Les cartes de tendances saisonnières sont présentées à la figure C.1 (annexe C).

sont de 4 °C durant la saison estivale. Au Centre du Québec, les températures varient entre -16 °C l'hiver et 12 °C l'été, tandis que dans la région du Sud, elles fluctuent typiquement entre -8 °C l'hiver et 20 °C l'été. La région du golfe bénéficie de températures hivernales plus clémentes, comparables à celles observées au sud. Cela s'explique en partie par l'influence de la présence de l'eau dans le golfe du Saint-Laurent qui tempère les températures des régions qui le bordent. L'ampleur et la durée de cet effet dépendront de la date de formation et de l'étendue de la glace marine d'année en année. Les températures moyennes annuelles varient d'une année à l'autre (voir courbe noire de la figure 1-6 et la colonne σ du tableau 1-2). La variation interannuelle des températures diffère légèrement selon les régions (elle est plus importante dans le nord, par exemple), tandis que les variations saisonnières sont généralement plus grandes que les variations annuelles (voir tableau 1-2). On remarque, entre autres, que la variabilité hivernale est plus grande que celle des autres saisons, et ce, pour les quatre régions du Québec.

³ Une analyse des tendances n'est pas recommandée avec des données qui n'ont pas été corrigées pour des changements dans les procédures d'observations, dans le type d'instrumentation ou pour le déplacement des stations météorologiques. Par conséquent, il est préférable d'utiliser des données corrigées telles que les Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées d'Environnement Canada (DCCAHC) pour une telle analyse (Vincent et al., 2012).

Observations : 1971 à 2000 (CRU TS 3.21)

Horizon 2050 : RCP 8.5

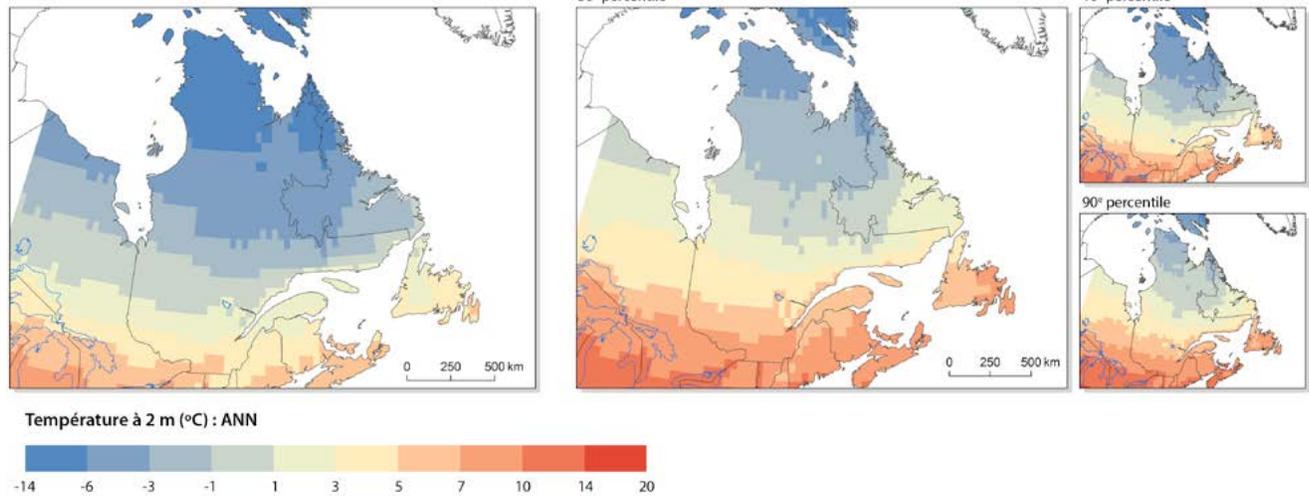


Figure 1-5 Températures moyennes annuelles observées pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projetées (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données CRU TS 3.21⁴. Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 29 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (RCP8.5). Les résultats saisonniers et pour l'horizon 2080 sont présentés dans les figures A.1 et A.2 respectivement (annexe A). Voir tableau D.1 (Annexe D) pour la liste des simulations CMIP5.

Les courbes présentant l'évolution des températures moyennes observées (figure 1-6) montrent que les températures ont été à la hausse pour la période d'observation entre 1950 et 2012. Par contre, ces courbes montrent aussi que bien que la tendance à long terme soit à une hausse générale, il existe des périodes où la tendance a été à la baisse (voir, par exemple, les panneaux b-d la période entre le commencement des années 80 et le commencement de la décennie suivante). Cette variabilité interannuelle est naturelle, et explique pourquoi les tendances sur de courtes périodes peuvent s'éloigner de la tendance à long terme forcée par l'effet de serre anthropique, allant même jusqu'à être négatives parfois.

Les hausses des températures ont aussi une incidence sur les événements de températures chaudes extrêmes à l'échelle du globe, comme le témoigne l'occurrence de plusieurs canicules récentes (Coumou *et al.*, 2013; Coumou et Robinson, 2013). Le nombre de records de températures mensuelles chaudes observées a aussi augmenté au courant des dernières décennies (Coumou *et al.*, 2013). De plus, globalement, la durée des événements chauds a augmenté tandis que la durée des événements froids a diminué (Donat *et al.*, 2013). Au Québec, les résultats de Donat *et al.* (2013) indiquent des diminutions statistiquement significatives dans le nombre de nuits et jours frais, et la durée des vagues de froid pour la période 1951-2010. Les résultats montrent également des augmentations significatives dans le nombre de nuits et de jours chauds, et la durée des vagues de chaleur pour cette même période.

⁴ Le territoire Québécois ne bénéficie pas d'une couverture en stations météorologiques aussi dense que celles des États-Unis ou de l'Europe. Dans ce contexte, les bases de données observées interpolées sur grille régulière pour couvrir tout le territoire. Les données comme celles du Climatic Research Unit (CRU TS 3.21, Harris *et al.*, 2014), même si imparfaites, sont particulièrement utiles pour comprendre le climat du Québec. Les données CRU TS 3.2.1 ont été utilisées pour cartographier la température moyenne annuelle observée de la figure 1-5, et pour tracer la partie observée de la courbe d'évolution des températures moyennes annuelles par région de la figure 1-6. Le tableau 1-2 contient aussi des valeurs de températures moyennes et l'écart-type interannuel calculées à partir de ces mêmes données pour chacune des quatre régions.

Tableau 1-2 Sommaire des valeurs observées 1971-2000 (CRU 3.21 TS) et changements relatifs projetés des températures moyennes pour les quatre régions d'intérêt pour l'horizon 2020 (2011 à 2040), l'horizon 2050 (2041 à 2070) et l'horizon 2080 (2071 à 2100). Les changements sont présentés pour les saisons : annuel (ANN); décembre, janvier, février (DJF); mars, avril, mai (MAM); juin, juillet, août (JJA); et septembre, octobre, novembre (SON). L'intervalle dans les Δ indique les 10^e et 90^e percentiles des simulations climatiques (n = 33 RCP 4.5; n = 29 RCP 8.5 de CMIP5). Voir tableau D.1 (Annexe D) pour la liste des simulations CMIP5.

Températures moyennes									
Région	Saison	Observations (°C) 1971-2000		Δ horizon 2020 (°C)		Δ horizon 2050 (°C)		Δ horizon 2080 (°C)	
		μ	σ	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Sud	ANN	4.6	0.8	+0.9 à +2.1	+1.1 à +2.3	+1.7 à +3.7	+2.4 à +4.6	+2.1 à +4.7	+4.1 à +7.2
	DJF	-9.5	1.6	+1.2 à +2.7	+1.0 à +2.9	+1.8 à +4.3	+3.0 à +5.5	+2.3 à +5.5	+5.1 à +8.2
	MAM	3.9	1.3	+0.7 à +2.3	+0.8 à +2.1	+1.4 à +3.5	+2.2 à +5.1	+1.8 à +4.2	+3.9 à +7.6
	JJA	17.6	0.8	+1.0 à +1.8	+1.0 à +2.0	+1.6 à +3.3	+2.2 à +4.5	+1.9 à +4.2	+3.9 à +7.2
	SON	6.4	0.9	+0.8 à +2.1	+0.9 à +2.2	+1.7 à +3.4	+2.5 à +4.2	+2.1 à +4.3	+3.9 à +6.8
Centre	ANN	-2.0	1.0	+0.8 à +2.3	+1.1 à +2.4	+1.7 à +4.0	+2.6 à +5.0	+2.2 à +5.2	+4.7 à +8.0
	DJF	-18.1	1.8	+1.3 à +3.3	+1.5 à +3.6	+2.2 à +5.6	+3.7 à +6.7	+2.9 à +6.8	+7.0 à +9.9
	MAM	-3.5	1.6	+0.7 à +2.5	+0.7 à +2.5	+1.1 à +3.9	+2.1 à +4.6	+1.5 à +4.8	+3.6 à +8.3
	JJA	12.7	0.9	+0.6 à +2.0	+0.8 à +2.0	+1.2 à +3.3	+1.9 à +4.5	+1.6 à +4.1	+3.6 à +7.1
	SON	1.0	1.1	+0.7 à +2.0	+1.0 à +2.2	+1.6 à +3.3	+2.5 à +4.4	+1.9 à +4.1	+4.1 à +7.0
Golfe	ANN	3.9	0.7	+0.8 à +1.9	+0.9 à +2.1	+1.3 à +3.5	+2.0 à +4.3	+1.9 à +4.3	+3.8 à +6.8
	DJF	-7.9	1.4	+0.9 à +2.3	+1.1 à +2.6	+1.4 à +4.1	+2.3 à +4.8	+2.0 à +4.7	+4.4 à +7.1
	MAM	2.0	1.1	+0.7 à +1.9	+0.7 à +2.2	+1.0 à +3.6	+1.7 à +4.4	+1.6 à +4.5	+3.5 à +7.1
	JJA	15.4	0.7	+0.7 à +2.0	+0.8 à +2.1	+1.1 à +3.4	+1.8 à +4.3	+1.7 à +4.2	+3.6 à +7.0
	SON	6.2	0.8	+0.7 à +1.8	+0.8 à +1.9	+1.3 à +3.1	+1.9 à +3.9	+1.6 à +3.8	+3.6 à +6.5
Nord	ANN	-6.7	1.2	+1.1 à +2.7	+0.8 à +2.7	+1.9 à +4.7	+2.8 à +5.8	+2.4 à +5.7	+5.3 à +9.6
	DJF	-22.5	2.4	+1.7 à +4.8	+1.3 à +5.2	+3.1 à +7.8	+4.5 à +9.5	+3.9 à +9.9	+8.1 à +14.8
	MAM	-10.2	1.9	+0.7 à +2.6	+0.7 à +2.5	+1.2 à +4.7	+2.4 à +6.2	+2.0 à +6.2	+4.3 à +10.6
	JJA	7.9	0.9	+0.5 à +2.0	+0.7 à +1.9	+0.9 à +3.4	+1.5 à +4.5	+1.4 à +3.9	+3.2 à +7.4
	SON	-2.0	1.3	+0.7 à +2.1	+1.0 à +2.2	+1.5 à +3.5	+2.5 à +4.4	+2.0 à +4.1	+3.9 à +7.6

1.2.2 Les projections et les scénarios climatiques

Les projections climatiques présentées dans cette section sont basées sur l'ensemble des simulations globales CMIP5 (voir section 1.1.3). Les différents tableaux et figures présentés dans ce portrait fournissent des informations, parfois similaires, mais qui permettent au lecteur de comparer différents aspects des changements attendus tels que : des comparaisons cartographiques ou spatiales (figure 1-5; annexe A); des comparaisons temporelles ou sur différents horizons futurs (figure 1-6; tableau 1-2); des comparaisons entre RCP 4.5 et 8.5 (tableau 1-2; figure 1-6); des comparaisons saisonnières (tableau 1-2; annexes A et B); des augmentations ou des changements relatifs projetés (tableau 1-2; figure 1-6); ou des conditions futures projetées (figure 1-5; annexe A).

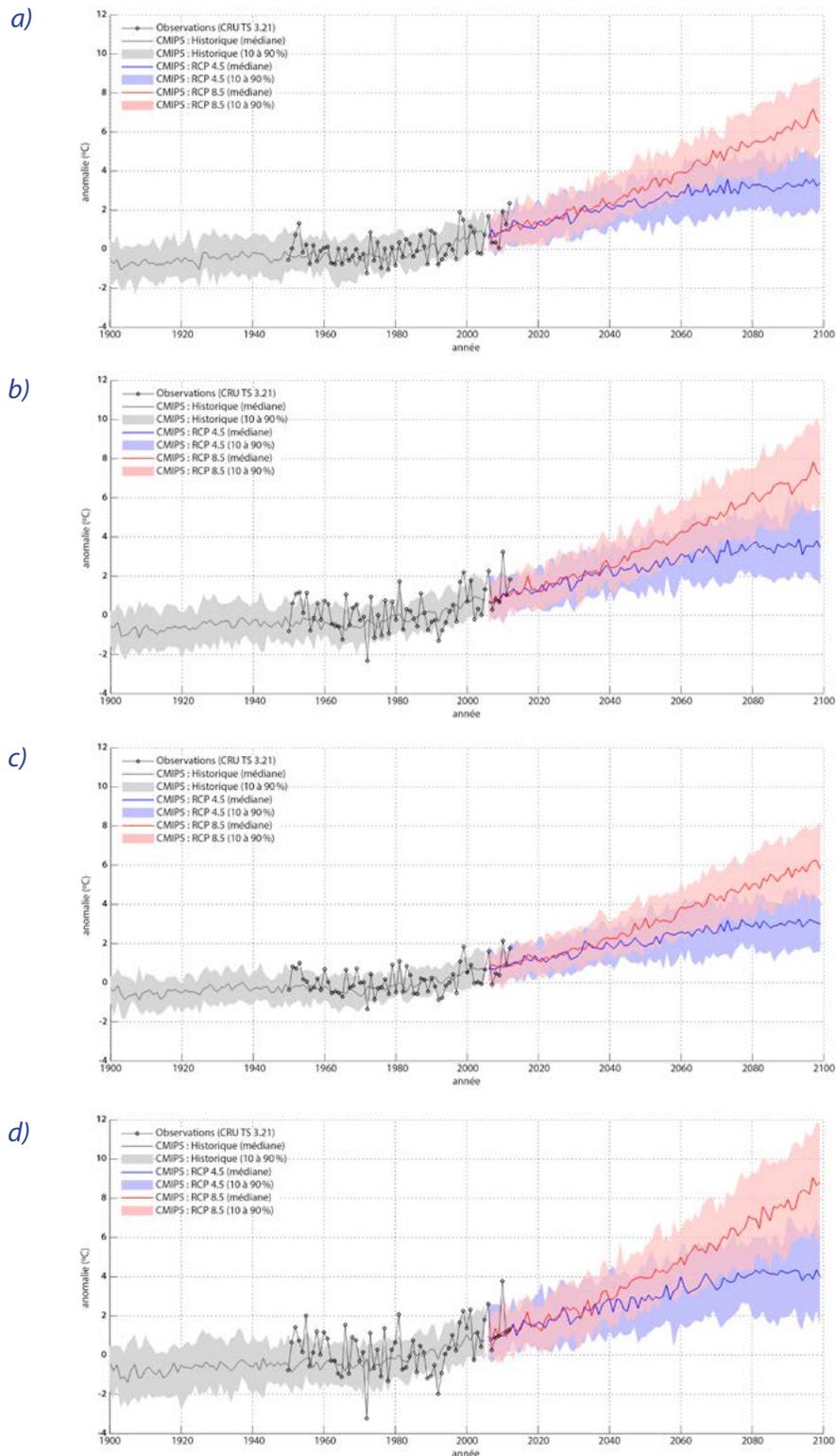


Figure 1-6 Évolution des anomalies de températures moyennes annuelles observées (1950-2012) et simulées (1900-2100), pour la période historique (gris) et selon les RCP4.5 (bleu; $n = 33$) et RCP8.5 (rouge; $n = 29$). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne 1971-2000 et sont présentées pour les quatre sous-régions du Québec a) Sud b) Centre c) golfe et d) Nord. Les résultats saisonniers sont présentés dans les figures B.1 à B.4 (annexe B). Voir tableau D.1 (Annexe D) pour la liste des simulations CMIP5.

Faits saillants

- *Au Sud du Québec et dans la région du golfe du Saint-Laurent, les températures annuelles projetées avec un scénario de fortes émissions (RCP 8.5) augmentent d'environ 2 à 4 degrés pour la période 2041-2070 et de 4 à 7 degrés pour la période 2071-2100. Au Centre et dans le Nord, les hausses projetées sont d'environ 3 à 6 degrés pour 2041-2070 et de 5 à 10 degrés pour 2071-2100.*
- *En termes de changements saisonniers pour 2071-2100, on note que les augmentations les plus grandes sont projetées pour la saison hivernale dans le Nord du Québec, avec des réchauffements qui pourraient atteindre 10 à 15 °C, selon le scénario d'émissions. Pour les autres régions, pour l'été, l'automne et le printemps, les réchauffements pourraient s'élever jusqu'à 4 à 7°C.*
- *On projette des fortes augmentations au Québec pour la température maximale de la journée la plus chaude de l'année. Les résultats montrent des augmentations médianes de l'ordre de 3 à 5 degrés pour le scénario RCP 4.5 et de 4 à 7 degrés pour RCP 8.5 selon la région.*
- *On projette que la température minimale de la journée la plus froide de l'année subira un réchauffement encore plus fort que les extrêmes chauds avec des augmentations médianes sur le Québec de l'ordre de 5 à 7 degrés pour le scénario RCP 4.5 et supérieures à 10 degrés pour RCP 8.5.*
- *Projections de fortes augmentations dans la durée des vagues de chaleur, ainsi que la fréquence de nuits chaudes (température minimale > 20 °C).*
- *Projections d'une forte réduction dans le nombre annuel de jours de gel (jours avec température minimale inférieure à zéro), ainsi que dans le nombre de nuits froides et de jours froids.*
- *Les projections pour le Québec montrent seulement une légère diminution dans la durée des vagues de froid.*
- *Selon les projections, les températures extrêmes maximales en été augmentent plus que les températures moyennes estivales. De la même manière, les températures extrêmes minimales en hiver augmentent aussi plus que les températures moyennes hivernales.*

Dans les régions du Sud du Québec et du golfe du Saint-Laurent, les températures annuelles projetées avec un scénario de fortes émissions (RCP 8.5) augmentent d'environ 2 à 4 degrés pour la période 2041-2070 (horizon 2050) et de 4 à 7 degrés pour la période 2071-2100 (horizon 2080). Au Centre et dans le Nord, les hausses projetées sont d'environ 3 à 6 degrés pour 2041-2070 et de 5 à 10 degrés pour 2071-2100 (tableau 1-2; figure 1-6). Les courbes d'évolution des températures moyennes, présentées à la figure 1-6 et à l'annexe B, démontrent bien elles aussi la hausse projetée. On note que l'écart entre les deux scénarios de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP8.5 est plus marqué dans la deuxième moitié du siècle. De plus, l'écart le plus grand se situe dans la région du Nord et le plus petit dans la région du Sud. Les projections pour les températures annuelles montrent un gradient nord-sud dans les changements projetés (tableau 1-2; figure 1-5). En effet, à l'instar des changements attendus à l'échelle mondiale, les augmentations projetées sur le Québec sont plus grandes pour les régions plus au nord, ce qui reflète surtout les changements hivernaux importants (tableau 1-2).

En termes de changements par saison, les augmentations de températures hivernales sont plus élevées que pour les autres saisons, de même que les hausses annuelles projetées, et ce, pour toutes les régions (tableau 1-2; figures B.1 à B.4 de l'annexe B). On remarque également que les augmentations les plus grandes sont projetées pour la saison hivernale dans le Nord du Québec, avec des réchauffements qui pourraient atteindre 10 à 15 °C selon le scénario d'émissions (tableau 1-2). Pour les autres saisons, les patrons diffèrent peu entre les régions. Au Sud, au Centre et pour le golfe, les changements attendus sont comparables pour le printemps, l'été et l'automne (augmentation entre 2 à 5 degrés pour RCP 4.5 et environ 4 à 7 degrés pour RCP 8.5). Au Nord, les augmentations les plus faibles sont projetées pour la saison estivale, tandis que les changements projetés pour le printemps et l'automne sont similaires.

En termes d'extrêmes de températures à l'échelle du globe, les températures extrêmes minimales et maximales sont appelées à réchauffer dans le futur (Casati et de Elía, 2014; Collins *et al.*, 2013). En effet, le 5^e rapport du GIEC indique qu'il y a un degré de certitude très élevé et qu'il est quasiment certain (probabilité de 99-100 %) que dans la plupart des régions continentales il y aura une augmentation dans le nombre d'extrêmes chauds et une diminution dans les extrêmes froids.

Pour les extrêmes chauds, Sillmann *et al.* (2013a) projettent de fortes augmentations sur le Québec dans les maximums annuels des températures maximales quotidiennes (journée la plus chaude de l'année). Les résultats de l'étude montrent des augmentations médianes (calculées à partir d'un ensemble de simulations CMIP5) de l'ordre de 3 à 5 degrés pour le scénario RCP 4.5 et de 4 à 7 degrés pour RCP 8.5 selon la région. Ce résultat est accompagné par des projections de fortes augmentations dans la durée des vagues de chaleur ainsi que la fréquence des nuits chaudes (température minimale > 20 °C) (Sillmann *et al.*, 2013a). Dans une étude sur les températures mensuelles, on évalue que le nombre de records de chaleur en 2040 pour tout le globe sera 12 fois plus élevé que dans un climat sans changement climatique (Coumou *et al.*, 2013).

En termes d'extrêmes froids, l'étude de Sillmann *et al.* (2013a) montre que les valeurs minimales annuelles des températures minimales quotidiennes (journée la plus froide de l'année) devraient subir un réchauffement encore plus fort que les extrêmes chauds avec des augmentations médianes sur le Québec de l'ordre de 5 à 7 degrés pour le scénario RCP 4.5 et supérieures à 10 degrés pour RCP 8.5. Les auteurs de l'étude indiquent également une forte réduction dans le nombre annuel de jour de gel (jours avec température minimale inférieure à zéro), ainsi que dans le nombre de nuits et de jours frais. Les projections pour le Québec montrent seulement une légère diminution dans la durée des vagues de froid (diminution de 1 à 2 jours pour RCP 4.5 et RCP 8.5). Ces changements sont toutefois statistiquement significatifs.

Une récente étude sur l'Amérique du Nord montre des résultats complémentaires, indiquant que dans plusieurs endroits au Québec et dans l'est de l'Amérique du Nord les températures extrêmes maximales augmentent plus que les températures moyennes estivales, et que les températures extrêmes minimales se réchauffent aussi plus que les températures moyennes hivernales (Casati et de Elía, 2014).

1.2.3 Les divers indicateurs thermiques

Faits saillants

- La longueur de la saison de croissance tend à s'allonger depuis 1971 (tableau 1-3). Les projections climatiques montrent une augmentation moyenne d'environ 20 jours sur l'ensemble du territoire pour 2041-2070.
- La saison de gel a eu tendance à raccourcir, particulièrement dans le Nord et le Centre du Québec. Cela dénote le fait, qu'à l'inverse, la longueur de la saison sans gel s'est allongée.

Les températures (moyennes, minimales et maximales) sont utilisées pour calculer plusieurs autres indicateurs climatiques importants pour divers secteurs économiques tels que les degrés-jours de croissance, la longueur de la saison de croissance, les épisodes de gel-dégel, ainsi que les degrés-jour de climatisation et de chauffage. Les changements de température ont, par conséquent, une incidence sur ces autres indices. Cette section décrit brièvement les changements attendus pour quelques indices climatiques fréquemment utilisés par la communauté qui fait des études de vulnérabilité, d'impacts et d'adaptation. Le tableau 1-3 résume les résultats abordés ici.

Tableau 1-3 Résumé des tendances observées et des projections climatiques de divers indices thermiques d'intérêt pour le Québec

Indices	Définitions	Observations (moyennes et tendances)	Changements projetés vers 2050 par rapport au passé récent
Longueur de la saison de croissance	La saison de croissance débute quand la température moyenne quotidienne est égale ou supérieure à 5 °C pendant 6 jours consécutifs.	Rallongement de quelques jours à environ 2 semaines, selon l'endroit. Ce phénomène est causé principalement par un printemps plus hâtif. (Audet et al., 2012; Zhang et al., 2011)	Rallongement de 10 à 30 jours, selon le scénario d'émission sur tout le territoire québécois. (Audet et al., 2012; Logan et al., 2011; Rapaic, 2012)
Degrés-jours de croissance	L'écart, en degrés Celsius, entre la température moyenne quotidienne et une valeur de base de 5°C. Ces valeurs sont cumulées sur une base annuelle.	Augmentation du nombre de degrés-jours sur le territoire québécois. (Audet et al., 2012; Zhang et al., 2011)	Près de 600 degrés-jours de plus dans le sud de la Province, selon le scénario d'émission. Augmentation faible dans le Nord. (Audet et al., 2012; Logan et al., 2011; Rapaic, 2012)
Longueur de la saison de gel	Période entre le premier jour de gel, où la température moyenne quotidienne est sous 0°C et le dernier jour de gel, où la température quotidienne moyenne est au-dessus de 0°C.	La longueur de la saison diminue : dernier gel plus hâtif au printemps et premier gel plus tardif à l'automne. Le froid est également moins intense (diminution des degrés-jours <0°C) durant la saison de gel. (Audet et al., 2012; Charron et al., 2013)	Réduction de 2 à 4 semaines en particulier pour la région du Golfe (pas de données pour le Nord) (Audet et al., 2012)
Épisodes de gel/dégel	Une journée où la température moyenne quotidienne oscille sous et au-dessus de 0°C en 24 heures. Un événement est observé quand la température minimale de la journée est inférieure à 0°C et quand la température maximale est supérieure à 0°C.	En moyenne, le nombre d'événements présente un fort gradient nord-sud avec un faible nombre d'événement dans le Nord. Sur l'ensemble du Québec, la tendance présente une légère baisse des événements. (Charron et al., 2013; Logan et al., 2011)	Peu de changement annuellement mais déplacement de la saisonnalité des événements. Le nombre d'événements est projeté d'augmenter l'hiver mais de diminuer l'automne et au printemps. (Logan et al., 2011; Rapaic, 2012)
Degrés-jours de climatisation	Cumul de degrés des températures moyennes quotidiennes supérieures à un seuil de 13°C (secteur industriel) ou 22°C (secteur résidentiel).	Faibles augmentations dans le Sud, au Centre et dans la région du Golfe (pas de données pour le Nord) (B. Caron, communication personnelle, 20 mars 2014)	Augmentation de plus de 83 à 173 degrés-jours pour la région de Montréal et de 42 à 103 pour la région de Québec (Chaumont, 2005)
Degrés-jours de chauffage	Cumul de degrés des températures moyennes quotidiennes inférieures à un seuil de 15°C (secteur industriel) ou 18°C (secteur résidentiel).	Diminutions au Sud, au Centre et pour la région du Golfe (pas de données pour le Nord) (B. Caron, communication personnelle, 20 mars 2014)	Diminution d'environ 550 à 865 degrés-jours pour la région de Montréal et de 615 à 1198 pour la région de Québec (Chaumont, 2005)

Plusieurs études récentes à l'échelle du globe rapportent une augmentation des températures de l'air au printemps, ce qui provoque un début de saison de croissance plus hâtif et contribue à l'augmentation de la longueur de celle-ci (Christidis *et al.*, 2007; Keeling *et al.*, 1996; Myneni *et al.*, 1997; Root *et al.*, 2003; Walther *et al.*, 2002). Ce phénomène est aussi observé au Québec, où la longueur de la saison de croissance tend à s'allonger depuis 1971. Les projections climatiques montrent une augmentation moyenne d'environ 20 jours de la longueur de la saison de croissance sur l'ensemble du territoire pour l'horizon 2050 (Audet *et al.*, 2012; Logan *et al.*, 2011).

Les conséquences d'une hausse des températures estivales sont aussi reflétées dans l'augmentation du nombre de degrés-jours de croissance, un indice couramment utilisé en agriculture et en foresterie pour estimer les stades de développement des plantes. Une hausse marquée de cet indice, soit de l'ordre de 600 degrés-jours, est projetée par les modèles globaux pour le Sud du Québec pour l'horizon 2050. Les changements attendus sont nettement inférieurs dans le Centre et le Nord de la province. Par contre, il faut noter qu'avec la normale climatique pour le Nord de 0 degré-jours, une faible augmentation du nombre de degrés-jours dans le futur représente un changement relatif important.

Le réchauffement des températures minimales et maximales a des conséquences sur la longueur de la saison de gel ainsi que sur le nombre d'épisodes de gel-dégel. D'abord, on note dans les observations que la saison de gel s'est raccourcie, particulièrement dans le Nord et le Centre du Québec (Charron *et al.*, 2013). Évidemment, à l'inverse, la longueur de la saison sans gel s'est allongée. Ensuite, selon les projections climatiques, la longueur de la saison de gel diminuera de l'ordre de 20 à 34 jours pour les régions du Sud et du golfe (aucun calcul n'est disponible actuellement pour le Centre et le Nord).

En termes de nombre d'événements de gel-dégel total annuel, les dernières décennies présentent une diminution au Sud, au Nord, ainsi que dans la région du golfe. Cette diminution est significative pour les régions du Golfe et du Nord. Le changement le plus important attendu ne se traduit pas en nombre total d'événements annuels, qui est appelé à très peu changer, mais plutôt dans la saisonnalité des événements. En effet, les projections climatiques montrent un déplacement de la saison gel-dégel avec une augmentation du nombre d'événements en hiver et une diminution au printemps et à l'automne (Logan *et al.*, 2011).

Finalement, une étude sur les conséquences des changements climatiques sur les degrés-jours de chauffage et de climatisation pour les villes de Québec et de Montréal révèle que le réchauffement hivernal entraînera une baisse importante du cumul de degrés-jours de chauffage pour l'horizon 2050 (Chaumont, 2005). Des augmentations dans les degrés-jours de climatisation sont aussi projetées, sans toutefois équivaloir à la baisse dans les degrés-jours de chauffage. De plus, la saison de climatisation pourrait être plus hâtive à Montréal (juin) et s'étirer plus longuement à Québec (août), comparativement à ce qui a été observé dans le passé.



1.3 Les précipitations

Auteur : Hélène Côté (Ouranos)

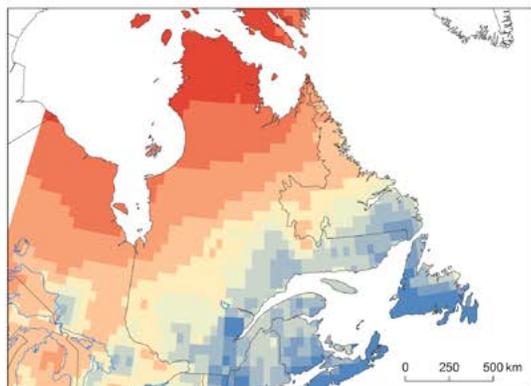
Réviseurs : Alain Mailhot (INRS-ETE), Sébastien Biner (Ouranos), Isabelle Charron (Ouranos), Ramón de Elía (Ouranos), Biljana Music (Ouranos), Dominique Paquin (Ouranos), Philippe Roy (Ouranos) et Julie Thériault (UQAM).

1.3.1. Les observations

Faits saillants

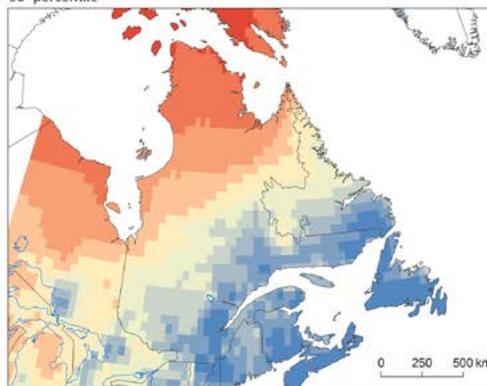
- Le secteur de Kuujuaq présente des tendances à la hausse sur toute l'année, tant pour la pluie que pour les chutes de neige, bien qu'elles ne soient statistiquement significatives que pour la pluie d'été et d'automne.
- C'est dans le Sud du Québec que l'on trouve le plus de tendances historiques significatives au Québec, notamment des tendances à la hausse pour la pluie printanière et automnale, ainsi que pour certaines stations en été. La tendance à la baisse des précipitations sous forme de neige est aussi significative pour plusieurs stations du Sud du Québec.
- Pour l'extrême sud du Québec, les quantités de précipitations des jours les plus pluvieux (R95p) présentent une tendance à la hausse pour la période 1950-2010. La quantité maximale de précipitations lors d'un épisode de 5 jours consécutifs montre aussi une tendance significative à la hausse pendant l'automne (important pour les risques d'inondations).

Observations : 1971 à 2000 (CRU TS 3.21)

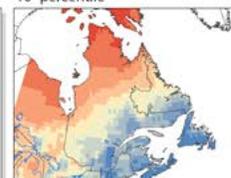


Horizon 2050 : RCP 8.5

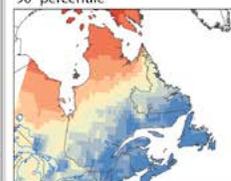
50^e percentile



10^e percentile



90^e percentile



Précipitations totales (mm) : ANN

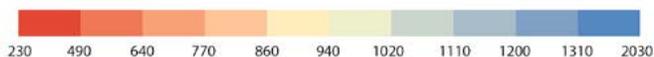


Figure 1-7 Précipitations totales annuelles observées pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projetées (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données CRU TS 3.21. Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 29 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (RCP8.5). Les résultats saisonniers et pour l'horizon 2080 sont présentés dans les figures A.3 et A.4 respectivement (annexe A). Voir tableau D.1 (Annexe D) pour la liste des simulations CMIP5.

1.3.1.1 Les normales et la variabilité interannuelle observées

La cartographie de la normale climatique des précipitations totales⁵ annuelles est présentée à la figure 1-7. Le large corridor centré sur la vallée du Saint-Laurent reçoit les plus grandes accumulations de précipitations du territoire québécois. Selon la figure 1-7, ce corridor reçoit annuellement en moyenne plus de 1000 mm de pluie. Le Nunavik ne reçoit annuellement que la moitié de cette quantité, soit environ 500 mm. Cette carte met en évidence le contraste nord-sud dans la répartition des précipitations sur le territoire québécois, car les hauteurs de précipitations diminuent graduellement au fur et à mesure que l'on se dirige vers le nord. Les moyennes régionales des précipitations annuelles apparaissent au tableau 1-4 pour chaque région de la figure 1-1.

Les valeurs saisonnières par région sont présentées dans le tableau 1-4. La deuxième colonne du tableau 1-4 indique qu'à l'exception de la région du golfe, les précipitations les plus abondantes sont enregistrées en été. Cela s'explique en partie par la succession des systèmes dépressionnaires, mais aussi par des systèmes orageux pouvant produire de grandes quantités de précipitations en peu de temps pendant cette saison. À l'inverse, la contribution hivernale au total annuel est la plus faible en raison des grands anticyclones qui sont responsables du temps ensoleillé, mais généralement froid, pouvant perdurer pendant plusieurs jours. Dans une moindre mesure, la pluviométrie de l'automne ressemble à celle de l'été, tandis que le printemps se comporte un peu plus comme l'hiver. La région du golfe présente les plus faibles variations saisonnières, les hauteurs de précipitations printanières y étant à peine plus faibles que pendant le reste de l'année. Les cartes des précipitations totales saisonnières observées (figure A.3 de l'annexe A) illustrent comment les valeurs présentées dans le tableau 1-4 se répartissent sur le territoire.

Les accumulations annuelles de précipitations varient sensiblement d'une année à l'autre, ce que montre les points reliés par la courbe noire de la figure 1-8. Pour démontrer la plus ou moins grande dispersion des valeurs de hauteurs de précipitations d'une année à l'autre, on exprime statistiquement cette variabilité par l'écart-type interannuel des cumuls annuels ou saisonniers présentés à la troisième colonne du tableau 1-4. On note que la variation interannuelle des précipitations totales annuelles diffère légèrement selon les régions, mais surtout que l'écart-type interannuel est dans tous les cas plus élevé pour n'importe quels cumuls saisonniers que pour le cumul de l'année entière. L'examen détaillé du tableau nous révèle également que le Nord du Québec présente à la fois les plus fortes variabilités interannuelles des précipitations saisonnières et les plus forts contrastes entre les saisons. Le Centre du Québec connaît le même genre de saisonnalité, mais avec des niveaux de variabilité plus faibles couvrant une plage plus restreinte. La variabilité interannuelle des précipitations est sensiblement la même, peu importe la saison dans la région du golfe. Quant au Sud du Québec, la variabilité interannuelle est plus élevée au printemps et diminue en été.

1.3.1.2 Les tendances historiques observées

L'évolution observée des précipitations totales (points reliés par la courbe noire sur la figure 1-8 ainsi que sur les figures B.5 à B.8 de l'annexe B) montre des fluctuations sur une variété d'échelles temporelles : c'est que l'on appelle la variabilité naturelle. Concrètement, cela veut dire que, pendant quelques années consécutives, la tendance des précipitations pourrait temporairement être contraire à la tendance à long terme. Puisqu'il pourrait y avoir des fluctuations décennales, il est inapproprié d'extrapoler à de longues périodes des tendances évaluées sur de courtes périodes. De même, les tendances observées à court terme ne doivent pas être utilisées pour inférer les tendances à long terme. À une échelle plus locale, les tendances observées sur la période 1950-2011 ont été calculées pour plusieurs stations météorologiques du Québec par Mekis et Vincent (2011) à partir

5 On utilise également les termes « cumul des précipitations » ou « hauteur des précipitations ».

Tableau 1-4 Sommaire des valeurs observées 1971-2000 (CRU 3.21 TS) et changements relatifs projetés des précipitations totales pour les quatre régions d'intérêt pour l'horizon 2020 (2011 à 2040), l'horizon 2050 (2041 à 2070) et l'horizon 2080 (2071 à 2100). Les changements sont présentés pour les saisons : annuel (ANN); décembre, janvier, février (DJF); mars, avril, mai (MAM); juin, juillet, août (JJA); et septembre, octobre, novembre (SON). L'intervalle dans les Δ indique les 10^e et 90^e percentiles des simulations climatiques (n = 33 RCP 4.5; n = 29 RCP 8.5 de CMIP5). Voir tableau D.1 (Annexe D) pour la liste des simulations CMIP5.

Δ Précipitations totales CMIP5									
Région	Saison	Observations 1971-2000		horizon 2020 (%)		horizon 2050 (%)		horizon 2080(%)	
		μ (mm)	σ (%)	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Sud	ANN	1054	8	+2 à +7	+0 à +7	+3 à +11	+5 à +14	+3 à +14	+5 à +20
	DJF	228	16	+0 à +15	+1 à +17	+2 à +22	+5 à +27	+5 à +24	+7 à +36
	MAM	246	19	+0 à +11	-2 à +10	+3 à +17	+7 à +18	+1 à +18	+11 à +25
	JJA	296	12	-2 à +10	-3 à +8	-1 à +9	-5 à +10	-4 à +12	-10 à +11
	SON	284	16	-3 à +10	-7 à +8	-2 à +13	-2 à +14	-2 à +13	-5 à +19
Centre	ANN	910	6	+3 à +9	+3 à +9	+6 à +12	+9 à +17	+7 à +16	+13 à +26
	DJF	164	15	+3 à +15	+2 à +16	+7 à +25	+13 à +34	+7 à +32	+23 à +45
	MAM	180	15	+2 à +12	+3 à +12	+3 à +16	+6 à +23	+6 à +20	+12 à +34
	JJA	299	10	-1 à +9	-1 à +8	+1 à +11	+0 à +15	+2 à +15	-2 à +15
	SON	268	12	-1 à +11	-0 à +9	+5 à +13	+6 à +19	+3 à +16	+8 à +27
Golfe	ANN	1254	8	+1 à +7	+2 à +8	+2 à +12	+5 à +13	+3 à +11	+7 à +18
	DJF	323	13	-0 à +10	+1 à +10	+2 à +17	+5 à +20	+3 à +19	+7 à +30
	MAM	292	15	-0 à +9	-0 à +10	+2 à +13	+5 à +17	+2 à +15	+9 à +23
	JJA	300	13	-1 à +9	-2 à +9	-1 à +15	-3 à +16	-3 à +17	-2 à +21
	SON	339	14	-0 à +8	-3 à +7	-2 à +9	-1 à +11	-4 à +10	-1 à +16
Nord	ANN	578	11	+1 à +11	+2 à +12	+6 à +17	+9 à +22	+6 à +21	+17 à +37
	DJF	92	26	+3 à +24	+1 à +25	+4 à +37	+13 à +48	+3 à +49	+26 à +79
	MAM	97	21	+0 à +17	+2 à +14	+1 à +23	+4 à +30	+2 à +28	+10 à +50
	JJA	206	15	-3 à +12	-3 à +13	+1 à +15	+4 à +21	+0 à +18	+2 à +27
	SON	183	16	+0 à +17	-0 à +14	+6 à +21	+5 à +27	+5 à +26	+15 à +42

des DCCA. Les tendances des précipitations totales⁶ annuelles sont présentées à la figure 1-9, tandis que les figures C.2a-d de l'annexe C montrent les tendances des précipitations saisonnières. Une tendance est significative lorsque l'on peut établir, à l'aide de tests statistiques, qu'elle se démarque de la variabilité naturelle.

Malheureusement, seulement deux stations dans le Nord du Québec présentaient un historique suffisamment long pour faire partie de cette base de DCCA, soit Kuujuaq et Kuujuarapik. Toujours selon les figures 1-9 et C.2a-d, le secteur de Kuujuaq présente des tendances à la hausse pour toute l'année tant pour la pluie que pour les chutes de neige, bien que ces tendances ne soient statistiquement significatives que pour la pluie

⁶ Les précipitations totales incluent celles qui tombent sous forme de neige. Les tendances pour les précipitations sous forme de pluie et de neige prises séparément sont présentées dans les figures 10 et 11 de Mekis et Vincent (2011), mais pour la période 1950-2009.

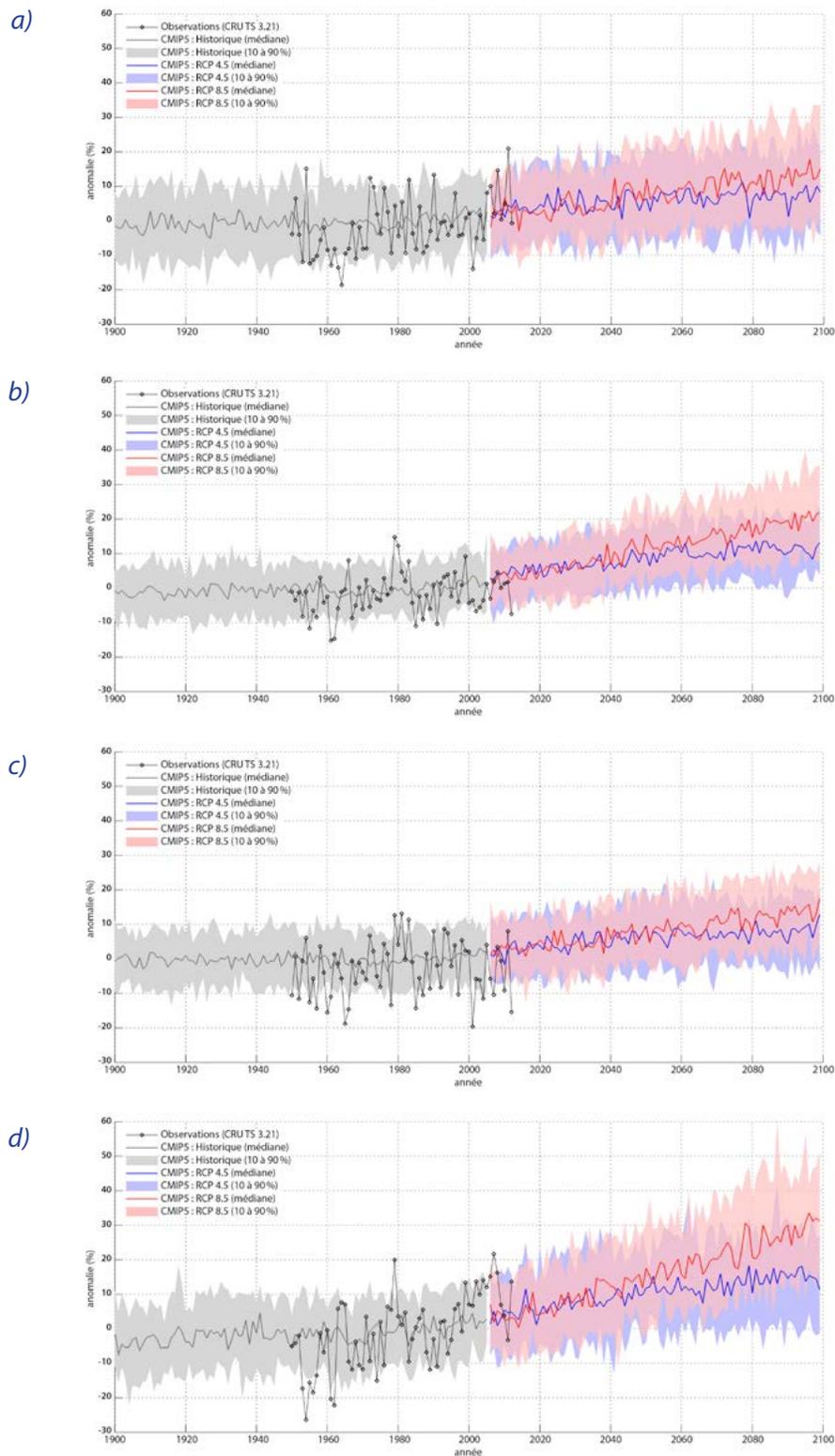


Figure 1-8 Évolution des anomalies (%) des précipitations totales annuelles observées (1950-2012) et simulées (1900-2100), pour la période historique (gris) et selon les RCP4.5 (bleu; n = 33) et RCP8.5 (rouge; n = 29). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne 1971-2000 et sont présentées pour les quatre sous-régions du Québec a) Sud b) Centre c) golfe et d) Nord. Les résultats saisonniers sont présentés dans les figures B.5 à B.8 (annexe B). Voir tableau D.1 (Annexe D) pour la liste des simulations CMIP5.

Précipitations totales (ANN) : Tendence observée 1950 à 2011

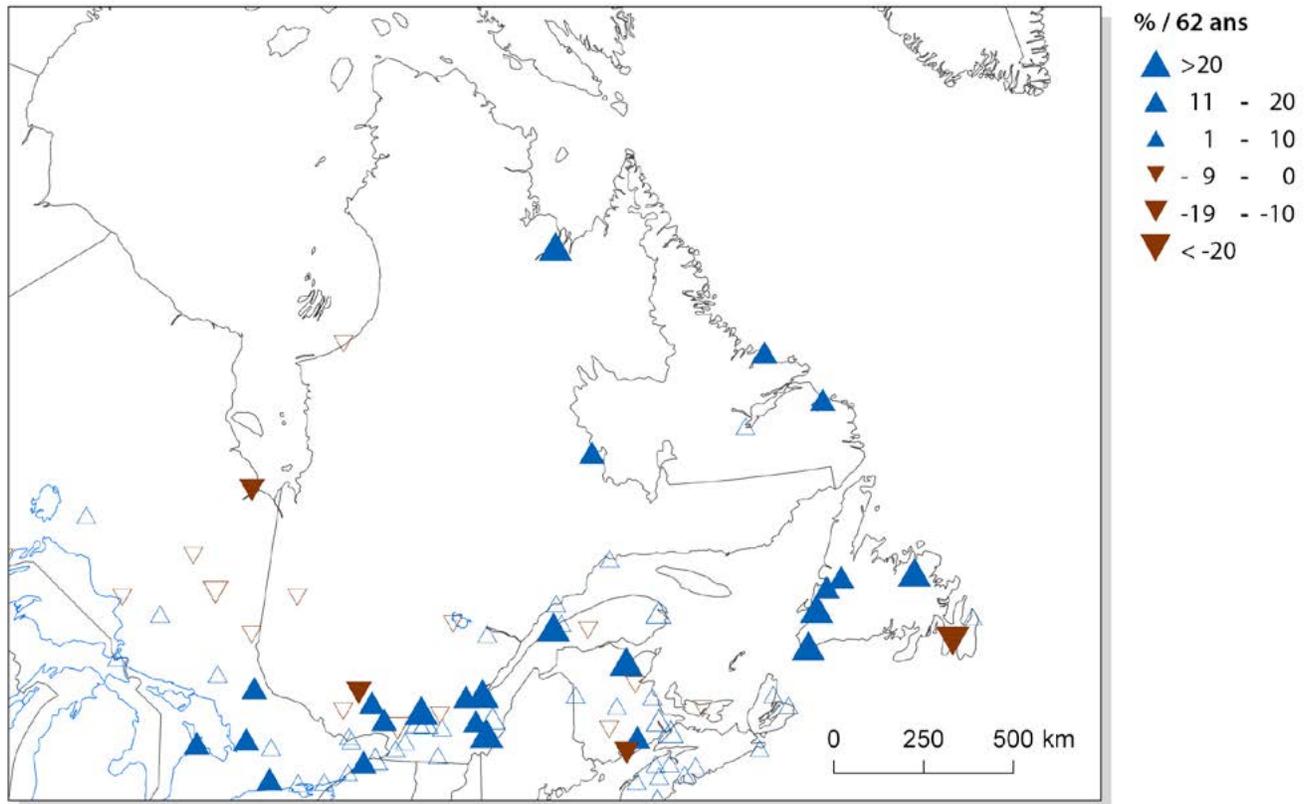


Figure 1-9 Tendances observées des précipitations annuelles totales pour la période 1950 – 2011 pour les données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées d'Environnement Canada (DCCA; Mekis et Vincent (2011)). Les triangles vers le haut (bleu) et vers le bas (brun) indiquent des tendances à la hausse et à la baisse respectivement. Les triangles pleins correspondent aux tendances significatives ($\alpha = 0.05$). Les tendances et les niveaux de signifiante statistique sont calculés selon la méthodologie de Mekis et Vincent (2011). Les cartes de tendances saisonnières sont présentées à la figure C.2 (Annexe C). Source : Ouranos (T. Logan)

d'été et d'automne. La situation diffère du côté de Kuujuarapik où il n'y a pas de tendance significative. On note une tendance non significative à la hausse pour de la pluie automnale ainsi que des chutes de neige aussi à la hausse pour cette même saison (voir les figures 10 et 11 de Mekis et Vincent (2011)). Cette région se caractérise par une faible tendance à la baisse des précipitations en été et des précipitations printanières à la hausse qui sont de plus en plus sous forme de pluie plutôt que sous forme de neige. Mis à part pour la pluie printanière qui est en augmentation, on trouve très peu de tendances significatives pour les stations se trouvant dans le Centre du Québec. Les précipitations y sont aussi en hausse en automne, mais on y retrouve un mélange de tendances à la hausse et à la baisse en été. Pour les stations de la région du golfe du Saint-Laurent, bien qu'elles soient pour la plupart non significatives, les tendances sont à la hausse en automne et au printemps; ces dernières montrent toutefois des tendances à la baisse en été et pour les chutes de neige hivernales. C'est dans le Sud du Québec que l'on retrouve le plus de tendances historiques significatives au Québec, notamment des tendances à la hausse pour la pluie printanière et automnale, tout comme pour certaines stations en été. La tendance à la baisse des précipitations sous forme de neige est aussi significative pour plusieurs stations du Sud.

Tableau 1-5 Tendances historiques pour divers indices de précipitations abondantes ou extrêmes pour la période 1950-2010.

Indices	Méthode de calcul	Sud du Qc	Golfe St-Laurent	Centre du Qc (moitié sud de la région)
L'indice simple de l'intensité quotidienne des précipitations (SDII).	Dérivé en divisant l'accumulation annuelle totale par le nombre de jour dont les précipitations excèdent 1mm	<ul style="list-style-type: none"> Tendance non significative à la baisse Tendance non significative à la hausse pour l'extrême sud 	Tendance non significative à la baisse	Tendance non significative à la baisse
Le nombre de jours de pluie abondante, (R10mm)	Comptabiliser le nombre de jours dont l'accumulation quotidienne excède 10 mm	Tendance non significative à la hausse	Tendance non significative à la hausse	Tendance non significative à la hausse
La quantité de précipitations provenant des jours les plus pluvieux (R95p)	la quantité de précipitations provenant des jours dont les accumulations quotidiennes dépassent le 95ième percentile (R95p) de la distribution locale des précipitations	Tendance significative à la hausse	Non disponible	Tendance non significative à la baisse
La contribution des jours les plus pluvieux à l'accumulation totale annuelle (R95pTOT)	Ratio de la quantité de précipitation des jours les plus pluvieux (R95) sur l'accumulation annuelle totale	<ul style="list-style-type: none"> Tendance non significative à la baisse Tendance non significative à la hausse pour l'extrême sud 	Tendance non significative à la baisse	Tendance non significative à la baisse
L'intensité des épisodes de longue durée est déterminée à partir des cinq jours consécutifs les plus pluvieux (Rx5day)		<ul style="list-style-type: none"> DJF: tendance non significative à la hausse pour l'extrême sud ; non significative à la baisse ailleurs MAM: tendance non significative à la hausse JJA: tendance non significative à la hausse SON: tendance à la hausse, significative sur l'extrême sud seulement 	<ul style="list-style-type: none"> DJF: tendance non significative à la baisse MAM: tendance non significative à la hausse JJA: tendance non significative à la hausse SON: tendance non significative à la hausse 	<ul style="list-style-type: none"> DJF: tendance non significative à la baisse MAM: tendance non significative à la hausse JJA: tendance non significative à la baisse SON: tendance non significative à la hausse

Source : adapté des résultats de Donat et al. (2013) qui ne sont pas disponibles pour le nord du Québec et la moitié nord de la région du centre du Québec. L'indice R95p calculé à partir des mêmes données mais par Hartmann et al. 2013 (IPCC AR5 Chapitre 2).

D'autres calculs de tendances de précipitations sont disponibles sur l'Atlas agroclimatique du Québec (<http://www.agrometeo.org/index.php/atlas>). Pour répondre aux besoins en agriculture, l'atlas se concentre sur divers indices dont le cumul des précipitations d'avril à octobre pour les stations situées sur le territoire agricole québécois. Ces tendances ont été calculées sur des périodes qui varient d'un endroit à l'autre en fonction de l'historique de la station, mais elles se terminent toutes en 2003. Les résultats peuvent donc différer par rapport à Mekis et Vincent (2011), mais on note tout de même que plusieurs stations du Sud du Québec montrent des tendances significatives à la hausse du cumul de pluie en avril-octobre, ce qui concorde avec les résultats de Mekis et Vincent (2011) pour le printemps, l'été et l'automne.

Dans plusieurs sphères de la société, de nombreux décideurs et gestionnaires surveillent de près les épisodes de précipitations abondantes et extrêmes en raison de leur fort potentiel à entraîner des conséquences négatives pour beaucoup de systèmes. Or, depuis quelques années, bien des gens ont l'impression que le Québec est plus exposé qu'avant aux événements extrêmes de précipitations. Cette impression est fondée, du moins pour l'extrême sud du Québec, sur les analyses réalisées par Donat *et al.* (2013) à partir de données qui couvrent la moitié-sud du Québec. Il est donc possible de caractériser différents aspects des événements extrêmes de précipitations en examinant plusieurs indices. Les définitions et les résultats par régions pour les indices les plus usuels et surtout fréquemment demandés par les usagers sont détaillés dans le tableau 1-5 pour la période 1950-2010. On peut constater que les quantités de précipitations des jours les plus pluvieux (R95p) présentent une tendance à la hausse. La quantité maximale de précipitations lors d'un épisode de cinq jours consécutifs est un indice particulièrement important pour les risques d'inondation. Cet indice montre aussi une tendance significative à la hausse pendant l'automne. Pour les autres indices, de même que pour les autres régions, les tendances sont généralement faibles et non significatives.

1.3.2 Les projections et les scénarios climatiques

Faits saillants

- *Partout au Québec, les modèles climatiques s'accordent sur des hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations.*
- *Pour le Nord et le Centre du Québec, les modèles s'accordent aussi sur des augmentations, mais plus modestes, des précipitations en été et en automne.*
- *Le consensus entre les modèles est différent pour le Sud du Québec et le golfe du Saint-Laurent. Les plages de valeurs de changements attendus pour ces deux régions en été et en automne montrent que certains modèles climatiques projettent de faibles diminutions des cumuls de précipitations, tandis que d'autres projettent de faibles augmentations.*
- *Les périodes de retour des maximums annuels du cumul quotidien de précipitations seraient raccourcies de façon significative. En effet, un maximum annuel dont la période de retour est de 20 ans sur l'horizon 1986-2005 pourrait survenir plus fréquemment vers 2046-2065 avec une période de retour autour de 7 à 10 ans, et ce, pour l'ensemble du Québec.*
- *Toutes les régions du Québec peuvent s'attendre à des augmentations de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les durées et pour toutes les périodes de retour.*
- *On s'attend à des hausses significatives pour tous les indices de précipitations abondantes et extrêmes, et ce, pour toutes les régions du Québec. Les augmentations seront généralement plus substantielles dans le Nord que dans le Sud. Le Québec fait partie des endroits dans le monde où il existe un fort consensus parmi les modèles.*

Parmi les principales conséquences du réchauffement climatique sur les régimes de précipitations, il y a sans contredit le fait que l'air plus chaud peut contenir plus d'humidité et que la quantité de vapeur d'eau transportée des tropiques vers les latitudes plus élevées est augmentée de façon notable. Ce transport d'eau contribue à diminuer les précipitations dans les zones plus sèches, comme dans beaucoup de régions subtropicales, et à les augmenter dans les régions déjà humides comme le Québec (Held et Soden, 2006; Walsh *et al.*, 2014). Par endroits, ce phénomène pourrait être amplifié ou atténué par des changements locaux d'évaporation de surface ou de la circulation atmosphérique. En fin de compte, on s'attend, à l'échelle mondiale, à un contraste accru entre régions sèches et régions humides, de même qu'entre saisons sèches et saisons humides. D'ailleurs, la zone de transition entre ces deux régimes de précipitations bouge au gré des saisons. En Amérique du Nord, elle se trouve au sud des États-Unis en hiver et se déplace vers le sud du Canada en été (Walsh *et al.*, 2014). Les paragraphes qui suivent décrivent plus en détail les changements de précipitations attendus sur le territoire québécois.

L'examen, tant des cartes de projections des précipitations annuelles totales de la figure 1-7 que des cartes saisonnières présentées à la figure A.3 de l'annexe A, permet de constater que la répartition géographique des précipitations annuelles totales reste sensiblement la même en climat futur, si ce n'est que les quantités de précipitations sont décalées vers des valeurs plus élevées pour le scénario RCP8.5. Toutefois, les cartes des projections de précipitations estivales et printanières pour le 10^e percentile (figure A.3 b-c de l'annexe A) montrent que quelques modèles se distinguent du reste de l'ensemble en projetant de faibles réductions des précipitations, surtout dans le Sud du Québec. Cet aspect sera approfondi plus loin. Le contraste nord-sud dans la répartition des précipitations, bien présent dans le climat récent, subsistera en climat futur, mais sera atténué par des hausses de précipitations qui seront plus fortes dans le nord que dans le sud, comme le montrent la plupart des cartes (figures 1.3.1 et A.3).

Les hausses de précipitations sur la majeure partie du territoire québécois se confirment à partir des courbes d'évolution des précipitations totales annuelles de la figure 1-8. Fait notable, les deux scénarios de gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5 donnent des résultats très semblables pour la première moitié du 21^e siècle. Dans la seconde moitié, le scénario RCP8.5 conduit à des augmentations de précipitations plus importantes que le scénario RCP4.5. Les tendances à la hausse et les écarts entre les deux RCP sont les plus marqués dans le Nord du Québec. Cette différence diminue au fur et à mesure que l'on se déplace vers le sud. Les graphiques d'évolution des cumuls saisonniers de précipitations confirment la plupart de ces résultats. Toutes les régions peuvent s'attendre à des hausses de quantités de précipitations en hiver et au printemps. Ce sera aussi le cas en été et en automne pour le Nord et le Centre du Québec. Les tendances sont très faibles pour le Sud du Québec et la région du golfe en été et en automne, et l'on ne voit presque aucune différence entre les deux RCP. La région du golfe présente les valeurs de tendances les plus uniformes, peu importe la saison ou le scénario RCP dans tout le Québec.

Le tableau 1-4 met plutôt l'accent sur les valeurs de changement des précipitations plutôt que sur les quantités totales futures. Cela permet de tirer les mêmes conclusions qu'avec les courbes d'évolution, mais la vue quantitative facilite les comparaisons saisonnières et régionales. Partout au Québec, les modèles climatiques s'accordent sur des hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations. Pour le Nord et le Centre du Québec, les modèles s'accordent aussi sur des augmentations plus modestes des précipitations en été et en automne. La situation diffère toutefois pour le Sud du Québec et le golfe du Saint-Laurent. Les plages de valeurs des changements attendus pour ces deux régions en été et en automne montrent que certains modèles climatiques projettent de faibles diminutions des cumuls de précipitations, tandis que d'autres projettent de faibles augmentations. Le fait que les modèles ne s'accordent pas tous sur la direction du changement ne veut

pas dire que ceux-ci sont inadéquats quant à cet aspect du climat. Cela tient plutôt du fait l'expansion de la zone subtropicale (Christensen *et al.*, 2013; Collins *et al.*, 2013) déplace la région de transition entre les climats qui s'assècheront de ceux qui seront plus humides et que cette transition se situe près du Sud du Québec en été. Les modèles climatiques globaux reproduisent bien le phénomène, mais ne placent pas tous la zone de transition exactement au même endroit. Puisque leur résolution horizontale typique est de l'ordre de 100 à 250 km, cela limite aussi la précision sur la localisation de la transition. Autrement dit, la projection à la baisse ou à la hausse des précipitations, faite par un modèle donné, dépendra de la proportion de la région du Sud du Québec qui se trouvera du côté sec ou du côté humide de la zone de transition.

Les modèles régionaux de climat permettent de réaliser des projections climatiques à plus fine résolution que les modèles globaux dont les résultats ont été discutés jusqu'à présent⁷. L'ensemble NARCCAP est constitué de 17 projections climatiques régionales à une résolution de 50 km produites par six modèles régionaux de climat alimentés aux frontières de leur grille de calcul par quatre modèles globaux de climat choisis parmi l'ensemble CMIP3. Leur résolution accrue fait en sorte qu'ils sont utilisés comme intrants dans de nombreux modèles d'impacts. Les changements de normales saisonnières des précipitations ont été analysés par Mearns *et al.* (2013) pour l'hiver et l'été. Il ressort de cette étude que pour l'ensemble du Québec, les modèles régionaux projettent des augmentations plus élevées ainsi que des baisses plus sévères dans certaines régions des États-Unis par rapport aux modèles climatiques globaux de l'ensemble CMIP3 qui les ont alimentés. Le faible nombre de modèles inclus dans l'ensemble NARCCAP fait en sorte qu'il est actuellement difficile de statuer si la résolution plus grossière des modèles globaux cause une sous-estimation du changement des précipitations sur le Québec. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour répondre à cette question.

L'une des façons d'examiner le comportement futur des précipitations extrêmes est d'étudier la quantité maximale annuelle des précipitations accumulées sur diverses durées pour différentes périodes de retour. Kharin *et al.* (2013) ont étudié le maximum annuel de la précipitation quotidienne en se basant sur les projections de CMIP5 qui tiennent compte du RCP4.5. Selon cette étude, les quantités de précipitations pouvant tomber pendant 24 heures avec une période de retour de 20 ans seront de 10 à 20 % plus élevées pour l'ensemble du Québec. Kharin *et al.* (2013) proposent une autre façon de voir le changement dans les maximums annuels de la précipitation quotidienne. Selon leur analyse, un maximum annuel du cumul quotidien de précipitations, qui sur l'horizon 1986-2005 a une période de retour de 20 ans, pourrait survenir plus fréquemment vers 2046-2065 avec une période de retour significativement plus courte qui serait autour de 7 à 10 ans pour l'ensemble du Québec. Mailhot *et al.*, (2012) ont obtenu des résultats semblables en basant leurs analyses sur les données NARCCAP. Ils ont comparé le comportement des précipitations extrêmes annuelles pour diverses durées (6, 12, 24, et 120 heures) et pour différentes périodes de retour (2, 5, 10 et 20 ans) entre les années 2041-2070 et 1971-2000. De façon générale, il en ressort que toutes les régions du Québec peuvent s'attendre à des augmentations de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les durées et pour toutes les périodes de retour : de 10-22 % dans le Sud, de 4-16 % pour le golfe du Saint-Laurent, de 12-22 % pour le Centre et de 9-16 % pour le Nord du Québec. Les augmentations de précipitations pour des durées de 6 heures sont compatibles avec l'augmentation projetée des orages (voir la section 1.3.3.1).

Les analyses effectuées par Sillmann *et al.* (2013a) sur l'ensemble de projections CMIP5 concluent également à une augmentation projetée des événements extrêmes de précipitations pour l'horizon 2081-2100 par rapport à 1981-2000. Les résultats de cette étude portant sur plusieurs indices de précipitations abondantes et extrêmes ont été colligés pour les régions du Québec au tableau 1-6. Le tableau fait ressortir que les changements

⁷ L'article de Roy *et al.* (2014), ainsi que les références qui y sont citées, expliquent les raisons qui motivent l'usage des modèles régionaux de climat.

Tableau 1-6 Projections climatiques de l'ensemble des simulations CMIP5 pour des indices de précipitations totales de même qu'abondantes et extrêmes colligées à partir des figures 12,13 (Sillmann et al., 2013a) et S4 (Sillmann et al., 2013b) de pour la période 2081-2100 par rapport à 1981-2000. Tous les résultats présentés dans le tableau sont significatifs à un degré de 5 %.

Indices	Méthode de calcul	Sud du Qc	Golfe St-Laurent	Centre du Qc	Nord du QC
PRCPTOT	Accumulation totale provenant des jours de précipitation c.-à-d. dont le cumul quotidien dépasse 0.1 mm	↑ 5-15% RCP4.5 ↑ 5-15% RCP8.5	↑ 5-15% RCP4.5 ↑ 15-30% RCP8.5	↑ 5-15% RCP4.5 ↑ 15-30% RCP8.5	↑ 15-30% RCP4.5 ↑ 30-45% RCP4.5
Quantité de précipitations provenant des jours les plus pluvieux (R95p)	La quantité de précipitations provenant des jours dont les accumulations quotidiennes dépassent le 95ième percentile (R95p) de la distribution locale des précipitations	↑ 20-40% RCP4.5 ↑ 40-70% RCP8.5	↑ 40-70% RCP4.5 ↑ 70-100% RCP8.5	↑ 40-70% RCP4.5 ↑ 40-70% RCP8.5	↑ 40-70% RCP4.5 ↑ 70-100% RCP8.5
La contribution des jours les plus pluvieux à l'accumulation totale annuelle (R95pTOT)	Ration de la quantité de précipitation des jours les plus pluvieux (R95) sur l'accumulation annuelle totale.	↑ 4-6% RCP4.5 ↑ 8-10% RCP8.5	↑ 4-6% RCP4.5 ↑ 10-12% RCP8.5	↑ 4-6% RCP4.5 ↑ 8-12% RCP8.5	↑ 4-6% RCP4.5 ↑ 6-12% RCP8.5
Le nombre de jours de pluie abondante, (R10mm)	Comptabiliser le nombre de jours dont l'accumulation quotidienne excède 10 mm	↑ 0,5-2 jours RCP4.5 ↑ 4-6 jours RCP8.5	↑ 2-4 jours RCP4.5 ↑ 4-6 jours RCP8.5	↑ 4-6 jours RCP4.5 ↑ 6-10 jours RCP8.5	↑ 2-4 jours RCP4.5 ↑ 4-8 jours RCP8.5
L'intensité des épisodes de longue durée est déterminée à partir des cinq jours consécutifs les plus pluvieux (Rx5day)		↑ 10-15% RCP4.5 ↑ 15-25% RCP8.5	↑ 10-15% RCP4.5 ↑ 15-25% RCP8.5	↑ 5-15% RCP4.5 ↑ 15-25% RCP8.5	↑ 5-15% RCP4.5 ↑ 15-25% RCP8.5 ↑ 25-35% (RCP8.5) le long de la côte de la Baie James jusqu'aux environs d'Inukjuak

attendus sont significatifs pour tous les indices et pour toutes les régions du Québec, et que les augmentations seront généralement plus substantielles dans le Nord que dans le Sud. Les quantités de précipitations produites lors des jours les plus pluvieux connaîtront d'impressionnantes hausses pouvant atteindre jusqu'à 40-70 % dans le Sud et le Centre du Québec, et jusqu'à 70-100 % pour le Golfe et le Nord du Québec pour le scénario RCP8.5. Les changements de précipitations seront plus importants pour les événements extrêmes que pour les normales. Par conséquent, les jours les plus pluvieux contribueront davantage à la distribution totale des précipitations que dans le passé récent. Le nombre de jours de précipitations abondantes (excédant 10 mm) sera aussi en augmentation pour toutes les régions de même que l'intensité des épisodes de longues durées. Bien que d'autres régions du monde appréhendent des augmentations des événements extrêmes, le Québec fait partie des endroits dans le monde où il existe un fort consensus parmi les modèles (Sillmann et al., 2013a).

1.3.3 Processus et phénomènes liés aux précipitations

1.3.3.1 Les orages, les tornades et la foudre

Faits saillants

- On projette une hausse de la fréquence des événements de précipitations convectives tels que les orages. Ces derniers produiraient des quantités de précipitations de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'on s'approche de l'année 2100. Ces études sont basées sur de petits nombres de modèles ou de projections climatiques, ce qui ne permet pas pour l'instant d'établir un niveau de confiance pour l'augmentation des orages.
- Il n'est pas encore possible de se prononcer sur le comportement de la foudre en climat futur. En effet, les connaissances sur plusieurs processus sont encore limitées, et leur prise en compte dans les modèles climatiques doit être grandement améliorée. De plus, les aérosols influencent la formation de la foudre, mais le niveau de confiance est très faible quant à leur évolution.

Les processus convectifs sont à l'origine de phénomènes générateurs d'événements extrêmes ayant un fort potentiel de dommages. Par exemple, la convection profonde est à l'origine des forts mouvements ascendants responsables de la formation rapide de nuages pouvant produire de grandes quantités de précipitations. Ces mouvements verticaux favorisent le déplacement de charges électriques dans le nuage; la foudre est ainsi créée et libère une grande quantité d'énergie, ce qui est caractéristique des orages. Dans des nuages d'orages particulièrement intenses, des mouvements de rotation peuvent s'enclencher et produire des tornades. C'est pourquoi l'amélioration des connaissances sur le comportement futur des processus convectifs est un enjeu scientifique majeur en climatologie.

L'étude du rôle des processus convectifs dans le climat futur nécessite l'examen de l'évolution projetée de deux facteurs cruciaux pour la convection. Le premier concerne la capacité d'une parcelle d'air à se soulever. Le soulèvement d'une parcelle d'air est facilité lorsqu'elle devient plus chaude et plus humide que son environnement. Cette aisance est en fonction de l'énergie convective potentielle disponible de la parcelle. Le deuxième facteur est la variation du vent selon l'altitude, appelé cisaillement vertical du vent. L'augmentation du cisaillement dans les six premiers kilomètres de l'atmosphère à partir de la surface favorise la convection. D'après l'étude réalisée par Paquin *et al.* (2014) à l'aide du MRCC4, on s'attend à une augmentation de l'énergie convective potentielle disponible, induite principalement par l'augmentation du gradient d'humidité dans l'air, sur l'ensemble du territoire québécois. Cette augmentation compensera la diminution significative du cisaillement vertical causée indirectement par un plus faible contraste nord-sud des températures de l'hémisphère Nord. En fin de compte, il en résulte une tendance à la hausse de la fréquence des événements de précipitations convectives, c.-à-d. des orages. Ces derniers produiraient des quantités de précipitations de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'on s'approche de l'année 2100. Guinard *et al.* (2014) se basent sur une autre technique pour arriver à des conclusions similaires : ils analysent les caractéristiques géométriques des structures de précipitations du MRCC4 ainsi que le volume et l'intensité des précipitations qu'elles produisent. Ils concluent que pour les régions correspondant au Sud du Québec et au golfe du Saint-Laurent, les structures de précipitations seront plus hétérogènes et plus intenses, ce qui sous-entend une augmentation de la convection. D'autres études répertoriées par le GIEC (Collins *et al.*, 2013) et réalisées dans d'autres régions du monde suggèrent également un climat futur plus favorable aux orages violents. À l'instar de Paquin *et al.* (2014) et Guinard *et al.* (2014), ces études sont cependant basées sur de petits nombres de modèles ou de projections climatiques, ce qui limite le niveau de confiance quant à l'augmentation des orages dans le futur. Le fait que la résolution des modèles climatiques n'est pas encore assez fine par rapport à la taille typique des orages contribue aussi à l'incertitude.

D'après une analyse des rapports historiques de tornades réalisée par Brooks (2013), les tornades se forment majoritairement dans des orages qui se distinguent par un fort cisaillement vertical du vent et une énergie convective potentielle disponible élevée. Le fort cisaillement contribue à amorcer et à maintenir les mouvements de rotation. Le nombre de tornades varie fortement d'une année à l'autre ce qui rend difficile l'identification d'une tendance historique, particulièrement pour nos régions où elles sont peu nombreuses. Dans le futur, advenant une confirmation de la tendance à la baisse du cisaillement vertical du vent (Paquin et al., 2014), cela pourrait impliquer que l'augmentation projetée des orages ne se traduirait pas nécessairement par une augmentation des tornades au Québec. Des recherches supplémentaires basées sur des modèles climatiques à plus haute résolution sont nécessaires pour avoir un meilleur portrait de l'évolution possible du nombre de tornades.

L'électrification d'un nuage d'orage qui précède le déclenchement de la foudre repose principalement sur deux catégories de processus qui sont décrits dans la revue de littérature de Price (2013). Les premiers sont responsables de la formation des divers types de précipitations (processus microphysiques), tandis que les seconds favorisent les forts mouvements verticaux (processus dynamiques). Lorsqu'un nuage d'orage est suffisamment froid pour contenir simultanément de la glace, des gouttelettes et de la vapeur, des mécanismes complexes -et parfois méconnus- interagissent pour former rapidement un éventail de particules glacées de tailles variées, allant des fins cristaux de glace jusqu'aux grêlons. Les collisions entre les diverses particules leur font acquérir une charge électrique. Les plus petites, comme les cristaux, acquièrent une charge positive et restent dans le haut du nuage, tandis que les plus lourdes, chargées négativement comme les grêlons, descendent à la base du nuage. Cette séparation des charges produit un éclair. De très forts mouvements verticaux, et par conséquent des valeurs d'énergie convective potentielle disponibles élevées, favorisent les collisions, et par le fait même, l'électrification du nuage. L'abondance d'aérosols, peu importe s'ils sont de source naturelle ou anthropique, dans l'air semble plutôt nuire à l'électrification des nuages pour deux raisons principales : (1) il en résulte des nuages contenant des particules de glace et des gouttelettes plus nombreuses, mais de plus petites tailles ce qui défavorise la séparation des charges, (2) les aérosols modifient aussi le profil vertical de température de façon à ralentir les mouvements verticaux. Malheureusement, il n'est pas encore possible de se prononcer sur le comportement de la foudre en climat futur. En effet, les connaissances de plusieurs processus sont encore limitées. Les paramétrages de la microphysique des nuages et de la convection profonde dans les modèles climatiques doivent être grandement améliorés. Finalement, le niveau de confiance est très faible par rapport à l'évolution des aérosols.

1.3.3.2 Le verglas

Fait saillant

- *La compréhension des conditions météorologiques propices à la formation du verglas a beaucoup progressé, mais nous ne savons pas encore si le nombre, la durée et l'intensité des épisodes de verglas changeront au Québec dans les décennies à venir.*

La vallée du Saint-Laurent compte annuellement un plus grand nombre d'épisodes de verglas que toute autre région de l'Amérique du Nord. Sa morphologie et son orientation font en sorte que la longueur et l'intensité des épisodes sont aussi plus élevées qu'ailleurs (Ressler *et al.*, 2012). Le verglas se forme lorsque les précipitations parcourent une couche d'air suffisamment épaisse et chaude⁸ pour les faire fondre complètement ou les garder sous forme liquide avant de traverser une mince couche d'air froid⁹ située près de la surface. Dès qu'elle entre en contact avec le sol ou toute autre structure dont la température est inférieure à 0 °C, la pluie se transforme instantanément en glace. Les mois de novembre à avril sont donc propices à la formation du verglas. Il n'existe pas au Canada de mesures directes des accumulations de verglas : les stations météorologiques rapportent toutes les heures l'occurrence et le type de précipitations – y compris si elles sont verglaçantes – tandis que les accumulations de verglas sont estimées à partir des accumulations de précipitations liquides qui sont disponibles à toutes les six heures. À partir de ces données observées aux stations météorologiques des aéroports Pierre-Eliot-Trudeau et Jean-Lesage, des études plus détaillées ont été réalisées par une équipe de chercheurs de McGill pour les villes de Montréal (Ressler *et al.*, 2012) et Québec (Splawinski, *et al.*, 2011, 2012).

La formation du verglas est en bonne partie contrôlée par des processus microphysiques de très fine échelle (Stewart, 1992; Thériault *et al.*, 2006), mais aussi par de grands systèmes météorologiques à l'échelle continentale pour des durées pouvant facilement excéder 48 heures. Or, si les modèles climatiques sont en mesure de simuler les grands systèmes météorologiques, leur résolution (horizontale, verticale et temporelle) est encore trop grossière pour simuler les processus microphysiques. Pour pallier l'absence de ces processus dans les modèles climatiques, il serait possible de les prendre compte en utilisant des relations empiriques comme cela se fait dans des modèles météorologiques (Bourgouin, 2000). Pour la plupart des modèles climatiques, il n'est donc pas encore possible de faire des projections de verglas en tant que tel. Ce phénomène demeure un défi tout aussi important pour les modèles de prévisions météorologiques. Heureusement, les travaux de Ressler *et al.* (2012) ainsi que de Splawinski *et al.* (2011, 2012) ont permis de déterminer les conditions météorologiques à grande échelle, tant en surface qu'en altitude, qui sont nécessaires à la formation du verglas. Leurs analyses des conditions météorologiques ont permis de classer les épisodes de verglas en trois grandes catégories possédant chacune des agencements typiques de dépressions et d'anticyclones qui favorisent la superposition des couches d'air chaud et froid dans nos régions. Les trois catégories d'agencements font en sorte que les vents sont canalisés dans la vallée du St-Laurent à cause de sa morphologie et de son orientation. Cet effet de canalisation favorise la formation et le maintien de la fine couche froide près de la surface. On voit donc qu'un épisode de verglas n'est pas que le simple résultat de températures plus chaudes et de précipitations plus abondantes : des conditions météorologiques bien particulières doivent être réunies. Le travail d'évaluation des occurrences de ces combinaisons particulières de dépressions et d'anticyclones dans les simulations climatiques historiques et futures reste à faire. Nous ne savons donc pas encore si le nombre, la durée et l'intensité des épisodes de verglas changeront au Québec dans les décennies à venir.

8 Techniquement, cette couche chaude doit avoir une température du thermomètre mouillé > 0 °C

9 La couche d'air froid doit être suffisamment mince pour que la pluie soit surfondue, c.-à-d. qu'elle demeure liquide même si l'air environnant est sous le point de congélation. Lorsque la couche d'air froid est plus épaisse, la pluie gèle pendant sa chute et forme du grésil.



1.4 La neige

Auteur : Hélène Côté (Ouranos)

Réviseur : Ross Brown (Environnement Canada, Ouranos)

Faits saillants

- *Le Québec connaît une tendance au réchauffement des températures et à l'augmentation des précipitations durant la saison froide. La façon dont le couvert de neige réagira aux tendances de ces deux variables variera selon les régions en fonction de l'altitude, du régime climatique, du type de surface et de la végétation.*

Il est facile de constater à quel point les conditions météorologiques répondent rapidement et de façon importante à l'apparition ou à la disparition du couvert de neige, mais aussi combien la présence ou l'absence de neige au sol affecte à son tour les conditions météorologiques. Cela est vrai pour la météo et ce l'est aussi pour le climat. Les propriétés réfléchissantes et isolantes de la neige influencent les interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre, tant sur le plan du bilan d'énergie que du cycle de l'eau. La neige dépend à la fois de la température et des précipitations. Or, le Québec connaît une tendance au réchauffement des températures et à l'augmentation des précipitations durant la saison froide. La façon dont le couvert de neige réagira aux tendances de ces deux variables variera selon les régions en fonction de l'altitude, du régime climatique, du type de surface et de la végétation.

L'accumulation de neige au sol est très importante dans une foule de domaines (transports, sécurité des bâtiments, hydrologie, gestion des barrages, agriculture, tourisme, etc.). Elle peut être déterminée de plusieurs façons. Dans les stations climatiques, les mesures quotidiennes de l'épaisseur de la neige sont réalisées à l'aide de règles ou de sondeurs à ultrasons. En hydrologie, et particulièrement dans le domaine de la gestion de l'eau, il est très important de connaître la quantité d'eau stockée sous forme de neige pendant l'hiver, laquelle sera disponible pour le sol et les cours d'eau lors de la fonte. Cette information est fournie par l'équivalent en eau de la neige (EEN) qui est en fait le produit de l'épaisseur du couvert par la densité de la neige. Lorsque l'épaisseur de la neige au sol atteint un certain seuil, généralement 2 cm (ou un EEN de 2 mm), on considère que ce territoire est complètement couvert de neige. Dès lors, il est possible de déterminer la durée et l'étendue du couvert de neige. À noter que d'autres seuils peuvent être utilisés selon les besoins de divers secteurs d'activité. Par exemple, la pratique du ski de fond et de la motoneige requiert un couvert de neige naturelle d'au moins 15 cm. Toutes ces variables sont importantes pour la compréhension du climat historique et des changements attendus, car ces caractéristiques du couvert de neige ne seront pas affectées de la même manière par les changements de température et de précipitations.

1.4.1 L'équivalent en eau de la neige

Faits saillants

- Le couvert de neige maximum est atteint en avril sur presque tout le Québec, à l'exception de l'extrême sud-ouest du Québec où l'équivalent en eau de la neige culmine en mars avec des quantités autour de 66 à 132 mm.
- Les tendances à long terme (1949-2004) du maximum annuel de l'équivalent en eau de la neige (EENmax) sont à la baisse dans les régions du Sud du Québec et du golfe, mais à la hausse pour le Nord ainsi qu'une grande partie du Centre du Québec. Toutefois, ces tendances ne sont significatives que pour une petite sous-région du Sud du Québec et pour la partie ouest du Nord- du Québec.

1.4.1.1 Les observations

Il existe plusieurs bases de données d'observation de la neige au sol. Certaines sont constituées de mesures in situ réalisées par divers instruments. Depuis la fin des années 1960, les mesures de neige par satellite permettent une couverture spatiale qu'un réseau de mesures au sol peut difficilement offrir, et ce, à des résolutions qui ne cessent de s'améliorer. Toutefois, obtenir des mesures satellites de qualité pour la neige dans des régions où la forêt est dense (particulièrement celles peuplées de conifères), pose encore un défi. Un bon nombre de ces bases de données disponibles pour le Québec sont décrites dans (Brown *et al.*, 2010; Brown, 2010; Langlois *et al.*, 2014).

La figure 1-10 montre la moyenne de la période 1971-2000 du maximum annuel de l'équivalent en eau de la neige (EENmax) d'après les données d'Hydro-Québec traitées selon Tapsoba *et al.* (2005). Les diverses régions du Québec atteignent leur enneigement maximum entre février et mai. Selon la carte 1971 2000, on remarque les valeurs de l'EENmax se situent entre 230 et 370 mm dans la majorité des régions montagneuses du Québec. Les cartes mensuelles d'équivalent en eau (figures A5a-d de l'annexe A) montrent que le couvert de neige maximum est atteint en avril sur presque tout le Québec, à l'exception de l'extrême sud-ouest du Québec où l'équivalent en eau de la neige culmine en mars avec des quantités autour de 66 à 132 mm. En avril, l'équivalent en eau de la neige se situe typiquement entre 186 et 315 mm sur la majeure partie du Sud et du Centre du Québec. Les terres les plus basses du Nord du Québec et du golfe du Saint-Laurent reçoivent environ de 113 à 186 mm. Il est intéressant de constater que le couvert de neige subsiste avec peu de changement jusqu'en mai dans les secteurs du Québec où le relief est plus élevé comme le démontre la figure A.5d de l'annexe A.

L'équivalent en eau maximal de la neige (EENmax) montre beaucoup de variabilité interannuelle et multidécennale sous l'influence de différents patrons de circulation comme NAO et AO¹⁰, mais cette influence est très variable sur le territoire et dans le temps (Brown, 2010). Selon la reconstruction de l'EEN par (Brown, 2010), les tendances à long terme (1949-2004) de l'EENmax sont à la baisse dans les régions du Sud du Québec et du golfe, mais à la hausse pour le Nord ainsi qu'une grande partie du Centre du Québec. Toutefois, ces tendances ne sont significatives que pour une petite sous région du Sud du Québec et pour la partie ouest du Nord du Québec.

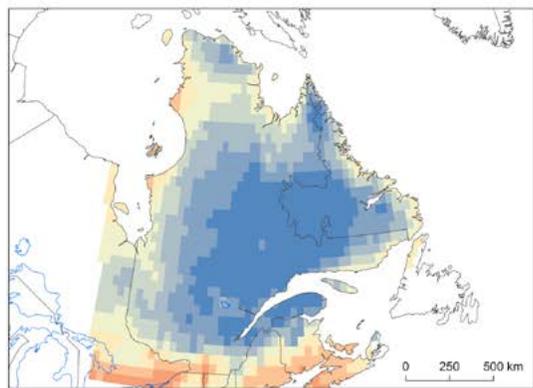
¹⁰ North Atlantic Oscillation (NAO) et Arctic Oscillation (AO) qui est parfois appelé Northern Annular Mode (NAM), sont décrits en détail dans le dernier rapport du GIEC (Christensen *et al.*, 2013; Hartmann *et al.*, 2013)

1.4.1.2 Les projections et les scénarios climatiques

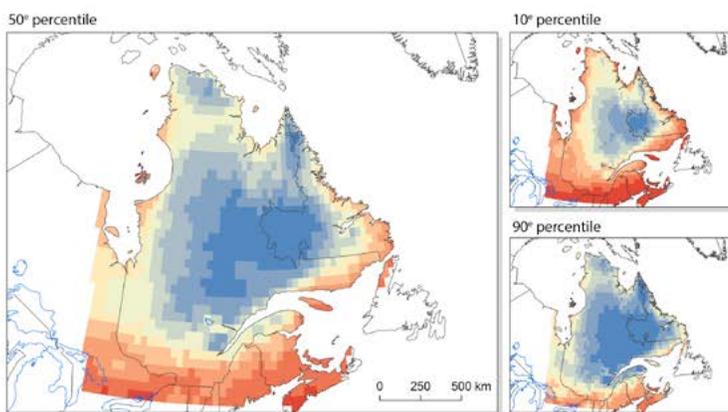
Faits saillants

- Presque tout le territoire peut s'attendre à une diminution de la neige au sol pour la période 2041-2070 (horizon 2050).
- Les changements du couvert de neige seront importants dans le Sud du Québec. L'enneigement dans le Sud du Québec atteindrait dorénavant son maximum en février et aurait une accumulation moindre que ce que l'on a connu dans la période 1971-2000.
- Les régions montagneuses du Centre du Québec verront peu de changement dans leurs conditions d'enneigement maximal selon le scénario médian, mais les terres plus basses au sud et à l'ouest peuvent s'attendre à des réductions de l'EEN d'une vingtaine de millimètres (environ 20 cm de neige). C'est d'ailleurs en mars que l'enneigement sera à son maximum, car les valeurs d'EEN d'avril connaîtront des diminutions importantes.
- Les changements les plus drastiques sont attendus vers 2041-2070 dans la région du golfe du Saint-Laurent, surtout dans les basses terres. Cela est particulièrement visible pour la Côte-Nord, mais pas pour les secteurs plus élevés de la Gaspésie.
- Le maximum de l'équivalent en eau de la neige dans le Nord du Québec change très peu pour l'horizon 2041-2070. Les diminutions de la neige au sol les plus importantes se produisent en mai, car les accumulations plus faibles typiques de ce temps de l'année sont forcément plus vulnérables aux hausses de température.

Observations : 1971 à 2000 (Hydro-Québec)



Horizon 2050 : RCP 8.5



Équivalent en eau de la neige (mm) : maximum (février à mai)

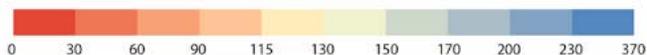


Figure 1-10 Maximum de l'équivalent en eau de la neige entre février et mai observé pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projeté (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données interpolées d'Hydro-Québec (Tapsoba et al., 2005). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 22 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (RCP8.5). Les résultats mensuels (février à mai) et pour l'horizon 2080 sont présentés dans les figures A.5 et A.6 (annexe A). Voir tableau D.2 (Annexe D) pour la liste des simulations CMIP5.

Les cartes des projections du maximum de l'équivalent en eau de la neige réalisées par les modèles climatiques de l'ensemble CMIP5 pour la période 2041-2070 (horizon 2050) et basées sur le scénario RCP8.5 sont présentées à la figure 1-10. Selon les cartes de la médiane (50^e percentile), presque tout le territoire peut s'attendre à une diminution de la neige au sol.

Les changements du couvert de neige seront importants dans le Sud du Québec. Selon les cartes A.5a-d de l'annexe A, l'équivalent en eau y diminuera de façon importante en mars. Le consensus entre les modèles est fort en avril où même les simulations se trouvant dans le 90^e percentile, c.-à-d. les EEN les plus élevés de l'ensemble, projettent des réductions importantes de la neige, ce qui n'était pas nécessairement le cas en mars. La figure A.5a de l'annexe A nous indique que l'enneigement dans le Sud du Québec atteindrait dorénavant son maximum en février et aurait une accumulation moindre que ce que l'on a connu dans la période 1971-2000. Selon la figure A.6 de l'annexe A qui présente les projections pour l'horizon 2080 (2071-2100), l'équivalent en eau sur l'ensemble du Sud du Québec serait typiquement inférieur à 20 mm dès le mois d'avril vers la fin du siècle.

La figure 1-10 montre que les régions montagneuses du Centre du Québec verront peu de changement dans leurs conditions d'enneigement maximal selon le scénario médian, mais que les terres plus basses au sud et à l'ouest peuvent s'attendre à des réductions de l'EEN d'une vingtaine de millimètres. L'examen de la figure A.5 de l'annexe A permet de réaliser qu'à l'avenir, l'enneigement sera à son maximum en mars car les valeurs de l'EEN en avril connaîtront des diminutions importantes. De plus, la figure A.5 de l'annexe A montre qu'à l'horizon 2050, les conditions d'enneigement en février ressembleront encore beaucoup à celles de la période 1971-2000, mais ce ne sera pas le cas pour le mois de mai où un couvert de neige considérablement réduit subsistera même en régions montagneuses. Si l'on regarde vers la fin du siècle les cartes de la figure A.6 de l'annexe A, elles montrent une diminution de l'enneigement dès le mois de février et qui s'accroît pour le reste de la saison. On peut alors présumer que le réchauffement de température aura atteint un point tel que les hausses de précipitations ne pourront plus contribuer au couvert de neige, signe que les chutes de neige seront plus fréquemment remplacées par de la pluie.

Les changements les plus drastiques sont attendus dans la région du golfe du Saint-Laurent, surtout dans les basses terres. Cela est particulièrement visible pour la Côte-Nord sur la figure 1-10. À l'exception des secteurs plus élevés de la Gaspésie, la plupart des secteurs auraient des conditions d'enneigement inférieures à 100 mm dès le mois de février selon la figure A.5 de l'annexe A. Le couvert de neige substantiel qui persistait jusqu'en mai aurait, pour l'horizon 2050, un équivalent en eau en deçà de 20 mm à ce moment de l'année. D'après le scénario médian (50^e percentile) la région du golfe du Saint-Laurent serait exempte de neige en mai.

Le maximum de l'équivalent en eau de la neige dans le Nord du Québec change très peu pour l'horizon 2050. Cela est particulièrement vrai au nord du cercle arctique. En examinant les cartes du 90^e percentile de la figure 1-10, on remarque que certains modèles de l'ensemble projettent même des augmentations de l'EEN. Les plus importantes diminutions de neige au sol se produisent en mai (figure A.5 de l'annexe A), car les accumulations plus faibles typiques de ce temps de l'année sont forcément plus vulnérables aux hausses de température. La figure A.6 de l'annexe A montre bien que la réduction de la neige s'aggrave vers la fin du siècle en mai, mais que les valeurs de l'EEN diminuent aussi en avril.

1.4.2 La durée de l'enneigement

Faits saillants

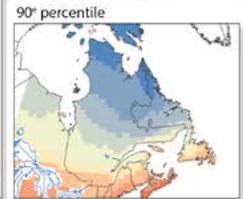
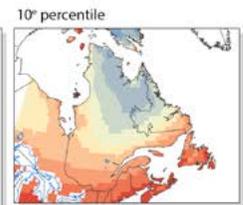
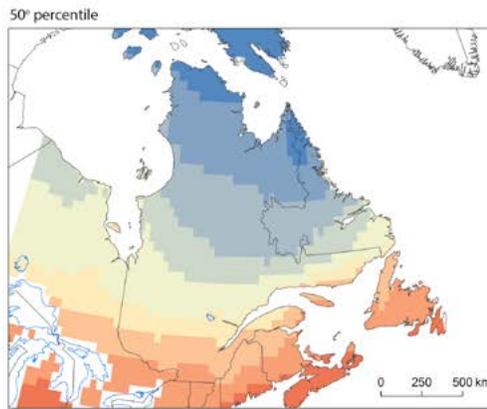
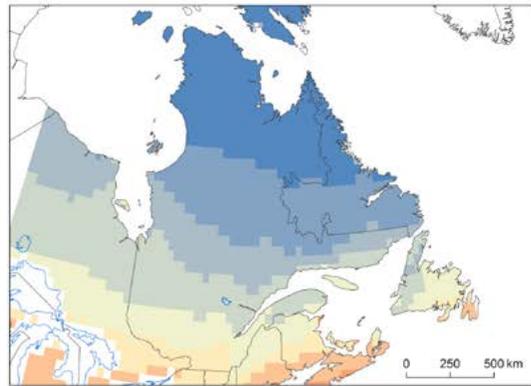
- *L'analyse de plusieurs sources de données sur la période 1948-2005 indique une réduction significative de la durée de l'enneigement d'environ 2 jours par décennies pour le Sud du Québec.*
- *Aux environs de Kuujuaq, l'enneigement survient 1-2 semaines plus tard en automne et se termine de 3-4 semaines plus tôt au printemps qu'il y a une trentaine d'années.*
- *Une évaluation préliminaire des projections des modèles climatiques de l'ensemble CMIP5 basées sur le scénario RCP8.5 suggère une réduction de la durée de l'enneigement pour la période 2041-2070 par rapport à la moyenne de 1970-1999. Les réductions médianes atteignent jusqu'à 25 jours dans le Nord du Québec, 25 à 45 jours dans le Centre, 45 à 75 jours pour le golfe du Saint-Laurent et 45 à 65 jours pour le Sud du Québec.*

La connaissance de l'étendue du couvert de neige a beaucoup progressé avec l'arrivée des satellites qui peuvent la mesurer directement avec de plus en plus de précision (Brown, 2010). Il est aussi possible de dériver cette variable à partir des mesures d'épaisseur de neige et d'équivalent en eau de la neige. Une fois que la neige au sol atteint un certain seuil (2 cm d'épaisseur ou encore 2 mm d'équivalent en eau) pour un certain nombre de jours consécutifs, il est alors possible de déterminer la durée du couvert de neige et, par conséquent, ses dates d'apparition et de disparition. La durée de l'enneigement est surtout influencée par les températures (Brown, 2010).

La figure 1-11 montre que la moyenne de la durée de l'enneigement pour la période 1999-2010 est d'environ 115 à 180 jours dans le Sud du Québec, de 160 à 225 jours dans la région du Centre, de 160 à 180 pour le secteur du golfe du Saint-Laurent et de 225 à 315 dans le Nord du Québec. L'analyse de plusieurs sources de données sur la période 1948-2005 (Brown, 2010) indique une réduction significative de la durée de l'enneigement d'environ 2 jours par décennies pour le Sud du Québec. Cette diminution est principalement attribuable à une fonte printanière de plus en plus hâtive. Ces résultats sont en accord avec ce qui est observé pour l'hémisphère Nord (Brown et Robinson, 2011) ainsi qu'avec la tendance au réchauffement des températures. Le début de l'enneigement est plus difficile à déterminer car en début de saison, l'accumulation de neige au sol est faible et intermittente. Cela fait en sorte qu'il y a moins de cohérence entre les sources de données, surtout pour les mesures plus anciennes qui étaient moins fréquentes. C'est pourquoi, il serait difficile d'avoir une tendance fiable depuis les années 1950. Par contre, depuis le début des années 1970, il y a une tendance à l'enneigement tardif en automne perceptible tant dans les données satellitaires que dans les mesures in situ (Brown, 2010). Pour le Nord du Québec, il faut essentiellement se fier aux données satellitaires disponibles depuis le début des années 1970. Il en ressort que la tendance à la diminution de la durée de l'enneigement est plus marquée que dans le sud. Par exemple, aux environs de Kuujuaq, l'enneigement survient 1-2 semaines plus tard en automne et se termine de 3-4 semaines plus tôt au printemps qu'il y a une trentaine d'années (Brown, 2010).

Observations : 1999 à 2010 (IMS)

Horizon 2050 : RCP 8.5



Durée de l'enneigement (jours)



Figure 1-11 Durée de l'enneigement observée pour la période 1999-2010 (panneau gauche) et projetée (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données IMS 24 (National Ice Center, 2008). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10^e et 90^e percentiles de 19 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (RCP8.5). Les résultats pour l'horizon 2080 sont présentés dans la figure A.7 (annexe A). Voir tableau D.2 (Annexe D) pour la liste des simulations CMIP5.

Une évaluation préliminaire des projections des modèles climatiques de l'ensemble CMIP5 basées sur le scénario RCP8.5 suggère une réduction de la durée de l'enneigement pour la période 2041-2070 par rapport la moyenne de 1970-1999. Les réductions médianes pourraient atteindre jusqu'à 25 jours dans le Nord du Québec, 25 à 45 jours dans le Centre, 45 à 75 jours pour le golfe du Saint-Laurent et finalement, 45 à 65 jours pour le Sud du Québec. Selon les projections médianes de l'horizon 2080 (2071-2100) de la figure A.7 de l'annexe A, la période d'enneigement continue de diminuer drastiquement sous l'effet de la hausse des températures. Les projections du 10^e percentile, qui constituent les périodes d'enneigement les plus courtes correspondant aux réchauffements les plus intenses de l'ensemble laissent entrevoir la possibilité pour l'extrême sud du Québec d'avoir un couvert de neige dont la présence serait inférieure à 20 jours. L'analyse plus fine permettant de faire la répartition entre le retardement de la neige à l'automne et le devancement de la fonte au printemps reste à compléter sur le territoire québécois.

1.5 Les nuages

Auteur : Hélène Côté (Ouranos)

Réviseurs: Eric Girard (UQAM) et David Plummer (Environnement Canada)

Certains éléments du système climatique posent de grands défis tant pour l'observation que pour la modélisation. À cet égard, les nuages sont assurément dans une classe à part. Leur rôle crucial, tant dans le bilan énergétique planétaire que dans le cycle de l'eau, fait en sorte qu'un grand nombre de variables climatiques sont directement ou indirectement sensibles à la quantité de nuages. Par exemple, un ciel couvert limite la baisse des températures minimales durant la nuit, mais aussi la hausse des températures maximales durant le jour. Il existe plusieurs types de nuages qui varient selon la forme, l'altitude, la température, leur contenu en gouttelettes d'eau ou en cristaux de glace. Les nuages sont le fruit d'un amalgame complexe de processus qui opèrent et interagissent à des échelles spatiales allant de quelques microns jusqu'à des milliers de kilomètres.

1.5.1 Les observations

Faits saillants

- *Dans l'état actuel des connaissances, on considère que le couvert nuageux est stable depuis le début des années 80 d'après les données satellitaires.*

Comme pour d'autres éléments du système climatique, les nuages sont mesurés depuis la surface par le réseau de stations météorologiques pour la portion continentale et par des navires pour la portion océanique, mais aussi à partir de l'espace grâce à une panoplie de capteurs installés sur divers satellites. Dans les stations météorologiques, les observations de nuages ont longtemps été effectuées par des observateurs; les marges d'incertitude sont donc plus élevées pour ce type de données. Pendant les années 90, un grand nombre de stations avec observateurs ont été remplacées par des stations automatisées, notamment au Canada et aux États-Unis. La façon de mesurer les nuages avant et après l'avènement des stations automatisées diffère tellement qu'il est impossible de combiner ces deux types de données pour calculer les tendances et les autres statistiques (Dai *et al.*, 2006). Les mesures satellitaires de nuages sont apparues vers le début des années 90. Les satellites offrent une couverture globale (continentale et océanique), mais ils ne mesurent pas nécessairement les mêmes caractéristiques des nuages selon le type de capteur utilisé. Un algorithme d'extraction permet d'obtenir la quantité de nuages à partir des mesures de radiance (rayonnement émis ou dispersé par l'atmosphère, les nuages et la surface de la Terre). Les sources d'incertitude des mesures satellitaires proviennent du type de capteur et de sa résolution spatiale, de l'algorithme d'extraction, de la dégradation des instruments dans l'espace et des dérives dans l'orbite des satellites. Les satellites ont encore de la difficulté à détecter les cirrus minces (malgré certain progrès depuis 2006) ainsi que les nuages dont la température contraste peu avec celle de la surface (Stubenrauch *et al.*, 2012). C'est le cas pour les nuages bas ou lorsque la température des sommets des nuages se trouve dans la gamme de nos températures hivernales. Toutes ces raisons font en sorte qu'il est vraiment difficile d'avoir un portrait à long terme des conditions observées des nuages.

Les données basées sur les mesures de plusieurs satellites (ISSCP D2; Rossow et Schiffer, 1999) permettent de calculer les moyennes climatiques saisonnières de la période 1983-2009. On constate, pour la plupart des régions du Québec, un couvert nuageux de l'ordre de 70-80 % qui varie très peu selon les saisons, à l'exception du Sud du Québec en été et du Nunavik en hiver qui ont une nébulosité autour de 60-70 %. D'après les comparaisons effectuées par (Stubenrauch *et al.*, 2012), les autres bases de données satellitaires produisent des valeurs de couvert nuageux à l'intérieur d'une plage de ± 15 % par rapport à ISSCP. Toujours selon la même étude, le couvert nuageux a une faible variabilité interannuelle, soit d'environ 3 %. Il est impossible d'obtenir une tendance significative, car les valeurs sont comprises à l'intérieur de l'incertitude entre les sources de données. Dans l'état actuel des connaissances, on considère donc que le couvert nuageux est stable depuis le début des années 80 d'après les données satellitaires.

1.5.2 Les projections et les scénarios climatiques

Faits saillants

- *Les modèles climatiques n'anticipent pas de changement significatif du couvert nuageux sur le territoire québécois pour la période 2081-2100.*
- *Le bilan énergétique planétaire est très sensible à la quantité de nuages. Les disparités dans les quantités de nuages, associées aux différences entre les divers modèles climatiques, constituent toujours la plus grande contribution à l'incertitude dans les projections de changements climatiques.*

Des cartes de changement de la moyenne annuelle de la quantité de nuages pour la période 2081-2100 par rapport à 1985-2005, obtenus au moyen d'une quarantaine de modèles globaux CMIP5, sont présentées dans le dernier rapport du GIEC (Collins *et al.*, 2013). Malgré cet horizon temporel lointain, les modèles climatiques n'anticipent pas de changement significatif du couvert nuageux sur le territoire québécois. Pour le Nord du Québec, les résultats montrent des hausses non significatives inférieures à 1 %, tant pour le scénario RCP4.5 que pour le RCP8.5. Pour la moitié-sud du Québec, les résultats montrent des baisses non significatives inférieures à 1 % pour le RCP4.5 et inférieures à 2 % pour le RCP8.5.

Le GIEC (Boucher *et al.*, 2013; Flato *et al.*, 2013) note une légère amélioration du comportement des nuages dans les modèles de climat, mais les défis sont encore nombreux. Le niveau de confiance a progressé pour les processus de grande échelle qui sont assez bien pris en compte avec les tailles actuelles des maillages des grilles de modèle. Par contre, la représentation des processus de fine échelle repose sur différents modules (turbulence, convection, microphysique des nuages, transfert radiatif, superposition des couches de nuages, etc.) qui doivent interagir, mais dont la formulation varie beaucoup d'un modèle climatique à l'autre. Malgré l'avancée des connaissances pour plusieurs de ces mécanismes, ces disparités entre les modèles de climat engendrent des différences dans les quantités de nuages. Vu la très grande sensibilité du bilan énergétique planétaire à la quantité de nuages, ces différences représentent toujours la plus grande contribution à l'incertitude dans les projections de changements climatiques.

1.5.3 Les processus et phénomènes liés aux nuages : les rayons UV

Faits saillants

- *Le Québec connaîtra, avec un niveau de confiance élevé, un recouvrement amplifié de l'ozone stratosphérique ce qui diminuera le rayonnement UV reçu à la surface dans des conditions de ciel clair sans pollution.*
- *L'injection de particules dans la stratosphère, soit par des éruptions volcaniques majeures ou par la géoingénierie visant à contrer le réchauffement climatique, entraîne une destruction de l'ozone et, par conséquent, une augmentation de la radiation érythémale.*

L'indice UV mesure plus spécifiquement la radiation susceptible de causer une rougeur cutanée (radiation érythémale). La quantité de rayons UV reçus à la surface varie en fonction de l'état de la couche d'ozone dans la stratosphère, du couvert nuageux ainsi que de la quantité de particules fines en suspension dans l'atmosphère appelées aérosols. Les réflexions causées par la présence de neige et de glace contribuent à augmenter l'indice UV. Il n'y a pas d'étude réalisée spécifiquement pour le Québec, mais le WMO Scientific Assessment of ozone depletion (Bekki *et al.*, 2011) est l'étude la plus complète à ce jour sur l'évolution de l'indice UV. Elle est basée sur les 18 modèles climatiques globaux de CMIP5 couplés avec un modèle de chimie atmosphérique qui incluent la stratosphère.

Selon Bekki *et al.* (2011), le protocole de Montréal qui régleme la diminution et le remplacement des substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) porte déjà ses fruits. Le recouvrement graduel de l'ozone stratosphérique est mesurable et se traduit par une diminution des rayons UV reçus à la surface. Selon les projections des modèles CCM (chemistry coupled models), on peut s'attendre à ce que cette tendance à la baisse se poursuive pour les prochaines décennies pour des conditions de ciel clair sans pollution (« pristine clear sky »). Ironiquement, le recouvrement de l'ozone stratosphérique est favorisé (du moins au début) par les changements climatiques. En effet, tandis que la troposphère se réchauffe, on assiste à un refroidissement de la stratosphère. Cela cause un ralentissement des réactions chimiques destructrices d'ozone, particulièrement dans le haut de la stratosphère. Ces changements de température entraînent également une modification des vents dans la stratosphère (l'intensification de la circulation de Brewer-Dobson). Dans l'hémisphère Nord, les vents stratosphériques transportent l'ozone des tropiques vers les latitudes moyennes (Bekki *et al.*, 2011; McKenzie *et al.*, 2011). Le Québec connaîtra donc, avec un niveau de confiance élevé, un recouvrement amplifié de l'ozone stratosphérique ce qui diminuera le rayonnement UV reçu à la surface dans des conditions de ciel clair sans pollution. Cela étant dit, le rayonnement reçu dépend fortement du couvert nuageux et des aérosols qui peuvent être d'origine naturelle ou engendrés par la pollution atmosphérique. L'évolution du couvert nuageux demeure toutefois la grande inconnue des changements climatiques et le niveau de confiance dans ces projections est très faible. Il est important de mentionner que l'injection de particules dans la stratosphère, soit par des éruptions volcaniques majeures ou par la géoingénierie visant à contrer le réchauffement climatique, entraîne une destruction de l'ozone et, par conséquent, une augmentation de la radiation érythémale (Bekki *et al.*, 2011)

Le cas des milieux marins arctiques est particulièrement intéressant. L'augmentation de l'ozone stratosphérique, par les vents stratosphériques et par réduction des SACO, combinée à l'augmentation des nuages produira une réduction des rayons UV. Or, la disparition de la glace marine, en totalité ou sur une plus longue partie de l'année selon les régions, permettrait une pénétration plus importante des UV dans l'océan. Autrement dit, les rayons UV étaient plus élevés dans le passé, mais le couvert de glace limitait considérablement leur pénétration sous la surface de la mer. Ce phénomène pourrait se concrétiser dans les régions maritimes du Nunavik et nécessite davantage d'études.

1.6 La circulation atmosphérique: vents, dépressions et tempêtes

Auteur : Hélène Côté (Ouranos)

Réviseurs : René Laprise (UQAM) et Leticia Hernandez Diaz (UQAM)



1.6.1 Les vents

Faits saillants

- *La vitesse moyenne des vents observés pour la grande majorité des stations varie très peu d'une saison à l'autre.*
- *La majorité des stations québécoises présentent une tendance à la diminution de la vitesse moyenne des vents tout au long de l'année entre 1953 et 2006. Par contre, quelques stations dérogent de ce constat général et présentent de faibles tendances à l'augmentation de la vitesse du vent. C'est le cas pour Schefferville (hiver, printemps et automne), de Kuujjuaq et de Kuujuarapik en hiver, et finalement, de Val-D'Or et de Baie-Comeau en automne.*
- *Une étude basée sur seulement cinq modèles CMIP5 suggère, pour nos régions, une réduction des vents en été pour la période 2079-2099 par rapport à 1979-1999 et une faible augmentation des vents en hiver, cette dernière obtenant un consensus moins fort entre les cinq modèles. Des analyses supplémentaires basées sur un plus grand nombre de simulations sont requises pour le Québec.*

Le vent est un élément crucial du climat. Il affecte le degré de confort des êtres vivants en été et d'inconfort en hiver. Il joue un rôle dans l'intensité de l'évapotranspiration. Il transporte des pollens, des insectes et des polluants, en plus de causer de la poudrière en hiver. Le vent est une source d'énergie, mais aussi de destruction. Les vents forts peuvent détruire ou endommager les bâtiments et les infrastructures, créer des vagues et des surcotes qui produisent de l'érosion et aggravent des inondations, en plus d'augmenter les risques dans le secteur des transports.

Le vent est le déplacement de l'air engendré, entre autres, par la rotation terrestre et les différences de la pression atmosphérique. Ces inhomogénéités de la pression découlent du fait que la température n'est pas uniforme horizontalement.

Les mouvements de l'air se font sur une vaste gamme d'échelles spatiales et temporelles. Généralement, plus grande est la taille du phénomène, plus longue sera sa durée de vie. La rotation terrestre et les différences de pressions induites par les contrastes de température pôles-équateur et continents-océans ainsi que les grandes chaînes de montagnes sont responsables de la circulation atmosphérique aux latitudes moyennes. C'est ce qui détermine les vents moyens et qui cause, entre autres, les grands méandres du courant-jet et les grands systèmes quasi stationnaires (ex. la basse pression islandaise, l'anticyclone des Bermudes) à des échelles d'une dizaine de milliers de kilomètres. À une échelle à peine plus petite, de l'ordre de quelques milliers de kilomètres, viennent ensuite les grands systèmes météorologiques extratropicaux : les dépressions (basses pressions appelées aussi cyclones) et les anticyclones (hautes pressions). Ils se forment grâce à d'intenses variations horizontales de température et leur succession engendre les principales fluctuations de la vitesse et de la direction des vents près de la surface, mais aussi en altitude. Lorsque la taille des inhomogénéités de pression est de l'ordre de quelques centaines à quelques dizaines de kilomètres, il se produit des phénomènes généralement situés à l'intérieur même des dépressions ou des tempêtes, par exemple les fronts chauds et froids, les rafales et les lignes de grain. À partir de quelques dizaines de kilomètres jusqu'à environ un

kilomètre, on trouve les brises de mer, mais aussi des événements bien plus violents comme les orages et les tornades. À des échelles d'à peine quelques mètres, la turbulence peut modifier le vent sur de courtes durées. Localement, le vent que l'on mesure résulte de la combinaison de mouvements de l'air d'échelles différentes en plus d'être influencé par le relief et la végétation environnante. Cela fait aussi en sorte que le vent est un aspect du climat qui est difficile à observer, à analyser et à modéliser.

1.6.1.1 Les observations

Les vents près de la surface sont mesurés aux stations météorologiques par des anémomètres situés à 10 mètres de hauteur. C'est pourquoi on y fait parfois référence en utilisant les expressions vent à 10 mètres ou vent au niveau de l'anémomètre. On dispose actuellement de deux types de mesures directes pour le vent : les anémomètres des stations météorologiques pour les vents près de la surface et les radiosondes pour les vents en altitude. La faible densité de ces réseaux au Québec limite grandement la compréhension de cette variable complexe. Puisque le vent est grandement influencé par des processus très locaux, le vent mesuré n'est représentatif que des environs immédiats de la station, ce qui en complique l'interpolation pour des fins de cartographie et d'analyse, à moins d'avoir un réseau de stations d'une très grande densité. Par ailleurs, les observations de vent sont très sensibles aux changements survenus dans les types d'anémomètres, à la hauteur à laquelle ils ont été installés (qui n'a pas toujours été de 10 m), au déplacement des stations ainsi qu'aux changements de l'environnement autour de la station, comme la croissance ou la disparition de la forêt et l'urbanisation. C'est pourquoi l'étude du vent doit impérativement se faire sur des données homogénéisées.

Des statistiques à long terme de la vitesse du vent ont été obtenues au moyen de stations météorologiques canadiennes sur la période 1953-2006 par Wan *et al.* (2010) après en avoir complété l'homogénéisation. De ces stations, treize se situent dans des aéroports du Québec (Val-D'Or, Rouyn, Sept-Îles, Bagotville, St-Hubert, Montréal (Pierre-Élliott-Trudeau), Schefferville, Kuujuaq, Québec (Jean-Lesage), Roberval, Baie-Comeau, Kuujuarapik et Mont-Joli).

L'analyse de Wan *et al.* (2010) nous apprend que les moyennes saisonnières de la vitesse de vent pour la période 1953-2006 se situent entre 10 et 20 km/h. Les seules stations faisant exception sont Mont-Joli en hiver et Kuujuarapik en automne pour lesquelles les moyennes saisonnières excèdent 20 km/h. On constate que la vitesse moyenne des vents pour la grande majorité des stations varie très peu d'une saison à l'autre.

On peut en dire autant de la variation interannuelle de la moyenne saisonnière du vent. Pour la majorité des stations, la variabilité interannuelle se situe en deçà de 5 km/h, peu importe le temps de l'année. Toutefois, quelques stations se comportent différemment. À Kuujuarapik, Kuujuaq, Schefferville et Mont-Joli, les moyennes hivernales et automnales fluctuent d'une année à l'autre de 5 à 10 km/h, tandis que la variabilité excède 10 km/h en été à Kuujuarapik.

Les tendances observées ont aussi été calculées par Wan *et al.* (2010) qui remarquent une tendance à la diminution de la vitesse moyenne des vents pour la majorité des stations tout au long de l'année entre 1953 et 2006. Par contre, quelques stations dérogent de ce constat général et présentent de faibles tendances à l'augmentation de la vitesse du vent. C'est le cas pour Schefferville (hiver, printemps et automne), de Kuujuaq et de Kuujuarapik en hiver, et finalement, de Val-D'Or et de Baie-Comeau en automne.

1.6.1.2 Les projections et les scénarios climatiques

Très peu d'études dans le monde se sont attardées à quantifier les changements futurs des vents à 10 mètres. Le fait que la résolution des modèles climatiques était insuffisante pour prendre en compte les effets locaux qui influencent le vent près de la surface explique en partie cette situation. Lorsque de telles évaluations sont disponibles, ce sont en général des analyses très localisées qui portent sur des régions limitées du globe. L'évaluation des projections des

vents n'a pas encore été réalisée au Québec. Toutefois, il existe une étude réalisée par Kulkarni et Huang (2014) qui se concentre sur les États-Unis, mais qui incluent aussi le Sud et une partie du Centre du Québec. Leurs analyses sont basées sur les projections de cinq modèles globaux de CMIP5 qui utilisent l'évolution des GES RCP8.5. Les résultats de Kulkarni et Huang (2014) suggèrent, pour nos régions, une réduction des vents en été pour la période 2079-2099 par rapport à 1979-1999 et une faible augmentation des vents en hiver, cette dernière obtenant un consensus moins fort entre les cinq modèles. Le comportement des vents hivernaux à 10 m serait lié à celui des vents en altitude qui eux augmentent dans le futur. Des analyses supplémentaires basées sur un plus grand nombre de simulations sont requises pour le Québec

1.6.2 Les dépressions et les tempêtes

Faits saillants

- *La complexité des cyclones extratropicaux a mené au développement de plusieurs algorithmes permettant de les détecter, et qui, lorsqu'utilisés sur les mêmes données, donnent des résultats différents. En raison de ces disparités, nous n'avons pas présentement de statistiques précises du nombre de cyclones et de leur intensité pour les diverses régions du monde. Cette incertitude s'ajoute à celle provenant des modèles de climat et limite le degré de confiance dans les projections.*
- *L'analyse des cyclones extratropicaux à l'aide d'un algorithme de détection appliqué à des données historiques n'a pas permis de détecter de tendance dans l'activité cyclonique saisonnière pour le Québec pour la période 1951-2010. Il en ressort toutefois une forte variabilité décennale : l'activité cyclonique a connu une tendance à la hausse de 1985 à 1995 et semble à la baisse depuis.*
- *Les projections de 22 modèles globaux de CMIP5 RCP8.5 suggèrent une diminution de l'activité cyclonique sur toutes les grandes trajectoires de dépressions affectant le Québec en hiver pour la période 2081-2100 comparativement à 1980-1999. Il ne semble pas y avoir de changement notable au-dessus de la baie d'Hudson. Pour l'été, les projections vont également dans le sens d'une baisse d'activité, surtout pour les dépressions provenant du Colorado et les dépressions du nord ouest de l'Atlantique. Le consensus est plus fort parmi l'ensemble CMIP5 qu'il ne l'était pour l'ensemble CMIP3.*
- *Il pourrait y avoir une diminution des dépressions sur l'océan en bordure du Gulf Stream et une augmentation à l'intérieur des terres sur tout le long de la côte est américaine jusqu'au Sud du Québec et des provinces atlantiques. Ce déplacement vers le nord des dépressions du nord ouest de l'Atlantique ne semble pas se produire pour les autres grandes trajectoires nord américaines. C'est là l'une des principales différences par rapport à la génération précédente de projections CMIP3.*
- *Contrairement à ce qui était projeté par la génération précédente de modèles climatiques, les projections des modèles de l'ensemble CMIP5 basées sur l'évolution des GES RCP8.5 montrent plutôt une diminution des cyclones extrêmes pour l'hiver dans l'hémisphère nord. Les résultats varient beaucoup d'un modèle à l'autre.*
- *Pour les cyclones du nord-ouest de l'Atlantique qui remontent à l'intérieur des terres, il pourrait y avoir une augmentation temporaire des cyclones intenses pendant la première moitié du 21^{ème} siècle, suivie d'une diminution durant dans la seconde moitié. Ceux qui transitent par l'océan Atlantique au large des côtes verraient leur nombre diminuer, peu importe leur taux d'intensification.*

Les termes dépression et cyclone sont utilisés indistinctement pour désigner une zone de basse pression atmosphérique dont la pression minimale se trouve en son centre. On appelle dépressions extratropicales celles qui se forment à des latitudes supérieures à 25 degrés. Elles constituent l'élément dominant du climat et de sa variabilité dans les régions des latitudes moyennes comme le Québec. On qualifie de tempête des événements dont les vents atteignent au moins la force 10 de l'échelle de Beaufort (89 à 102 km/h). De tels vents peuvent être générés par des cyclones extratropicaux intenses, des ouragans ou des tornades. Les ouragans seront abordés dans la section suivante, tandis que la section 1.3.3.1 traite des tornades.

Il est bien loin le temps où les systèmes dépressionnaires étaient tracés manuellement sur des cartes météo et où l'on pouvait suivre leur parcours en notant les déplacements du centre de la dépression. Les quantités colossales de données à traiter, encore plus dans le cas des données des modèles climatiques, requièrent l'usage de méthodes automatisées de détection des cyclones. Ces méthodes tentent de localiser le centre de la dépression et de le suivre dans le temps. Or, cette tâche est loin d'être simple. Bien que les cyclones extratropicaux façonnent notre météo quotidienne et notre climat, plusieurs aspects de leur cycle de vie (formation, intensification et déclin) restent à élucider. L'amalgame de processus complexes se produisant à des échelles allant du millier de kilomètres jusqu'à quelques mètres auquel les cyclones doivent leur existence est en partie responsable de cette situation. Par conséquent, leur morphologie varie grandement d'une dépression à l'autre. Cette particularité des cyclones extratropicaux explique le fait qu'il existe plusieurs algorithmes de détection, qui, lorsqu'utilisés sur les mêmes données, donnent des résultats différents (Neu *et al.*, 2012). En raison de ces disparités, nous n'avons pas actuellement de statistiques précises du nombre de cyclones et de leur intensité pour les diverses régions du monde. Cette incertitude s'ajoute à celle provenant des modèles de climat et limite le degré de confiance dans les projections.

Les avantages d'utiliser des algorithmes de détection de cyclones extratropicaux surpassent certains de leurs défauts, car ils permettent d'identifier des zones privilégiées pour le passage de ces systèmes : ce sont les grandes trajectoires de cyclones (« storm track » en anglais). Parmi celles qui traversent l'Amérique du Nord, plusieurs d'entre elles affectent le Québec (voir encadré 1). De par sa position sur le continent, le Québec se situe à la confluence de ces grandes trajectoires : les clippers albertains viennent s'y dissiper, tout comme les dépressions du Colorado qui, à l'occasion, fusionnent avec des dépressions du nord-ouest de l'Atlantique qui poursuivent leur trajet vers l'est.

Wang *et al.* (2012) ont appliqué un algorithme de détection des cyclones sur les données climatiques historiques pour la période 1951-2010. Leur analyse n'a pas permis de détecter de tendance dans l'activité cyclonique saisonnière pour le Québec. Toutefois, Colle *et al.* (2013) ont mis en relief la forte variabilité décennale : l'activité cyclonique a connu une tendance à la hausse de 1985 à 1995 et semble à la baisse depuis.

La performance des modèles climatiques de l'ensemble CMIP5 à reproduire les grandes trajectoires de cyclones extratropicaux a été évaluée par Chang *et al.* (2012) à partir de la variance des vents dans la troposphère et de la pression au niveau moyen de la mer. Si on considère les résultats moyens de l'ensemble, il subsiste un léger biais vers le sud dans le positionnement des grandes trajectoires pendant l'hiver dans l'hémisphère nord, tandis que leur amplitude est très proche des valeurs climatiques pour la période 1980-1999. En été, les modèles ont dans l'ensemble produit des trajectoires plus au sud et de moindre amplitude que dans la réalité. Bien que les résultats varient encore beaucoup d'un modèle à l'autre, la performance de ceux de l'ensemble CMIP5 s'est améliorée par rapport à ceux de la génération précédente de l'ensemble CMIP3.

Le comportement futur des trajectoires de dépressions a aussi été analysé par Chang *et al.* (2012) en utilisant les projections de 22 modèles globaux de CMIP5 basées sur l'évolution des gaz à effet de serre RCP8.5. Leurs résultats indiquent une diminution de l'activité cyclonique sur toutes les grandes trajectoires de dépressions

Encadré 1-1. D'où viennent les dépressions qui affectent le Québec?

Les dépressions du nord-ouest de l'Atlantique

Elles se forment aux États-Unis au large des Carolines et remontent vers le nord-est en suivant le Gulf Stream. Elles longent la côte est américaine pour toucher le Sud du Québec avant de se diriger vers les provinces atlantiques, puis vers le sud du Groenland (Dacre et Gray, 2009). Le nombre et l'intensité de ces dépressions culminent de novembre à mars. Elles produisent souvent des précipitations abondantes à cause de la vapeur d'eau puisée dans les eaux chaudes du Gulf Stream.

Les clippers albertains ("Alberta clippers" en anglais)

Ces dépressions se forment sur le versant est des Rocheuses canadiennes entre octobre et mars, mais sont plus nombreuses en décembre et en janvier. Elles traversent très rapidement les Prairies canadiennes pour se diriger vers les Grands Lacs et le Sud du Québec où elles se dissipent. Les clippers albertains sont généralement associés à des vents très forts, du temps très froid et ne génèrent presque pas de précipitations (Thomas et Martin, 2007). Toutefois, lors de leur passage au-dessus des eaux libres (complètement ou partiellement) de glace des Grands Lacs, ils peuvent produire de fortes bourrasques de neige. Ils sont aussi responsables d'épisodes de vents forts sur le Sud du Québec. Ceux qui se forment dans le nord des Rocheuses peuvent atteindre le secteur de la baie d'Hudson et s'intensifier en l'absence de glace.

Les dépressions du Colorado (« Colorado Lows » en anglais)

Ces dépressions naissent sur le versant est des Rocheuses américaines dans les environs du Colorado. En été, elles sont associées à d'importants systèmes orageux, mais c'est en hiver et au début du printemps qu'elles sont les plus intenses. Ces dépressions produisent des précipitations abondantes et des vents forts. Elles se dirigent en général vers les Grand Lacs et la moitié-sud du Québec, mais peuvent à l'occasion bifurquer vers la Baie James (Bierly et Winkler, 2001).

affectant le Québec en hiver pour la période 2081-2100 comparativement à 1980-1999. Il ne semble pas y avoir de changement notable au-dessus de la baie d'Hudson. Pour l'été, les projections vont également dans le sens d'une baisse d'activité, surtout pour les dépressions du Colorado et du nord-ouest de l'Atlantique. Les résultats de l'étude de Maloney *et al.* (2014) basés sur 15 des modèles climatiques de CMIP5 vont d'ailleurs dans le même sens. Leur étude mentionne toutefois que le consensus est plus fort parmi l'ensemble CMIP5 qu'il ne l'était pour l'ensemble CMIP3. En analysant plus en détail l'est du continent, Maloney *et al.* (2014) de même que Colle *et al.* (2013) constatent une diminution des dépressions sur l'océan en bordure du Gulf Stream et une augmentation à l'intérieur des terres tout au long de la côte est américaine jusqu'au Sud du Québec et des provinces atlantiques. Ce déplacement vers le nord des dépressions du nord-ouest de l'Atlantique ne semble pas se produire pour les autres grandes trajectoires nord-américaines. C'est là l'une des principales différences par rapport à la génération précédente de projections CMIP3 (Chang *et al.*, 2012).

Le portrait est plus complexe en ce qui a trait aux tempêtes extratropicales, qui sont en fait des dépressions plus intenses. Comme le rappelle Chang *et al.* (2012), la génération précédente de projections de l'ensemble CMIP3 suggérait, avec un degré de confiance faible, une augmentation de l'intensité des cyclones. Or, d'après les travaux de Chang *et al.* (2012), les projections des modèles de l'ensemble CMIP5 basées sur l'évolution des GES RCP8.5 montrent plutôt une diminution des cyclones extrêmes pour l'hiver dans l'hémisphère nord. Ils en

viennent au même constat pour les « bombes » météorologiques, qui sont en fait des dépressions qui s'intensifient de façon explosive. Deux autres études se sont concentrées sur la trajectoire du nord-ouest de l'Atlantique. Maloney *et al.* (2014, matériel supplémentaire) concluent aussi dans le sens d'une diminution graduelle des cyclones intenses tout au long du 21^e siècle et soulignent que les résultats varient beaucoup d'un modèle à l'autre. Toutefois, d'après Colle *et al.* (2013), il pourrait y avoir une augmentation temporaire des cyclones intenses qui remontent à l'intérieur des terres le long de la côte est américaine jusqu'au Sud du Québec et des provinces atlantiques pendant la première moitié du 21^e siècle suivie d'une diminution des cyclones intenses dans la seconde moitié. Quant aux dépressions intenses qui transitent par l'océan Atlantique au large des côtes, leur nombre devrait diminuer, peu importe leur taux d'intensification.

1.6.3 Les ouragans

Faits saillants

- *Les modèles climatiques globaux ont encore beaucoup de difficulté à simuler les systèmes tropicaux, ce qui se traduit par une importante sous-estimation du nombre et de l'intensité des tempêtes par rapport aux données des dernières décennies et les résultats varient beaucoup d'un modèle à l'autre.*
- *Le GIEC considère qu'il est presque certain que la fréquence et l'intensité des ouragans les plus intenses (catégorie 4 et 5 sur l'échelle Saffir-Simpson) présentent une tendance à la hausse depuis les années 1970. Le Québec est indirectement affecté par les ouragans lorsque ceux-ci se transforment en cyclones post-tropicaux.*
- *En termes de projections, plusieurs études s'entendent sur l'augmentation du nombre d'ouragans de catégorie 4 et 5, et de la hausse des quantités de précipitations associées aux systèmes tropicaux de toute catégorie.*
- *Il n'est pas encore possible d'établir si la fréquence et l'intensité des cyclones post-tropicaux (« restes d'ouragan ») qui causent des épisodes de temps sévère (pluies torrentielles, vents violents, fortes vagues et surcotes) au Québec changeront dans les prochaines décennies. Il est toutefois possible d'affirmer que les cyclones post-tropicaux apporteront de plus grandes quantités de précipitations et que ceux qui atteindront le golfe du Saint-Laurent frapperont des régions côtières ayant subi une hausse du niveau de la mer.*

De par sa position géographique, il y a peu de chance qu'une tempête tropicale ou un ouragan atteigne le Québec comme cela peut se produire à l'occasion dans les provinces atlantiques. Toutefois, le Québec n'est pas à l'abri d'épisodes de pluies torrentielles et de vents extrêmes qui tirent leur origine de cyclones tropicaux s'étant profondément transformés en se déplaçant vers le nord. Dans le langage populaire, on utilise souvent le vocable « reste d'ouragan », mais compte tenu de leur force et de leur potentiel d'intensification, il est plus juste de les désigner comme étant des cyclones post-tropicaux.

Il y a formation d'un cyclone post-tropical lorsqu'un système tropical, peu importe son intensité (dépression, tempête, ouragan), subit ce que l'on appelle une transition extratropicale. Cela se produit lorsque le cyclone se déplace hors des tropiques et rencontre soit une perturbation en altitude soit un cyclone extratropical. Comme le décrivent Jones *et al.* (2003), le cyclone perd quelques-unes de ses caractéristiques tropicales, mais en conserve certaines comme ses quantités torrentielles de précipitations et ses vents violents, tout en gagnant des propriétés extratropicales comme une forme asymétrique et une grande vitesse de déplacement. En général, les tempêtes tropicales perdent de leur intensité lorsqu'elles pénètrent à l'intérieur des terres ou lorsqu'elles se déplacent au-dessus d'eaux plus froides. Lorsqu'elles subissent une transition extratropicale, les tempêtes peuvent s'intensifier et retrouver des vents de force tempête ou ouragan. Jones *et al.* (2003) soulignent

également que, vu leur grande vitesse de déplacement, leur forme asymétrique et leur potentiel d'intensification, les cyclones post-tropicaux posent un réel défi pour les prévisions météorologiques, car il est difficile de prédire le moment, l'endroit et l'intensité du temps sévère qui leur est associé. Les cyclones post-tropicaux peuvent survenir tout au long de la saison des ouragans dans l'Atlantique Nord, qui bat son plein typiquement de mai à novembre, mais ils sont plus nombreux en septembre et en octobre. Pour le Sud du Québec et dans la région du golfe du Saint-Laurent, les cyclones post-tropicaux produisent des pluies extrêmes et des vents violents. Dans les secteurs côtiers, s'ajoutent de fortes vagues et des surcotes produites par les vents violents qui présentent un réel danger pour la navigation.

Le comportement futur des cyclones post-tropicaux dépend des projections quant à la fréquence et à l'intensité des tempêtes tropicales ainsi que des conditions propices à la transition extratropicale telle que la durée de vie des tempêtes. Malheureusement, la transition extratropicale a été très peu étudiée à l'aide de modèles climatiques. Le phénomène est brièvement mentionné dans Knutson *et al.* (2010) qui ont étudié les cyclones tropicaux à l'aide de projections de modèles climatiques de l'ensemble CMIP3 basées sur le scénario d'évolution des GES SRES A1B. Leur analyse ne permet pas d'entrevoir de tendance future (ni à la hausse ni à la baisse) dans la durée de vie des tempêtes tropicales, celles qui persistent plus longtemps ayant plus de chance de se transformer en cyclones post-tropicaux. Par ailleurs, les modèles climatiques projettent une expansion vers les pôles des zones subtropicales. Cela pourrait déplacer vers le nord la latitude à laquelle survient en moyenne la transition extratropicale. Vu le manque d'études sur le sujet, Knutson *et al.* (2010) soulignent que le degré de confiance quant à l'avenir des cyclones post-tropicaux est faible.

Quelques études récentes basées sur les projections des modèles globaux de l'ensemble CMIP5 ont tenté d'évaluer quels seraient les changements futurs dans la fréquence et dans l'intensité des tempêtes tropicales dans l'Atlantique Nord (Camargo, 2013; Emanuel, 2013; Knutson *et al.*, 2013; Maloney *et al.*, 2014; Villarini et Vecchi, 2012, 2013). Toutes ces études s'accordent sur le fait que les modèles climatiques globaux ont encore beaucoup de difficulté à simuler les systèmes tropicaux, ce qui se traduit par une importante sous-estimation du nombre et de l'intensité des tempêtes par rapport aux données des dernières décennies et que les résultats varient beaucoup d'un modèle à l'autre. Pour pallier cette difficulté, les groupes de recherche impliqués ont fait appel à diverses techniques : méthodes de modélisation à très fine échelle, méthodes statistiques et analyse des conditions favorables à la formation de tempêtes tropicales. Leurs conclusions diffèrent de façon importante pour l'Atlantique Nord : pas de tendance identifiable (Camargo, 2013; Maloney *et al.*, 2014; Villarini et Vecchi, 2012); tendance à la hausse (Emanuel, 2013; Villarini et Vecchi, 2013); et tendance à la baisse (Knutson *et al.*, 2013). Les expériences réalisées par ces derniers laissent présager que les simulations climatiques à très haute résolution (5-10 km de maillage) qui deviendront accessibles grâce à la puissance accrue des super-ordinateurs permettront des avancées importantes dans la compréhension des cyclones tropicaux.

Le GIEC considère qu'il est presque certain que la fréquence et l'intensité des ouragans les plus intenses (catégorie 4 et 5 sur l'échelle Saffir-Simpson) présentent une tendance à la hausse depuis les années 1970 (Hartmann *et al.*, 2013). En termes de projections, plusieurs études s'accordent sur l'augmentation du nombre d'ouragans de catégorie 4 et 5, et de la hausse des quantités de précipitations associées aux systèmes tropicaux de toute catégorie (Emanuel, 2013; Knutson *et al.*, 2013; Maloney *et al.*, 2014).

Pour les décennies à venir, il n'est pas encore possible d'établir si la fréquence et l'intensité des cyclones post-tropicaux qui causent des épisodes de temps sévère (pluies torrentielles, vents violents, fortes vagues et surcotes) au Québec changeront dans les prochaines décennies. Il est toutefois possible d'affirmer que les cyclones post-tropicaux apporteront de plus grandes quantités de précipitations et que ceux qui atteindront le golfe du Saint-Laurent frapperont des régions côtières ayant subi une hausse du niveau de la mer.



1.7 Le régime hydrique: les débits de rivières

Auteur : Hélène Côté (Ouranos)

Réviseurs: Jacinthe Clavet-Gaumont (Ouranos), Catherine Guay (IREQ), Simon Ricard (CEHQ), Richard Turcotte (CEHQ)

Faits saillants

- *On s'attend à une augmentation des débits hivernaux moyens des rivières pour l'ensemble du Québec pour l'horizon 2041-2070. Le consensus est élevé (supérieur à 90 %) parmi l'ensemble des projections hydroclimatiques utilisées.*
- *Les rivières du Nord du Québec pourraient connaître des augmentations des débits moyens au printemps et en automne pour le même horizon (consensus modéré).*
- *La plupart des rivières du Sud du Québec peuvent s'attendre à une baisse des débits moyens en été, au printemps et en automne (consensus modéré).*

Le débit des cours d'eau est influencé par de nombreux facteurs climatiques tels que l'accumulation et la fréquence des précipitations, l'épaisseur du couvert de neige, la température, l'évaporation, le niveau de saturation des sols et la hauteur de la nappe phréatique. Au Québec, le cycle hydrologique se divise en quatre principaux régimes. Le régime hivernal se distingue par une accumulation des précipitations sous forme de neige, la sublimation de la neige, une végétation en dormance et de faibles débits. Le régime printanier se démarque par la fonte de la neige, la crue printanière, un sol saturé, le début de la croissance des végétaux et de l'évapotranspiration. Le régime estival coïncide avec l'accroissement de l'évapotranspiration et des épisodes de précipitations plus localisés et potentiellement intenses. Pour finir, le régime automnal se différencie par la décroissance de la végétation et une pluviométrie qui dépend des grands systèmes météorologiques.

La présente section se concentrera sur l'évolution des débits moyens des rivières. Un éventail très complet d'indicateurs hydrologiques touchant les autres aspects du régime hydrique est disponible pour une série de tributaires du Saint-Laurent dans l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (CEHQ, 2013). Les changements attendus pour certains de ces indicateurs sont résumés au tableau 2-8 de la section 2.5.1.1. Les changements projetés du débit moyen (Q_{moy}) pour les divers régimes hydrologiques saisonniers pour la période 2041-2070 par rapport à 1971-2000 sont illustrés à la figure 1-12. Cette figure comporte également un indicateur du consensus parmi les différentes projections hydroclimatiques de l'ensemble (cQ)2 (voir encadré 3).

Encadré 1-2. Le frasil

La formation de frasil est une préoccupation importante pour la gestion hivernale des cours d'eau. Le frasil est un facteur déterminant dans la formation d'embâcles, mais il peut aussi obstruer les prises d'eau municipales ainsi que les turbines des barrages. Malheureusement, l'état actuel des connaissances ne permet pas encore de modéliser ce phénomène avec suffisamment de confiance pour le projeter à l'horizon 2041-2070.

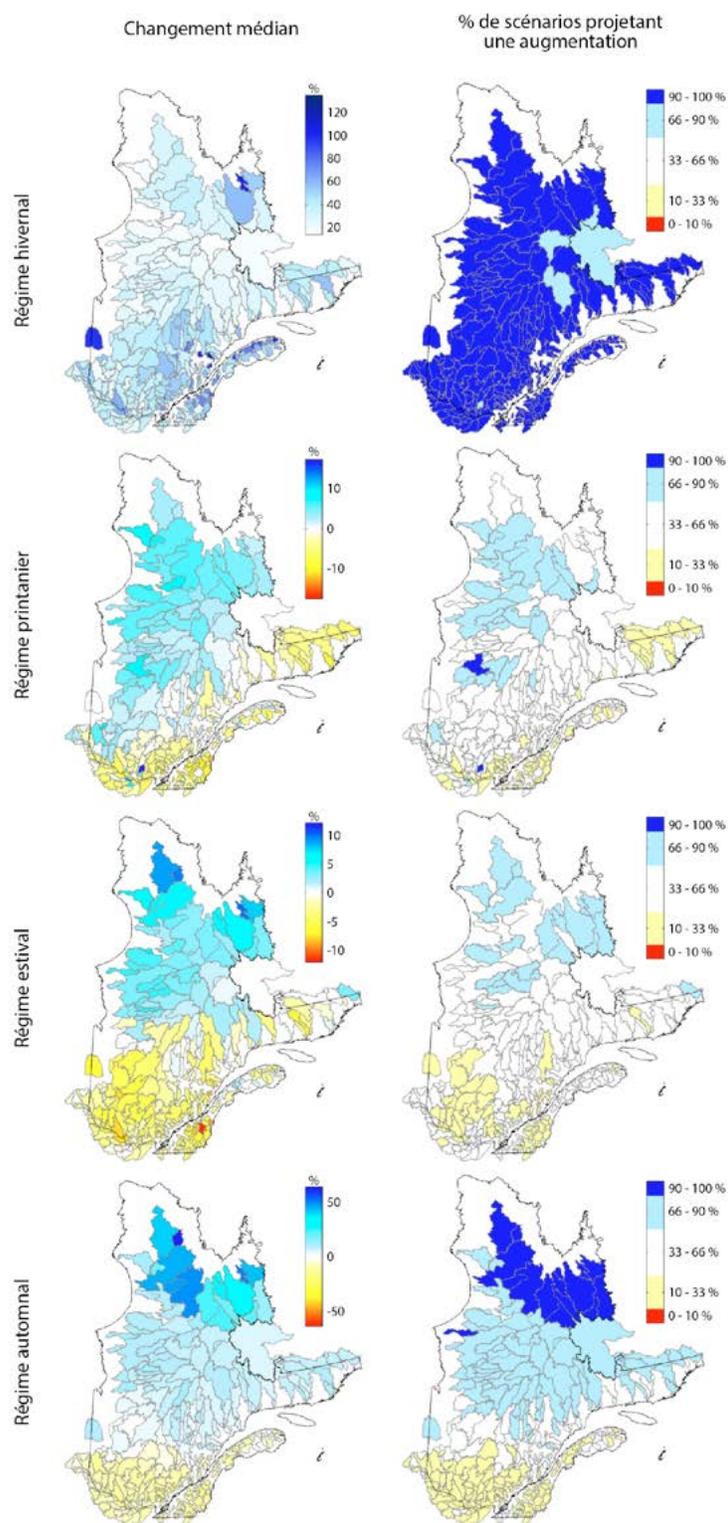


Figure 1-12 Changement projeté des débits moyens saisonniers sur l'horizon 2041-2070 par rapport à 1971-2000. La colonne de gauche présente le changement médian d'après les scénarios hydroclimatiques (cQ)². La colonne de droite fournit le pourcentage de scénarios qui indiquent une hausse des débits moyens. Les résultats sont présentés pour le régime a) hivernal, b) printanier, c) estival et d) automnal. Source : Catherine Guay (IREQ)

Encadré 1-3. « Les projections hydrologiques (cQ)² »

Le Québec peut compter sur un grand ensemble de projections hydrologiques produit conjointement par Hydro-Québec, le CEHQ et Ouranos dans le cadre de la collaboration (cQ)² (Impact des changements climatiques sur l'hydrologie (Q) au Québec). Issues d'un ensemble climatique commun (CMIP3, NARCCAP, MRCC-Ouranos) les projections hydrologiques (cQ)² sont le fruit de pratiques de modélisation hydroclimatique harmonisées et couvre une grande portion du territoire québécois. La modélisation hydroclimatique fait intervenir des modèles climatiques et hydrologiques afin d'évaluer l'impact de l'augmentation des GES sur les principaux processus déterminant le comportement des régimes hydrologiques (CEHQ 2013, Annexe 1).

En hiver, la majorité des bassins versants du Québec peuvent s'attendre à une hausse des débits (consensus élevé, supérieur à 90 %). Cette hausse serait davantage marquée au Sud et potentiellement liée à l'augmentation projetée des épisodes de gel/dégel (Charron *et al.*, 2013; Logan *et al.*, 2011), des températures et des précipitations évoqués dans les sections précédentes.

Le régime printanier est grandement influencé par l'enneigement maximal. Au Sud du Québec, les débits moyens diminueraient d'environ 10 %, ce qui s'explique par la réduction de l'enneigement maximal ainsi que par la hausse de l'évapotranspiration découlant d'un début hâtif de la saison de croissance des végétaux (Audet *et al.*, 2012), conséquences des températures plus chaudes. Au nord, les débits moyens augmenteraient de 10 % (consensus modéré) dus à l'accroissement de l'enneigement maximal, causé par l'augmentation des précipitations dans un climat plus chaud, mais encore suffisamment froid pour que les précipitations tombent sous forme de neige¹¹.

Le contraste entre les changements de débits des rivières du nord par rapport à celles du reste du Québec s'applique aussi pour le régime estival. Les débits moyens pourraient augmenter d'environ 5 % au nord et diminuer de 5 % au sud (consensus modéré). Cette projection s'explique par le changement anticipé des précipitations (diminution au sud et hausse au nord) combiné à l'augmentation de l'évapotranspiration, particulièrement au sud.

À l'automne, les débits moyens augmenteront au nord (consensus élevé, supérieur à 90 %), ce qui est cohérent avec la hausse des précipitations. Toutefois, malgré une faible augmentation projetée des précipitations dans le sud du Québec, les débits moyens y diminueront (consensus modéré) en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration. Ce résultat est aussi cohérent avec les projections d'allongement de la saison de croissance des végétaux (Audet *et al.*, 2012; Logan *et al.*, 2011).

¹¹ Les projections d'enneigement maximal présentées à la figure 1-10 ont été produites par les modèles climatiques de CMIP5 qui ont utilisé le scénario de GES RCP8.5. Ce dernier génère des réchauffements plus élevés que les scénarios de GES SRES sur lesquels sont basées les projections climatiques CMIP3 utilisées dans l'ensemble (cQ)² (voir encadré). C'est pourquoi la figure 1-10 indique une diminution de l'enneigement maximal pour le Nord du Québec contrairement aux projections (cQ)². Cela suggère que des projections hydroclimatiques basées sur le RCP8.5 pourraient potentiellement, de façon temporaire, produire des hausses des débits hivernaux dans le Nord du Québec, mais sur un horizon plus hâtif que 2041-2070.

1.8 Les glaces marines

Auteurs : Travis Logan (Ouranos) et Isabelle Charron (Ouranos)

Collaboratrice : Marie-France Sottile (MDDELCC - Ouranos)

Réviseurs : Ross Brown (Environnement Canada), Diane Chaumont (Ouranos), Patrick Grenier (Ouranos) et Philippe Roy (Ouranos).



Cette section décrit brièvement les connaissances sur les glaces marines pour l'hémisphère Nord, surtout l'océan Arctique et le nord de l'océan Atlantique étant donné leur grande proximité avec le Québec. Les glaces marines sont une composante importante de la cryosphère, qui joue un rôle significatif sur le climat terrestre à travers son influence sur l'énergie, le cycle de l'eau, la productivité primaire, les échanges gazeux ainsi que le niveau des mers. Les glaces de l'Arctique peuvent perdurer pendant plusieurs années et s'accumulent à la base avec le gel de l'eau de mer. Les glaces saisonnières n'atteignent généralement pas plus de 2 mètres d'épaisseur, tandis que les glaces qui ont plus d'un an peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur. Les glaces marines sont sensibles à plusieurs facteurs tels que la température de l'air, la température des océans, le vent et les courants marins. L'influence des changements de température sur les glaces de mer fait en sorte que celles-ci forment l'une des signatures les plus visibles des changements climatiques (Vaughan *et al.*, 2013).

1.8.1 Les observations

Faits saillants

- *Des études récentes, dont l'accent était mis sur les eaux limitrophes du Québec, démontrent un déclin de l'étendue des glaces marines sur ce territoire depuis les 50 dernières années.*
- *Dans le golfe du Saint-Laurent, les observations indiquent que la saison des glaces est plus courte que par le passé. L'englacement survient plus tardivement, bien que la variabilité interannuelle demeure grande et que des différences importantes sont observées pour les différents secteurs.*

Depuis le déploiement d'un système d'imagerie satellitaire à micro-ondes passives en 1979, il est possible d'avoir une estimation de l'étendue des glaces marines avec une résolution temporelle inférieure à une journée. Ces trente-quatre années de données montrent, tout d'abord, que le couvert annuel de la glace arctique a diminué d'environ de 3,5 à 4,1 % par décennie depuis 1979 à aujourd'hui (figures 1-13 et 1-14, (Vaughan *et al.*, 2013). Cette diminution est plus rapide en été et à l'automne, mais le couvert a néanmoins diminué à chaque saison (figure 1-13). De plus, malgré la tendance évidente à la baisse à partir des années 1970, on observe la présence d'une forte variabilité interannuelle dans l'étendue de glace (figure 1-14). Dans le centre de l'Arctique (excluant la mer du Groenland), les couverts de la glace pérenne (glace qui perdure un été) et de la glace pluriannuelle (glace qui dure plusieurs étés) ont aussi diminué durant ces mêmes années, d'environ 11,5 % et de 13,5 % par décennie, respectivement (Vaughan *et al.*, 2013). Enfin, l'épaisseur de la glace hivernale a diminué en moyenne de 0,6 m par décennie sur le bassin de l'Arctique pendant la période 1980 à 2008, ce qui indique que le volume de glace est aussi à la baisse. Ces données d'épaisseur des glaces proviennent de plusieurs techniques telles que l'utilisation des sonars sous-marins, d'altimétrie satellitaire et de la détection électromagnétique. Pour les endroits où une diminution de l'épaisseur de la glace est enregistrée, on note une augmentation de la vitesse de la dérive des glaces (Vaughan *et al.*, 2013).

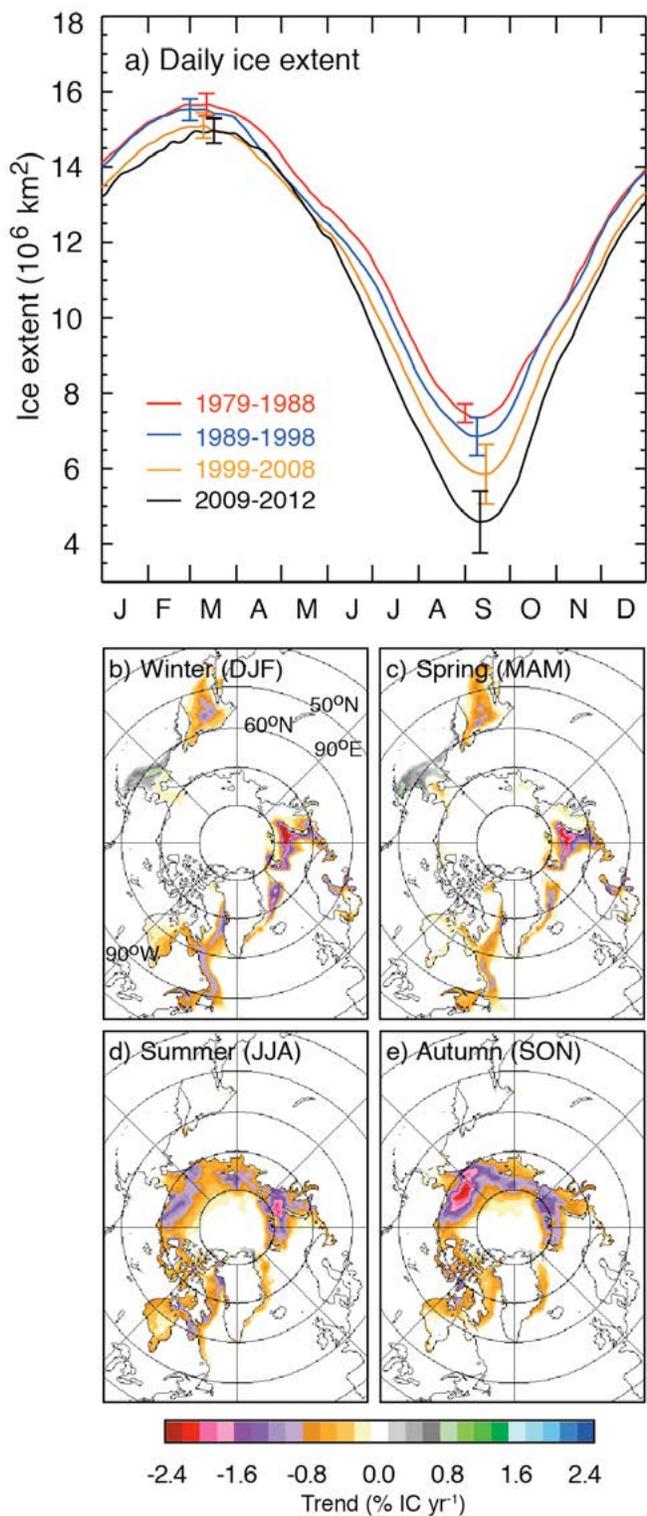


Figure 1-13 (a) Plots of decadal averages of daily sea ice extent in the Arctic (1979 to 1988 in red, 1989 to 1998 in blue, 1999 to 2008 in gold) and a 4-year average daily ice extent from 2009 to 2012 in black. Maps indicate ice concentration trends (1979– 2012) in (b) winter, (c) spring, (d) summer and (e) autumn (updated from Comiso, 2010)¹². Source: Vaughan et al. (2013)

12 La traduction française officielle de cette figure n'a pas été publiée par le GIEC au moment de la publication de cette synthèse. La légende de cette figure sera mise à jour lorsque cette traduction sera disponible.

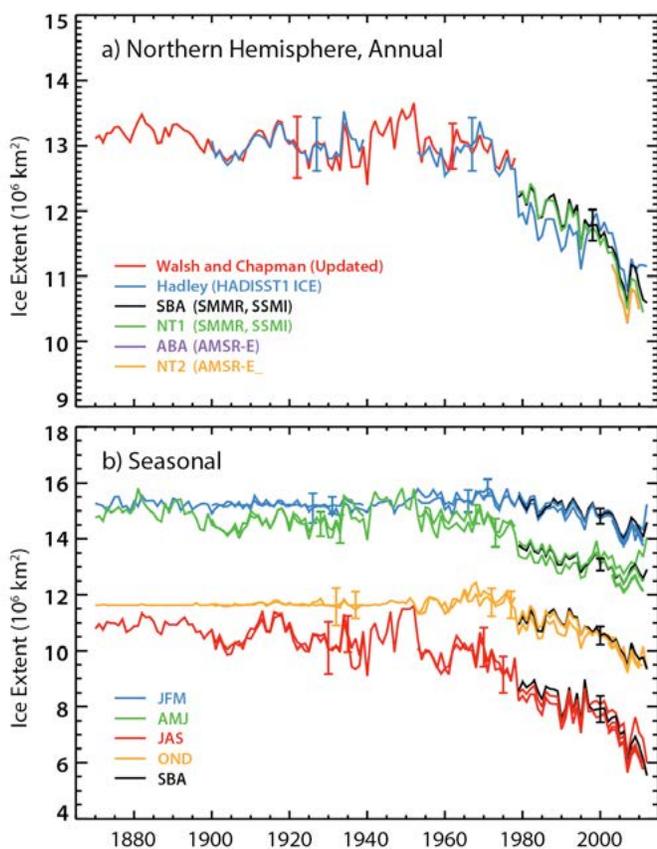


Figure 1-14 Ice extent in the Arctic from 1870 to 2011. (a) Annual ice extent and (b) seasonal ice extent using averages of mid-month values derived from in situ and other sources including observations from the Danish meteorological stations from 1870 to 1978 (updated from Walsh et Chapman (2001)). Ice extent from a joint Hadley and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) project (called HADISST1_Ice) from 1900 to 2011 is also shown. The yearly and seasonal averages for the period from 1979 to 2011 are shown as derived from Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) and Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) passive microwave data using the Bootstrap Algorithm (SBA) and National Aeronautics and Space Administration (NASA) Team Algorithm, Version 1 (NT1), using procedures described in Comiso et Nishio (2008), and Cavalieri et al. (1984), respectively; and from Advanced Microwave Scanning Radiometer, Version 2 (AMSR2) using algorithms called AMSR Bootstrap Algorithm (ABA) and NASA Team Algorithm, Version 2 (NT2), described in Comiso et Nishio (2008) and Markus et Cavalieri (2000). In (b), data from the different seasons are shown in different colours to illustrate variation between seasons, with SBA data from the procedure in Comiso et Nishio (2008) shown in black¹³. Source: Vaughan et al. (2013)

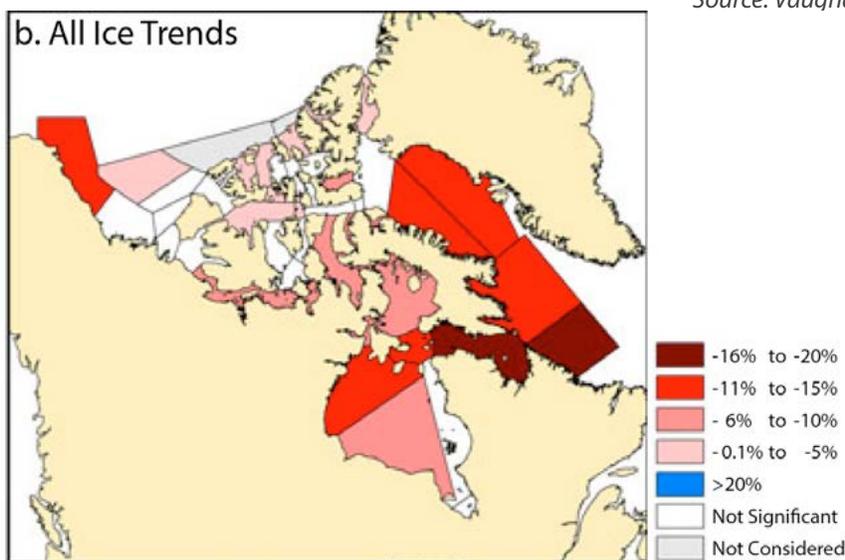


Figure 1-15 Réduction du couvert de glace (% par décennie) pour la période 1968-2010 dans l'arctique canadien. Seulement les tendances statistiquement significatives ($\alpha=0.05$) sont montrées. Source : adapté de Derksen et al. (2012)

¹³ La traduction française officielle de cette figure n'a pas été publiée par le GIEC au moment de la publication de cette synthèse. La légende de cette figure sera mise à jour lorsque cette traduction sera disponible.

Des études récentes dont l'accent a été mis, entre autres, sur la baie d'Hudson et la mer du Labrador montrent aussi le déclin de l'étendue des glaces marines sur ce territoire depuis les 50 dernières années (Derksen *et al.*, 2012; Tivy *et al.*, 2011). Plus spécifiquement, on note que l'étendue des glaces dans la baie d'Hudson a diminué de 6 à 15 % par décennie (figure 1-15), tandis que la région du Labrador a perdu près de 17 % de ses glaces d'été au courant de la période 1968-2010 (figure 1-15, Derksen *et al.*, 2012). La perte totale du couvert de glace et, par conséquent, l'apparition de l'eau libre en septembre sur plusieurs régions autour du Québec sont similaires aux résultats observés dans l'océan Arctique.

Une étude sur l'estuaire marin et le golfe du Saint-Laurent montre que l'englacement connaît une baisse de 0,27 % en moyenne par année pour la période de 1998 à 2012 (Senneville *et al.*, 2014) : les données sur les glaces marines proviennent du Service Canadien des Glaces. Au cours des 15 dernières saisons, soit la période 1998 à 2013, le taux annuel moyen de réduction a été de 1,53 %. Le pourcentage d'englacement maximum a aussi diminué de 46,9 % (1968-1998) à 36,4 % (1998-2013). Cette étude indique aussi que la saison des glaces est plus courte avec un englacement plus tardif que par le passé, bien que la variabilité interannuelle demeure grande et que des différences importantes sont observées pour les différentes régions le long du Saint-Laurent.

1.8.2 Les projections et les scénarios climatiques

Faits saillants

- À l'échelle planétaire, l'océan Arctique sera essentiellement sans glace en septembre avant 2050 selon un scénario de fortes émissions (RCP 8.5).
- L'incertitude liée à ces projections est grande et la réponse entre les modèles varie beaucoup. Les mécanismes qui contrôlent la réponse des glaces de mer dans les modèles climatiques ne sont toujours pas encore bien compris.
- On s'attend à ce que vers 2041-2070, la période pendant laquelle la baie d'Hudson est libre de glace s'allonge de plus de deux mois.
- Pour le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, on projette un englacement plus tardif de l'ordre de 10 à 20 jours tandis que la fonte pourrait être devancée de 20 à 30 jours pour l'horizon 2041-2070 par rapport à la période 1982-2011. De plus, la concentration de glace maximale annuelle est appelée à diminuer de 67 % dans cette région.

Les projections climatiques suggèrent une réduction de l'étendue de la glace marine de l'Arctique, et ce, au courant de toute l'année (Collins *et al.*, 2013). Ces réductions (figure 1-16), projetées jusqu'à la fin du 21^e siècle, varient de 43 % pour le RCP2.6 et de 94 % pour le RCP8.5 en septembre, et de 8 et 34 % respectivement pour les 2 RCP pour le mois de février. Cela implique, selon le RCP8.5, que l'océan Arctique sera essentiellement sans glace (superficie inférieure à 1x106 km²) en septembre avant 2050. Le volume de glace, quant à lui, est projeté de diminuer de 29 % (RCP2.6) à 73 % (RCP8.5) en février, et de 54 % (RCP2.6) à 96 % (RCP8.5) en septembre.

Il faut noter que l'incertitude liée à ces projections est grande et que la réponse entre les modèles varie beaucoup. Les mécanismes qui contrôlent la réponse des glaces de mer dans les modèles climatiques ne sont toujours pas encore bien compris. Plusieurs chercheurs ont montré, par exemple, que l'épaisseur de la glace marine de l'Arctique au 21^e siècle dépend de la distribution de l'épaisseur de la glace à la fin du 20^e siècle. Ce type d'étude suggère qu'une meilleure calibration ou validation des modèles est peut-être requise. Par contre, le moyen optimal d'effectuer ce genre d'analyse est difficile à cibler. Plusieurs chercheurs ont aussi utilisé un

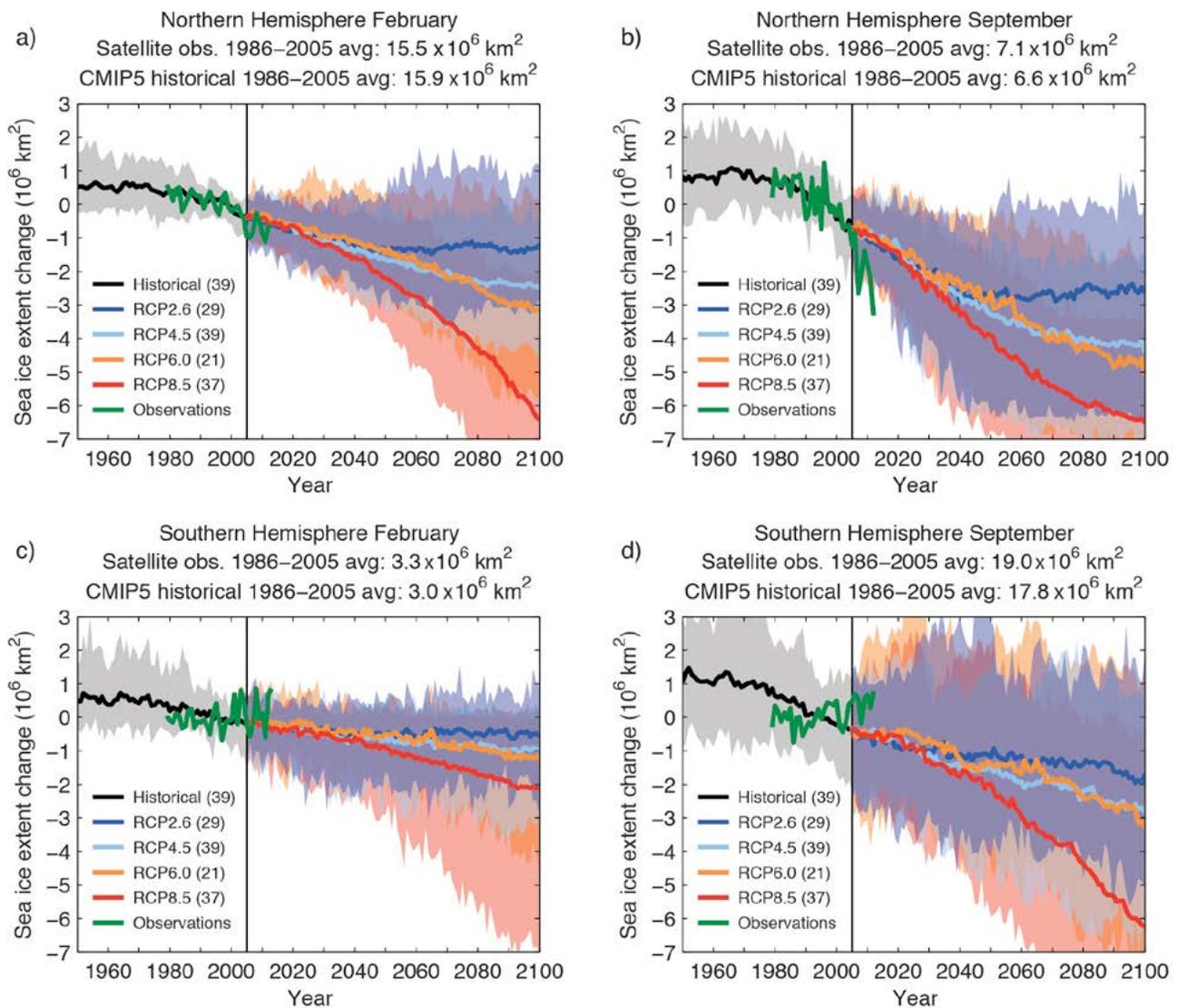


Figure 1-16 IPCC, 2013, Chapitre 12, figure 12.28. Changes in sea ice extent as simulated by CMIP5 models over the second half of the 20th century and the whole 21st century under RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 for (a) Northern Hemisphere February, (b) Northern Hemisphere September, (c) Southern Hemisphere February and (d) Southern Hemisphere September. The solid curves show the multi-model means and the shading denotes the 5 to 95% range of the ensemble. The vertical line marks the end of CMIP5 historical climate change simulations. One ensemble member per model is taken into account in the analysis. Sea ice extent is defined as the total ocean area where sea ice concentration exceeds 15% and is calculated on the original model grids. Changes are relative to the reference period 1986–2005. The number of models available for each RCP is given in the legend. Also plotted (solid green curves) are the satellite data of Comiso and Nishio (2008, updated 2012)¹⁴. Source: Collins et al. (2013)

14 La traduction française officielle de cette figure n'a pas été publiée par le GIEC au moment de la publication de cette synthèse. La légende de cette figure sera mise à jour lorsque cette traduction serai disponible.

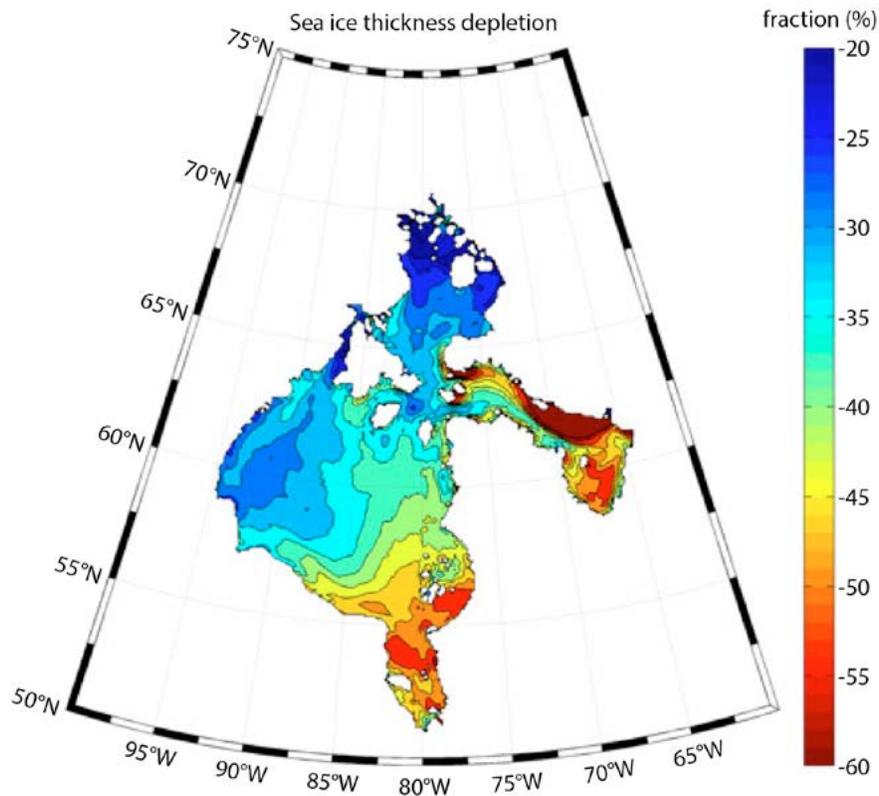


Figure 1-17 Changement relatif de l'épaisseur de glace hivernale (janvier à avril) projeté entre les périodes future (2041–2070) et référence (1961-1990). Source : Joly *et al.* (2011)

sous-ensemble de modèles sélectionnés selon leur capacité à reproduire des données observées (exemples : Massonnet *et al.* (2012); Stroeve *et al.* (2012); Wang et Overland, (2009)). Néanmoins, pour le moment, l'incertitude des réponses des modèles climatiques demeure importante.

Plus localement, les scénarios climatiques pour la région de la baie d'Hudson et pour l'estuaire du Saint-Laurent projettent des tendances à la baisse, similaires à celles attendues sur l'Arctique. Pour la baie d'Hudson, les projections dénotent un englacement plus tardif, soit de l'ordre de 25 à 30 jours, un déglacement de 22 à 24 jours plus tôt et une réduction 30 à 50 % de l'épaisseur de la glace hivernale pour la période 2041-2070 comparativement à la période 1961-1990 (figure 1-17, Joly *et al.* 2011). Ces résultats sont complémentaires à ceux de Senneville et St-Onge Drouin (2013), qui ont également effectué une modélisation des glaces de mer pour la baie d'Hudson. Dans les deux études, la baie James, l'est de la baie d'Hudson, ainsi que la baie d'Ungava sont parmi les régions où l'on projette que l'épaisseur de la glace pourrait subir de plus grandes diminutions dans le futur (régions d'études semblables à la figure 1-17 dans les deux cas). De plus, les résultats de la moyenne de l'ensemble CMIP5 pour la période 2081-2100 indiquent également que, d'après les projections, ces régions pourraient subir de fortes réductions dans la concentration de glace de mer pour le mois de février Collins *et al.*, (2013). L'étude de Joly *et al.* (2011) indique également que la période où la baie d'Hudson est en eau libre, sans glace, est appelée à s'allonger de plus de deux mois.

Finalement, pour le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, Senneville *et al.* (2014) projettent un englacement plus tardif de l'ordre de 10 à 20 jours, tandis que la fonte pourrait être devancée de 20 à 30 jours pour la période 2041-2070 par rapport à celle de 1982-2011. De plus, la concentration de glace maximale annuelle est appelée à diminuer de 67 % dans cette région.



1.9 Phénomènes liés au climat

1.9.1 Les sécheresses

Auteurs : Travis Logan (Ouranos)

Réviseurs : Isabelle Charron (Ouranos), Diane Chaumont (Ouranos), Patrick Grenier (Ouranos) et Philippe Roy (Ouranos).

La sécheresse est typiquement définie comme une période de conditions météorologiques anormalement sèches qui est suffisamment prolongée pour causer un sérieux déséquilibre hydrologique (Seneviratne *et al.*, 2012). Par contre, malgré une utilisation fréquente, le terme sécheresse peut être défini de plusieurs manières selon des intérêts différents. En effet, la littérature scientifique distingue plusieurs types de sécheresses incluant : la sécheresse météorologique causée par un déficit de précipitations; la sécheresse agricole qui se concentre sur des déficits d'humidité du sol (typiquement dans la zone racinaire proche de la surface) qui intègrent souvent des mesures non seulement des précipitations, mais aussi d'évapotranspiration; et la sécheresse hydrologique définie par des anomalies négatives de ruissellement, de niveaux d'eau de lacs ou de réservoirs souterrains (souvent mesurés à l'échelle de bassin versant). Un quatrième type, la sécheresse socio-économique, s'avère encore plus complexe en intégrant des facteurs humains de demande d'utilisation de l'eau. Cela explique, en partie, pourquoi des évaluations de changements (passés ou projetés) concernant des sécheresses peuvent varier d'une étude à l'autre (Seneviratne *et al.*, 2012).

En raison des définitions multiples et parfois complexes, ainsi que par un manque d'observations d'humidité du sol, une multitude d'indices ont été développés pour caractériser les conditions de sécheresse (Seneviratne *et al.*, 2012). Une description complète de tous ces indices est impossible dans un tel document, mais il est important de retenir que chaque indice a ses forces et ses faiblesses, et que chacun a typiquement été développé pour un usage spécifique. Ainsi, dans le contexte des changements climatiques, il est recommandé de considérer plusieurs indicateurs dans des études VI&A et surtout de bien sélectionner les indices selon la problématique en question (Seneviratne *et al.*, 2012).

1.9.1.1 Les observations

Faits saillants

- Pour le Sud du Québec, les observations montrent une légère tendance à la baisse des indices de sécheresses météorologiques.
- Pour les sécheresses agricoles, il y a un désaccord dans les études scientifiques sur les tendances observées au Québec, possiblement lié à la méthode de calcul de l'évapotranspiration, la calibration des indices de sécheresses, ainsi que des différences dans les jeux de données des précipitations observées.

En raison des complexités décrites dans la section précédente, il n'est pas surprenant que les études scientifiques montrent des résultats variés quant aux tendances observées dans les conditions de sécheresse.

En termes d'indices de sécheresses météorologiques pour le Sud du Québec, Donat *et al.* (2013) indiquent une légère tendance, statistiquement significative, à la baisse (ou durée réduite de 0 à 2 jours par décennie) dans le maximum annuel de nombre de jours consécutifs sans précipitations pour la période 1901-2010.

Pour les sécheresses agricoles, Dai (2011, 2012) observe des tendances pour des conditions plus sèches sur le Centre du Québec et une tendance à des conditions plus humides dans le sud et le nord pour la période 1950-2010. Les résultats de cette étude sont d'abord démontrés pour la précipitation totale, avec des tendances de -0,1 à -0,4 mm/j par 50 ans pour le Centre du Québec, et de 0 à 1,0 mm/j par 50 ans pour le Nord et le Sud du Québec. Ces résultats sont reflétés dans les tendances du « self calibrating Palmer Drought Severity Index » (sc_PDSI; Wells *et al.*, 2004) pour lequel l'auteur signale des tendances vers des conditions plus sèches dans le Centre du Québec (tendance dans le sc_PDSI entre -1 et -4 par 50 ans) et des tendances à des conditions plus humides pour le sud et le nord (tendance dans le sc_PDSI entre 0,1 et 1,0). Par contre, (Sheffield *et al.*, 2012) obtiennent des résultats pour ce même indice (sc_PDSI) indiquant que la zone d'assèchement dans le Centre du Québec est soit absente soit beaucoup plus réduite. De plus, Zhang *et al.* (2011) n'ont trouvé aucune tendance statistiquement significative de conditions plus sèches au Québec dans leur analyse des données de stations homogénéisées.

Afin de résoudre ce désaccord de résultats, Trenberth *et al.* (2013) ont fait une comparaison de plusieurs articles récents indiquant que ces différences pouvaient avoir des origines diverses incluant : la méthodologie utilisée pour calculer l'évapotranspiration de l'indice, le choix de la période de référence pour définir et calibrer l'indice, ainsi que des différences (parfois importantes) dans les jeux de données des précipitations observées.

1.9.1.2 Les projections et les scénarios climatiques

Faits saillants

- Bien qu'à ce jour les études sur les tendances observées manquent de consensus, le signal de changement à plus long-terme semble un peu plus clair.
- Au Québec, à l'horizon 2081-2100, 12 sur 17 des simulations CMIP3 utilisées projettent un raccourcissement de la séquence maximale de jours consécutifs sans précipitations à l'échelle annuelle et hivernale (DJF), mais un allongement de ces épisodes pour la saison estivale (JJA).
- Les projections d'anomalies d'humidité du sol montrent qu'au moins 66 % (10 sur 15) des simulations CMIP3 disponibles projettent des conditions plus sèches annuellement et encore davantage pour la saison estivale sur l'horizon 2081-2100.
- Les projections CMIP5 d'humidité du sol (0-10 cm de profondeur) projettent des conditions plus sèches à l'échelle annuelle et estivale au Québec dans le futur.

Il faut noter que la prudence recommandée dans l'interprétation des différents types d'indices de sécheresses (avec des applications et échelles de temps différentes) dans la section précédente est toujours importante dans l'investigation des projections. Par contre, si les résultats sur les tendances observées manquent encore de consensus, le signal à plus long terme dans les projections climatiques semble légèrement plus clair. Le rapport spécial SREX du GIEC (Seneviratne *et al.*, 2012) montre que, pour le Québec, 12 des 17 simulations CMIP3 analysées projettent un raccourcissement de la séquence maximale de jours consécutifs sans précipitations à l'échelle annuelle et hivernale (DJF) à l'horizon 2081-2100 par rapport à la période 1980-1999. Par contre, dans le Sud de la province, un allongement de ces épisodes est projeté pour la saison estivale (JJA). Dans le Sud et le Centre de la province, les projections d'anomalies d'humidité du sol montrent que 10 des 15 simulations analysées à cet égard projettent des conditions annuelles plus sèches, surtout pour la saison estivale à l'horizon 2081-2100 (Seneviratne *et al.*, 2012).

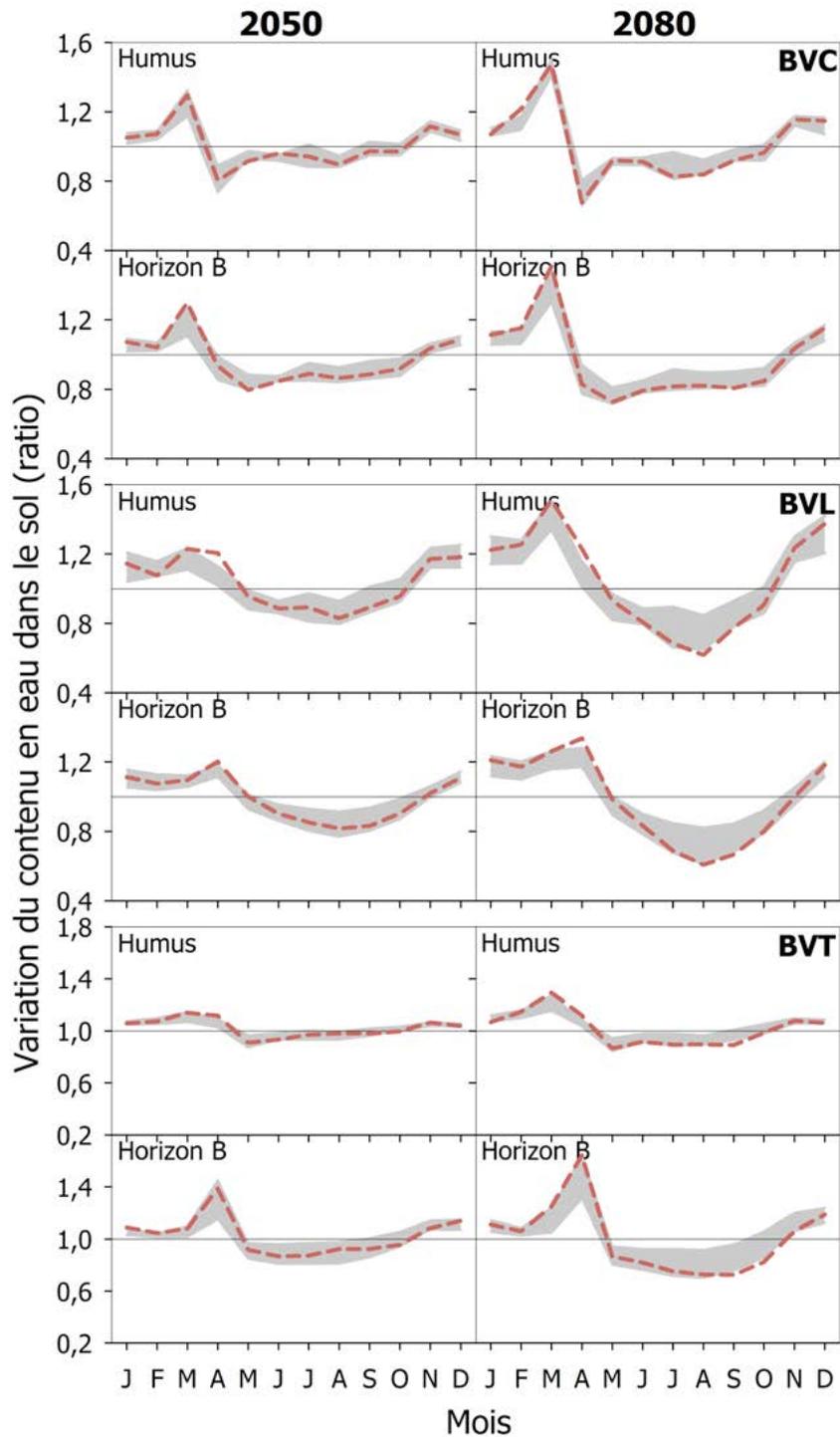


Figure 1-18 Changements projetés du contenu en eau pour les trois sites de l'étude Houle et al. (2012) : érable à sucre (BVC), sapin baumier (BVL) et d'épinette noire (BVT). Les changements (exprimé en ratio des valeurs futures sur valeurs présentes) sont projetés pour les couches d'humus et de l'horizon B pour les horizons 2050 (2041-2070) et 2080 (2071-2100) par rapport à la période 1971-2000. La ligne rouge représente les changements projetés utilisant un scénario produit avec le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC 4.2.3). L'enveloppe grise donne un intervalle d'incertitude construite à partir de cinq simulations globales de CMIP3 sélectionnés de manière à bien couvrir l'ensemble CMIP3 au complet. Source : adapté de Houle et al. (2012).

Les résultats du rapport SREX sont renforcés par les projections CMIP5. Selon le GIEC (Collins *et al.*, 2013), les projections d'humidité du sol (0-10 cm de profondeur) montrent des changements vers des conditions plus sèches à l'échelle annuelle au Québec. En effet, dans le Sud du Québec, les simulations forcées par RCP8.5 projettent un signal clair d'assèchement avec un changement moyen de l'ensemble supérieur à deux écarts-types de la variabilité naturelle et un consensus d'au moins 90 % des simulations quant au signal du changement. Dirmeyer *et al.* (2013) montrent également un fort consensus pour des conditions futures estivales plus sèches dans les simulations CMIP5 forcées par RCP 8.5. Les résultats de l'AR5 du nombre de jours consécutifs sans pluie à l'échelle annuelle sont aussi complémentaires à ceux du rapport SREX avec des projections RCP8.5 qui montrent des durées réduites de 0 à -5 jours pour toutes les régions du Québec (Collins *et al.*, 2013).

Houle *et al.* (2012) présentent des résultats semblables pour une modélisation des conditions de sol observées et futures pour trois sites hébergeant différents types de forêts. La figure 1-18 montrent des changements projetés du contenu en eau des couches organiques (humus) et du sol minéral (horizon B) pour les sites d'érable à sucre (BVC), de sapin baumier (BVL) et d'épinette noire (BVT) sur les horizons futurs de 2041-2070 et de 2071-2100 par rapport à la moyenne 1971-2000. Les résultats indiquent des conditions futures plus sèches pour les mois de mai à octobre (avec un ratio des valeurs futures sur valeurs présentes inférieur à 1). Les changements pour l'horizon 2080 sont plus prononcés que ceux pour l'horizon 2050, avec des réductions mensuelles du contenu en eau de 20 à 40 % (ratio de 0,8 à 0,6) pour le site du sapin baumier (BVL).

1.9.2 Les feux de forêts

Auteurs : Travis Logan (Ouranos)

Collaborateur : Dominic Cyr (UQO)

Réviseur : Isabelle Charron (Ouranos)

L'activité future des feux de forêt dépendra à la fois de répercussions directes des changements climatiques sur l'occurrence d'une météo propice aux feux et de répercussions indirectes par l'entremise de modifications graduelles aux assemblages d'espèces ainsi qu'à la configuration des paysages. En plus des changements climatiques, d'autres facteurs pourront jouer un rôle non négligeable, notamment l'aménagement forestier ainsi que les efforts de suppression des feux.

1.9.2.1 Les observations

Une réduction de l'activité des feux au cours des 200 dernières années a été documentée à plusieurs endroits en forêt boréale canadienne (Bergeron *et al.*, 2001; Larsen, 1997; Tardif, 2004; Wallenius *et al.*, 2011). Cette réduction semble avoir été principalement liée à une réduction de l'occurrence d'épisodes de météo propice aux grands feux causés par une augmentation des précipitations (Girardin et Wotton, 2009), relation confirmée par une méta-analyse récente de plus de 28 reconstitutions de l'historique des feux partout au Canada, mises en relation avec l'évolution de l'indice de sécheresse canadien (Girardin *et al.*, 2013a). Toutefois, le réchauffement observé dans les années récentes ainsi que projeté pour les prochaines décennies suggère une augmentation de périodes sèches propices aux feux (Bergeron *et al.*, 2010; Girardin *et al.*, 2013a).

1.9.2.2 Les projections et les scénarios climatiques

Les projections de l'activité future des feux sur le territoire québécois ont considérablement évolué ces dernières années, allant de possibles réductions, alors que l'on croyait probable une augmentation des précipitations suffisante pour surcompenser l'effet du réchauffement (ex. Flannigan *et al.* 1998), à une augmentation substantielle (ex. Bergeron *et al.*, 2010; Girardin *et al.*, 2013a). Les projections moyennes les plus récentes faites en utilisant les simulations CMIP3 tendent à converger vers une activité des feux accrue d'environ un facteur deux pour la période 2081 à 2100 par rapport au régime de 1961 à 1999. Par contre, celles-ci demeurent associées à une large plage d'incertitude principalement liée à l'incertitude climatique, allant d'un facteur d'environ 1,5 jusqu'à 3 fois plus d'activité par rapport à la période de référence (Bergeron *et al.*, 2010; Girardin *et al.*, 2013a). De plus, comme la composition des paysages boréaux évoluera aussi au cours du 21^e siècle, il reste difficile de projeter avec précision l'activité des feux du futur, notamment en raison d'un possible enfeuillage de certaines régions boréales, végétation d'une plus faible inflammabilité qui pourrait dans une certaine mesure compenser l'effet des déterminants météorologiques (Girardin *et al.*, 2013b; Terrier *et al.*, 2013).

1.9.3 La hausse du niveau de la mer

Auteur : Hélène Côté (Ouranos)

Réviseurs: Albéric Botella (U. Ottawa) et Glenn Milne (U. Ottawa)

Faits saillants

- *Le niveau global moyen de la mer a augmenté au cours des dernières décennies et cette hausse est attribuable à l'augmentation des températures sous l'action des GES générés par l'activité humaine.*
- *Les dernières projections du GIEC prévoient une baisse du niveau relatif de la mer de 0,3 à 1,5 m selon les scénarios d'émissions de GES RCP8.5 et RCP4.5 (figure 1-20) le long des côtes du détroit et de la baie d'Hudson.*
- *Dans le golfe du Saint-Laurent, la projection médiane de l'ensemble du GIEC basé sur le scénario RCP8.5 laisse entrevoir une hausse du niveau relatif de la mer de 30 à 75 cm (figure 1-20a).*
- *Les réductions de GES hâtives offrent une meilleure atténuation de la hausse du niveau moyen de la mer que des réductions tardives, car cela agit directement sur l'important mécanisme qu'est l'expansion thermique de l'océan. En termes d'adaptation et de réduction des répercussions, cela revêt une importance primordiale pour les régions côtières où la hausse du niveau moyen de la mer est aggravée par les mouvements descendants de la croûte terrestre.*

Le dernier rapport du GIEC (Church *et al.*, 2013) fait état de la progression des connaissances en ce qui a trait à la hausse du niveau de la mer. Cette section puisera dans ce rapport les éléments les plus pertinents pour le Québec concernant le golfe du Saint-Laurent et la baie d'Hudson. Selon le GIEC, on dispose maintenant de suffisamment d'observations pour établir que le niveau global moyen de la mer (voir encadré 4) a augmenté au cours des dernières décennies et que cette hausse est attribuable à l'augmentation des températures sous l'action des GES générés par l'activité humaine. La contribution la plus importante provient de l'absorption de chaleur par l'océan qui se dilate en devenant plus chaud. Pour l'instant, ce transfert de chaleur se limite aux couches superficielles de l'océan, mais il progressera graduellement vers l'océan profond dans l'avenir. La fonte des glaciers continentaux a aussi contribué de manière significative à l'élévation du niveau global moyen de la mer. La contribution de la fonte des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique est jusqu'à ce jour modeste, mais ce phénomène aura une importance grandissante dans le futur. Enfin, il est important de rappeler que la fonte de la banquise arctique n'a aucune conséquence directe sur le niveau des océans.

Encadré 1-4. Qu'entend-on au juste par niveau de la mer?

Il faut d'abord comprendre ce que l'on entend par niveau de la mer. Premièrement, la surface de la mer n'est pas uniforme d'un endroit à l'autre du globe. Elle est modulée par de nombreux paramètres locaux tels que les vents, les courants marins, les marées, la pression atmosphérique, la densité de l'eau de mer, le champ gravitationnel. Le niveau absolu de la mer, ou niveau géocentrique, est mesuré par rapport au centre de la terre grâce à des satellites altimétriques depuis le début des années 90. Or, ce niveau fluctue rapidement dans le temps selon les marées, la pression atmosphérique, mais aussi à plus long terme selon la température, l'apport d'eau douce par la fonte de la glace continentale et des cours d'eau, les mouvements tectoniques, etc. Lorsque l'on moyenne le niveau géocentrique sur une période suffisamment longue, on élimine l'effet des fluctuations rapides afin d'obtenir le niveau moyen de la mer (NMM) en un point. Le niveau global moyen de la mer (NGMM) est en fait la moyenne sur tous les points du globe du niveau moyen de la mer. On peut aussi mesurer le niveau de la mer par rapport à un repère sur la terre ferme à l'aide d'un marégraphe: on parle alors du niveau relatif de la mer (NRM). Ce dernier est affecté par les mouvements verticaux de la croûte terrestre comme l'ajustement isostatique glaciaire et les mouvements tectoniques ou encore, dans certains cas, par des affaissements causés par le pompage excessif de la nappe phréatique. Le niveau moyen de la mer réagit aux changements du système climatique, cette variable est donc utilisée pour mesurer l'ampleur du changement climatique. Lorsque l'on doit évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur les régions côtières, c'est du niveau relatif de la mer dont il faut tenir compte.

Si le niveau global moyen de la mer a augmenté au cours de l'ère industrielle et que cette hausse s'est vraisemblablement accélérée au cours des dernières décennies (niveau de confiance élevé à 90-100 %), il en va autrement du niveau moyen de la mer pour de plus petites régions du globe. En effet, à une échelle plus régionale, le niveau d'eau dépend fortement des courants marins, de la circulation atmosphérique, de la densité de l'eau de mer (fonction des températures en surface, mais aussi de l'apport d'eau douce par des cours d'eau ou la fonte de glace), de la proximité des calottes et glaciers (effets gravitationnels) ou d'autres phénomènes géophysiques (effets rotationnels). Certains phénomènes se combinent en s'annulant ou bien fluctuent dans le temps à des échelles interannuelles et parfois décennales faisant en sorte qu'il est plus difficile de détecter des tendances significatives.

L'exposition au risque de submersion marine est évaluée à partir du niveau relatif de la mer qui tient compte, bien sûr, du niveau moyen de la mer, mais aussi des mouvements verticaux de la surface terrestre (voir encadré). Or, au Québec, les mouvements de la croûte terrestre sont importants et leur cause principale est une conséquence de la dernière glaciation. À cette époque, l'inlandsis laurentidien recouvrait pratiquement tout le Canada et le nord des États-Unis. L'épaisseur de cette calotte glaciaire aurait atteint près de 4 km au-dessus du Nunavik, ce qui excède l'épaisseur maximale actuelle de la calotte du Groenland. Avec une telle masse de glace, la croûte terrestre qui se trouve sous la calotte s'affaisse, tandis que celle qui se trouve en périphérie de la calotte se soulève légèrement en un genre de renflement (bulge). Quand la glace fond, c'est l'inverse qui se produit : la partie de la croûte qui se trouvait sous la glace se soulève, et la zone en périphérie s'affaisse. Après la disparition de la glace, la surface peut mettre de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années pour reprendre sa forme : c'est ce que l'on appelle le rebond postglaciaire ou encore l'ajustement isostatique glaciaire. La majeure partie du territoire québécois et de la baie d'Hudson est toujours en train de se soulever, et ce, pour longtemps encore. Située autrefois en périphérie de la calotte, la croûte terrestre du golfe du Saint-Laurent subit un mouvement dans la direction opposée et s'enfonce graduellement. La figure 1-19a montre l'ajustement isostatique obtenu en moyennant les valeurs du modèle ANU (Lambeck *et al.*, 1998) et celles du modèle ICE-5G (Peltier, 2004). Le territoire autrefois recouvert par l'inlandsis laurentidien est l'une des régions

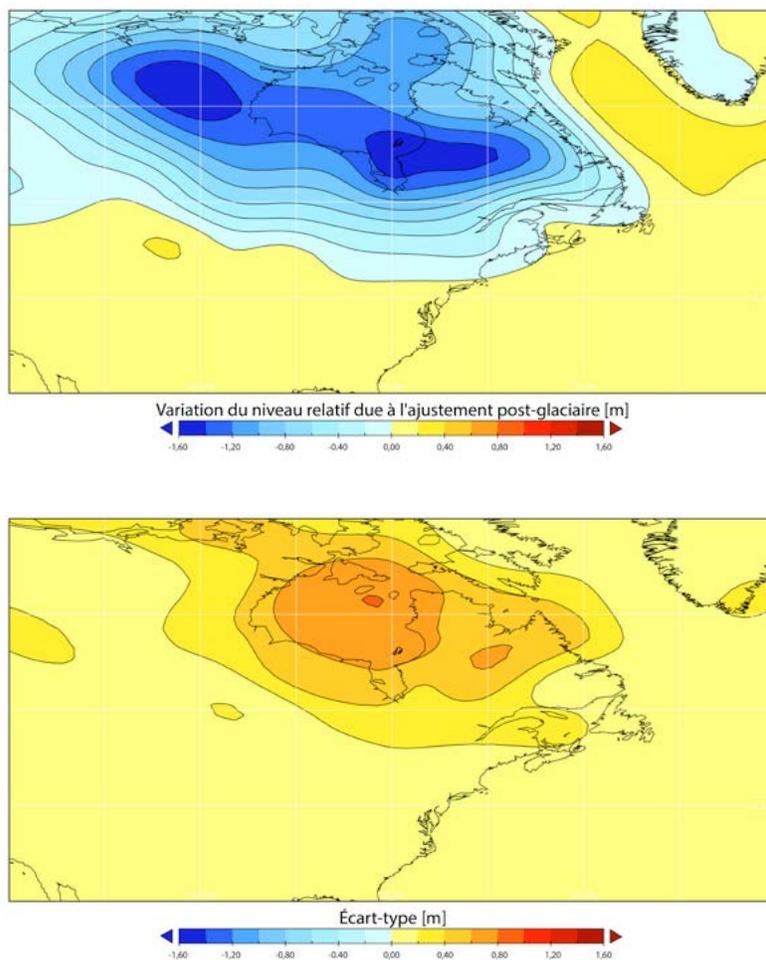


Figure 1-19 Variation de l'ajustement isostatique (m) entre la moyenne de la période 1985-2006 et la moyenne de la période 2081-2100 (a) calculée en moyennant la variation obtenue du modèle ANU (Lambeck et al., 1998) et celle du modèle ICE-5G (Peltier, 2004). En (b) la différence entre les deux modèles. Source : figure élaborée par Albéric Botella avec les données fournies par l'ICDC à l'Université de Hambourg.

du monde où l'ajustement isostatique est le plus difficile à déterminer. On peut constater les écarts importants entre les deux modèles d'ajustement isostatique à la figure 1-19b. Le GIEC a d'ailleurs combiné les résultats de ces deux modèles pour estimer l'ajustement isostatique (Church et al., 2013).

Les dernières projections du GIEC projettent une baisse du niveau relatif de la mer de 0,3 à 1,1 m selon le scénario d'émissions de GES RCP8.5 (figure 1-20) et de 0,3 à 1,2 m selon le scénario RCP4.5 (figure 1-20b) du détroit jusqu'à la baie d'Hudson pour la période 2081-2100 par rapport à 1986-2005. Il est important de noter que le consensus est fort parmi les projections de l'ensemble. C'est donc dire que le fort ajustement isostatique dans ce secteur atténue la hausse du niveau de la mer due aux autres contributions. En effet, selon la figure 1-19a, la côte se sera soulevée d'environ 1,4 m de la baie James jusqu'aux environs de Povungnituk et de 0,4 à 1,1 m sur les rives du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava, d'ici 2100.

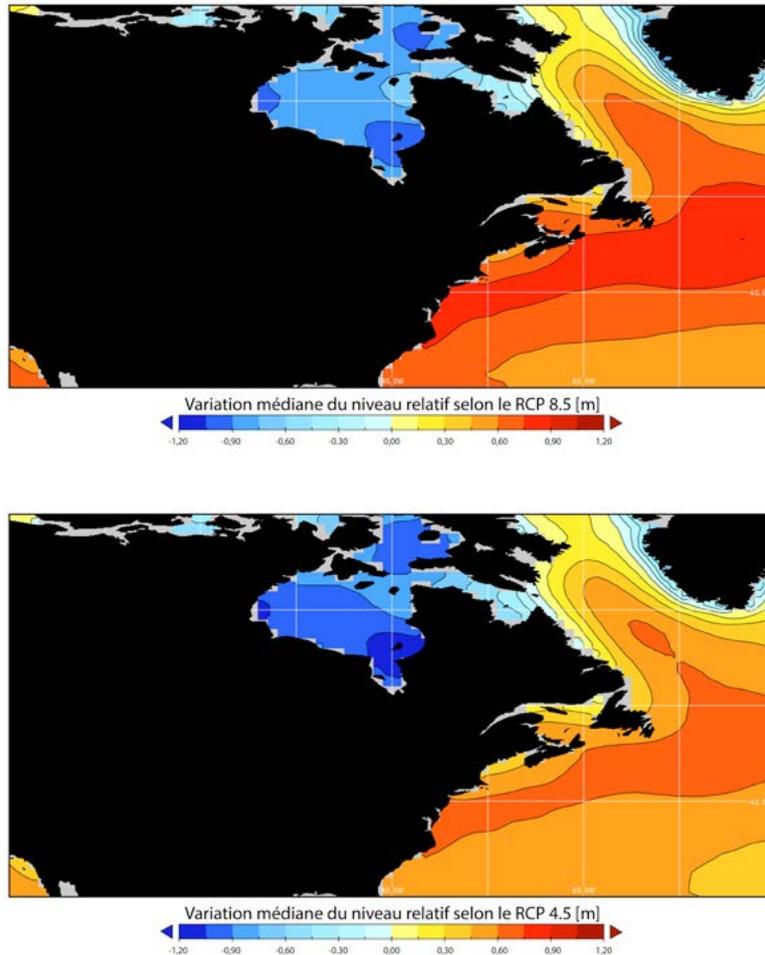


Figure 1-20 Hausse du niveau relatif de la mer obtenue par la différence entre les moyennes des périodes 2081-2100 et 1985-2006. Les cartes représentent la valeur médiane de l'ensemble des projections du GIEC basées sur le scénario de GES RCP8.5 (a) et RCP4.5 (b). Le calcul du niveau relatif de la mer inclut les contributions des glaciers, des calottes glaciaires (bilan de masse en surface et dynamique), du stockage terrestre, de l'expansion thermique, de l'effet de baromètre inverse et de l'ajustement isostatique. Les détails méthodologiques relatifs à ce calcul sont décrits à la section 13.SM.2.4 du AR5 WG1. Source : figure élaborée par Albéric Botella avec les données fournies par l'ICDC à l'Université de Hambourg

La situation est très différente pour le golfe du Saint-Laurent, surtout pour les Îles-de-la-Madeleine et une bonne partie de la Gaspésie. La projection médiane de l'ensemble du GIEC laisse entrevoir une hausse du niveau relatif de la mer de 30 à 75 cm (figure 1-20a) selon le scénario RCP8.5 et de 15 à 60 cm (figure 1-20b) selon le scénario RCP4.5 pour 2081-2100 par rapport à 1986-2005. Les projections varient sur une plus grande plage de valeurs, pouvant aller d'une faible baisse du niveau relatif de 20 cm jusqu'à de fortes hausses de 90 cm. À noter que les hausses du niveau relatif de la mer seront légèrement plus faibles dans l'estuaire et le long de la Côte-Nord, car ces régions subissent un faible ajustement isostatique d'environ 30 à 45 cm d'ici 2100, tandis que les Îles-de-la-Madeleine et une partie de la Gaspésie se seront enfoncées d'environ 10 cm (figure 1-19).

Pour finir, les travaux du GIEC montrent que pour une même somme cumulative de GES émis, les réductions de GES hâtives offrent une meilleure atténuation de la hausse du niveau moyen de la mer que des réductions tardives, car cela agit directement sur l'important mécanisme qu'est l'expansion thermique de l'océan. En termes d'adaptation et de réduction des répercussions, cela revêt une importance primordiale pour les régions côtières où la hausse du niveau moyen de la mer est aggravée par les mouvements descendants de la croûte terrestre.

1.9.4 La salinité de la mer

Auteur : Hélène Côté (Ouranos)

Réviseurs : Stéphane O'Carroll (Ouranos), Robert Siron (Ouranos), Philippe Roy (Ouranos), Richard Turcotte (CEHQ) et Ramón de Elía (Ouranos).

Faits saillants

- *On détecte une tendance à la baisse de la salinité des eaux de surfaces pour tout le golfe et l'estuaire du St-Laurent à l'exception des hauts-fonds des Îles-de-la-Madeleine sur la période 1950-2011.*
- *Pour l'ensemble du golfe et de l'estuaire, la tendance 1951-2009 de la salinité à 50 m de profondeur est à la baisse, mais le degré de confiance est plus faible.*
- *Un petit sous-ensemble de modèles de CMIP5 projette une faible diminution de la salinité du golfe du Saint-Laurent pour la période 2046-2065 par rapport à la période 1985-2006. Vu le petit nombre de modèles utilisés ainsi que certaines améliorations devant leur être apportées, il est encore difficile d'établir un niveau de confiance pour ces projections. À plus long terme, l'ensemble CMIP5 constitué de 32 modèles projette une diminution de la salinité en 2081-2100, mais elle n'est pas statistiquement significative.*
- *Les observations requises pour calculer des tendances historiques de la salinité dans la baie d'Hudson sont insuffisantes.*
- *Les projections d'un sous-ensemble de modèles de CMIP5 laissent entrevoir une baisse de la salinité dans la baie d'Hudson pour la période 2046-2065 par rapport à 1985-2006. Le nombre de modèles utilisés est insuffisant pour établir un niveau de confiance. Ce résultat est toutefois qualitativement cohérent avec les projections de précipitations et de débits de rivières.*

La salinité des océans varie considérablement selon la profondeur et la région considérée. Elle dépend de la température de l'eau, des courants marins, du volume d'eau douce déversé par les rivières le long des côtes, de la proximité des glaciers, de l'intensité de l'évaporation et de la quantité de précipitations reçues. Par conséquent, tant à l'échelle planétaire que locale, la salinité de la mer est contrôlée par des processus purement océaniques, mais aussi par ceux qui résultent des interactions entre l'océan, l'atmosphère et la surface terrestre à travers le cycle hydrologique.

Selon le dernier rapport du GIEC (Rhein *et al.*, 2013), l'activité humaine a très probablement contribué, depuis les années 1950, à accentuer la répartition géographique de la salinité à la surface des océans. Autrement dit, les eaux des régions qui étaient déjà plus salées le seront davantage, tandis que la salinité diminuera dans celles où elle était déjà plus faible. Les changements de la salinité apparaissent aussi dans les eaux profondes. Cette amplification, qui est probablement attribuable aux changements déjà survenus dans le cycle de l'eau (Bindoff *et al.*, 2013), devrait se poursuivre dans le futur. En effet, toujours selon le GIEC (Collins *et al.*, 2013), les projections de salinité issues de 32 modèles climatiques globaux de l'ensemble CMIP5 permettent d'envisager une baisse significative de la moyenne annuelle de la salinité de l'océan (2081-2100 vs 1986-2005 pour le scénario RCP8.5) pour presque toutes les régions dont la latitude se trouve au nord de 40°N. Toutefois, lorsque l'on examine de plus près les régions côtières du Québec pour des fenêtres temporelles plus rapprochées, le portrait est moins clair, en partie parce que certains de ces modèles globaux ont une résolution spatiale trop grossière pour bien représenter la baie d'Hudson, le détroit d'Hudson et le golfe du Saint-Laurent.

Dans le golfe du Saint-Laurent, le traitement effectué par Hebert (2013) des observations issues de la Ocean Science Hydrographic Climate Database (Gregory, 2004) permet de détecter une tendance à la baisse de la salinité des eaux de surface pour tout le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, à l'exception des hauts-fonds des Îles-de-la-Madeleine sur la période 1950-2011. La même étude note, avec un niveau de confiance plus faible, une tendance à la baisse de la salinité à 50 m pour l'ensemble du golfe et de l'estuaire. Dans le cas de l'estuaire, la diminution de la salinité à 50 m est plus marquée pendant les trente dernières années (1979-2009). La série d'observations utilisée est suffisamment longue pour relever d'importantes variations décennales de la salinité (Hebert, 2013). Selon une évaluation réalisée par Loder et van der Baaren (2013) à partir de 6 ESM faisant partie de CMIP5, il appert que ces modèles ont de la difficulté à reproduire certaines caractéristiques importantes du couvert de glace et de la circulation océanique dans l'Atlantique Nord. Cela produit certains écarts par rapport aux observations pour plusieurs variables océaniques, dont la salinité. Ce sous-ensemble de modèles projette une faible diminution de la salinité pour la période 2046-2065 par rapport à la période 1985-2006 (voir aussi Lavoie *et al.*, 2013). Vu le petit nombre de modèles utilisés ainsi que certaines améliorations devant leur être apportées, il est encore difficile d'établir un niveau de confiance pour ces projections. À plus long terme, l'ensemble CMIP5 constitué de 32 modèles projette une diminution de la salinité en 2081-2100, mais elle n'est pas statistiquement significative (Bindoff *et al.*, 2013).

Selon Steiner *et al.* (2013), les observations requises pour calculer des tendances historiques de la salinité dans la baie d'Hudson ne sont pas disponibles. Par contre, cette étude met en évidence que la salinité de surface de la baie d'Hudson est en grande partie déterminée par l'apport d'eau douce des rivières qui s'y jettent. Ces débits connaissent une forte variabilité décennale, mais présentent une tendance à la hausse depuis le début des années 90 (Déry *et al.*, 2011). Cette tendance à la hausse des débits s'observe dans la plupart des régions arctiques (Déry *et al.*, 2009) et est cohérente avec la hausse des précipitations. Les projections du sous-ensemble de 6 des ESM de CMIP5 laissent entrevoir une baisse de la salinité dans la baie d'Hudson pour la période 2046-2065 par rapport à 1985-2006 (Loder et van der Baaren, 2013). Le nombre de modèles utilisés est insuffisant pour établir un niveau de confiance. Toutefois, ce résultat est qualitativement cohérent avec l'augmentation projetée des débits de septembre à mai des rivières se jetant dans la baie d'Hudson (voir la section 1.7).

1.9.5 La qualité de l'air

Auteur : Travis Logan (Ouranos)

Collaboratrice : Marie-France Sottile (MDDELCC - Ouranos)

Réviseur : David Plummer (Environnement Canada)

Si la qualité de l'air dépend largement des émissions anthropogéniques (locales, régionales et globales) et biogéniques (issues de la végétation et du sol), elle est néanmoins influencée par plusieurs aspects du système climatique tels que la température, l'humidité, la vitesse et direction du vent, ainsi que la précipitation (Kelly *et al.*, 2012; Kirtman *et al.*, 2013). Ces variables affectent, à leur tour, les processus de chimie en phase gazeuse, la chimie des aérosols, le transport, la dispersion, les processus affectant les gaz et les aérosols dans les nuages, ainsi que les émissions et la déposition (Kelly *et al.*, 2012). Parmi les différents polluants présents dans l'atmosphère, la plupart des études scientifiques sur le sujet de la qualité de l'air en lien avec les changements climatiques se concentrent sur l'ozone troposphérique (O₃) et les particules fines en suspension (PM_{2,5}). Ce sont également les deux polluants responsables de la plupart des effets sérieux sur la santé humaine reliés à la qualité de l'air.

1.9.5.1 Les observations

Faits saillants

- *Au Québec, de 1974 à 2009, les concentrations de polluants classiques indiquent globalement une amélioration de la qualité de l'air.*
- *Par contre, les niveaux d'ozone troposphérique (près de la surface) en milieu urbain montrent paradoxalement une augmentation dans les concentrations pour les années 1988 à 2009 au Québec.*

Au Québec, de 1974 à 2009, les concentrations de polluants classiques indiquent globalement une amélioration de la qualité de l'air (Lebel *et al.*, 2012). Pourtant, localement, on atteint parfois encore des niveaux au-dessus des seuils pour la santé humaine. Par contre, en termes d'ozone troposphérique en milieu urbain, Lebel *et al.* (2012) montrent qu'il y a eu paradoxalement une augmentation dans les concentrations pour les années 1988 à 2009 au Québec. Cela s'explique par le fait qu'il y a également eu une diminution des concentrations de monoxyde d'azote, qui réagit et diminue les concentrations d'ozone en proximité des sources importantes (ex. en proximité des corridors routiers) (Lebel *et al.*, 2012).

Or, le constat est généralement le même en Ontario où entre 2001 et 2011, une baisse notable a été constatée sur le dioxyde d'azote (NO₂), le CO, le SO₂ et les particules fines. Depuis 1990, aux États-Unis, une amélioration globale de la qualité de l'air est également constatée, autant pour les polluants classiques que toxiques. Les principales causes sont la réduction des émissions issues du transport et des industries, notamment grâce à une réglementation à la source plus sévère (MOE, 2013).

1.9.5.2 Les projections futures

Faits saillants

- *Les projections de la qualité de l'air sont fortement conditionnées par les changements dans les émissions des polluants (dont le méthane) plutôt que par les changements climatiques physiques.*
- *Pour l'Amérique du Nord, les résultats des projections RCP 2.6, 4.5 et 6.0 indiquent des réductions d'ozone à la surface entre 2 à 6 ppb pour la fin du siècle, tandis que les projections RCP 8.5 montrent une augmentation d'environ 3 ppb d'ici 2100.*
- *Au niveau des particules fines en suspension (PM_{2,5}), les résultats des projections de tous les RCP montrent des résultats semblables pour l'Amérique du Nord, soit une réduction entre 0,5 à 1,9 µg/m³ d'ici 2100.*
- *Par contre, les résultats d'analyses d'observations et de données de modèles indiquent qu'en absence de changement dans les émissions un réchauffement climatique pourrait augmenter les pics de concentrations d'O₃ et de PM_{2,5} dans les zones polluées.*

Le rôle des émissions

Le 5^e rapport du GIEC (Kirtman *et al.*, 2013) attribue un rôle déterminant des émissions (dont le méthane) par rapport au changement climatique physique dans la gamme de valeurs projetées d'O₃ et de PM_{2,5}. En général, les projections des niveaux de ces polluants produites avec des émissions RCP sont nettement inférieures à celles des projections produites avec la famille SRES (4^e et 3^e rapport du GIEC), ce qui reflète l'implémentation des mesures de contrôle de pollution (Kirtman *et al.*, 2013). Le rôle des émissions globales par rapport aux régionales dans les changements projetés est différent pour les deux types de polluant. Dans le cas des PM_{2,5}, les changements dans les émissions régionales sont considérés comme étant le facteur le plus important. Les particules fines sont enlevées relativement rapidement de l'atmosphère, et ainsi ne sont pas transportées en grande quantité d'un bout à l'autre des continents ou des océans (Dentener *et al.*, 2010). L'ozone troposphérique sera affecté à la fois par des émissions globales et régionales. Les émissions globales sont un facteur important influençant les concentrations de fond d'ozone à la surface de la Terre. Au niveau régional, les épisodes sévères de pollution à l'ozone se bâtissent ensuite sur ces concentrations de fond (Dentener *et al.*, 2010).

Pour l'ozone troposphérique, les projections forcées par des scénarios d'émission RCP montrent en général des diminutions dans la concentration globale d'O₃, sauf dans les cas de RCP 8.5 où une augmentation des émissions de méthane contribue à une légère augmentation d'O₃. Plus précisément pour l'Amérique du Nord, les résultats des projections RCP 2.6, 4.5 et 6.0 indiquent des réductions d'ozone à la surface entre 2 à 6 ppb pour la fin du siècle, tandis que les projections RCP 8.5 montrent une augmentation d'environ 3 ppb d'ici 2100. Quant aux particules fines en suspension (PM_{2,5}), les résultats des projections de tous les RCP montrent des résultats semblables pour l'Amérique du Nord, soit une réduction entre 0,5 à 1,9 µg/m³ d'ici 2100.

Le rôle du changement climatique physique

Malgré le rôle dominant des émissions dans les projections de la qualité de l'air, plusieurs efforts ont été faits pour déterminer à quel point le changement climatique physique (ex. un réchauffement ou changement dans le régime des précipitations) pourrait influencer les niveaux de polluants dans le futur. Dans le 5^e rapport du GIEC, Kirtman *et al.* (2013) indiquent que globalement (et en absence de changements dans les émissions) un réchauffement climatique va diminuer les concentrations de fond de l'ozone à la surface dans les zones non polluées. Les PM_{2,5} pourront être à leur tour affectés par une altération des sources naturelles d'aérosols (ex. nombre et intensité d'incendies) ainsi que par le taux de lessivage causé par les précipitations. Cependant, à ce jour, aucun degré de confiance n'est fourni quant à la répercussion globale du changement climatique physique sur les concentrations de particules fines (Kirtman *et al.*, 2013).

Par ailleurs, les résultats de modèles et d'analyses d'observations indiquent que (toujours en absence de changement dans les émissions) un réchauffement climatique pourrait augmenter les pics de concentrations d'O₃ et de PM_{2,5} dans les zones polluées (Kelly *et al.*, 2012; Kirtman *et al.*, 2013). Ces effets sont démontrés, entre autres, par une modélisation de haute résolution spatiale sur l'Amérique du Nord (Kelly *et al.*, 2012) où le scénario de climat futur (2041-2050 par rapport à 1997-2006) avec des émissions actuelles projette des augmentations dans les valeurs maximales estivales d'O₃ sur le Québec (jusqu'à 2 ppb pour la région de Montréal et le Sud du Québec) et également dans les moyennes journalières estivales de PM_{2,5} (augmentations autour de 0,1 µg/m³ dans le nord et jusqu'à 0,5 µg/m³ dans le sud de la province). Cependant, tout comme les résultats discutés plus haut, ces augmentations sont largement contrebalancées quand la simulation est produite suivant les émissions RCP 6.0, ce qui produit des réductions nettes sur le territoire Québécois. Des résultats semblables sont également montrés pour la cote air santé (CAS), un indice de qualité de l'air conçu par Santé Canada et Environnement Canada. Ici, le scénario d'un réchauffement avec les émissions actuelles montre des hausses légères dans les valeurs de CAS pour les villes de Montréal et de Québec, tandis que le scénario de réchauffement combiné avec des émissions RCP 6.0 montre des réductions marquées (Kelly *et al.*, 2012).



1.10 Conclusion

La lecture des sections précédentes nous permet de constater à quel point les connaissances sur les différents aspects du système climatique n'ont pas progressé de façon uniforme depuis plusieurs années. Le tableau 1-7 résume l'état des connaissances décrites dans ce portrait climatique. Il est important de noter que le niveau accordé est qualitatif et non quantitatif, et n'indique pas une valeur de probabilité. Les aspects les mieux compris, et pour lesquels les modèles climatiques performant le mieux, sont sans contredit les phénomènes fortement conditionnés par des processus de grandes échelles et qui sont bien représentés par les réseaux d'observation. Les températures moyennes font partie de cette catégorie. Nous avons vu aussi que, parfois, la complexité du phénomène ou sa nature épisodique pose des défis à l'avancement des connaissances. La faible densité des réseaux d'observation et le nombre limité de variables pour lesquelles ces mesures sont disponibles ont plusieurs fois été évoqués. Non seulement cela rend plus difficile la compréhension de plusieurs types d'événements de plus petite échelle, mais en plus, il devient complexe d'en valider la représentation dans les modèles climatiques.

La préservation et l'expansion des réseaux d'observation resteront des enjeux importants. À l'échelle internationale, la réduction des financements gouvernementaux dans les années 1990 a touché durement les réseaux de stations comme dans le cas des mesures satellitaires à la suite de la crise financière de 2008. La surveillance et l'analyse du climat nécessitent des réseaux de qualité tant en surface qu'en orbite. Des efforts soutenus devront être consentis pour offrir une couverture adéquate du territoire, élargir l'accès aux données, réhabiliter des données plus anciennes et quantifier les incertitudes sur les observations. Lorsque les séries de mesures sont suffisamment longues pour capturer la variabilité décennale, nous pourrions bénéficier de précieuses informations sur la variabilité naturelle d'un nombre grandissant de paramètres climatiques.

À l'échelle internationale, les travaux futurs en modélisation et en analyse du climat porteront forcément sur les aspects du système climatique qui sont encore méconnus ou dont le niveau d'incertitude est encore élevé. Malgré les progrès, il y a encore beaucoup à faire en ce qui a trait aux nuages et aux différents types de précipitations. Les liens et les interactions entre les diverses composantes du système climatique (l'atmosphère, la surface, l'océan, la cryosphère, la biosphère) continueront d'être approfondis et permettront d'améliorer les modèles quant aux processus liés à la glace marine, aux diverses sources de variabilité de la circulation atmosphérique, au couvert de neige et aux sécheresses pour ne citer que quelques exemples. Il sera important de surveiller les progrès dans les modèles de glaciers et de calottes glaciaires en rapport avec les projections de hausse du niveau de la mer.

Parallèlement à l'amélioration des modèles climatiques, on fonde beaucoup d'espoir, dans les années à venir, dans l'augmentation de leur résolution pour améliorer les simulations et les projections climatiques. Or, tant les recherches en météorologie que plusieurs expériences de sensibilité à la résolution réalisées avec des modèles climatiques laissent entrevoir des avancées en ce qui a trait aux orages et autres phénomènes convectifs, aux cyclones extratropicaux et tropicaux, aux précipitations extrêmes, aux vents près de la surface et bien d'autres encore. En effet, les modèles météorologiques utilisés pour faire des prévisions à courte échéance opèrent à de plus fines résolutions que les modèles climatiques qui doivent produire des projections sur plusieurs décennies. Les connaissances acquises grâce à des études de cas portant sur des phénomènes locaux réalisées dans le but d'améliorer les prévisions météorologiques pourront éventuellement être transférées aux modèles climatiques.

Tableau 1-7 Sommaire des connaissances du portrait climatique du Québec

<i>L'État des connaissances</i>	<i>Phénomène Climatique</i>
<i>Élevé</i>	<p><i>Observé</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Tendances à la hausse dans les températures moyennes pour toutes les régions du Québec (1950-2011). • Augmentations dans la fréquence d'extrêmes chauds (nuits et jours chauds) ainsi que la durée des vagues de chaleur. • Diminutions dans la fréquence d'extrêmes froids (nuits et jours frais) ainsi que la durée des vagues de froid. • Déclin de l'étendue des glaces marines pour les eaux limitrophes du Québec. • Augmentation du niveau global moyen de la mer au cours des dernières décennies. • Sud du Québec : tendances à la hausse pour la pluie printanière et automnale, tout comme pour certaines stations en été. • Sud du Québec : tendance à la baisse des précipitations sous forme de neige à plusieurs endroits. • Sud du Québec : tendance à la hausse des quantités de précipitations des jours les plus pluvieux. • Nord du Québec (Kuujuaq) : tendances significatives à la hausse pour la pluie d'été et d'automne.
	<p><i>Projeté</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Réchauffement des températures moyennes, ainsi que des extrêmes chauds et froids. • Le réchauffement des extrêmes de température (chauds et froids) sera plus marqué que celui des températures moyennes. • Hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations pour toutes les régions du Québec. • Nord et Centre du Québec : augmentations plus modestes des précipitations en été et en automne. • Augmentations projetées pour plusieurs indices thermiques (longueur de la saison croissance, degrés-jours de croissance). • Diminution projetés dans la longueur de la saison de gel. • Augmentation des débits hivernaux moyens des rivières pour l'ensemble du Québec pour l'horizon 2041-2070. • Recouvrement amplifié de l'ozone stratosphérique ce qui diminuera le rayonnement UV reçu à la surface dans des conditions de ciel clair sans pollution.

<i>Modéré</i>	<p><i>Observé</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction significative de la durée de l'enneigement d'environ 2 jours par décennie pour le Sud du Québec. • Nord du Québec (Kuujuaq) : l'enneigement survient 1-2 semaines plus tard en automne et se termine de 3-4 semaines plus tôt au printemps qu'il y a une trentaine d'années. • La majorité des stations québécoises présentent une tendance à la diminution de la vitesse moyenne des vents tout au long de l'année entre 1953 et 2006. • Au Québec, de 1974 à 2009, les concentrations de polluants classiques indiquent globalement une amélioration de la qualité de l'air. • En termes d'ozone troposphérique en milieu urbain montrent qu'il y a eu paradoxalement une augmentation dans les concentrations pour les années 1988 à 2009 au Québec.
	<p><i>Projeté</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Augmentations de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les régions du Québec (toutes les durées et toutes les périodes de retour). • Des hausses significatives des indices de précipitations abondantes et extrêmes et pour toutes les régions du Québec (davantage dans le nord que dans le sud). • Sud et Golfe du Saint-Laurent : peu de changement dans les précipitations en été et en automne (faibles diminutions à faibles augmentations selon la simulation climatique et région). • Diminution de la neige au sol projetée pour la période 2041-2070, particulièrement dans le sud de la province • Réduction de la durée de l'enneigement projetée pour la période 2041-2070. • Les rivières du nord du Québec peuvent s'attendre à des augmentations des débits moyens au printemps et en automne pour la période 2041-2070. • La plupart des rivières du sud du Québec peuvent s'attendre à une baisse des débits moyens en été, au printemps et en automne (2041-2070). • La période où la baie d'Hudson et le Golfe du Saint-Laurent est en eau libre, sans glace, est appelée à s'allonger. • A l'échelle planétaire, l'océan Arctique sera essentiellement sans glace en septembre avant 2050. • Sécheresses agricoles : Conditions plus sèches du sol annuellement et pour la saison estivale. • Baisse du niveau relatif de la mer le long des côtes du détroit et de la baie d'Hudson. • Hausse du niveau relatif de la mer dans le golfe du Saint-Laurent. • Il y a un rôle déterminant des émissions (dont le méthane) par rapport au changement climatique physique dans la gamme de valeurs projetées de qualité de l'air. • À l'exception de l'ozone à la surface pour les simulations forcées par RCP 8.5, les projections CMIP5 suivant des émissions RCP montrent une amélioration dans la qualité de l'air pour l'Amérique du Nord. • En absence de changement dans les émissions un réchauffement climatique pourrait augmenter les pics de concentrations d'O₃ et de PM_{2,5} dans les zones polluées.

<i>Limité</i>	<p><i>Observé</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sud du Québec et Golfe du Saint-Laurent : tendances à la baisse de l'équivalent en eau de la neige maximale (statistiquement non-significatif sauf pour une sous-région dans le sud du Québec). • Nord et Centre du Québec : tendances à la hausse de l'équivalent en eau de la neige maximale (statistiquement non-significatif sauf pour une sous-région dans le nord-ouest du Québec). • Dans l'état actuel des connaissances, on considère que le couvert nuageux est stable depuis le début des années 80 d'après les données satellitaires. • Tendence à la baisse (1951-2009) de la salinité à 50m de profondeur pour le golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent.
	<p><i>Projeté</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pas de changement significatif du couvert nuageux sur le territoire québécois pour la période 2081-2100. • Réduction des vents en été pour la période 2079-2099 par rapport à 1979-2099 et une faible augmentation des vents en hiver (basé sur seulement 5 modèles CMIP5). • Augmentation de l'activité des feux de forêt projetée pour la période 2081 à 2100 (associée à une large plage d'incertitude –voir section 1.9.2.2). • Baisse d'activité cyclonique sur toutes les grandes trajectoires de dépressions affectant le Québec. • Il pourrait y avoir une diminution des dépressions sur l'océan en bordure du Gulf Stream et une augmentation à l'intérieur des terres tout au long de la côte est américaine jusqu'au sud du Québec et des provinces atlantiques. • Les projections des modèles de l'ensemble CMIP5 (RCP8.5) montrent plutôt une diminution des cyclones extrêmes pour l'hiver dans l'hémisphère nord. Par contre, les résultats varient beaucoup d'un modèle à l'autre. • Faible diminution de la salinité du golfe du Saint-Laurent et la baie d'Hudson pour la période 2046-2065 par rapport à la période 1985-2006.
<i>Indéterminé</i>	<p><i>Observé</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sécheresses agricoles : Désaccord dans les études scientifiques sur les tendances observées, possiblement lié à la méthode de calcul de l'évapotranspiration, la calibration des indices de sécheresses, ainsi que des différences dans les jeux de données des précipitations observées. • La complexité des cyclones extratropicaux a mené au développement de plusieurs algorithmes permettant de les détecter, mais qui donnent des résultats différents. En raison de ces disparités, nous n'avons pas présentement de statistiques précises du nombre de cyclones et de leur intensité pour les diverses régions du monde. • Les observations requises pour calculer des tendances historiques de la salinité dans la baie d'Hudson sont insuffisantes.
	<p><i>Projeté</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Les modèles climatiques n'anticipent pas de changement significatif du couvert nuageux sur le territoire québécois pour la période 2081-2100. • Il n'est pas encore possible d'établir si la fréquence et l'intensité des cyclones post-tropicaux («restes d'ouragan») au Québec changera dans les prochaines décennies. Il est toutefois possible d'affirmer que les cyclones post-tropicaux apporteront de plus grandes quantités de précipitations et que ceux qui atteindront le golfe du Saint-Laurent frapperont des régions côtières ayant subi une hausse du niveau de la mer.

RÉFÉRENCES

Audet, R., Côté, H., Bachand, D. et Mailhot, A. (2012). Atlas agroclimatique du Québec : Évaluation des opportunités et des risques agroclimatiques dans un climat en évolution (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/155_RapportAudetet2012.pdf

Bekki, S., Bodeker, G.E., Bais, A.F., Butchart, N., Eyring, V., Fahey, D.W., Kinnison, D.E., Langematz, U., Mayer, B., Portmann, R.W. et Rozanov, E. (2011). Future Ozone and its Impact on Surface UV. Dans *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010* (p. 3-1, 3-60). World Meteorological Organization (WMO). Repéré à http://ozone.unep.org/new_site/en/scientific_assessment_2010.php

Bergeron, Y., Cyr, D., Girardin, M. P. et Carcaillet, C. (2010). Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *International Journal of Wildland Fire*, 19(8), 1127. doi:10.1071/WF09092

Bergeron, Y., Gauthier, S., Kafka, V., Lefort, P. et Lesieur, D. (2001). Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: consequences for sustainable forestry. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(3), 384–391. doi:10.1139/cjfr-31-3-384

Bierly, G.D. et Winkler, J.A. (2001). A Composite Analysis of Airstreams within Cold-Season Colorado Cyclones. *Weather and Forecasting*, 16, 57–80.

Bindoff, N.L., Stott, P.A., AchutaRao, K.M., Allen, M.R., Gillett, N., Gutzler, D., Hansingo, K., Hegerl, G., Hu, Y., Jain, S., Mokhov, I.I., Overland, J., Perlwitz, J., Sebbari, R. Et Zhang, X. (2013). Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. naules, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 867–952). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S.K., Sherwood, S., Stevens, B. Et Zhang, X.-Y. (2013). Clouds and Aerosols. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, ... P.M. Midgley (dir.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 571–657). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Bourgouin, P. (2000). A Method to Determine Precipitation Types. *Weather and Forecasting*, 15(Octobre), 583–592.

Brooks, H. E. (2013). Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research*, 123, 129–138. doi:10.1016/j.atmosres.2012.04.002

Brown, R.D. (2010). Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948-2005. *Hydrological Processes*, n/a–n/a. doi:10.1002/hyp.7565

Brown, R.D. et Robinson, D.A. (2011). Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty. *The Cryosphere*, 5(1), 219–229. doi:10.5194/tc-5-219-2011

Brown, R., Derksen, C. et Wang, L. (2010). A multi-data set analysis of variability and change in Arctic spring snow cover extent, 1967–2008. *Journal of Geophysical Research*, 115(D16), D16111. doi:10.1029/2010JD013975

- Camargo, S.J. (2013). Global and Regional Aspects of Tropical Cyclone Activity in the CMIP5 Models. *Journal of Climate*, 26(24), 9880–9902. doi:10.1175/JCLI-D-12-00549.1
- Casati, B. et de Elía, R. (2014). Temperature Extremes from Canadian Regional Climate Model (CRCM) Climate Change Projections. *Atmosphere-Ocean*, 52(3), 191–210.
- Cavalieri, D.J., Gloersen, P. et Campbell, W.J. (1984). Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D4), 5355–5369.
- CEHQ. (2013). Atlas hydroclimatique du Québec méridional: Impacts des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec: Centre d'expertise hydrique du Québec. Repéré à http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/atlas/atlas_hydroclimatique.pdf
- Chang, E.K.M., Guo, Y. et Xia, X. (2012). CMIP5 multimodel ensemble projection of storm track change under global warming. *Journal of Geophysical Research*, 117(D23), D23118. doi:10.1029/2012JD018578
- Charron, I. (2014). Guide sur les scénarios climatiques: Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation. Montréal, Québec: Ouranos. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/351_GuideCharron_FR.pdf
- Charron, I., Logan, T. et Houle, D. (2013). Analyse rétrospective des cycles gel-dégel sur le territoire québécois pour la période 1951 à 2010. Montréal : Ouranos.
- Chaumont, D. (2005). Développement de scénarios climatiques à des fins de prévision de la demande énergétique au Québec pour les besoins de chauffage et de climatisation. Montréal, Québec : Ouranos.
- Christensen, J.H., Krishna Kumar, K., Aldrian, E., An, S.-I., Cavalcanti, I.F.A., de Castro, M., Dong, W., Goswami, P., Hall, A., Kanyanga, J.K., Kitoh, A., Kossin, J., Lau, N.-C., Renwick, J., Stephenson, D.B., Xie, S.-P. et Zhou, T. (2013). Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley (dir.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1217–1308). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- Christidis, N., Stott, P. A., Brown, S., Karoly, D. J. et Caesar, J. (2007). Human Contribution to the Lengthening of the Growing Season during 1950–99. *Journal of Climate*, 20(21), 5441–5454. doi:10.1175/2007JCLI1568.1
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D., et Unnikrishnan, A.S. (2013a). Sea Level Change Supplementary Material. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 8). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M. Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D. et Unnikrishnan, A.S. (2013b). Sea Level Change. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 1137–1216). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Colle, B.A., Zhang, Z., Lombardo, K.A., Chang, E., Liu, P. et Zhang, M. (2013). Historical Evaluation and Future Prediction of Eastern North American and Western Atlantic Extratropical Cyclones in the CMIP5 Models during the Cool Season. *Journal of Climate*, 26(18), 6882–6903. doi:10.1175/JCLI-D-12-00498.1

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe M., Tebaldi, C., Weaver, A.J. et Wehner, M. (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley (dir.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1029–1136). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Comiso, J.C. (2010). *Polar Oceans from Space*. New York, NY, USA et Heidelberg, Germany: Springer Science+Business Media.

Comiso, J. C. et Nishio, F. (2008). Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. *Journal of Geophysical Research*, 113(C2), C02S07. doi:10.1029/2007JC004257

Coumou, D. et Robinson, A. (2013). Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034018 (6p).

Coumou, D., Robinson, A. et Rahmstorf, S. (2013). Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures. *Climatic Change*, 118(3-4), 771–782.

Dacre, H.F. et Gray, S.L. (2009). The Spatial Distribution and Evolution Characteristics of North Atlantic Cyclones. *Monthly Weather Review*, 137(1), 99–115. doi:10.1175/2008MWR2491.1

Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45–65. doi:10.1002/wcc.81

Dai, A. (2012). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3(1), 52–58. doi:10.1038/nclimate1633

Dai, A., Karl, T.R., Sun, B. et Trenberth, K.E. (2006). Recent Trends in Cloudiness over the United States: A Tale of Monitoring Inadequacies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(5), 597–606. doi:10.1175/BAMS-87-5-597

Dentener, F., Keating, T. and Akimoto, H. (dir.). (2010). *Hemispheric Transport of Air Pollution. Part A : Ozone and Particulate Matter*. Air Pollution Studies No. 17. New York et Geneva: United Nations.

Derksen, C., Smith, S.L., Sharp, M., Brown, L., Howell, S., Copland, L., Mueller, D.R., Gauthier, Y., Fletcher, C.G., Tivy, A., Bernier, M., Bourgeois, J., Brown, R., Burn, C.R., Duguay, C., Kushner, P., Langlois, A., Lewkowitz, A.G., Royer, A. et Walker, A. (2012). Variability and change in the Canadian cryosphere. *Climatic Change*, 115(1), 59–88. doi:10.1007/s10584-012-0470-0

Déry, S. J., Hernández-Henríquez, M.A., Burford, J.E. et Wood, E.F. (2009). Observational evidence of an intensifying hydrological cycle in northern Canada. *Geophysical Research Letters*, 36(13), L13402. doi:10.1029/2009GL038852

Déry, S.J., Mlynowski, T.J., Hernández-Henríquez, M.A. et Straneo, F. (2011). Interannual variability and interdecadal trends in Hudson Bay streamflow. *Journal of Marine Systems*, 88(3), 341–351. doi:10.1016/j.jmarsys.2010.12.002

- Dirmeyer, P. A., Jin, Y., Singh, B. and Yan, X. (2013). Evolving Land–Atmosphere Interactions over North America from CMIP5 Simulations. *Journal of Climate*, 26(19), 7313–7327. doi:10.1175/JCLI-D-12-00454.1
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., Willett, K.M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A.M.G., Krueger, A.C., Marengo, J., Peterson, T.C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., Salinger, J., Elayah, A.S., Sekele, S.S., Srivastava, A.K., Trewin, B., Villarreal, C., Vincent, L.A., Zhai, P., Zhang, X. Et Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2098–2118.
- Emanuel, K.A. (2013). Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(30), 12219–24. doi:10.1073/pnas.1301293110
- Flannigan, M. D., Bergeron, Y., Engelmark, O. et Wotton, B. M. (1998). Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. *Journal of Vegetation Science*, 9, 469–476.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chan Chou, S., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Glecler, P., Guilyardi, E., Eyring, V., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., Rummukainen, M. (2013). Evaluation of Climate Models. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741–866). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press. Repéré à http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter09_FINAL.pdf
- Girardin, M., Ali, A. et Carcaillet, C. (2013a). Fire in managed forests of eastern Canada: Risks and options. *Forest Ecology and Management*, 294, 238–249.
- Girardin, M.P., Ali, A.A, Carcaillet, C., Blarquez, O., Hély, C., Terrier, A., Genries A. et Bergeron, Y. (2013b). Vegetation limits the impact of a warm climate on boreal wildfires. *The New phytologist*. 199: 1001-1011. doi:10.1111/nph.12322
- Girardin, M.P. et Wotton, B.M. (2009). Summer Moisture and Wildfire Risks across Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3), 517–533. doi:10.1175/2008JAMC1996.1
- Gregory, D. (2004). *Climate: A database of Temperature and salinity Observations for the Northwest Atlantic*, 3848, 6. Repéré à <http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/>
- Guinard, K., Mailhot, A. et Caya, D. (2014). Projected changes in characteristics of precipitation spatial structures over North America. *International Journal of Climatology*. doi:DOI: 10.1002/joc.4006
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. et Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623–642.
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M. et Zhai, P.M. (2013). Observations: Atmosphere and Surface. Dans T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley (dir.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Hebert, D. (2013). Trends in temperature, salinity, and stratification in the upper ocean for different regions of the Atlantic Canadian shelf. Dans J. W. Loder, G. Han, P. S. Galbraith, J. Chassé et A. van der Baaren (dir.). *Aspects of climate change in the Northwest Atlantic of Canada* (Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 3045). (p. 33–42). Dartmouth, Nova Scotia: Fisheries and Oceans Canada, Bedford Institute of Oceanography.

Held, I. M. et Soden, B.J. (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate*, 19, 5686–5699.

Houle, D., Bouffard, A., Duchesne, L., Logan, T. et Harvey, R. (2012). Projections of Future Soil Temperature and Water Content for Three Southern Quebec Forested Sites. *Journal of Climate*, 25(21), 7690–7701. doi:10.1175/JCLI-D-11-00440.1

IPCC. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios* (N. Nakicenovic et R. Swart, dir.). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Joly, S., Senneville, S., Caya, D. et Saucier, F.J. (2011). Sensitivity of Hudson Bay Sea ice and ocean climate to atmospheric temperature forcing. *Climate Dynamics*, 36(9-10), 1835–1849. doi:10.1007/s00382-009-0731-4

Jones, S.C., Harr, P.A., Abraham, J., Bosart, L.F., Bowyer, P.J., Evans, J.L., Hanley, D.E., Hanstrum, B.N., Hart, B.N., Hart, R.E., Lalaurette, F., Sinclair, M.R., Smith, R.K. et Thorncroft, C. (2003). The Extratropical Transition of Tropical Cyclones : Forecast Challenges , Current Understanding , and Future Directions. *Weather and Forecasting*, 18, 1052–1092.

Keeling, C.D., Chin, J.F.S. et Whorf, T.P. (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 382(11), 146–149.

Kelly, J., Makar, P.A. et Plummer, D.A. (2012). Projections of mid-century summer air-quality for North America: effects of changes in climate and precursor emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(12), 5367–5390. doi:10.5194/acp-12-5367-2012

Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. et Wehner, M. (2013). Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119(2), 345–357. doi:10.1007/s10584-013-0705-8

Kirtman, B., Power, S.B., Adedoyin, J.A., Boer, G.J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F.J., Fiore, A.M., Kimoto, M., Meehl, G.A., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., van Oldenborgh, G.J., Vecchi, G. et Wang, H.J. (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 953-1028). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA.: Cambridge University Press.

Knutson, T.R., McBride, J.L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J.P., Srivastava, A.K. et Sugi, M. (2010). Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience*, 3(3), 157–163. doi:10.1038/ngeo779

Knutson, T.R., Sirutis, J.J., Vecchi, G.A., Garner, S., Zhao, M., Kim, H.-S., Bender, M., Tuleya, R.E., Held, I.M., et Villarini, G. (2013). Dynamical Downscaling Projections of Twenty-First-Century Atlantic Hurricane Activity: CMIP3 and CMIP5 Model-Based Scenarios. *Journal of Climate*, 26(17), 6591–6617. doi:10.1175/JCLI-D-12-00539.1

Knutti, R. et Sedláček, J. (2012). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369–373.

- Kulkarni, S. et Huang, H. (2014). Changes in Surface Wind Speed over North America from CMIP5 Model Projections and Implications for Wind Energy. *Advances in Meteorology*, 2014. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2014/292768>
- Lambeck, K., Smither, C. et Johnston, P. (1998). Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe. *Geophysical Journal International*, 134(1), 102–144.
- Langlois, A., Bergeron, J., Brown, R., Royer, A., Harvey, R., Roy, A., Wang, L. et Thériault, N. (2014). Evaluation of CLASS 2.7 and 3.5 Simulations of Snow Properties from the Canadian Regional Climate Model (CRCM4) over Québec, Canada*. *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), 1325–1343. doi:10.1175/JHM-D-13-055.1
- Larsen, C.P.S. (1997). Spatial and Temporal variations in boreal forest fire in frequency variations and temporal Spatial Alberta. *Journal of Biogeography*, 24(5), 663–673.
- Lavoie, D., Lambert, N., den Mustapha, S. et van der Baaren, A. (2013). Projections of Future Physical and Biogeochemical Conditions in the Northwest Atlantic from CMIP5 Global Climate Models (Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences 285). Mont-Joli, Québec: Fisheries and Oceans Canada.
- Lebel, G., Busque, D., Therrien, M., Walsh, P., Paradis, J., Brault, M.-P. et Canuel, M. (2012). Bilan de la qualité de l'air au Québec en lien avec la santé, 1975-2009 (p. 43). Québec, Québec : Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ). Repéré à http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1432_BilanQualiteAirQcLienSante1975-2009.pdf
- Loder, J. W. et van der Baaren, A. (2013). Climate change projections for the Northwest Atlantic from six CMIP5 Earth System Models (Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences 286) (p. 112). Dartmouth, Nova Scotia: Ocean and Ecosystem Science Division, Fisheries and Oceans Canada.
- Logan, T., Charron, I., Chaumont, D. et Houle, D. (2011). Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Montréal: Ouranos; Ministère de ressources naturelles et de la faune du Québec (MRNF). Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011-Sans-Annexes.pdf
- Mailhot, A., Bearegard, I., Talbot, G., Caya, D. et Biner, S. (2012). Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1151–1163. doi:10.1002/joc.2343
- Maloney, E.D., Camargo, S.J., Chang, E., Colle, B., Fu, R., Geil, K.L., Hu, Q., Jiang, X., Johnson, N., Karauskas, K.B., Kinter, J., Kirtman, B., Kumar, S., Langenbrunner, B., Lombardo, K., Long, L., Mariotti, A., Meyerson, J.E., Mo, K.C., Neeling, J.D., Pan, Z., Seager, R., Serra, Y., Seth, A., Sheffield, J., Stroeve, J., Thibeault, J., Xie, S.P., Wang, C., Wyman, B. et Zhao, M. (2014). North American Climate in CMIP5 Experiments: Part III: Assessment of Twenty-First-Century Projections*. *Journal of Climate*, 27(6), 2230–2270. doi:10.1175/JCLI-D-13-00273.1
- Markovic, M., Elía, R., Frigon, A. et Matthews, H. D. (2013). A transition from CMIP3 to CMIP5 for climate information providers: the case of surface temperature over eastern North America. *Climatic Change*, 120(1-2), 197–210.
- Markus, T. et Cavalieri, D.J. (2000). An enhancement of the NASA Team sea ice algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3), 1387–1398.

- Massonnet, F., Fichet, T., Goosse, H., Bitz, C.M., Philippon-Berthier, G., Holland, M. M. et Barriat, P.-Y. (2012). Constraining projections of summer Arctic sea ice. *The Cryosphere*, 6(6), 1383–1394. doi:10.5194/tc-6-1383-2012
- McKenzie, R.L., Aucamp, P.J., Bais, A.F., Bjorn, L.O., Ilyas, M. et Madronich, S. (2011). Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 10(2), 182–198. doi:10.1039/C0PP90034F
- Mearns, L.O., Sain, S., Leung, L.R., Bukovsky, M.S., McGinnis, S., Biner, S., Caya, D., Arritt, R.W., Gutowski, W., Takle, E., Snyder, M., Jones, R.G., Nunes, A.M.B., Tucker, S., Herzmann, D., McDaniel, L. et Sloan, L. (2013). Climate change projections of the North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP). *Climatic Change*, 120(4), 965–975. doi:10.1007/s10584-013-0831-3
- Mekis, É. et Vincent, L. A. (2011). An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation Dataset for Trend Analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 49(2), 163–177. doi:10.1080/07055900.2011.583910
- MOE. (2013). Air Quality in Ontario : Report for 2011. Ottawa, Ontario: Ontario Ministry of the Environment (MOE) 96p.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T.C., Emori, S., Kainuma S., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A. M., Weyant, J.P. et Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–56.
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G. et Nemani, R. R. (1997). Increased plant growth in the northern latitudes. *Nature*, 386(17), 689–702.
- National Ice Center. (2008). IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 4 km and 24 km resolution [1999-2010]. updated daily. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Repéré à <http://dx.doi.org/10.7265/N52R3PMC>
- Neu, U., Akperov, M.G., Bellenbaum, N., Benestad, R., Blender, R., Caballero, R., Coccozza, A., Dacre, H.F., Feng, Y., Fraedrich K., Grieger, J., Gulev, S., Hanley, J., Hewson, T., Inatus M., Keay, K., Kew, S.F., Kindem. I., Leckebusch, G.C., Liberato, M.L.R., Lionello, P., Mokhov, I.I., Pinto, J.G., Raible, C.C., Reale, M., Rudeva, I., Schuster, M., Simmonds, I., Sinclair, M., Sprenger, M., Tilinina, N.D., Trigo I.F., Ulbrich, S., Ulbrich, U., Wang, X.L. et Wernli, H. (2012). IMILAST – a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms: assessing method-related uncertainties. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(4), 529–547. doi:10.1175/BAMS-D-11-00154.1
- Paquin, D., de Elía, R. et Frigon, A. (2014). Change in North American Atmospheric Conditions Associated with Deep Convection and Severe Weather using CRCM4 Climate Projections. *Atmosphere-Ocean*, 52(3), 175–190. doi:10.1080/07055900.2013.877868
- Peltier, W. R. (2004). Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32(1), 111–149. doi:10.1146/annurev.earth.32.082503.144359
- Price, C. G. (2013). Lightning Applications in Weather and Climate Research. *Surveys in Geophysics*, 34(6), 755–767. doi:10.1007/s10712-012-9218-7

- Rapaic, M. (2012). Atlas de la Biodiversité du Québec nordique. Analyses et scénarios climatiques. Montréal, Québec : Ouranos. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/271_RapportRapaic2013red.pdf
- Ressler, G. M., Milrad, S. M., Atallah, E. H. et Gyakum, J. R. (2012). Synoptic-Scale Analysis of Freezing Rain Events in Montreal, Quebec, Canada. *Weather and Forecasting*, 27(2), 362–378. doi:10.1175/WAF-D-11-00071.1
- Rhein, M., Rintoul, S.R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R.A., Gulev, S., Johnson, G.C., Josey, S.A., Kostianoy, A., Mauritzen, C., Roemminch, D., Talley, L.D. et Wang, F. (2013). Observations: Ocean. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 255–315). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA.: Cambridge University Press.
- Rogelj, J., Meinshausen, M. et Knutti, R. (2012). Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*, 2(4), 248–253.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R. et Schneider, S.H. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(2), 57–60. doi:10.1038/nature01309.1.
- Rossow, W.B. et Schiffer, R.A. (1999). Advances in Understanding Clouds from ISCCP. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11), 2261–2287. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2
- Roy, P., Gachon, P. et Laprise, R. (2014). Sensitivity of seasonal precipitation extremes to model configuration of the Canadian Regional Climate Model over eastern Canada using historical simulations. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-014-2066-z
- Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera C. et Zhang, X. (2012). Changes in climate extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment. Dans C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M. et P.M. Midgley (dir.). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (pp. 109–230). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Senneville, S. and St-Onge Drouin, S. (2013). Étude de la variation des glaces dans le système couplé océan — glace de mer de la baie d’Hudson (Rapport final MTQ-Ouranos). Institut des sciences de la mer de Rimouski.
- Senneville, S., St-Onge Drouin, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, A.-C., Belemale, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P. Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S. et Villeneuve, R. (2014). Modélisation des glaces dans l’estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques (Rapport final). Rimouski : Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1147874.pdf>
- Sheffield, J., Barrett, A. P., Colle, B., Nelun Fernando, D., Fu, R., Geil, K. L., Hu, Q., Kinter, J., Kumar, S., Langenbrunner, B., Lombardo, K., Long, K., Long, L.N., Maloney, E., Mariotti, A., Meyerson, J., Mo, K.C., Neeling, J.D., Nigam, S., Pan, Z., Ren T., Ruiz-Barradas, A., Serra, Y.L., Seth, A., Thibeault, J.M., Stroeve, J.C., Yang, Z. et Yin, L. (2013a). North

American Climate in CMIP5 Experiments. Part I: Evaluation of Historical Simulations of Continental and Regional Climatology*. *Journal of Climate*, 26(23), 9209–9245.

Sheffield, J., Camargo, S. J., Fu, R., Hu, Q., Jiang, X., Johnson, N., Karnauskas, K.B., Kim, S.T., Kinter, J., Kumar, S., Langenbrunner, B., Maloney, E., Mariotti, A., Meyerson, J.E., Neelin, J.D., Nigam, S., Pan, Z., Ruiz-Barradas, A., Seager, R., Serra, Y.L., Sun, D.-Z., Wang, C., Xie, S.-P., Yu, J.-Y., Zhang, T. et Zhao, M. (2013b). North American Climate in CMIP5 Experiments. Part II: Evaluation of Historical Simulations of Intraseasonal to Decadal Variability. *Journal of Climate*, 26(23), 9247–9290.

Sheffield, J., Wood, E. F. et Roderick, M. L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424), 435–8.

Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. et Bronaugh, D. (2013a). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(6), 2473–2493.

Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. and Bronaugh, D. (2013b). Supplementary material. *Journal of Geophysical Research*, 118(6).

Splawinski, S., Gyakum, J. R. et Atallah, E.H. (2011). Atmospheric circulation structures associated with freezing rain in Quebec City, Quebec, 6(1), 50–55.

Splawinski, S., Gyakum, J.R. et Atallah, E.H. (2012). The role of anticyclones in replenishing surface cold air and modulating freezing rain duration. *McGill Science Undergraduate Research Journal*, 7(1), 54–60.

Steiner, N., Galbraith, P., Hamilton, J., Hedges, K., Hu, X., Janjua, M.Y., Lambert, N., Larouche, P., Lavoie, D., Loder, J., Melling, H., Merzouk, A., Myers, P.G., Perrie, W., Peterson, I., Pettipas, R., Scarratt, M., Sou, T., Starr, M., Tallmann, R.F. et van der Baaren, A. (2013). Climate Change Assessment in the Arctic Basin Part 1 : Trends and Projections - A Contribution to the Aquatic Climate Change Adaptation Services Program (Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 3042). Sidney, British Columbia: Fisheries and Oceans Canada.

Stewart, R.E. (1992). Precipitation Types in the Transition Region of Winter Storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(3), 287–296.

Stroeve, J.C., Kattsov, V., Barrett, A., Serreze, M., Pavlova, T., Holland, M. et Meier, W.N. (2012). Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geophysical Research Letters*, 39(16). doi:10.1029/2012GL052676

Stubenrauch, C., Rossow, W. et Kinne, S. (2012). Assessment of Global Cloud Data Sets from Satellites. A Project of the World Climate Research Programme Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Radiation Panel (WCRP Report No 23/2012). World Climate Research Programme.

Tapsoba, D., Fortin, V., Anctil, F. et Haché, M. (2005). Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige : Application aux bassins de la rivière Gatineau. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(1), 289–297. doi:10.1139/I04-110

Tardif, J. (2004). Fire history in the Duck Mountain Provincial Forest, western Manitoba (Projet reports 2003/2004). Winnipeg, Manitoba: Réseau de gestion durable des forêts.

Terrier, A., Girardin, M.P., Périe, C., Legendre, P. et Bergeron, Y. (2013). Potential changes in forest composition could reduce impacts of climate change on boreal wildfires. *Ecological Applications*, 23(1), 21–35.

- Thériault, J.M., Stewart, R.E., Milbrandt, J.A. et Yau, M.K. (2006). On the simulation of winter precipitation types. *Journal of Geophysical Research*, 111(D18), D18202. doi:10.1029/2005JD006665
- Thomas, B.C. et Martin, J.E. (2007). A Synoptic Climatology and Composite Analysis of the Alberta Clipper. *Weather and Forecasting*, 22(2), 315–333. doi:10.1175/WAF982.1
- Tivy, A., Howell, S.E.L., Alt, B., McCourt, S., Chagnon, R., Crocker, G., Carrieres, T. et Yackel, J.J. (2011). Trends and variability in summer sea ice cover in the Canadian Arctic based on the Canadian Ice Service Digital Archive, 1960–2008 and 1968–2008. *Journal of Geophysical Research*, 116(C3), C03007. doi:10.1029/2009JC005855
- Trenberth, K.E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R. et Sheffield, J. (2013). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17–22. doi:10.1038/nclimate2067
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Mausi, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. et Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5–31.
- Vaughan, D.G., Comiso, J.C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray t., Paul, F., Jen. R., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K. et Zhang, T. (2013). Observations: Cryosphere. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. naules, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 317–382). Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Villarini, G. et Vecchi, G.A. (2012). Twenty-first-century projections of North Atlantic tropical storms from CMIP5 models. *Nature Climate Change*, 2(8), 604–607. doi:10.1038/nclimate1530
- Villarini, G. et Vecchi, G.A. (2013). Projected Increases in North Atlantic Tropical Cyclone Intensity from CMIP5 Models. *Journal of Climate*, 26(10), 3231–3240. doi:10.1175/JCLI-D-12-00441.1
- Vincent, L. A., Wang, X. L., Milewska, E. J., Wan, H., Yang, F. et Swail, V. (2012). A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D18), 13.
- Wallenius, T.H., Pennanen, J. et Burton, P.J. (2011). Long-term decreasing trend in forest fires in northwestern Canada. *Ecosphere*, 2(5), art53. doi:10.1890/ES11-00055.1
- Walsh, J. E. et Chapman, W. L. (2001). 20th-century sea-ice variations from observational data. *Annals of Glaciology*, 444– 448.
- Walsh, J., Wuebbles, D., Hayhoe, K., Kossin, J., Kunkel, K., Stephens, G., Thorne, P., Vose, R., Wehner, M., Willis, J., Anderson, D., Doney, S., Feely, R., Hennon, P., Kharin, V., Knutson., T., Landerer, F., Lenton, T., Kennedy, J. et Somerville, R. (2014). Our Changing Climate. Dans J. M. Melillo, T. (T. C. . Richmond et G. W. Yohe (dir.), *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment* (pp. 19–67). U.S. Global Change Research Program. doi:10.7930/J0KW5CXT

Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O. et Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389–395.

Wan, H., Wang, X. L. et Swail, V. R. (2010). Homogenization and Trend Analysis of Canadian Near-Surface Wind Speeds. *Journal of Climate*, 23(5), 1209–1225. doi:10.1175/2009JCLI3200.1

Wang, M. et Overland, J.E. (2009). A sea ice free summer Arctic within 30 years? *Geophysical Research Letters*, 36(7), n/a–n/a. doi:10.1029/2009GL037820

Wang, X.L., Feng, Y., Compo, G.P., Swail, V.R., Zwiers, F.W., Allan, R.J. et Sardeshmukh, P.D. (2012). Trends and low frequency variability of extra-tropical cyclone activity in the ensemble of twentieth century reanalysis. *Climate Dynamics*, 40(11-12), 2775–2800. doi:10.1007/s00382-012-1450-9

Wells, N., Goddard, S. et Hayes, M. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335–2351. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2)

Zhang, X., Brown, R., Vincent, L., Skinner, W., Feng, Y. et Mekis, E. (2011). Tendances climatiques au Canada, de 1950 à 2007. Biodiversité canadienne: état et tendances des écosystèmes en 2010 (Rapport technique thématique n°5). Ottawa, Ontario: Conseils canadiens des ministres des ressources. Repéré à <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=137E1147-1>

ANNEXE A

Scénarios climatiques - Cartographie

Températures moyennes à 2m

Horizon 2050 (2041 à 2070)	82
Horizon 2080 (2071 à 2100)	83

Précipitations totales

Horizon 2050 (2041 à 2070)	84
Horizon 2080 (2071 à 2100)	85

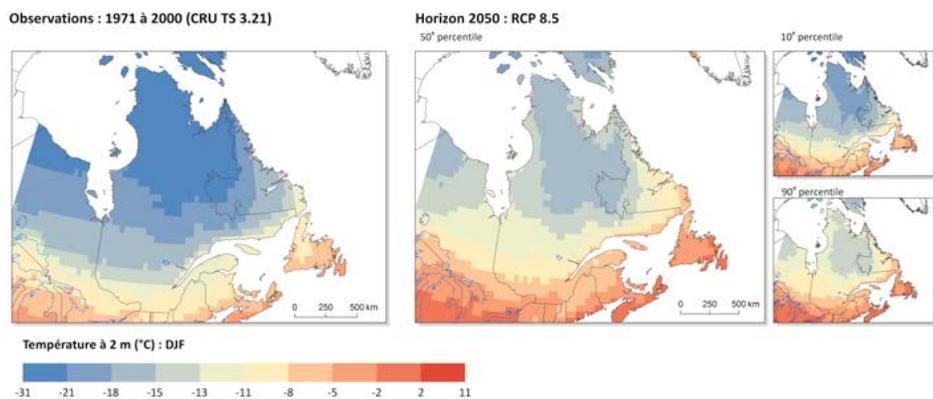
Équivalent en eau de la neige

Horizon 2050 (2041 à 2070)	87
Horizon 2080 (2071 à 2100)	88

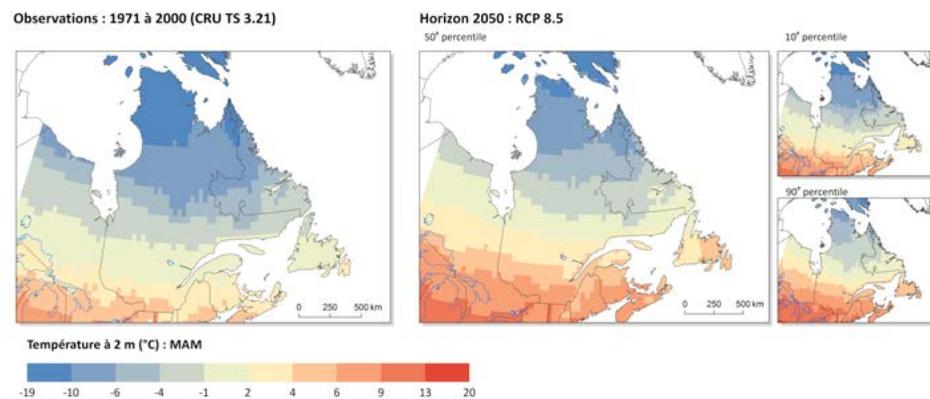
Durée de l'enneigement

Horizon 2050 (2041 à 2070)	89
Horizon 2080 (2071 à 2100)	90

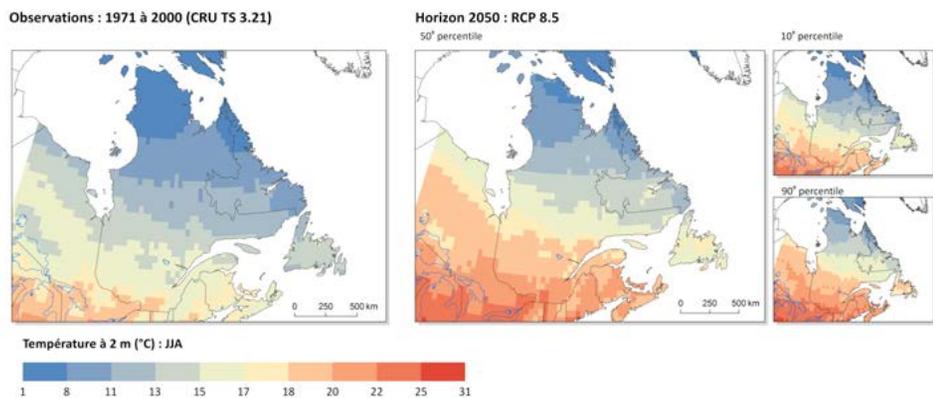
Figure A.1a-d. Moyennes saisonnières des températures moyennes à 2m observées pour la période 1971 à 2000 (CRU TS 3.21) et projetées pour l'horizon 2050 (2041 à 2070). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 29 projections CMIP5 forcées par RCP8.5. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON).



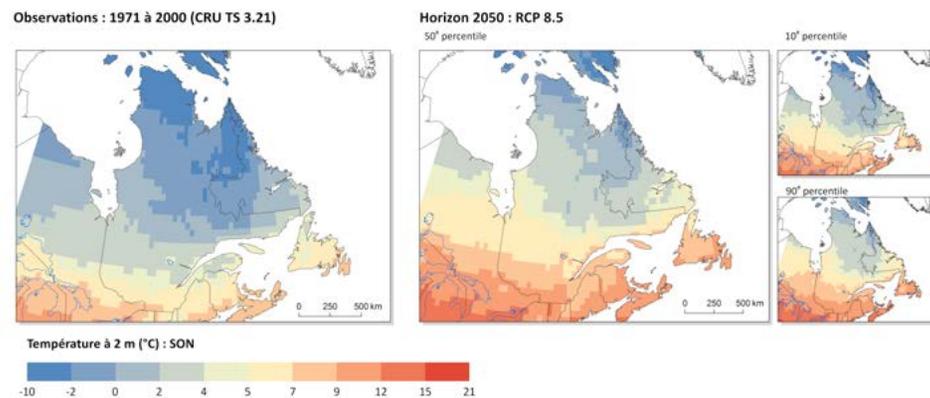
a)



b)



c)



d)

Figure A.2a-d. Moyennes saisonnières des températures moyennes à 2m observées pour la période 1971 à 2000 (CRU TS 3.21) et projetées pour l'horizon 2080 (2071 à 2100). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 29 projections CMIP5 forcées par RCP8.5. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON).

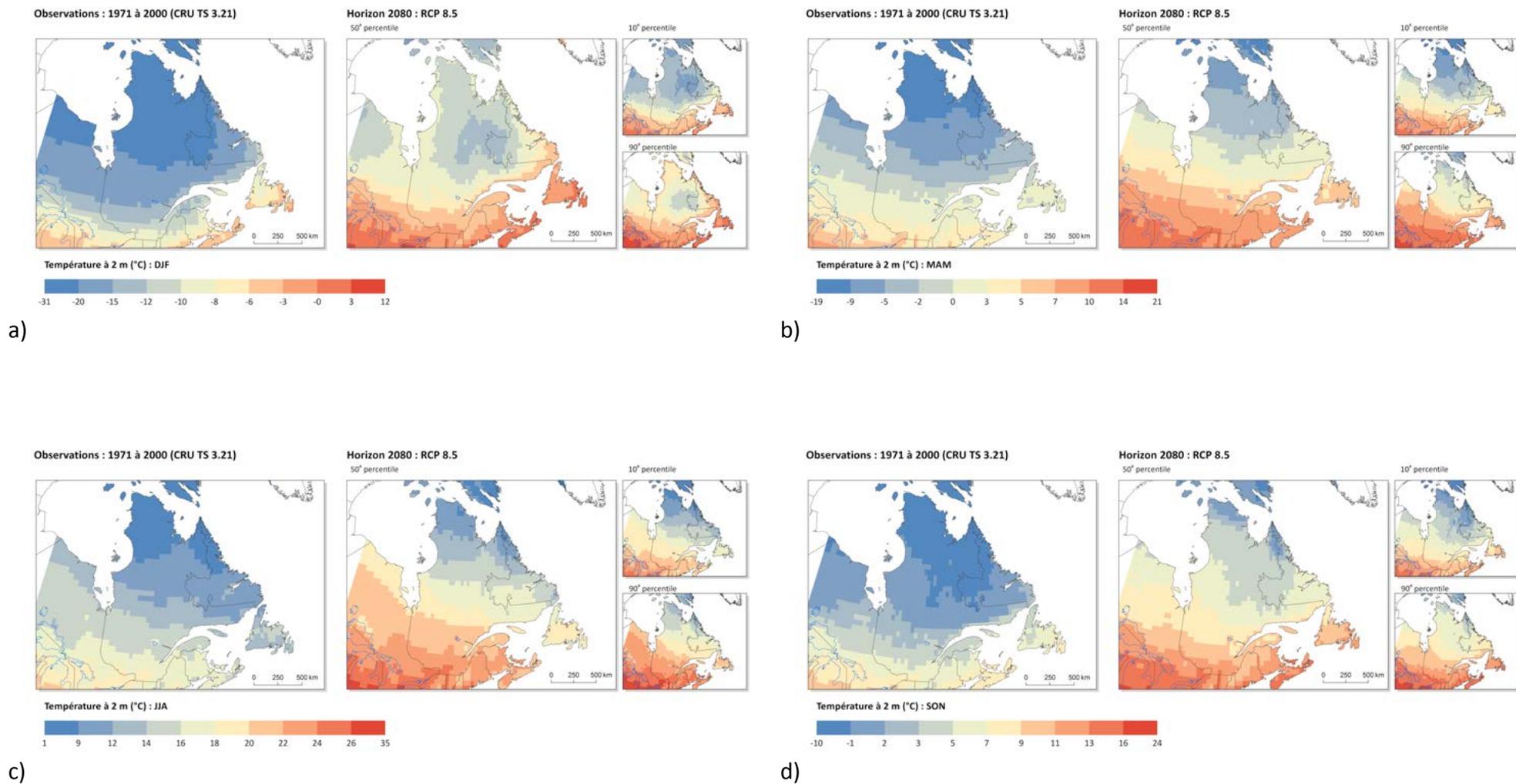
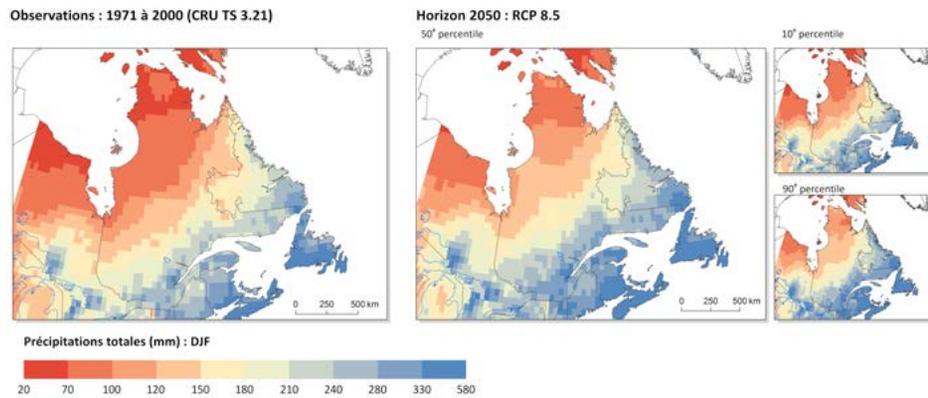
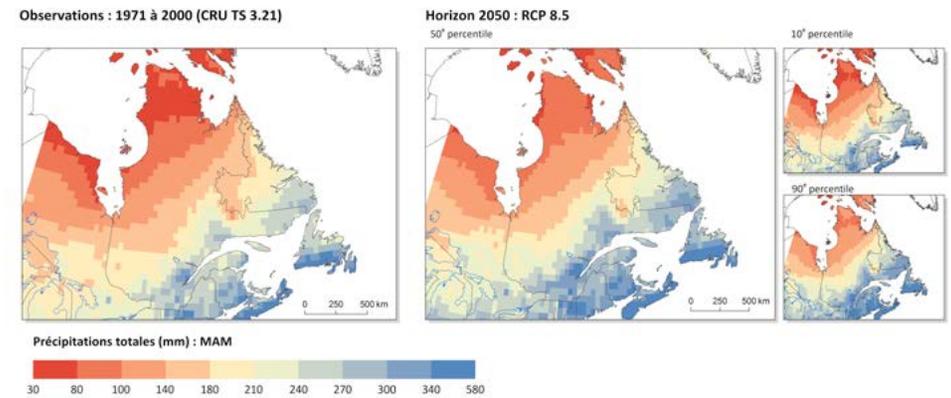


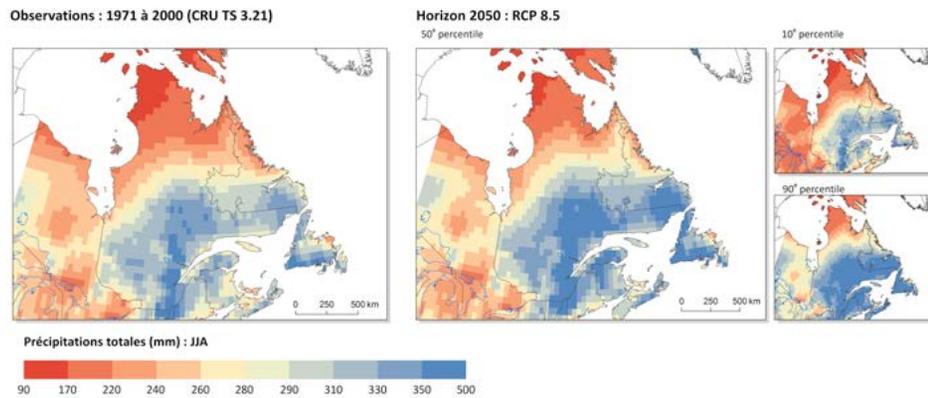
Figure A.3a-d. Moyennes saisonnières des précipitations totales observées pour la période 1971 à 2000 (CRU TS 3.21) et projetées pour l'horizon 2050 (2041 à 2070). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 29 projections CMIP5 forcées par RCP8.5. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON).



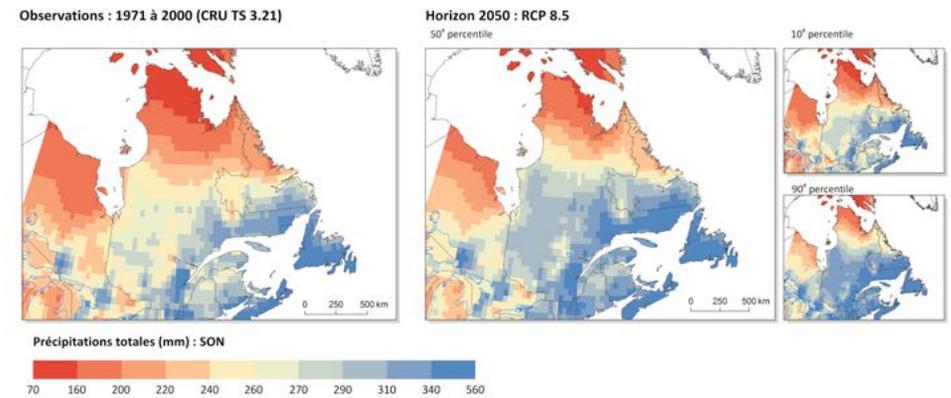
a)



b)

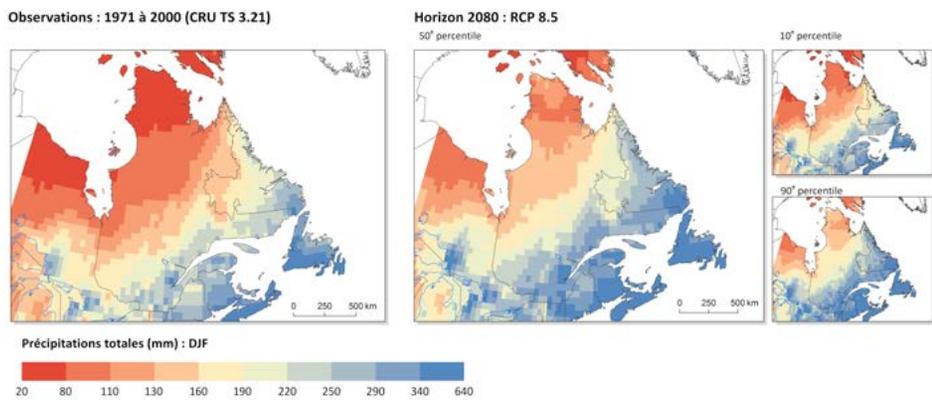


c)

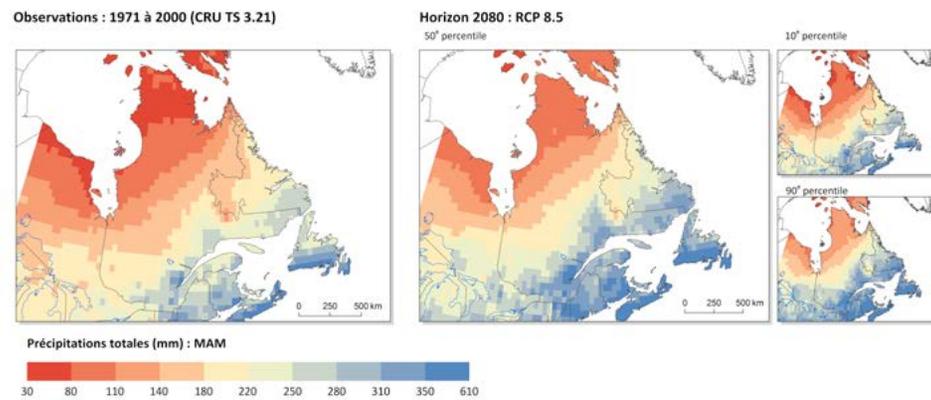


d)

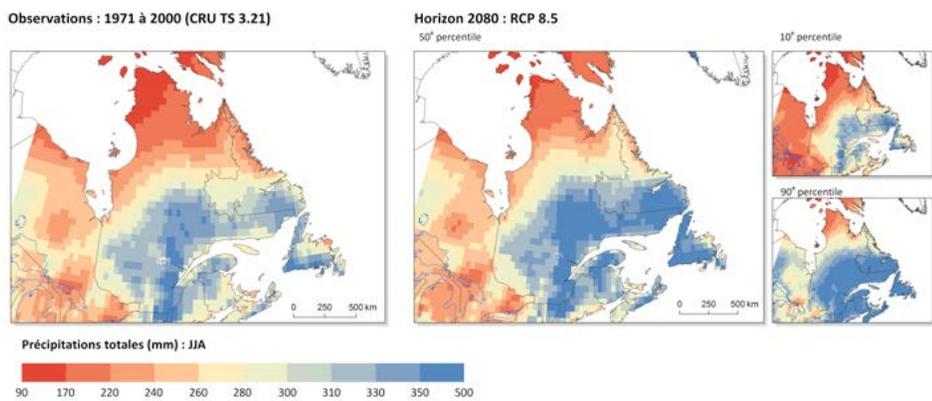
Figure A.4a-d. Moyennes saisonnières des précipitations totales observées pour la période 1971 à 2000 (CRU TS 3.21) et projetées pour l'horizon 2080 (2071 à 2100). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 29 projections CMIP5 forcées par RCP8.5. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON).



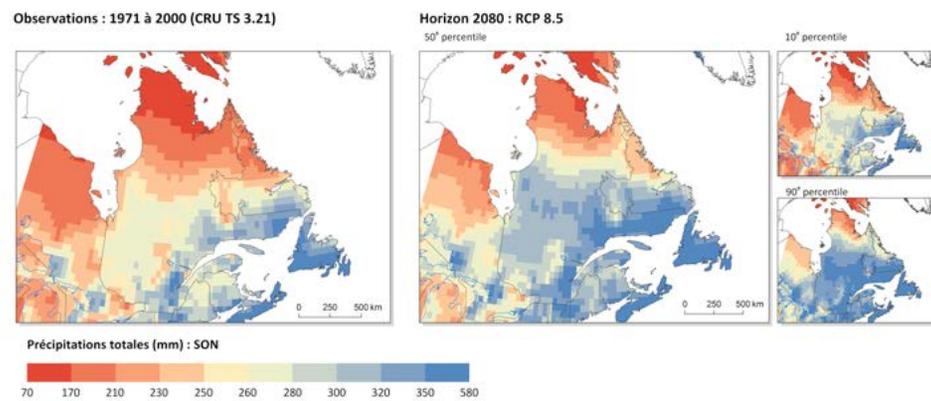
a)



b)

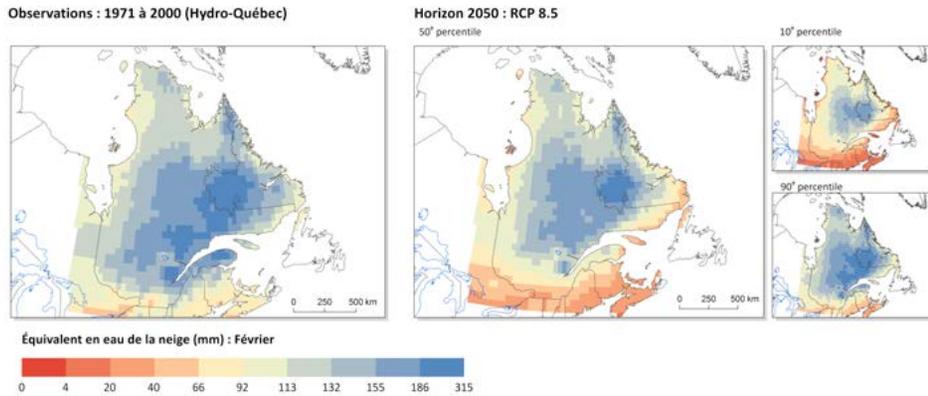


c)

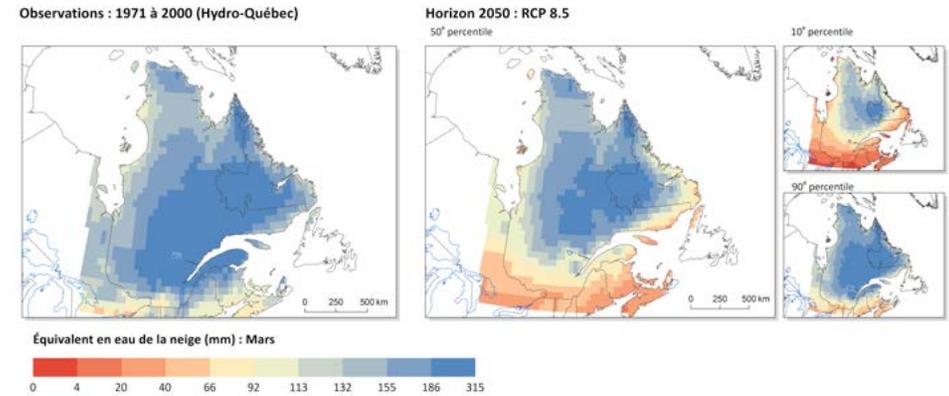


d)

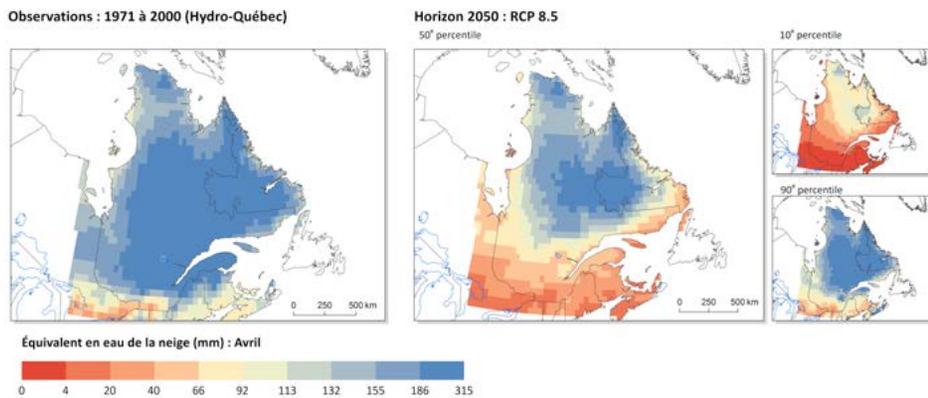
Figure A.5a-d. Moyennes saisonnières des précipitations totales observées pour la période 1971 à 2000 (CRU TS 3.21) et projetées pour l'horizon 2080 (2071 à 2100). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 29 projections CMIP5 forcées par RCP8.5. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON).



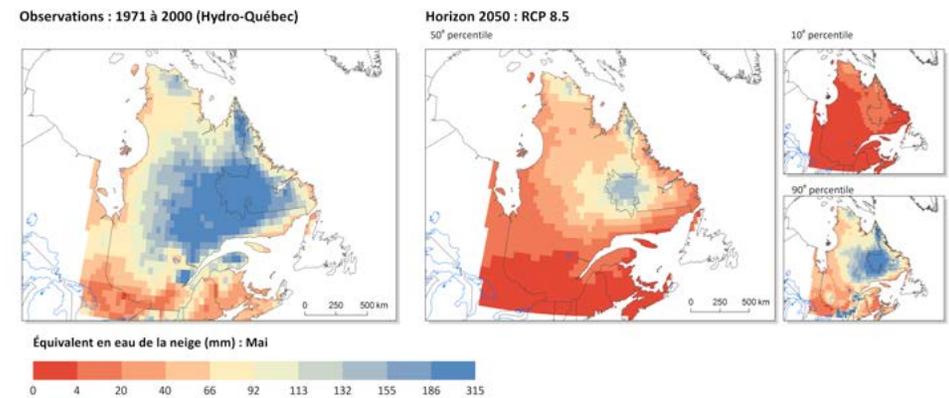
a)



b)



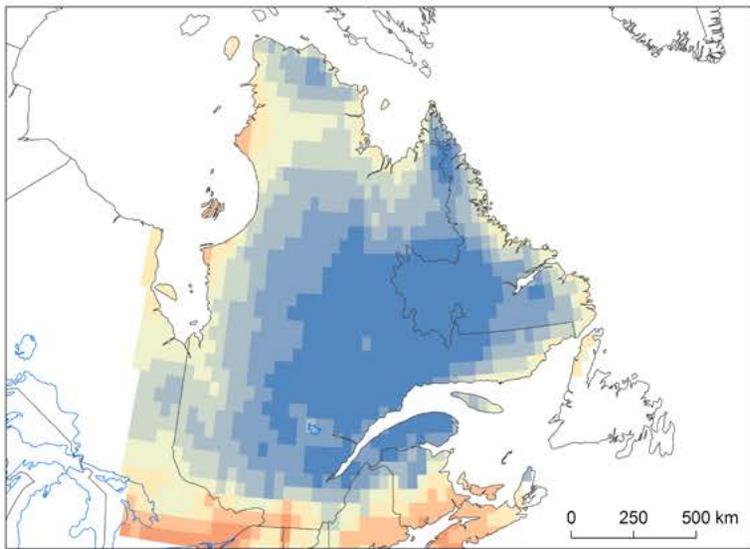
c)



d)

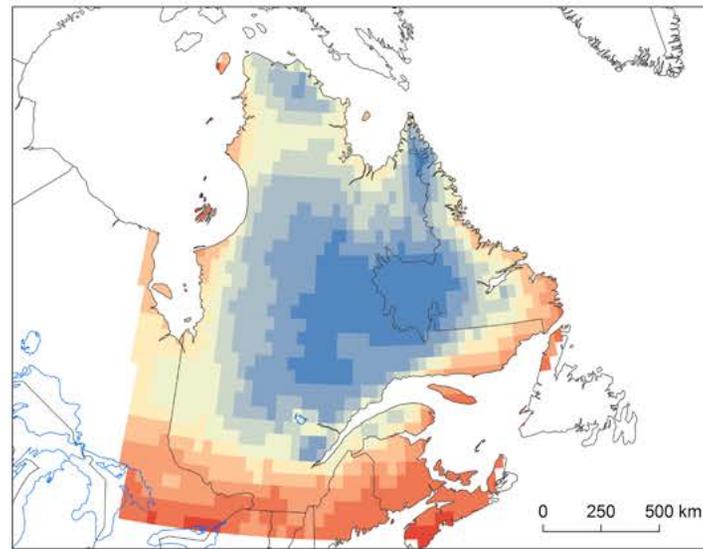
Figure A.5e. Maximum de l'équivalent en eau de la neige (février à mai) observée pour la période 1971 à 2000 (Hydro Québec) et projetées pour l'horizon 2050 (2041 à 2070). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 22 projections CMIP5 forcées par RCP8.5.

Observations : 1971 à 2000 (Hydro-Québec)

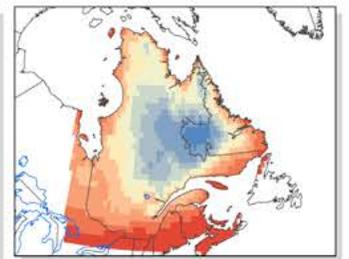


Horizon 2050 : RCP 8.5

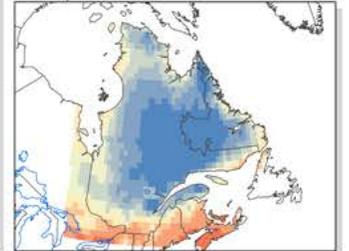
50^e percentile



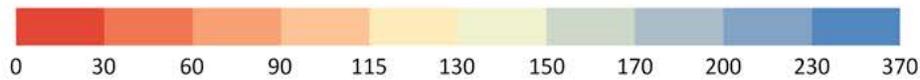
10^e percentile



90^e percentile

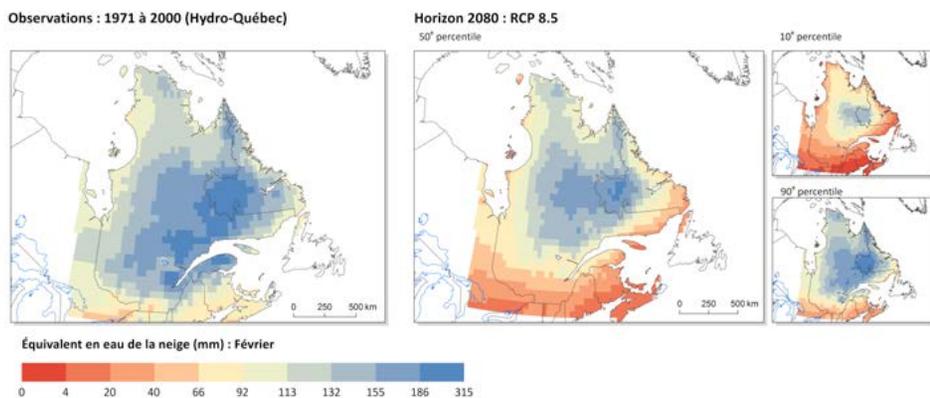


Équivalent en eau de la neige (mm) : maximum (février à mai)

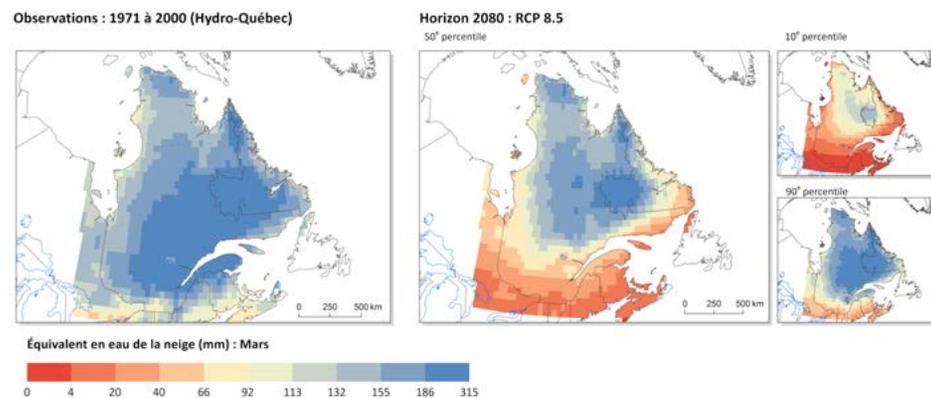


e)

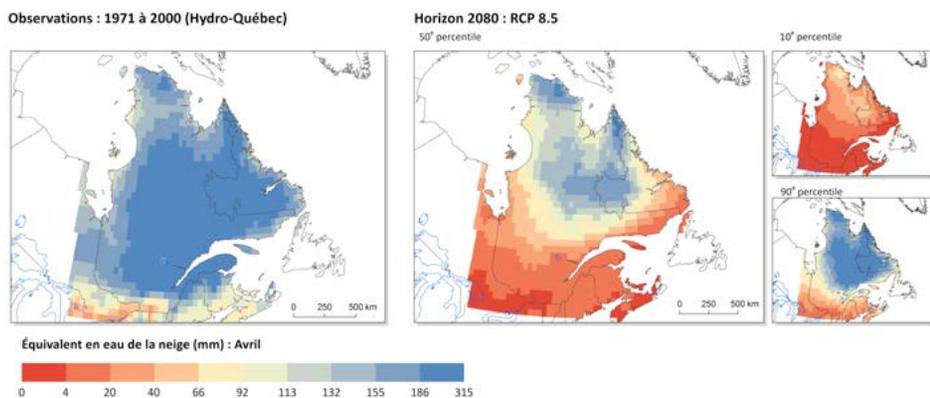
Figure A.6a-d. Moyennes mensuelles de l'équivalent en eau de la neige observée pour la période 1971 à 2000 (Hydro Québec) et projetées pour l'horizon 2080 (2071 à 2100). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 22 projections CMIP5 forcées par RCP8.5. a) Février b) Mars c) Avril d) Mai.



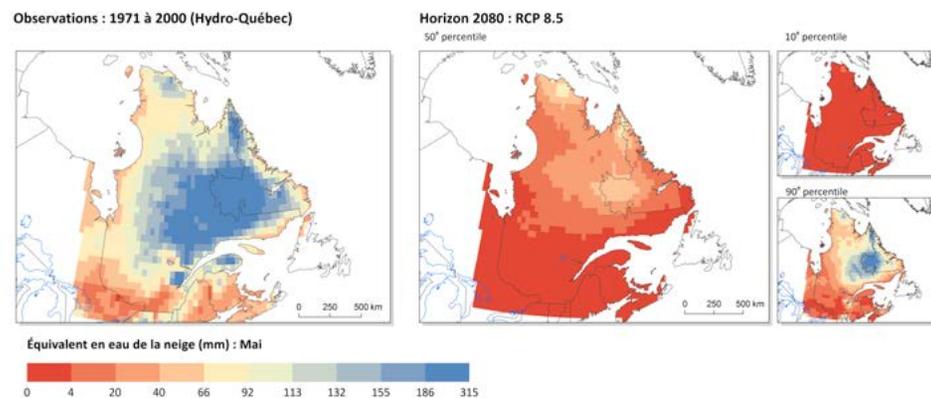
a)



b)



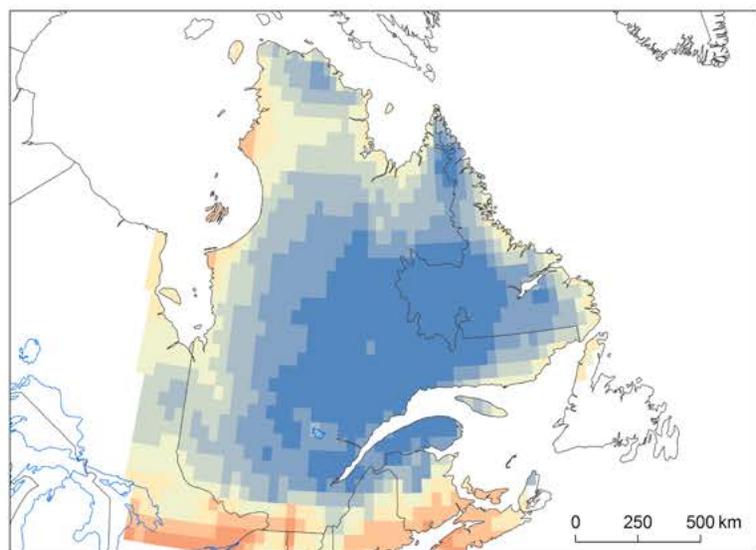
c)



d)

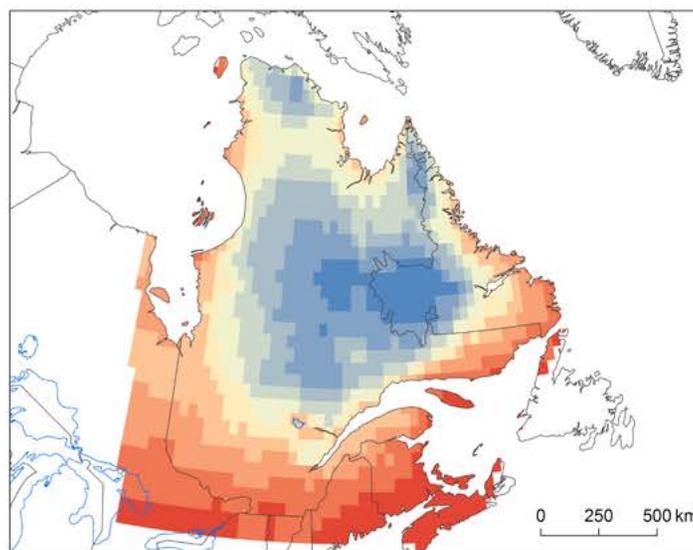
Figure A.6e. Maximum de l'équivalent en eau de la neige (février à mai) observée pour la période 1971 à 2000 (Hydro Québec) et projetées pour l'horizon 2080 (2071 à 2100). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 22 projections CMIP5 forcées par RCP8.5..

Observations : 1971 à 2000 (Hydro-Québec)

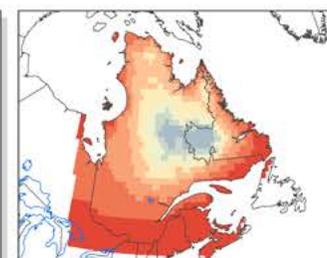


Horizon 2080 : RCP 8.5

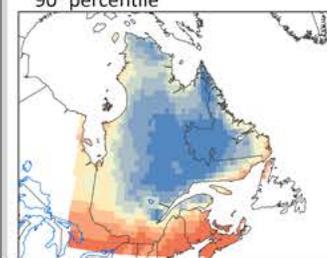
50^e percentile



10^e percentile



90^e percentile



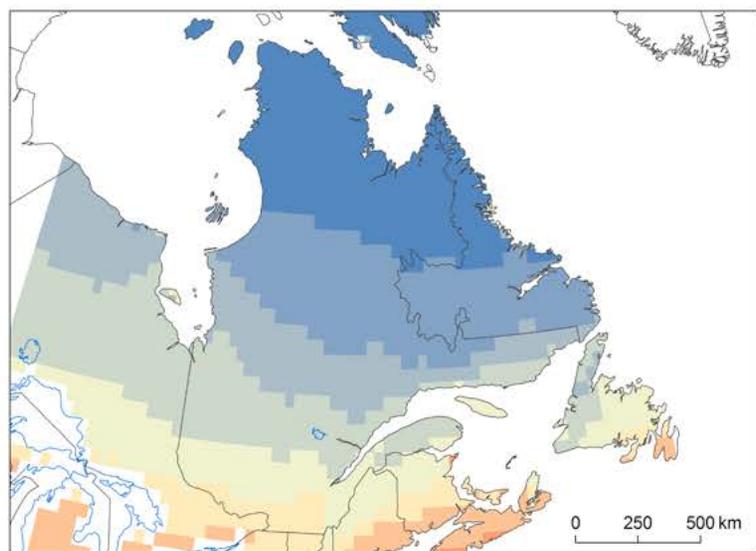
Équivalent en eau de la neige (mm) : maximum (février à mai)



e)

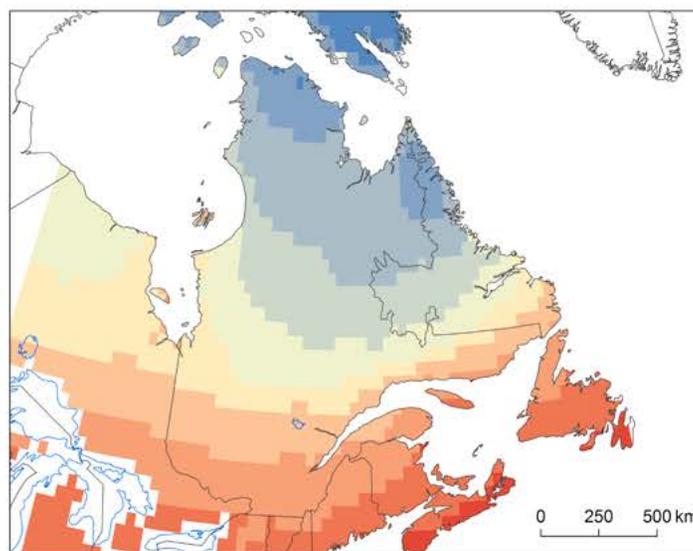
Figure A.7. Durée de l'enneigement observée pour la période 1999 à 2010 (IMS 24) et projetées pour l'horizon 2080 (2071 à 2100). Médiane, 10^e et 90^e percentiles de 19 projections CMIP5 forcées par RCP8.5.

Observations : 1999 à 2010 (IMS)

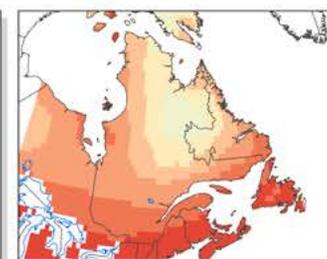


Horizon 2080 : RCP 8.5

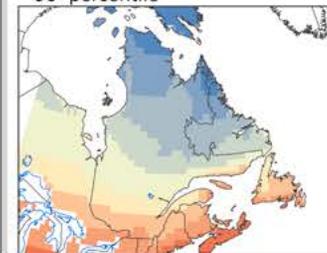
50^e percentile



10^e percentile



90^e percentile



Durée de l'enneigement (jours)



e)

ANNEXE B

Scénarios climatiques - Évolution des anomalies (1900-2100)

Températures moyennes à 2m

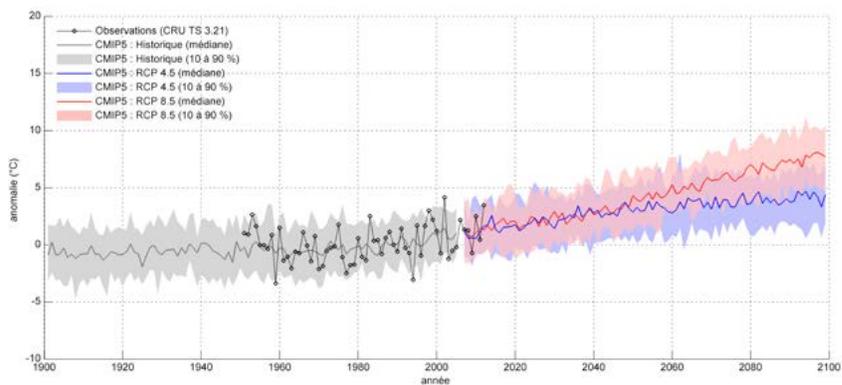
Sud du Québec	92
Centre du Québec	93
Golfe du Saint-Laurent	94
Nord du Québec	95

Précipitations totales

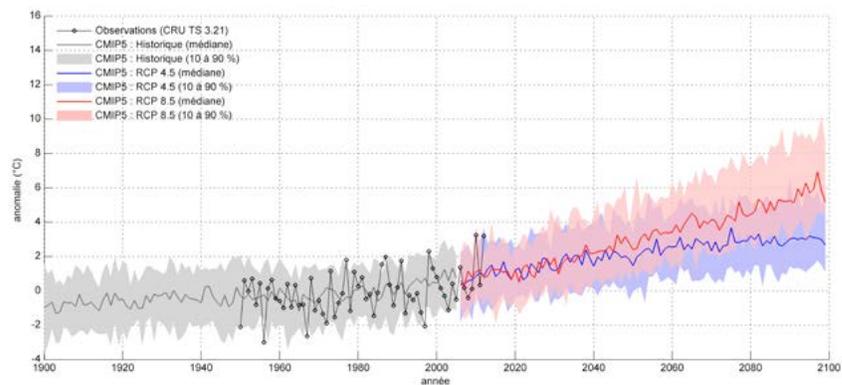
Sud du Québec	96
Centre du Québec	97
Golfe du Saint-Laurent	98
Nord du Québec	99

Figure B.1. Évolution des anomalies des températures moyennes à 2m observées pour la période 1950 à 2012 (CRU TS 3.21) et simulées (1900-2100) pour le sud du Québec. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne de 1971 à 2000.

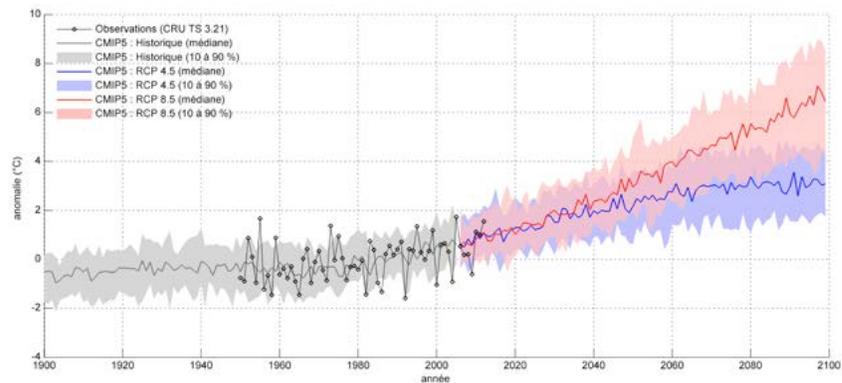
Sud du Québec



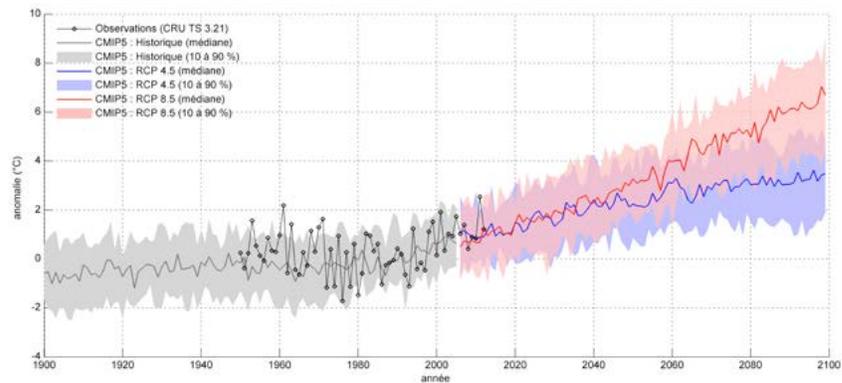
a)



b)



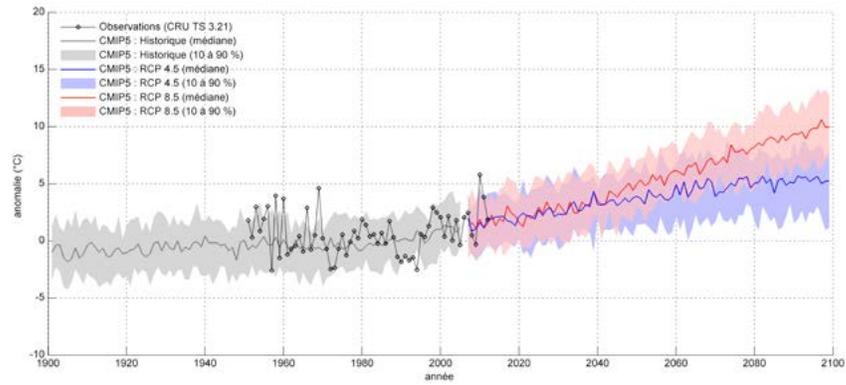
c)



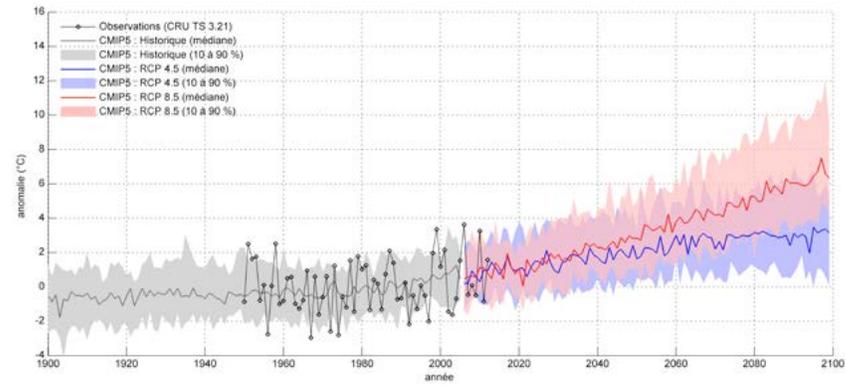
d)

Figure B.2. Évolution des anomalies des températures moyennes à 2m observées pour la période 1950 à 2012 (CRU TS 3.21) et simulées (1900-2100) pour le centre du Québec. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne de 1971 à 2000.

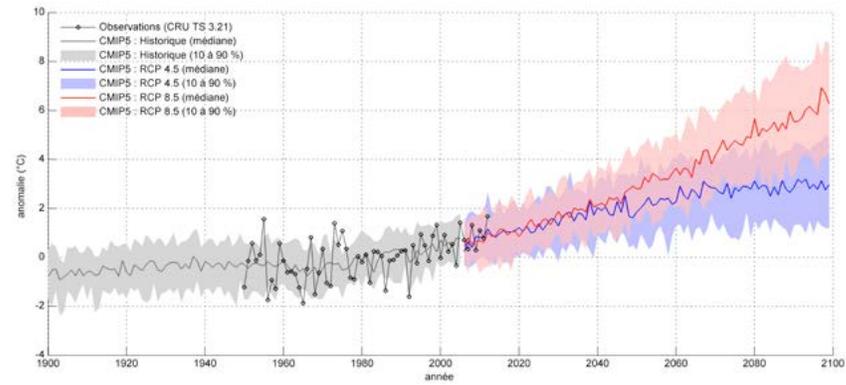
Centre du Québec



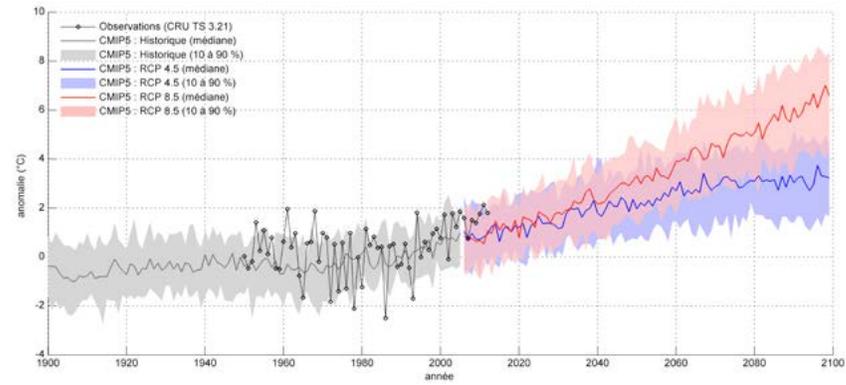
a)



b)



c)



d)

Figure B.3. Évolution des anomalies des températures moyennes à 2m observées pour la période 1950 à 2012 (CRU TS 3.21) et simulées (1900-2100) pour le golfe du Saint-Laurent. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne de 1971 à 2000.

Golfe du Saint-Laurent

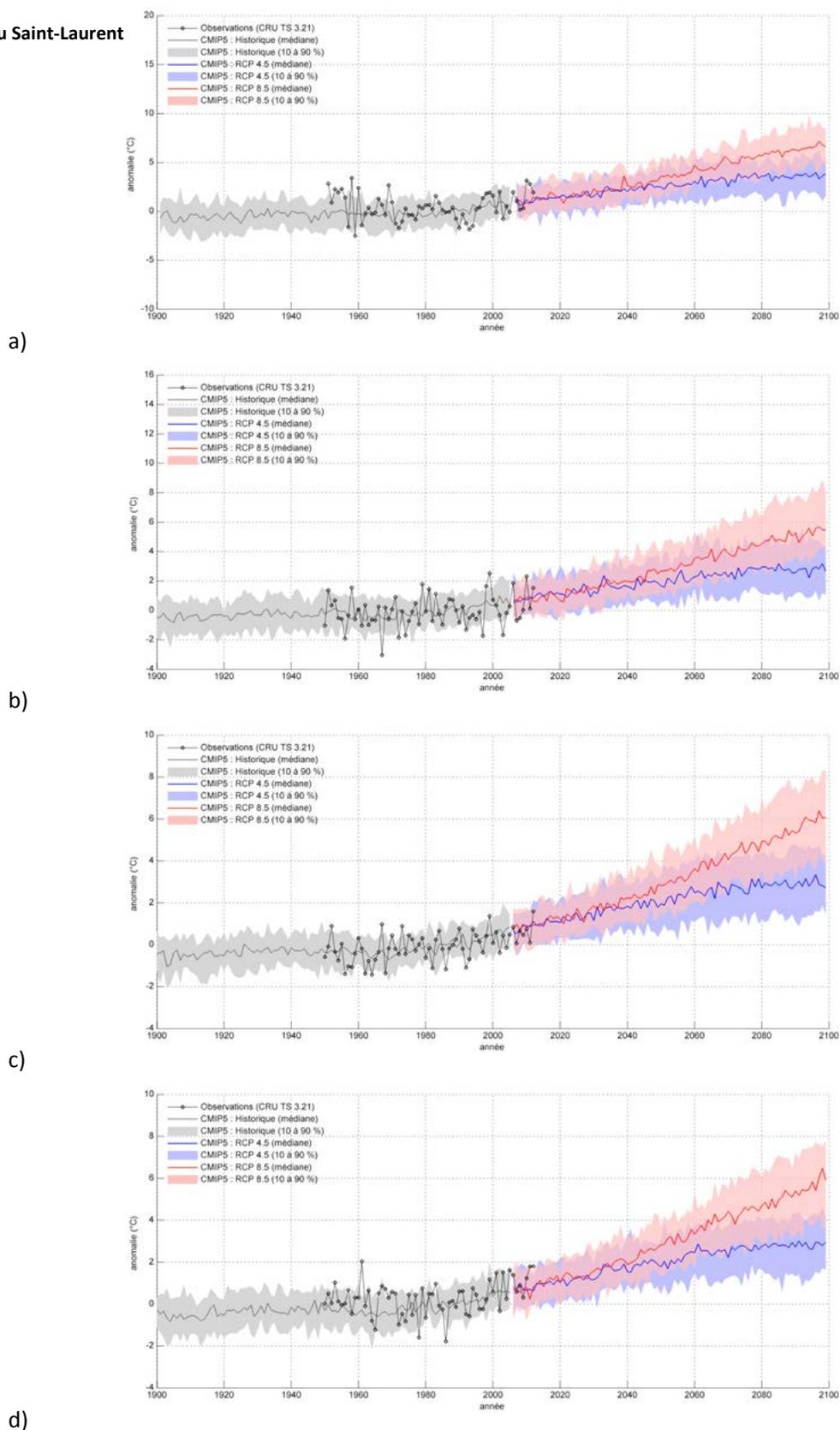


Figure B.4. Évolution des anomalies des températures moyennes à 2m observées pour la période 1950 à 2012 (CRU TS 3.21) et simulées (1900-2100) pour le nord du Québec. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne de 1971 à 2000.

Nord du Québec

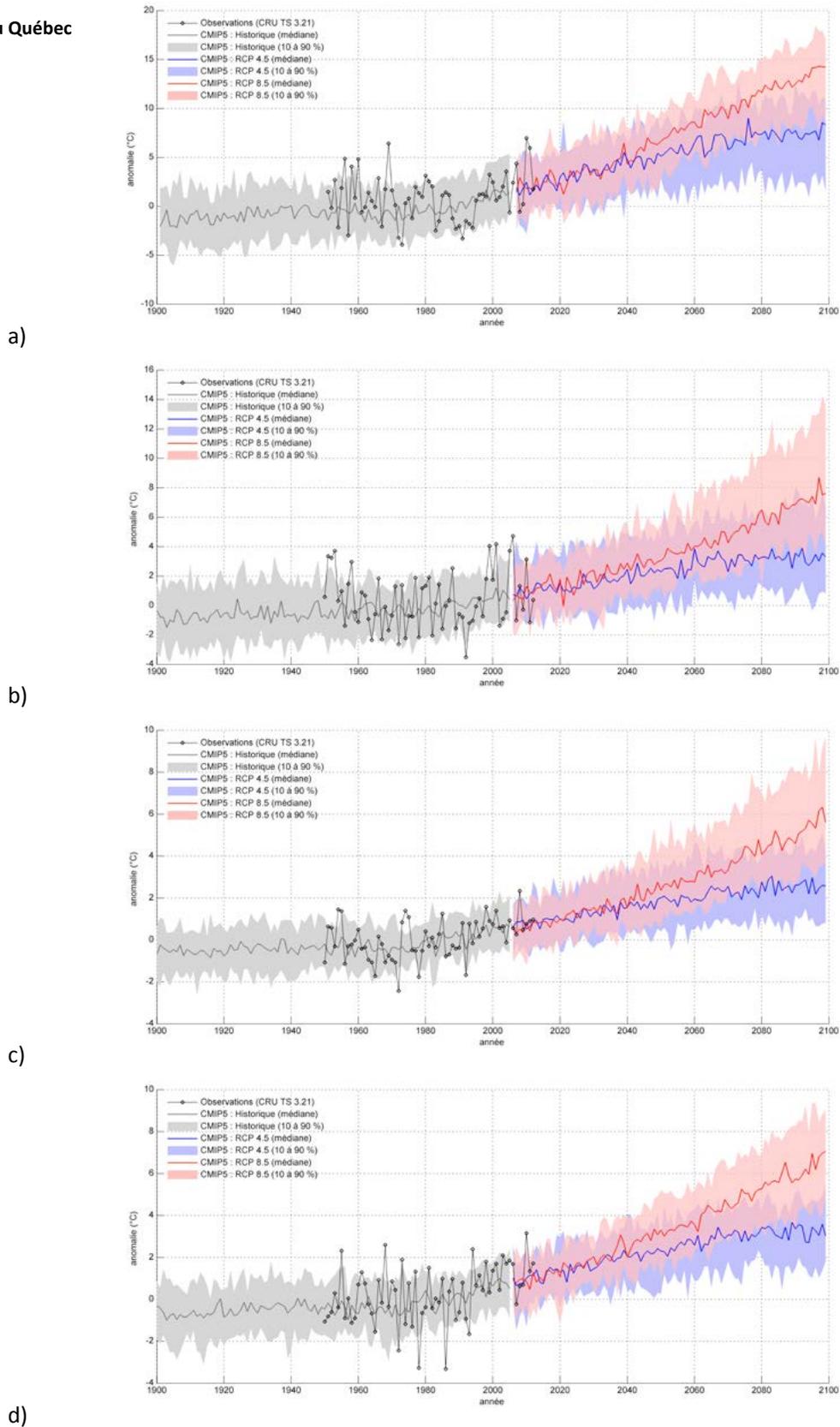


Figure B.5. Évolution des anomalies des précipitations totales observées pour la période 1950 à 2012 (CRU TS 3.21) et simulées (1900-2100) pour le sud du Québec. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne de 1971 à 2000.

Sud du Québec

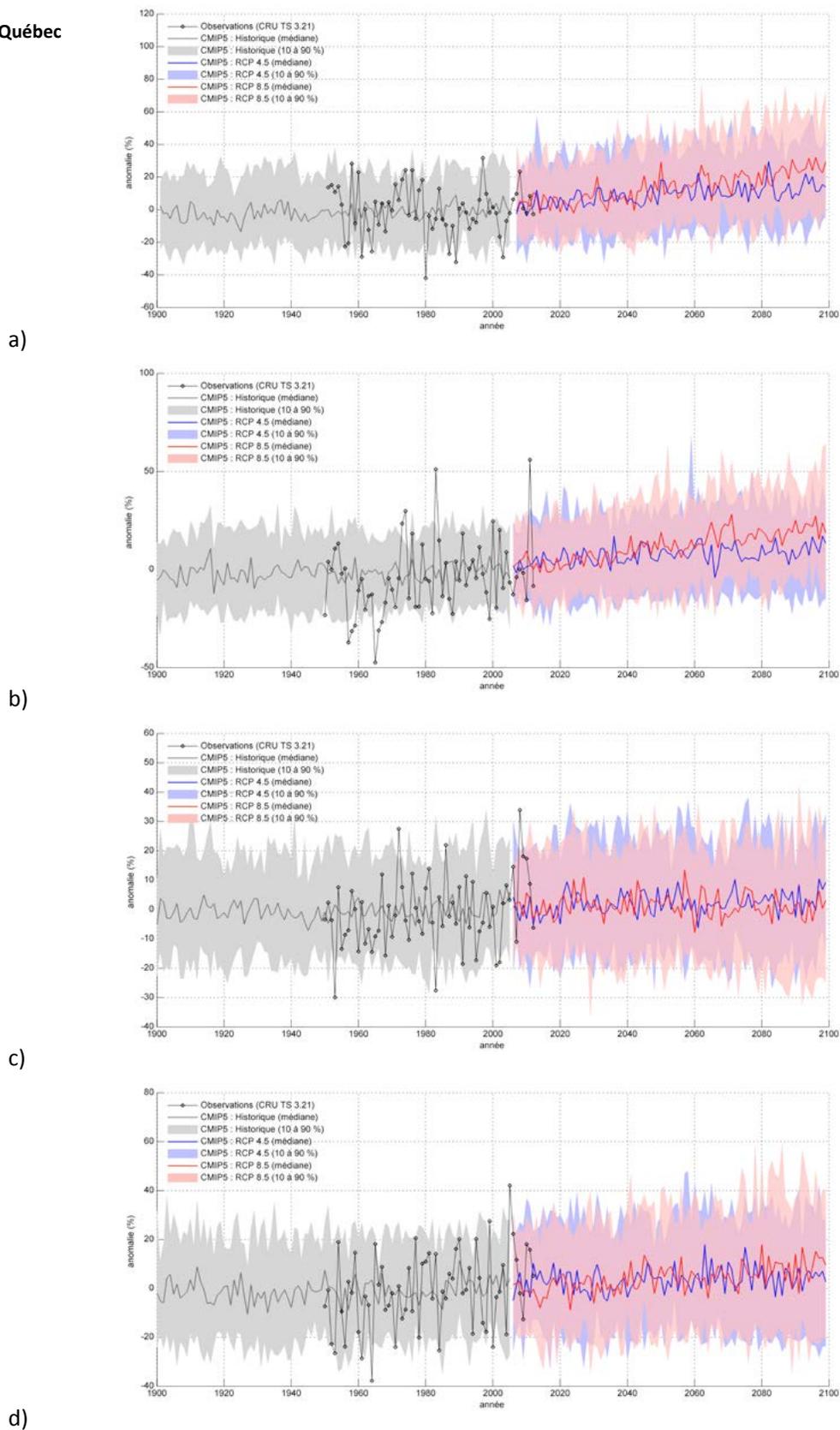


Figure B.6. Évolution des anomalies des précipitations totales observées pour la période 1950 à 2012 (CRU TS 3.21) et simulées (1900-2100) pour le centre du Québec. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne de 1971 à 2000.

Centre du Québec

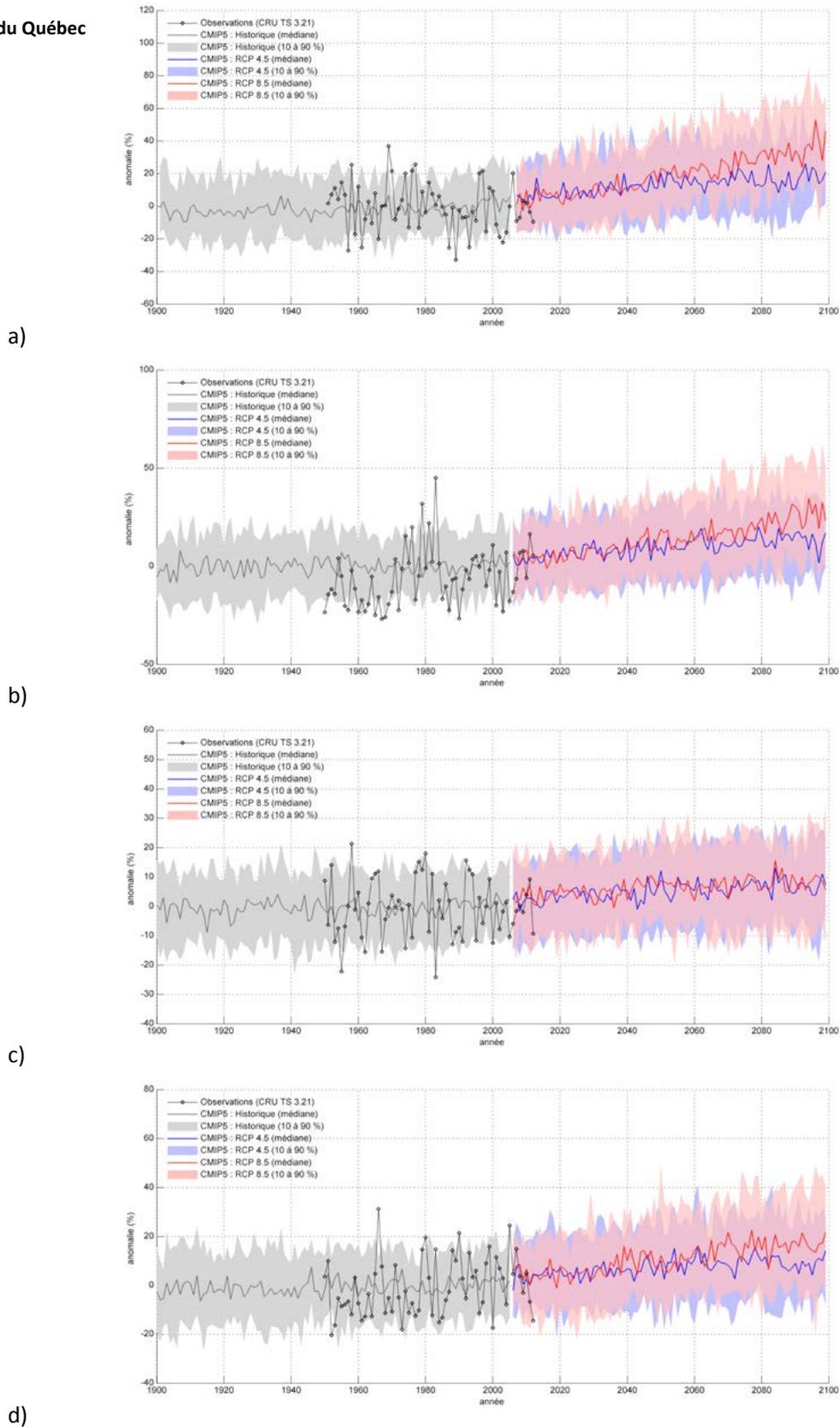


Figure B.7. Évolution des anomalies des précipitations totales observées pour la période 1950 à 2012 (CRU TS 3.21) et simulées (1900-2100) pour le golfe du Saint-Laurent. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne de 1971 à 2000.

Golfe du Saint-Laurent

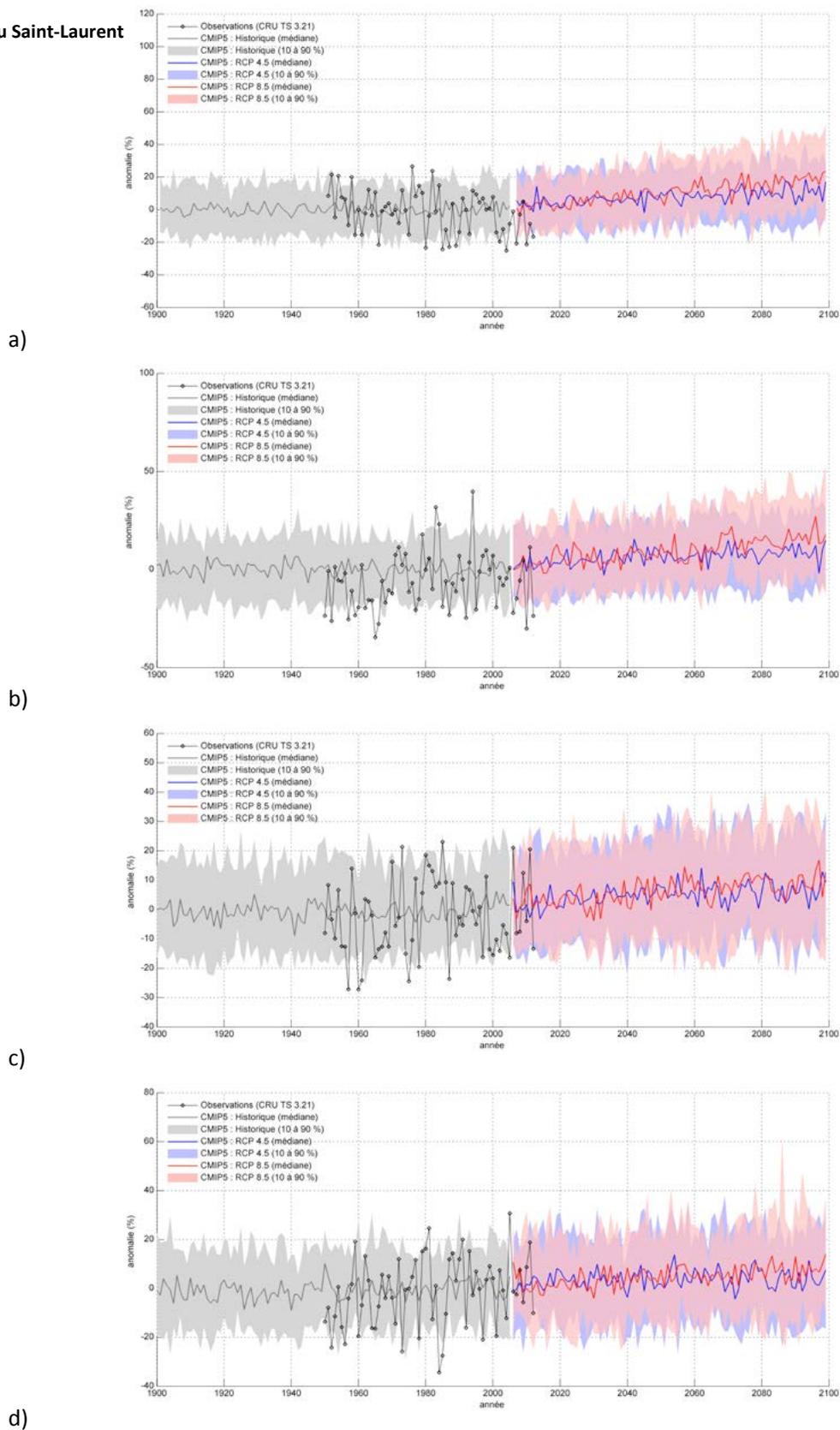
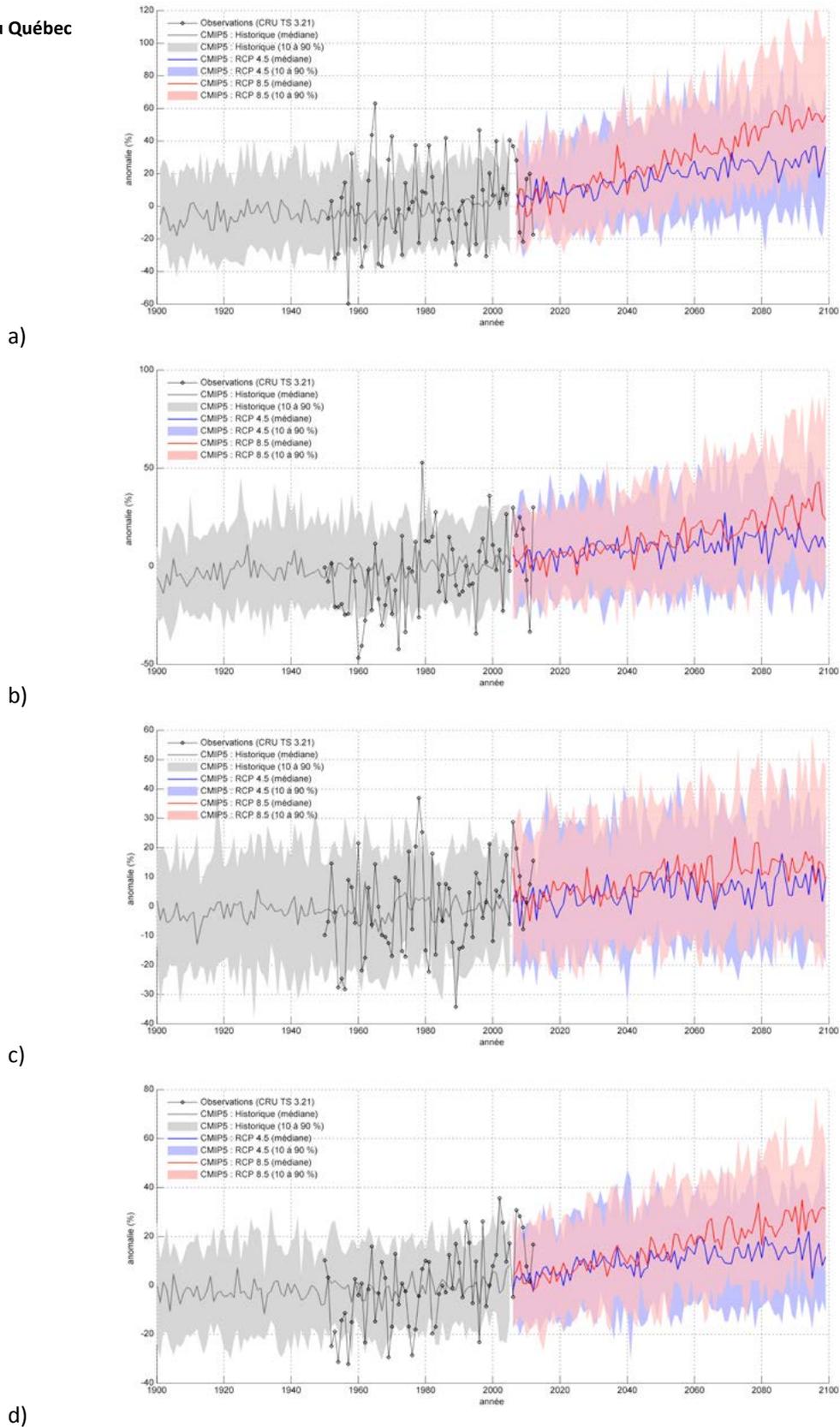


Figure B.8. Évolution des anomalies des précipitations totales observées pour la période 1950 à 2012 (CRU TS 3.21) et simulées (1900-2100) pour le nord du Québec. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON). Les anomalies sont calculées par rapport à la moyenne de 1971 à 2000.

Nord du Québec



ANNEXE C

Tendances observées - 1950-2011

Températures moyennes à 2m **101**

Précipitations totales **102**

Figure C.1a-d. Tendances observées des températures moyennes à 2m pour la période 1950 – 2011 pour les Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées d'Environnement Canada (DCCA; Vincent et al. 2012). Les triangles vers le haut (rouge) et vers le bas (violet) indiquent, respectivement, des tendances à la hausse et à la baisse. Les triangles pleins correspondent aux tendances significatives ($\alpha = 0.05$). Les tendances et les niveaux de signifiacnce statistique sont calculés selon la méthodologie de Vincent et al. 2012. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON).

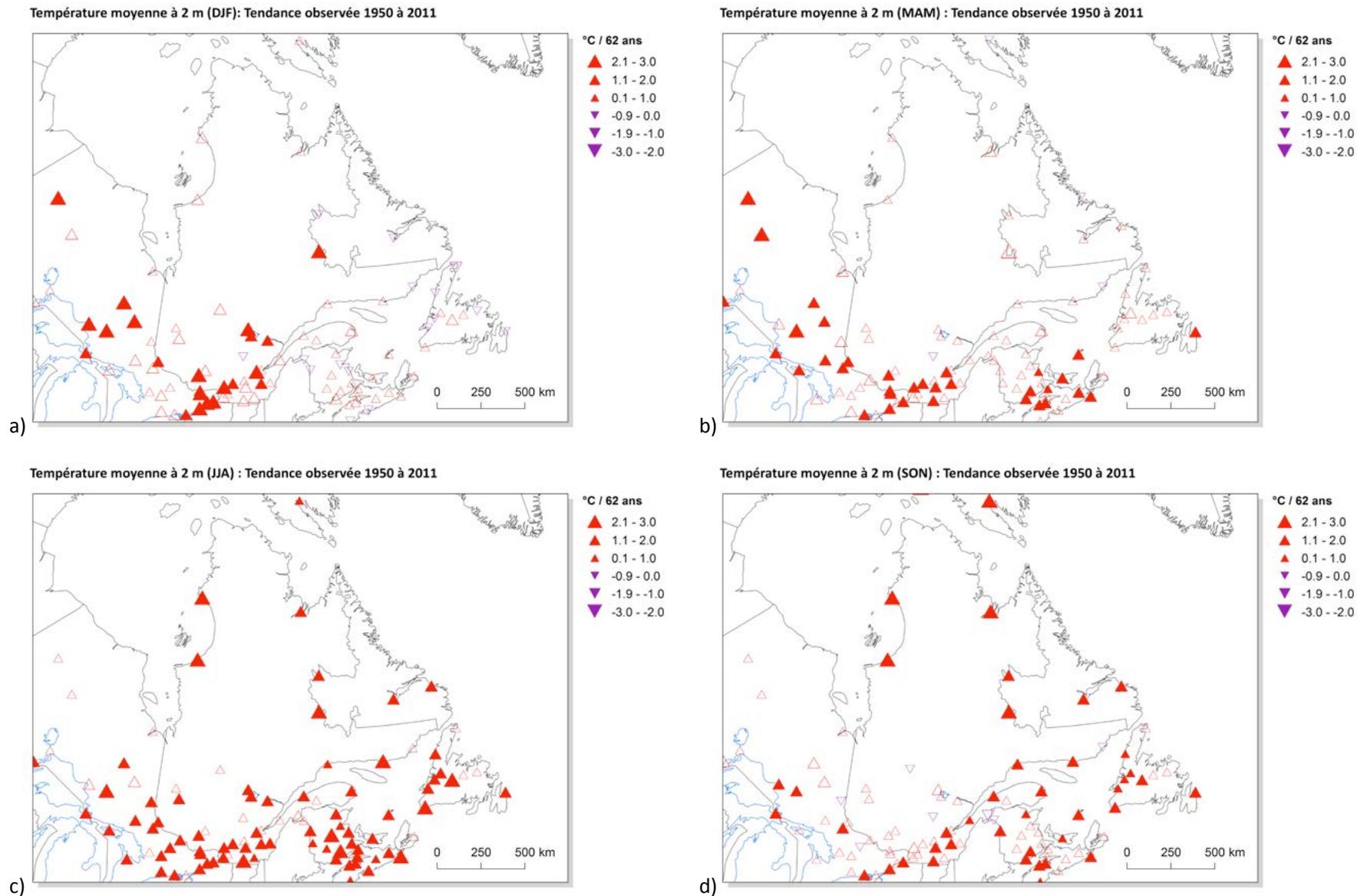
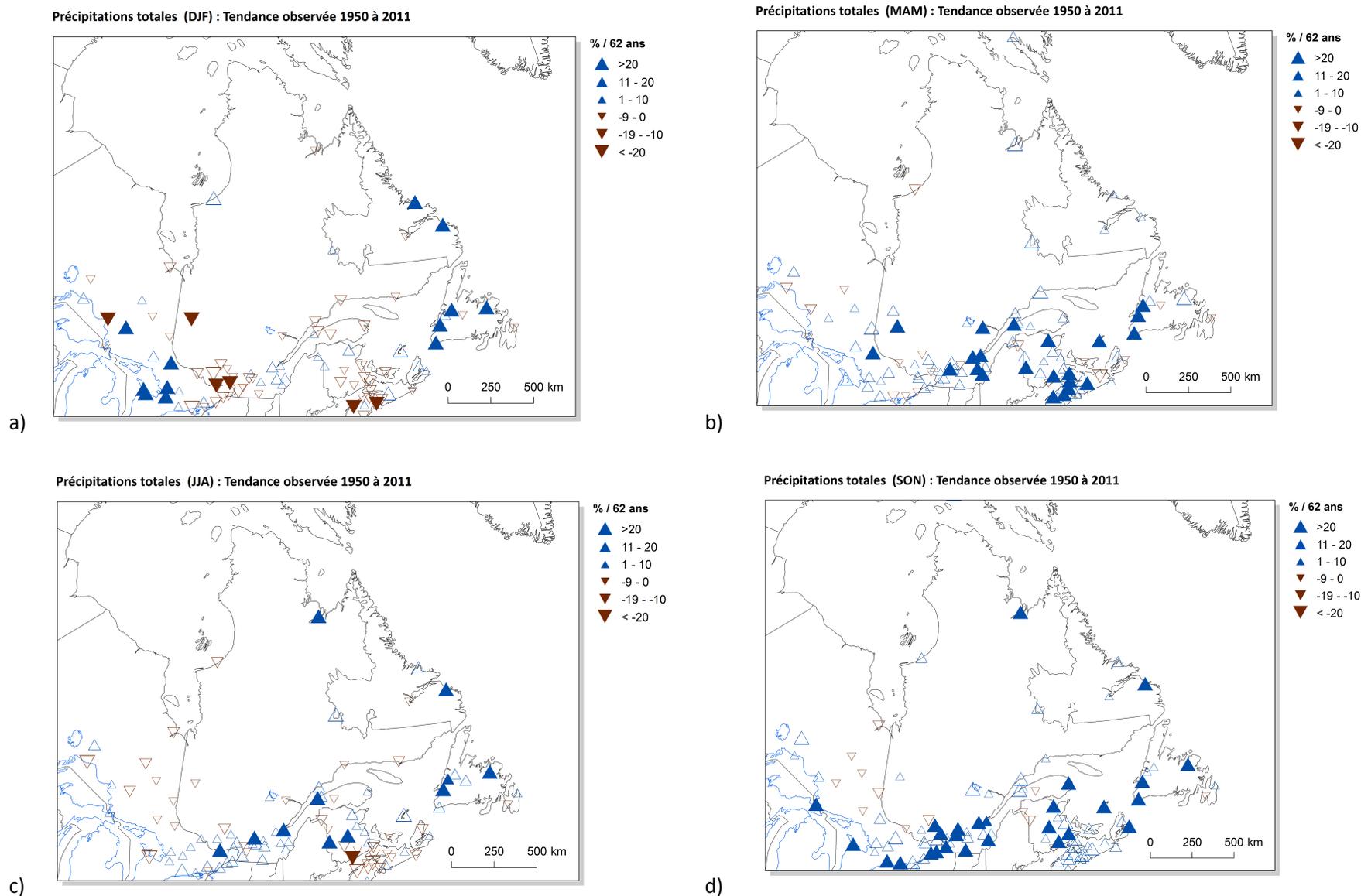


Figure C.2a-d. Tendances observées des précipitations totales pour la période 1950 – 2011 pour les Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées d'Environnement Canada (DCCA; Mekis et Vincent, 2011). Les triangles vers le haut (bleu) et vers le bas (brun) indiquent, respectivement, des tendances à la hausse et à la baisse. Les triangles pleins correspondent aux tendances significatives ($\alpha = 0.05$). Les tendances et les niveaux de signifiante statistique sont calculés selon la méthodologie de Mekis et Vincent, 2011. a) Hiver (DJF) b) Printemps (MAM) c) Été (JJA) d) Automne (SON).



ANNEXE D

Simulations globales CMIP5

Températures moyennes et précipitations totales	104
Équivalent en eau de la neige et durée de l'enneigement	105

Tableau D.1. Liste des simulations globales CMIP5 utilisées pour les projections de températures moyennes et précipitations totales.

Centre de Modélisation	Modèle	Membre	RCP4.5	RCP8.5
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	BCC-CSM1-1	r1i1p1	oui	oui
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	BCC-CSM1-1m	r1i1p1	oui	oui
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (GCESS)	BNU-ESM	r1i1p1	oui	oui
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCMA)	CanCM4	r1i1p1	oui	non
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCMA)	CanESM2	r1i1p1	oui	oui
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (CMCC)	CMCC-CESM	r1i1p1	non	oui
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (CMCC)	CMCC-CM	r1i1p1	oui	oui
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (CMCC)	CMCC-CMS	r1i1p1	oui	oui
Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	CNRM-CM5	r1i1p1	oui	oui
CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia) (CSIRO-BOM)	ACCESS1-0	r1i1p1	oui	oui
CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia) (CSIRO-BOM)	ACCESS1-3	r1i1p1	oui	oui
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	oui	oui
The First Institute of Oceanography, SOA, China (FIO)	FIO-ESM	r1i1p1	oui	oui
EC-EARTH consortium	EC-EARTH	r1i1p1	oui	non
Institute for Numerical Mathematics (INM)	INM-CM4	r1i1p1	oui	oui
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5A-LR	r1i1p1	oui	oui
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	oui	oui
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)	IPSL-CM5B-LR	r1i1p1	oui	oui
LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University (LASG-CESS)	FGOALS-g2	r1i1p1	oui	oui
LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (LASG-IAP)	FGOALS-s2	r1i1p1	non	oui
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC4h	r1i1p1	oui	non
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC5	r1i1p1	oui	oui
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies (MIROC)	MIROC-ESM	r1i1p1	oui	oui
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies (MIROC)	MIROC-ESM-CHEM	r1i1p1	oui	oui
Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (MOHC)	HadCM3	r1i1p1	oui	non
Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (MOHC)	HadGEM2-CC	r1i1p1	oui	oui
Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (MOHC)	HadGEM2-ES	r1i1p1	oui	non
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-LR	r1i1p1	oui	oui
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-MR	r1i1p1	oui	oui
Meteorological Research Institute	MRI-CGCM3	r1i1p1	oui	oui
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	GISS-E2-H-CC	r1i1p1	oui	non
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	GISS-E2-R	r1i1p1	oui	oui
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-M	r1i1p1	oui	oui
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-ME	r1i1p1	oui	oui
National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration (NIMR/KMA)	HadGEM2-AO	r1i1p1	oui	oui

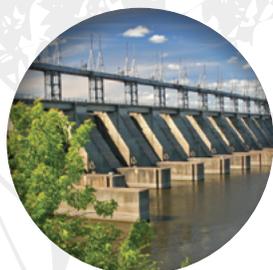
Tableau D.2. Liste des simulations globales CMIP5 RCP 8.5 utilisées pour les projections d'équivalent en eau (EEN) de la neige et la durée de l'enneigement (DE).

Centre de Modélisation	Modèle	Membre	EEN	DE
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	BCC-CSM1-1	r1i1p1	oui	oui
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (BCC)	BCC-CSM1-1m	r1i1p1	oui	oui
College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (GCESS)	BNU-ESM	r1i1p1	oui	non
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCMA)	CanESM2	r1i1p1	oui	oui
Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)	CNRM-CM5	r1i1p1	oui	oui
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence (CSIRO-QCCCE)	CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	oui	non
Institute for Numerical Mathematics (INM)	INM-CM4	r1i1p1	oui	oui
LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University (LASG-CESS)	FGOALS-g2	r1i1p1	oui	oui
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC4h	r1i1p1	non	oui
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	MIROC5	r1i1p1	oui	oui
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies (MIROC)	MIROC-ESM	r1i1p1	oui	oui
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies (MIROC)	MIROC-ESM-CHEM	r1i1p1	oui	oui
Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (MOHC)	HadGEM2-ES	r1i1p1	oui	non
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-LR	r1i1p1	oui	oui
Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-MR	r1i1p1	oui	oui
Meteorological Research Institute (MRI)	MRI-CGCM3	r1i1p1	oui	oui
Meteorological Research Institute (MRI)	MRI-ESM1	r1i1p1	oui	non
NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	GISS-E2-R	r1i1p1	oui	oui
National Center for Atmospheric Research (NCAR)	CCSM4	r1i1p1	oui	oui
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-M	r1i1p1	oui	oui
Norwegian Climate Centre (NCC)	NorESM1-ME	r1i1p1	oui	oui
National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research (NSF-DOE-NCAR)	CESM1BGC	r1i1p1	oui	oui
National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research (NSF-DOE-NCAR)	CESM1CAM5	r1i1p1	oui	oui

VERS L'ADAPTATION

Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec

Édition 2015



PARTIE 2 VULNÉRABILITÉS, IMPACTS ET ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES



TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Liste des encadrés	VII

2.1 La prospérité économique au Québec	1
2.1.1 Foresterie	5
2.1.1.1 <i>Impacts biophysiques</i>	7
2.1.1.2 <i>Impacts sur la ressource et les opérations forestières</i>	13
2.1.1.3 <i>Pistes d'adaptation</i>	14
2.1.2 Agriculture	15
2.1.2.1 <i>Le climat, un élément déterminant pour les activités agricoles</i>	16
2.1.2.2 <i>Impacts potentiels des changements climatiques sur l'agriculture</i>	17
2.1.2.3 <i>Adaptation</i>	25
2.1.2.4 <i>Conclusion</i>	29
2.1.3 Pêches et aquaculture	31
2.1.3.1 <i>L'importance économique des pêches et de l'aquaculture au Québec</i>	32
2.1.3.2 <i>Impacts des changements climatiques sur les propriétés physico-chimiques de l'eau et sur l'habitat du poisson</i>	32
2.1.3.3 <i>Conséquences sur les pêches et l'aquaculture</i>	34
2.1.3.4 <i>Mesures d'adaptation</i>	36
2.1.3.5 <i>Conclusion</i>	38
2.1.4 L'énergie	39
2.1.4.1 <i>Les impacts</i>	40
2.1.4.2 <i>L'adaptation</i>	48
2.1.4.3 <i>Conclusion</i>	49
2.1.5 Tourisme et loisirs	50
2.1.5.1 <i>La situation actuelle en tourisme</i>	50
2.1.5.2 <i>Impacts et vulnérabilités</i>	51
2.1.5.3 <i>Impact projeté sur la demande</i>	51
2.1.5.4 <i>Le processus d'adaptation de l'industrie touristique</i>	53
2.1.5.5 <i>Vers une meilleure planification des risques climatiques</i>	55

2.2 La santé des individus et des communautés	56
2.2.1 Exposition aux polluants atmosphériques et aux pollens	57
2.2.1.1 Combustibles fossiles	57
2.2.1.2 Incendies de forêt	60
2.2.1.3 Pollens allergènes	63
2.2.2 Exposition à la chaleur et aux ultraviolets solaires	65
2.2.2.1 Réchauffement moyen, vagues de chaleur et îlots de chaleur urbains (ICU)	65
2.2.2.2 Exposition aux ultraviolets solaires	69
2.2.3 Événements météorologiques extrêmes (EME)	72
2.2.3.1 Vagues de froid intense	73
2.2.3.2 Précipitations hivernales et épisodes de gel-dégel	74
2.2.3.3 Pluies abondantes et inondations	75
2.2.4 Contextes particuliers	77
2.2.4.1 Nord-du-Québec	77
2.2.4.2 Les changements climatiques, l'emploi et la santé au travail	78
2.2.4.3 Maladies hydriques et zoonoses	78
2.3 La pérennité et la sécurité des bâtiments et des infrastructures	83
2.3.1 Un cadre bâti développé mais vieillissant, et des spécificités régionales	84
2.3.2 Risques, impacts, vulnérabilités et adaptation aux changements climatiques	85
2.3.2.1 Les régions nordiques	86
2.3.2.2 Les régions côtières	89
2.3.2.3 Le Sud de la province	91
2.4 La biodiversité et le maintien des services écologiques	97
2.4.1 Contexte général et enjeux globaux	98
2.4.1.1 Impacts sur la biodiversité et les services écologiques	98
2.4.1.2 Stratégies d'adaptation	102
2.4.2 Risques, impacts, vulnérabilités et adaptation au Québec	105
2.4.2.1 La position particulière du Québec dans le continent nord-américain	105
2.4.2.2 À l'échelle du Québec	105
2.4.2.3 À l'échelle régionale	109
2.4.2.4 À l'échelle écosystémique	127
2.4.2.5 À l'échelle municipale	128

2.5 Enjeux transversaux

132

2.5.1	Gestion de l'eau	133
2.5.1.1	<i>Impacts biophysiques</i>	134
2.5.1.2	<i>Vulnérabilité, impacts et adaptation en lien avec les usages de l'eau</i>	139
2.5.1.3	<i>Conclusion</i>	142
2.5.2	Aménagement du territoire	142
2.5.2.1	<i>Aménagement du territoire – milieu urbanisé</i>	143
2.5.2.2	<i>Aménagement du territoire – milieux naturels</i>	151
2.5.3	Conclusion	156

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1	<i>Part de certaines activités économiques sensibles au climat dans le produit intérieur brut (PIB), à partir du PIB réel aux prix de base par industrie.</i>	2
Figure 2-2	<i>Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec</i>	6
Figure 2-3	<i>Changement du nombre de degrés-jours de croissance entre la période de référence (1971-2000 et l'horizon 2050, calculé à partir de l'ensemble des simulations MRC.</i>	7
Figure 2-4	<i>Changement de la longueur de la saison de croissance (en jours) entre la période de référence (1971-2000) et l'horizon 2050, calculé à partir de l'ensemble des simulations MRC.</i>	8
Figure 2-5	<i>Normales 1971-2000 (a) du cumul des unités thermiques maïs (UTM) et scénarios de changement inférieur (b) et supérieur (c) pour l'horizon 2041-2070 vs 1971-2000</i>	17
Figure 2-6	<i>Nombre moyen de générations du nématode à kyste du soya par saison de croissance durant le passé récent (1971-2000) (a) et pour le futur proche (2041-2070) selon le scénarios de changements inférieur (b) et supérieur (c)</i>	21
Figure 2-7	<i>Impact de deux scénarios de changements climatiques sur le bénéfice net des fermes laitières du Centre du Québec et du Bas-St-Laurent</i>	24
Figure 2-8	<i>Changement des débits à l'horizon 2050 a) changement médian des débits moyens par l'ensemble (cQ)2 sur les bassins hydrologiques d'Hydro-Québec b) consensus entre les différents scénarios climatiques sur la direction du changement et c) écart entre les scénarios</i>	41
Figure 2-9	<i>Comparaison de l'ensemble des débits simulés pour la période de référence (1971-2000 enveloppe bleue) avec les débits simulés pour la période future (2041-2070 enveloppe rouge) pour 9 bassins de la région de la Côte-Nord</i>	42
Figure 2-10	<i>Moyenne des changements projetés (en %) des volumes de crue printanière pour quelques bassins versants de la Côte-Nord associé à une période de retour de 20 ans</i>	43
Figure 2-11	<i>Changement projeté (en %) des CMP été-automne et CMP hiver-printemps du bassin Kénogami selon trois simulations du MRCC4, à l'aide de deux modèles hydrologiques (SSARR et HYDROTEL) et pour deux périodes (2000-2040 et 2040-2080)</i>	44
Figure 2-12	<i>Carte de l'Atlas du Canada pour la projection de la cote de gravité des feux de forêt 2090-2099</i>	61
Figure 2-13	<i>Image satellitaire d'incendies de forêt près d'Eastmain, été 2013</i>	62
Figure 2-14	<i>Distribution géographique de l'herbe à poux au Québec</i>	63
Figure 2-15	<i>Exemple de carte de prédiction pour la ville de Granby : probabilité de présence de l'herbe à poux.</i>	65
Figure 2-16	<i>Évolution du nombre annuel de journées chaudes entre 1961 et 2100 dans quelques villes canadiennes, dont Montréal.</i>	66
Figure 2-17	<i>Carte des îlots de chaleur, Montréal</i>	68
Figure 2-18	<i>Évolution de la végétation sur le territoire de la CMM entre 1984 et 2005</i>	71
Figure 2-19	<i>Inondation à Saint-Jean-sur-Richelieu, Montérégie, Québec 4 mai 2011</i>	76

Figure 2-20	<i>Évolution du nombre de cas de maladie de Lyme selon le lieu d'acquisition au Québec entre 2004 et 2013</i>	81
Figure 2-21	<i>Vérins sur lesquels reposent les maisons dans le Nord québécois</i>	87
Figure 2-22	<i>Schéma synthèse des différentes couches d'information géographique utilisées en vue de produire des cartes de potentiel de construction en fonction des risques de dégradation du pergélisol</i>	88
Figure 2-23	<i>Recul de la côte de Val-Marguerite et de la plage Ferguson à la suite de l'événement des 15 et 16 octobre 2005</i>	90
Figure 2-24	<i>Exemples de mesures de gestion des eaux de pluie</i>	93
Figure 2-25	<i>Surverse en milieu naturel</i>	95
Figure 2-26	<i>Exemples d'impacts des facteurs climatiques sur (a) les chaussées et (b) les zones côtières</i>	95
Figure 2-27	<i>Effets des changements climatiques sur la répartition potentielle des espèces au Québec</i>	107
Figure 2-28	<i>Profils thermiques passés et futurs pour deux lacs représentatifs du Sud et du Nord du Québec</i>	115
Figure 2-29	<i>Date d'arrivée printanière des oiseaux migrateurs nichant au Québec</i>	118
Figure 2-30	<i>Expansion actuelle et potentielle du roseau envahisseur dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent</i>	123
Figure 2-31	<i>Distributions historique et future de la souris à pattes blanches dans l'Est de l'Amérique du Nord et au Québec</i>	124
Figure 2-32	<i>Cartographie de la fonction de filtration des sédiments par les milieux humides du bassin versant de la rivière Yamaska selon divers scénarios climatiques et d'utilisation des terres</i>	126
Figure 2-33	<i>Territoire couvert par la plateforme de modélisation hydrologique de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional</i>	135
Figure 2-34	<i>Exemples de cartographies A) de la direction et B) de l'ampleur des changements climatiques sur les étiages à l'horizon 2050 en utilisant l'indicateur statistique Q7min2EA</i>	136
Figure 2-35	<i>Étiages estivaux plus sévères</i>	137
Figure 2-36	<i>Dynamique sédimentaire accrue</i>	138
Figure 2-37	<i>Fréquence des sinistres attribuables aux phénomènes météorologiques au Canada</i>	144
Figure 2-38	<i>Pertes (en milliard de dollars) dues aux sinistres attribuables aux phénomènes météorologiques au Canada</i>	145
Figure 2-39	<i>Schéma méthodologique</i>	148
Figure 2-40	<i>Exemple de carte localisant les sites d'empilement de la neige</i>	151
Figure 2-41	<i>Illustration simplifiée des concepts qui sous-tendent les stratégies de conservation de la biodiversité à l'échelle régionale dans le contexte des changements climatiques</i>	153
Figure 2-42	<i>Exemple de carte modélisée permettant la priorisation de corridors écologiques robustes aux changements climatiques</i>	154

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1	<i>Impact (%) des changements climatiques sur le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel</i>	46
Tableau 2-2	<i>Instruments d'adaptation des ouvrages hydrauliques aux conditions hydroclimatiques en évolution</i>	49
Tableau 2-3	<i>Effets des phénomènes climatiques observés sur les activités récréotouristiques pour les saisons hivernale et estivale</i>	52
Tableau 2-4	<i>Impacts économiques estimés des changements climatiques – Laurentides et Cantons-de-l'Est</i>	53
Tableau 2-5	<i>Synthèse de certains effets des changements climatiques sur les chaussées</i>	94
Tableau 2-6	<i>Stratégies d'adaptation pour la gestion de la biodiversité les plus recommandées par les experts.</i>	103
Tableau 2-7	<i>Services écologiques et changements climatiques</i>	110
Tableau 2-8	<i>Impacts des changements climatiques sur le régime hydrique des cours d'eau selon l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional</i>	135

LISTE DES ENCADRÉS

<i>Encadré 2-1</i>	<i>Changements climatiques, pollution atmosphérique et pollens allergènes</i>	58
<i>Encadré 2-2</i>	<i>Incendies de forêt : impacts sur la santé et la foresterie</i>	60
<i>Encadré 2-3</i>	<i>Exposition aux UV et réduction des ICU</i>	72
<i>Encadré 2-4</i>	<i>Projet d'adaptation d'envergure</i>	73
<i>Encadré 2-5</i>	<i>Changements climatiques et gestion de l'eau</i>	80
<i>Encadré 2-6</i>	<i>Maladie de Lyme</i>	81
<i>Encadré 2-7</i>	<i>L'importance économique des services écologiques dans le contexte des changements climatiques</i>	101
<i>Encadré 2-8</i>	<i>Les enjeux de biodiversité dans les politiques municipales et les actions citoyennes</i>	129



2.1 La prospérité économique du Québec

Auteur : Claude Desjarlais (Ouranos)

Collaboratrice : Caroline Larrivée

La nature et l'ampleur de la vulnérabilité du Québec aux changements climatiques dépendent autant du type et de l'importance des changements dans les variables climatiques, que des caractéristiques de l'environnement naturel, de l'économie et de la société québécoise sur lesquels ils s'exerceront. À cet égard, il est utile de jeter un regard sur les principales caractéristiques climatiques, physiques et socioéconomiques du Québec et leur évolution attendue au cours des prochaines décennies.

La population

La population du Québec, qui est de 8,1 millions (2013) (ISQ, 2013a), se concentre surtout (82 %) dans le Sud, le long du Saint-Laurent. Cette population est relativement urbanisée (77 %), résidant dans une centaine de villes de plus de 10 000 habitants – dont 48 % dans dix villes de plus de 100 000 habitants soit Montréal, Québec, Lévis, Gatineau, Sherbrooke, Laval, Longueuil, Saguenay, Trois-Rivières et Terrebonne. Le territoire rural (80 % du territoire habité) représente 1,5 million de personnes (19 % de la population) vivant dans près de 1 000 villages. Pour sa part, la population autochtone totale avoisine les 98 600 personnes (87 000 amérindiens, 11 600 Inuits) (SAA, 2013).

La croissance marquée du nombre d'ainés partout au Québec constitue un autre phénomène démographique important. En 2061, la population du Québec comptera 2,1 millions de personnes de plus qu'en 2011. À lui seul, le groupe des 65 ans et plus aura augmenté de 1,6 million, la part des aînés dans la population totale grimpant ainsi à plus de 28 %, comparativement à 16 % en 2011 (ISQ, 2014a). Ainsi, une proportion croissante de la population viendrait augmenter les tranches d'âge souvent associées à des groupes actuellement vulnérables aux changements climatiques.

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.

L'économie

L'économie du Québec, avec plus de 300 milliards de dollars en 2013 (ISQ, 2014b), est une économie très diversifiée. La production de biens et services par habitant du Québec est parmi les plus élevées dans le monde (28^e), ce qui lui permet de disposer d'importantes ressources techniques et financières, pour faire face aux impacts potentiels des changements climatiques.

Les industries productrices de biens, qui comprennent notamment l'agriculture et l'exploitation des ressources naturelles, telles que la forêt et la production hydroélectrique, sont parmi celles qui risquent d'être les plus directement affectées, à la fois positivement et négativement, par les changements climatiques. Toutefois, le secteur des services, qui occupe près de 70 % du PIB, sera également affecté, que l'on pense par exemple aux transports, au tourisme, ou à la santé, tel qu'illustré à la figure 2-1.

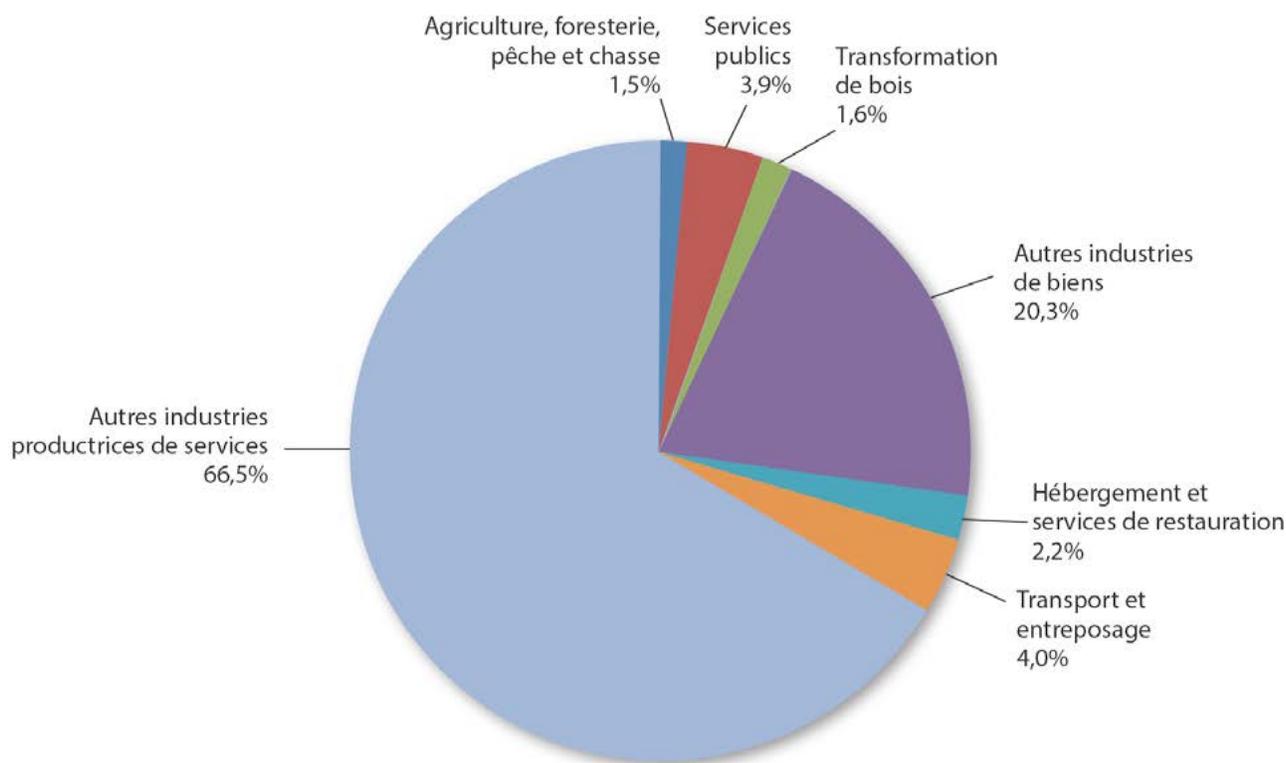


Figure 2-1 Part de certaines activités économiques sensibles au climat dans le produit intérieur brut (PIB), à partir du PIB réel aux prix de base par industrie.

Source : Statistique Canada (2014)

L'économie du Québec sera aussi touchée indirectement par le biais des impacts des changements climatiques sur ses partenaires commerciaux, qui viendront modifier à la fois l'offre et la demande des biens et services et leurs prix relatifs, notamment pour les industries du tourisme, de la production agricole et de la production d'électricité, pour n'en citer que quelques-unes. Il est important de rappeler que l'économie québécoise est largement tournée vers l'extérieur, avec environ 49 % de son activité économique relevant du commerce interprovincial et international. En fait, en 2013 les exportations et les importations représentaient respectivement 45 % et 53 % du PIB (Le Québec économique, 2014).

De façon très globale, on peut dire que l'économie du Québec, fortement tertiaisée, est modérément vulnérable aux changements climatiques (TRNEE, 2011b) en comparaison avec d'autres régions du monde. Aux industries de l'agriculture, de la foresterie et de la chasse et pêche, particulièrement sensibles au climat et qui représentaient en 2013, 1,5 % du PIB du Québec, il faut ajouter celle de la production d'électricité, essentiellement d'origine hydraulique, avec 3,9 % du PIB. De même, l'industrie touristique, qui contribue à raison de près de 2,2 % du PIB québécois et occupe une part encore plus grande de l'emploi, est également vulnérable notamment en ce qui concerne les activités hivernales.

Il faut enfin tenir compte du secteur manufacturier duquel plusieurs industries pourraient être affectées, notamment celles qui reposent sur la transformation des ressources, dont l'agroalimentaire et la transformation du bois. Cette dernière industrie représente environ 1,6 % du PIB, de même qu'une proportion importante des exportations du Québec (MRN, 2013).

Ces industries constituent en outre, pour plusieurs régions, la base même de leur économie et fournissent une part importante des emplois directs (12 à 20 %). Au total, plusieurs centaines de communautés dépendent directement de l'exploitation d'une ou de plusieurs ressources naturelles locales.

Ce portrait de l'économie québécoise évoluera fortement au cours des prochaines décennies et les changements climatiques ne sont qu'un des facteurs qui l'affecteront. On prévoit ainsi, selon les tendances actuelles de la démographie et de la productivité du travail, que le Québec connaîtra une croissance économique soutenue et doublera 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. De plus, de nombreux changements commerciaux (nouveaux accords commerciaux, développement économique des pays émergents), technologiques (demandes, méthodes ou procédés de production), ou encore reliés à la disponibilité et aux coûts des approvisionnements, influenceront sur les différentes activités de production de biens et services.

L'environnement bâti

Les changements climatiques risquent de se faire particulièrement sentir par leurs effets sur les infrastructures et les bâtiments. En particulier, il est à craindre que la fonte du pergélisol, l'augmentation de l'érosion côtière et la recrudescence des événements climatiques extrêmes aient un fort impact sur l'environnement bâti.

En effet, les bâtiments et les infrastructures privées et publiques ont été conçus en fonction de critères de risque fondés sur des données climatiques historiques dans l'hypothèse d'un 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. Les changements climatiques viennent donc augmenter le niveau de risque affectant l'ensemble de la société sur les plans humain et économique. Ceci se trouve d'ailleurs amplifié par la progression constante des actifs immobiliers au Québec, comme dans le reste du monde au cours des dernières décennies, s'expliquant notamment par l'urbanisation, mais aussi par l'enrichissement et les développements technologiques.

L'environnement bâti se compose de divers types d'infrastructures et édifices parmi lesquels on peut citer les routes (185 000 km et près de 12 000 ponts et tunnels), les chemins de fer, les ports et les aéroports, les infrastructures reliées aux ressources hydriques, comme les barrages (5 144 au Québec incluant 333 grands barrages (Environnement Canada, 2004), et les centrales de production (60) ainsi que les réseaux énergétiques, tels que le réseau de transport et de distribution d'électricité d'Hydro-Québec (transport 33 058 km et distribution 114 650 km) et les gazoducs. Il comprend aussi les infrastructures municipales qui assurent, par exemple, la distribution de l'eau et son traitement, la gestion de l'eau de surface ou encore l'élimination des déchets. À ces infrastructures, il faut ajouter les édifices publics et privés qui représentent un grand nombre de bâtiments (maisons, bureaux, écoles, hôpitaux, entrepôts) et assurent différents services à la population, ainsi que les usines manufacturières.

Plusieurs de ces infrastructures vieillissantes, ayant déjà dépassé leur durée de vie utile, devront être réhabilitées ou remplacées au cours des prochaines décennies, alors que s'ajoutent les besoins en nouvelles infrastructures. Les changements climatiques attendus 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. Des investissements massifs attendus et prévus au cours des prochaines décennies sont déjà amorcés (Larrivée *et al.*, 2015) et l'intégration de nouvelles données climatiques, ou de nouvelles approches lors de la conception et de la réhabilitation à venir, seront déterminantes quant à la vulnérabilité future de l'environnement bâti du Québec.

L'évolution sociale

Au-delà des impacts physiques et économiques plus aisément mesurables, l'importance des divers impacts des changements climatiques sera aussi 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, de meilleures communications et une prise de conscience de la complexité des enjeux affecteront les valeurs accordées aux différents impacts, et influenceront la prise de décisions permettant de composer avec ces derniers. À cet égard, des efforts de plus en plus marqués sont consacrés à l'évaluation monétaire des biens et services écosystémiques (Dupras *et al.*, 2013b).

Il est clair en effet que la société québécoise est maintenant beaucoup plus préoccupée par la qualité de l'environnement et qu'elle accordera dans l'avenir une valeur accrue aux biens et services écosystémiques.

Les Inuits du Nunavik et les Premières nations d'autres régions entretiennent avec leur environnement naturel une relation qui touche de près à l'identité même de leur communauté et à leur culture. En particulier, la pêche et la chasse jouent, dans ces communautés, un rôle majeur tant sur le plan économique que culturel. Ces communautés qui, dans plusieurs cas, connaissent un fort développement démographique, sont aux prises avec des changements majeurs 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 devront composer.

Sur un autre plan, une proportion non négligeable de la population vit dans des conditions de précarité socioéconomique (INSPQ, 2006). Cette population, concentrée dans les grandes villes, pose des défis particuliers en matière de vulnérabilité aux changements climatiques, notamment face aux vagues de chaleur en raison de la qualité de la nature de l'environnement urbain dans les quartiers défavorisés et d'un moindre accès à la climatisation pour les plus démunis. Les progrès qui seront accomplis pour réduire les taux de faible revenu au cours des prochaines décennies, par les différentes mesures d'aide et de soutien au revenu, auront un effet direct sur ce type de vulnérabilité.

Les secteurs qui subiront les impacts les plus directs et sur lesquels les efforts de recherche en vulnérabilité, impacts et adaptation ont porté dans les dernières années sont abordés plus en détail dans les sections suivantes.



2.1.1 Foresterie

Auteur principal : Daniel Houle (MFFP - Ouranos)

Collaborateur : Mathieu Bélanger-Morin (Ouranos)

Faits saillants

- ▶ L'augmentation importante des températures, et incidemment des degrés-jours, pourrait agir directement sur la physiologie et le métabolisme des arbres et par le fait même augmenter la productivité primaire des forêts, et plusieurs évidences ont montré que l'allongement de la saison de croissance avait déjà des impacts observables à plusieurs endroits sur la planète.
- ▶ La hausse de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère pourrait avoir un effet fertilisant sur les forêts. Toutefois, à long terme, ces gains pourraient être annulés par l'acclimatation des arbres aux nouvelles concentrations de CO₂, ou encore limités par le manque d'éléments nutritifs dans le sol, dont principalement l'azote.
- ▶ Des précipitations à peu près identiques en été, conjuguées à des températures plus élevées, pourraient augmenter l'évapotranspiration et causer un assèchement des sols. Le contenu en eau des sols de trois écosystèmes forestiers (érablière, sapinière, pessière) pourrait diminuer de 20 à 40 % pendant l'été entre 2041 et 2070 alors que la température des sols augmentera de 3 à 4 °C.
- ▶ Les changements climatiques ont le potentiel d'influencer la gravité, la fréquence et l'étendue des perturbations, notamment les proliférations d'insectes, dont la tordeuse des bourgeons de l'épinette, et les feux de forêt.
- ▶ La migration des écosystèmes, qui prendra plusieurs siècles à s'effectuer, sera donc nettement inférieure au rythme de modification des habitats thermiques induit par les changements climatiques.
- ▶ L'incertitude qui existe quant aux impacts des changements climatiques représente un énorme défi, mais l'aménagement forestier s'inscrit dans un contexte de planification à long terme et les décisions prises aujourd'hui auront des effets sur la forêt de demain. Mieux comprendre les mécanismes de décision et la souplesse du régime de gouvernance actuel devient crucial dans ce contexte.

Le rôle prépondérant de la forêt pour le Québec est bien reconnu, et ce, à plusieurs niveaux au sein de la société. En effet, les écosystèmes forestiers couvrent une grande superficie du territoire québécois et représentent une ressource cruciale du point de vue économique à l'échelle de la province avec une contribution d'environ 3 % au PIB du Québec. L'exploitation forestière, la fabrication des produits du bois, ainsi que la fabrication du papier, constituent trois axes majeurs dans ce secteur. Implantées un peu partout en région, plus de 400 usines de première transformation génèrent autour de 80 000 emplois directs en foresterie et en transformation du bois. La structure socio-économique de plusieurs communautés situées en régions est manifestement dépendante de l'exploitation de la forêt. De plus, les forêts représentent des habitats vastes et diversifiés qui abritent une multitude d'espèces végétales et animales, contribuant ainsi à plusieurs aspects de la biodiversité québécoise. Les forêts contribuent aussi à des cycles écologiques essentiels à l'échelle de la planète, tels que le cycle de l'eau et le cycle du carbone. Finalement, la forêt québécoise supporte aussi une foule de services écologiques/économiques, tels que le tourisme, la chasse et la pêche, le trappage et l'acériculture pour ne nommer que ceux-ci.

La question des changements climatiques se pose de façon particulièrement aiguë dans le cas des écosystèmes forestiers, la croissance des végétaux étant largement influencée par le climat. Pour bien comprendre le contexte général, il est important de mentionner que la forêt québécoise est le fruit d'une longue évolution. Depuis la dernière glaciation, soit il y a environ 10 000 ans, la forêt du Québec a surtout évolué sous l'influence du climat et de la dynamique des 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 végétation (figure 2-2) de trois grandes écozones forestières du sud au nord : l'érablière, la sapinière et la pessière ayant chacune leurs caractéristiques propres. Dans le dernier siècle, le climat s'est réchauffé de façon importante. Ce changement est d'autant plus important si l'on considère que le petit âge glaciaire a été particulièrement intense au Québec et a refroidi considérablement le climat du 18^e au 20^e siècle (Gennaretti *et al.*, 2014; Houle *et al.*, 2007). À ces impacts très récents, il faut ajouter ceux des activités humaines, au moyen de la récolte et de l'aménagement forestier, qui ont aussi sensiblement modifié le visage de la forêt autant au Québec (Duchesne et Ouimet, 2008) que pour l'ensemble de la forêt du nord-est de l'Amérique du Nord.

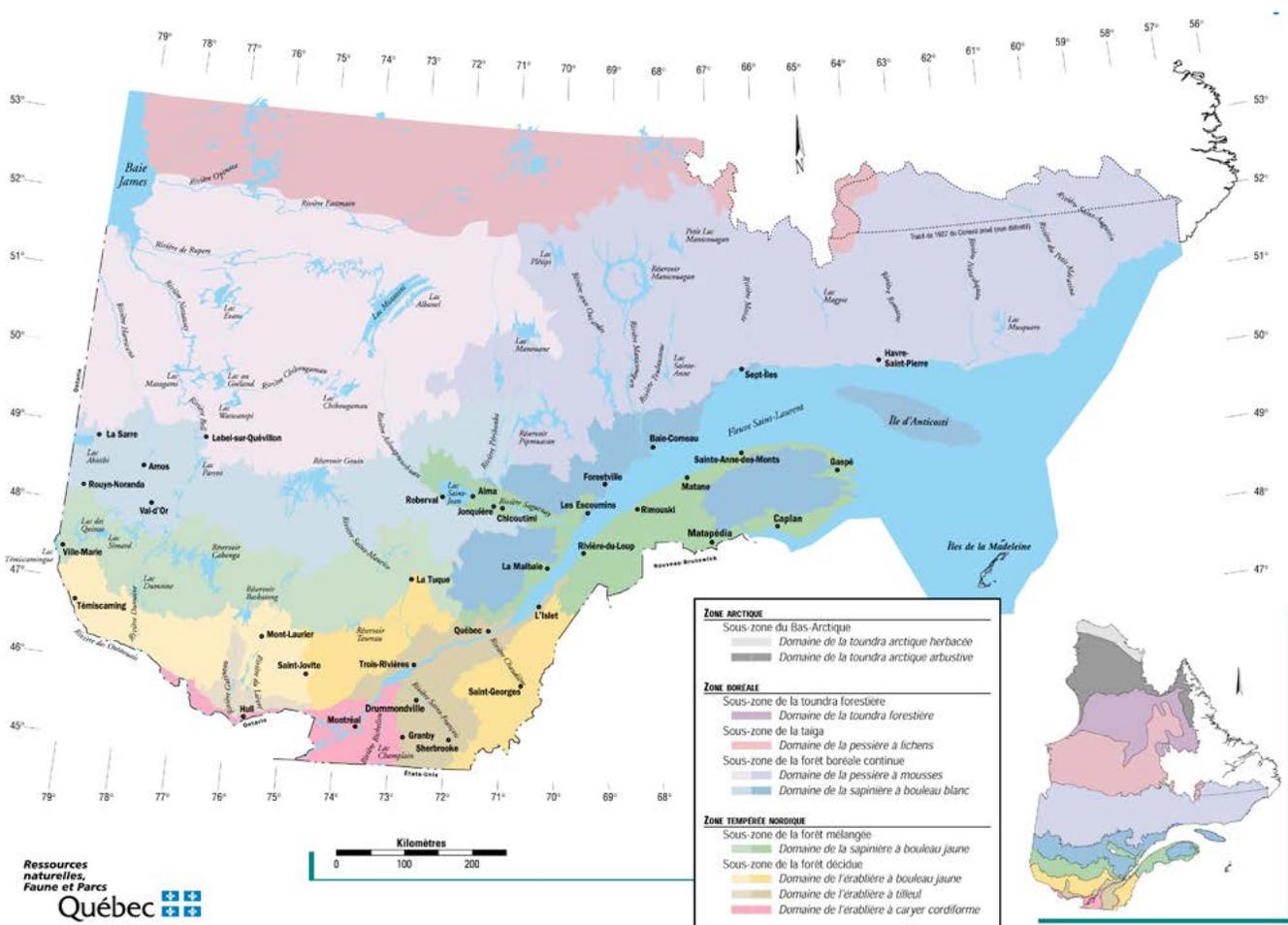


Figure 2-2. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec

Source : MFFP (2003)

De toute évidence, le réchauffement climatique appréhendé dans les 100 prochaines années sera beaucoup plus rapide que celui observé au cours du siècle dernier, et entraînera certainement des modifications dans la composition et la productivité des peuplements forestiers. Les impacts des changements climatiques s'exerceront en premier lieu par l'influence de la température et des précipitations sur le métabolisme et les aires de distribution des espèces. Mais ils seront aussi indirects, en modifiant la dynamique des perturbations naturelles (feux et insectes). Finalement, la fréquence des événements météorologiques extrêmes (sécheresses, verglas, tempêtes) sera également appelée 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.

2.1.1.1 Impacts biophysiques

Croissance et productivité

Les augmentations de température et des concentrations atmosphériques de CO₂ ainsi que les changements dans le régime des précipitations influenceront la croissance et la productivité des écosystèmes forestiers. La figure 2-3 montre les écarts en degrés-jours (cumul annuel des degrés-jours au-dessus de 5 °C), de la période 2041-2070 par rapport à la période de référence 1971-2000, tels que simulés par le modèle régional canadien du climat (MRCC). La quantité de degrés-jours est un indice de la somme d'énergie disponible pour la croissance des végétaux. Sur le territoire de la forêt québécoise, la prédiction médiane montre une augmentation d'environ 300 à 400 degrés-jours, avec des augmentations plus élevées au sud du territoire. Ainsi, on remarque qu'au sud de la forêt dans le domaine de l'érablière, les augmentations projetées 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. Globalement, les augmentations de degrés-jours prévues sont quantitativement très élevées, étant de l'ordre de 35 % à 45 %.

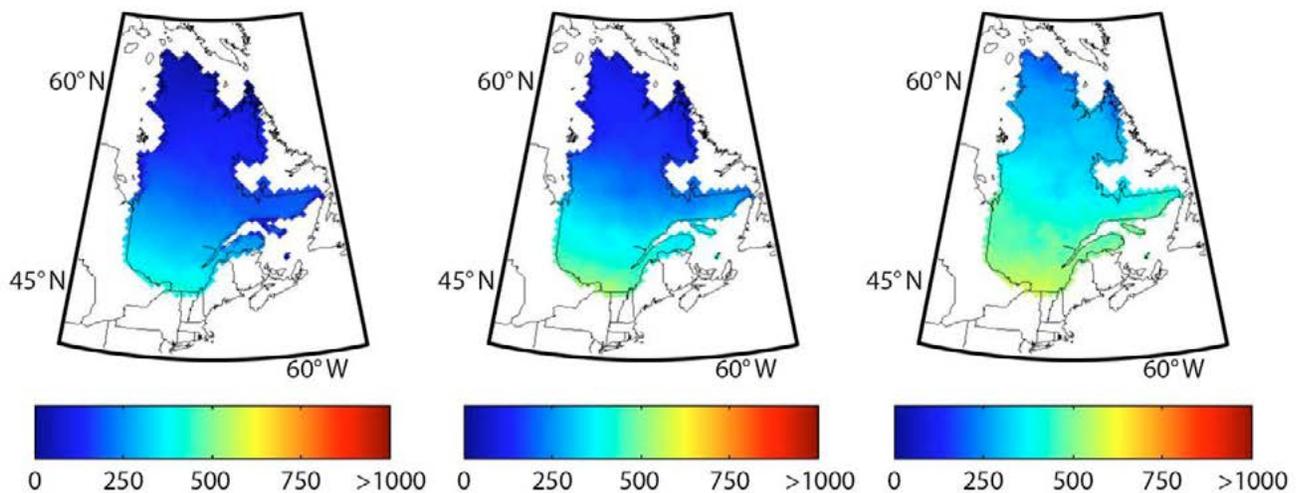


Figure 2-3. *Changement du nombre de degrés-jours de croissance entre la période de référence (1971-2000) et l'horizon 2050, calculé à partir de l'ensemble des simulations MRC. La figure du centre représente la médiane du changement, tandis que les figures à droite et à gauche de la médiane représentent les 10^e et 90^e percentiles, respectivement.*

Source : Logan et al. (2011)

L'augmentation importante des températures, et incidemment des degrés-jours, pourrait agir directement sur la physiologie et le métabolisme des arbres et par le fait même augmenter la productivité primaire des forêts (Kirschbaum, 2000; Price et Scott, 2006). L'augmentation des températures augmentera aussi la température des sols (Houle *et al.*, 2012), ce qui pourrait induire une accélération de la décomposition de la matière organique, augmentant la disponibilité de l'azote pour le système racinaire des arbres (Rustad *et al.*, 2001; Verburg, 2005).

L'augmentation des températures implique aussi une conséquence importante: l'allongement considérable de la saison de croissance, cette dernière étant définie comme le nombre maximal de jours consécutifs sans gel. La figure 2-4 montre les changements projetés de la durée de la saison de croissance. Cette dernière s'allongera de 25 à 30 jours pour la période 2041-2070, par rapport à la période 1971-2000. En proportion, l'allongement de la saison de croissance sera particulièrement marqué en forêt boréale, là où la saison est considérablement plus courte qu'au sud.

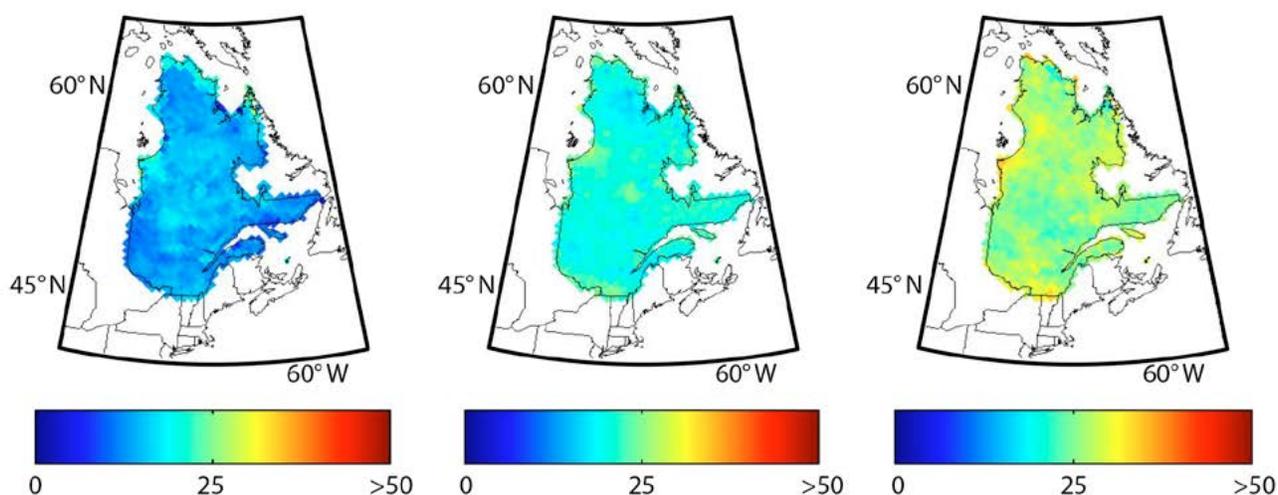


Figure 2-4. Changement de la longueur de la saison de croissance (en jours) entre la période de référence (1971-2000) et l'horizon 2050, calculé à partir de l'ensemble des simulations MRC. La figure du centre représente la médiane du changement, tandis que les figures à droite et à gauche de la médiane représentent les 10^e et 90^e percentiles, respectivement.

Source : Logan *et al.* (2011)

Il faut mentionner que la saison de croissance telle que formulée est un indice météorologique qui définit une saison de croissance potentielle et que son allongement ne signifie pas nécessairement que les plantes pousseront de façon proportionnelle à l'allongement de l'indice. Plusieurs études ont cependant montré que l'allongement de la saison de croissance avait déjà des impacts observables à plusieurs endroits sur la planète. Ainsi, Julien et Sobrino (2009) ont estimé qu'entre les années 1981 et 2004, la longueur de la saison de croissance effective a augmenté en moyenne, de 0,8 jour par année. Des signes d'un allongement de la saison de croissance sont déjà perceptibles au Québec; par exemple, Raulier et Bernier (2000) ont montré que l'ouverture des bourgeons de l'érable à sucre a été devancée de quelques jours ces dernières décennies. Au cours du XXI^e siècle, on estime que le réchauffement du climat pourrait devancer de 9,2 jours en moyenne (Morin *et al.*, 2009) la date d'apparition des feuilles de nombreuses espèces présentes en Amérique du Nord.

Selon la plupart des études, si des gains de productivité sont possibles avec l'allongement de la saison de croissance, ceux-ci se produiront surtout au début de la saison, alors que les arbres pourront commencer la division cellulaire du cambium plus tôt et espérer former plus de cellules dans leur cerne annuel de croissance, et ultimement une plus grande quantité de bois. Récemment, des études de la variabilité interannuelle du début de la saison de croissance, ainsi que des expériences de devancement de la fonte des neiges réalisées in situ, ont apporté de nouveaux enseignements quant au début de la division cellulaire et/ou de la croissance de la tige pour le sapin baumier et l'épinette noire (D'Orangeville *et al.*, 2013a; Duchesne et Houle, 2011; Lupi *et al.*, 2012; Rossi *et al.*, 2011). En général, ces études montrent que la croissance de la tige pourra effectivement commencer plus tôt à la suite de la disparition plus hâtive de la neige, mais que, à la fin de la saison, la croissance ne sera pas nécessairement plus élevée. Dans certains cas, une diminution de la disponibilité en eau plus tard pendant la saison peut venir annuler les gains dus à un début de croissance plus hâtif, comme ce fut le cas dans la sapinière de la forêt Montmorency en 2010 (Duchesne et Houle, 2011). Une étude parue plus récemment suggère toutefois une croissance plus forte et même disproportionnée, par rapport à l'allongement de la saison de croissance pour l'épinette noire (Rossi *et al.*, 2014). Il est clair que peu importe le moment du début de la croissance, les événements se produisant plus tard en saison ont une influence certaine sur la croissance finale. Les résultats obtenus peuvent dépendre des espèces considérées ainsi que des périodes de temps étudiées, périodes pendant lesquelles les événements climatiques après le début de la saison de croissance ont pu être très variables.

La hausse de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère pourrait avoir 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 (Ainsworth et Long, 2005; Drake *et al.*, 1997; Norby *et al.*, 2005). Des expériences d'ajouts expérimentaux de CO₂ réalisées in situ (projet « FACE » pour « Free-Air CO₂ Enrichment ») ont montré des gains de croissance à court terme pour différentes espèces à divers endroits sur la planète. 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 dans le sol, dont principalement l'azote (Luo *et al.*, 2004). Au Québec, l'impact du CO₂ est peu documenté, si ce n'est une étude qui conclut à l'absence d'effet sur le pin gris (Girardin *et al.*, 2011).

En se basant sur l'évolution probable des variables discutées ci-haut, le contexte climatique de 2050 pourrait être plus favorable à la croissance de la forêt. Plusieurs études dénotent déjà une productivité accrue au cours des dernières décennies (Gielen et Ceulemans, 2001; Nemani *et al.*, 2003; Boisvenue et Running, 2006) qui est potentiellement attribuable à l'augmentation des températures quoique l'effet du CO₂ et de la hausse des dépositions atmosphériques d'azote ait pu jouer un rôle qu'il est difficile de départager. Une étude encore plus récente (Pretzsch *et al.*, 2014) montre que la croissance des forêts de l'Europe centrale s'est considérablement accélérée depuis 1870, une conséquence probable de l'effet du CO₂, du climat et de l'augmentation des dépositions atmosphériques d'azote.

Cependant, la vue d'ensemble paraît moins positive quand on décortique les changements projetés au niveau des précipitations. En effet, bien que les modèles climatiques projettent des hausses marquées des précipitations annuelles, celles-ci se produiront surtout pendant l'hiver et seront principalement marquées dans le nord du Québec. Pendant la saison estivale (juin, juillet et août) qui correspond assez bien à la saison de croissance, les changements de précipitations seront minimes pour la majeure partie du Québec forestier. Ceci soulève des interrogations puisque des précipitations à peu près identiques en été conjuguées à des températures plus élevées pourraient augmenter l'évapotranspiration et causer une diminution du contenu en eau des sols. Récemment, Houle *et al.*, (2012) ont montré que le contenu en eau des sols de trois écosystèmes forestiers (érablière, sapinière, pessière) diminuera de 20 à 40 % pendant l'été entre 2041 et 2070 alors que la température

des sols augmentera de 3 à 4° C. Des efforts de modélisation faits en mode couplé à l'intérieur du MRCC suggèrent des changements généralement similaires et observables à grande échelle pour l'ensemble du Québec forestier (Houle *et al.*, 2014). Non seulement les sols seront en moyenne plus secs et plus chauds pendant la saison de croissance, mais les épisodes de sécheresses seront aussi plus fréquents (voir la partie 1 pour obtenir plus de renseignements à ce sujet). Plusieurs articles publiés récemment font déjà état des impacts de sécheresses sur divers types de forêts situées à plusieurs endroits sur la planète (voir Allen *et al.*, 2010). Peng *et al.* (2011) ont suggéré que le stress hydrique créé par des sécheresses régionales était peut-être le principal facteur ayant contribué à des taux de mortalité plus élevés à travers la forêt boréale du Canada. L'ouest du Canada semble cependant avoir été plus touché que l'est du Canada et peu d'observations étaient disponibles pour le Québec. Au Québec, quelques études réalisées dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc ont montré que le sapin baumier était sensible à des épisodes de sécheresse (Duchesne et Houle, 2011) ainsi qu'à une exclusion expérimentale des précipitations (D'Orangeville *et al.*, 2013b), avec des pertes de croissance de l'ordre de 20 %. L'épinette noire, lorsque soumise à un traitement similaire d'exclusion des précipitations, a montré une plus grande résistance que le sapin (Belien *et al.*, 2012). Une étude récente basée sur de nombreuses observations de croissance de l'épinette noire et sur des exercices de simulations suggère que le réchauffement estival a été la cause principale d'une diminution de la productivité de la forêt boréale nord-américaine ces dernières décennies (Girardin *et al.*, 2014). La diminution de croissance était synchronisée avec le retrait des glaces dans l'arctique. En concordance avec les études citées ci-haut, les gains de croissance potentiels dus à l'allongement de la saison de croissance semblent avoir été complètement annulés par un stress hydrique induit par les températures trop élevées et par les pertes de carbone via une stimulation de la respiration autotrophe.

Les conditions de sites peuvent aussi influencer la réponse des espèces aux épisodes de sécheresses. Des études réalisées en Abitibi ont montré que l'épinette noire et le peuplier faux-tremble avaient des réponses opposées, sur le plan de la croissance radiale, lors d'événements de sécheresse, et que l'amplitude de la différence entre les deux espèces était d'autant plus forte que l'épaisseur de la couche organique du sol était importante (Drobyshv *et al.*, 2013; Gewehr *et al.*, 2014).

Finalement, selon les modèles climatiques, il faudra aussi composer avec une augmentation probable des événements extrêmes (précipitations intenses, vents violents, ouragans, tempêtes de verglas), 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).

Perturbations naturelles

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 et les feux.

Étant des organismes poïkilothermes¹, les insectes sont très sensibles aux variations de température, celles-ci ayant une grande influence sur leur métabolisme et leur niveau d'activité (déplacement, alimentation, reproduction, temps de développement) (Bale *et al.*, 2002; Raffa *et al.*, 2008). De plus, les changements

¹ Organismes dont la température corporelle varie en fonction du milieu extérieur.

climatiques auront vraisemblablement des conséquences sur la distribution de plusieurs espèces végétales (McKenney *et al.*, 2007), influençant par la même occasion la distribution d'insectes se développant sur ces mêmes espèces végétales (Bale *et al.*, 2002). Plusieurs des études ont déjà pu observer des effets des changements climatiques sur la distribution de certains insectes (Bentz *et al.*, 2010; Régnière *et al.*, 2012) et sur de récentes épidémies, par exemple celles du Dendroctone du pin ponderosa (Raffa *et al.*, 2008). D'autres effets découlant des changements climatiques, comme une augmentation de la longévité ou une prolongation de la saison de vol, pourraient aussi être observés, augmentant ainsi le succès de certaines espèces d'insectes (Bentz *et al.*, 2010).

Les conséquences des changements climatiques sur les insectes ne seront pas que bénéfiques. Plusieurs éléments devraient aussi avoir des effets néfastes, limitant leur distribution ou leur pestilence. Par exemple, plusieurs espèces d'insectes doivent compter sur un étroit synchronisme avec la phénologie de leur plante hôte afin d'accomplir leur cycle de vie. Ce synchronisme peut cependant se fragiliser avec les effets des changements climatiques sur certaines plantes hôtes (Bale *et al.*, 2002). De plus, le développement peut être affecté par une hausse des températures minimales hivernales qui pourrait interrompre la diapause obligatoire de certaines espèces (Bentz *et al.*, 2010), et déplacer l'aire de distribution vers le nord (Bale *et al.*, 2002).

Au Québec, la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* [Clem.]) pourrait provoquer davantage de dommages dus à des infestations plus longues et à une augmentation du pourcentage de défoliation. Des études récentes (Régnière *et al.*, 2012) ont révélé que la tordeuse verrait son aire de répartition se déplacer vers le nord de façon importante, c'est-à-dire qu'elle perdrait au sud ce qu'elle gagne au nord. Cependant, cette aire de distribution se déplaçant vers le nord beaucoup plus rapidement que son essence hôte de prédilection (le sapin baumier), la sapinière pourrait éventuellement être à l'abri d'épidémies importantes sur la majeure partie de sa distribution. En revanche, la zone de la pessière noire serait davantage affectée bien que certaines interrogations subsistent quant au synchronisme au printemps, de l'éclosion de la larve avec l'apparition des bourgeons de l'épinette. Dernièrement, une épidémie récente d'arpenteuse de la pruche dans le parc des Laurentides au nord de Québec (2011-2013) a surpris les chercheurs. Cet insecte, qu'on retrouve surtout dans des forêts situées à proximité du golfe Saint-Laurent, n'avait jamais été observé en si grande abondance dans une forêt à l'intérieur du continent. La population aurait profité d'une succession d'hivers avec des températures minimales moins froides, pour atteindre une grande abondance et affecter gravement des peuplements entiers de sapin baumier. Bien que les superficies affectées aient été relativement faibles à l'échelle de la province, les impacts locaux ont été importants et cette épidémie a aussi montré que certains insectes indigènes peuvent devenir une menace là où ne les attend pas.

L'installation ainsi que l'invasion de plusieurs espèces exotiques d'insectes, favorisée par les changements climatiques, pourraient toucher grandement les forêts du Québec. En effet, une autre problématique qui émerge avec la multiplication ainsi que le raccourcissement des transits de marchandise à l'échelle mondiale et l'existence d'un climat moins hostile pour les insectes est la possibilité que des insectes exotiques venus de pays étrangers soient transportés au Québec et réussissent à s'y installer. Un exemple récent est l'agrile du frêne, insecte originaire de l'Asie, qui a été détecté pour la première fois au Canada en 2002 en Ontario. Depuis il s'est propagé vers l'est et est maintenant présent dans le sud du Québec. Il cause une mortalité sévère chez le frêne ayant tué des millions d'arbres. Son impact économique et écologique est considérable, notamment en milieu urbain comme Montréal où on compte plus de 200 000 frênes. Les insectes introduits de telle façon dans de nouveaux écosystèmes ont peu ou pas de prédateurs naturels, ce qui leur permet de proliférer très rapidement. D'autres insectes comme la spongieuse (*Lymantria dispar* [L.]) qui s'attaque à plusieurs espèces d'arbres, a été introduite de façon accidentelle au Massachusetts en 1869 par un naturaliste français qui essayait de faire des croisements entre la spongieuse européenne et des vers à soie nord-américains. Elle est maintenant

présente en Ontario, dans les maritimes et dans le sud du Québec. Le dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae* [Hopk.]), responsable de dommages massifs en Colombie-Britannique, pourrait s'étendre sur toute la forêt boréale de l'Ouest canadien jusqu'au Québec et aux Maritimes en s'attaquant au pin gris.

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 (Gillett *et al.*, 2004; Podur *et al.*, 2002). 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. Alors que les études réalisées il y a une dizaine d'années projetaient relativement peu de changements dans le futur quant à la fréquence et à l'étendue des feux (Bergeron *et al.*, 2004), des études plus récentes sont moins optimistes, projetant une augmentation de la fréquence des feux de 50 à 100 % pour le Québec (Girardin *et al.*, 2013; Boulanger *et al.*, 2014). Une étude d'Ali *et al.* (2012) indique que la température printanière est un facteur important qui a influencé la taille des feux lors des derniers millénaires et avance que les changements climatiques pourraient mener à des changements dans le régime de feux de la forêt boréale du nord-est de l'Amérique du Nord, en favorisant des feux printaniers de plus grande taille.

Changement de composition des forêts

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. Pour illustrer l'ampleur des changements potentiels, la hausse de température annuelle moyenne appréhendée de 3,2 °C d'ici 2050 au centre du Québec correspond à un déplacement des isothermes de 515 km vers le nord. Une forêt en équilibre avec un tel climat serait très différente de celle d'aujourd'hui. Une étude réalisée récemment (Périé *et al.*, 2014) projette les déplacements potentiels de plusieurs dizaines de plantes pour la période 2071- 2100. Les changements projetés sont importants comme l'illustre bien l'aire de distribution de l'érable à sucre qui pourrait s'étendre jusqu'à Baie-Comeau. Il est important de préciser que ces projections montrent une situation potentielle. Pour que les communautés forestières soient capables de suivre la vitesse des changements climatiques, cela impliquerait une vitesse de migration de l'ordre de 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, 1993). À cet égard, des stratégies permettant de renforcer la connectivité des écosystèmes forestiers pour contrer les effets de la fragmentation des forêts sur la biodiversité sont à l'étude (voir les chapitres 2.4 et 2.5). Par ailleurs, en raison des différences de vitesse de migration d'une espèce à l'autre, il n'est pas garanti que la structure et la composition actuelles des forêts seraient maintenues (Hansen *et al.*, 2001; Kirschbaum, 2000). 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. La migration des écosystèmes, qui prendra plusieurs siècles à s'effectuer, sera donc nettement inférieure au rythme de modification des habitats thermiques induit par les changements climatiques (Aitken *et al.*, 2008; Malcolm *et al.*, 2002; Neilson *et al.*, 2005). L'étude de Périé *et al.* (2014), citée plus haut, indique aussi que certaines espèces verront leur aire de distribution actuelle diminuer. C'est le cas notamment du bouleau jaune qui ne sera plus adapté pour croître dans une bonne partie du sud du Québec dont particulièrement la région de l'Outaouais.

La production de sirop d'érable dans un contexte de changements climatiques

La production de sirop à partir de la sève d'érable est une activité sociale et économique dont les origines remontent aux peuples amérindiens qui occupaient le territoire du Québec avant l'arrivée des Européens. La production de sirop d'érable est aujourd'hui une activité économique importante au Québec. Elle est pratiquée par environ 13 500 producteurs acéricoles qui produisent 71 % de la production mondiale et génère des revenus annuels de 283 millions de dollars.

Récemment, des chercheurs ont construit des modèles prédictifs de la production de sirop pour les régions productives du Québec (Houle, en élaboration) ainsi que pour le Québec et les États du nord-est des États-Unis (Duchesne et Houle, 2014). Ces études montrent que plusieurs variables influencent favorablement la production totale annuelle de sirop dont certaines précèdent le début de la coulée printanière (été précédent chaud, mois de janvier froid). Les autres variables importantes étaient reliées à certaines caractéristiques des cycles de gel-dégel pendant la période de coulée dont notamment leur fréquence et leur intensité. Ces modèles ont ensuite été utilisés en combinaison avec des scénarios climatiques pour projeter la production future (Houle, en élaboration). Les résultats suggèrent une production future peu affectée, mais un déplacement de l'ordre de 2 à 3 semaines dans le début et la fin de la saison de coulée. 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 face à la grande variabilité climatique des conditions printanières. Il en découle cependant que les producteurs devront être prêts à entailler de plus en plus tôt. Il semble que la variabilité interannuelle dans le début et la fin de la saison ainsi que la variabilité de la production totale annuelle, ne sera pas plus importante dans le futur. C'est donc dire que la saison va se déplacer significativement dans le temps, mais sans une augmentation de la variabilité. Par contre, les régions plus au sud du Québec pourraient connaître une plus grande proportion d'années de faible production, principalement en raison des saisons écourtées. Le printemps très hâtif de 2012 a d'ailleurs mené à une mauvaise année, notamment dans le sud-ouest du Québec, ce qui est un avant-goût de ce qui pourrait se produire plus fréquemment dans le futur. Il est intéressant de noter que la grande surface de production est un avantage pour atténuer les impacts d'une mauvaise année. En 2012 par exemple, le bas Saint-Laurent et la Beauce ont eu des bonnes productions ce qui a compensé le moins bon rendement du Sud-Ouest de la province. En revanche, aux États-Unis, la récolte a été très moyenne. Il semble d'ailleurs que la production des États-Unis pourrait diminuer particulièrement pour les États les plus au sud et que la position concurrentielle du Québec ne serait pas menacée dans le futur.

2.1.1.2 Impacts sur la ressource et les opérations forestières

Le secteur forestier est évidemment préoccupé par une multitude d'impacts potentiels des changements climatiques sur les forêts et sur les opérations forestières. Parmi les préoccupations émises, beaucoup concernent la ressource. Ainsi, la quantité de bois qui sera disponible ainsi qu'une éventuelle baisse de la qualité mécanique du bois viennent au premier rang (Bélanger-Morin *et al.*, 2014). La composition de la forêt et donc des essences disponibles pour les usines est aussi un sujet de préoccupations.

Au-delà des impacts directs des changements climatiques sur la forêt elle-même, il est important de considérer l'impact des changements climatiques sur le secteur forestier dans son ensemble, dont celui sur les opérations forestières. En premier lieu, le secteur craint une augmentation de la complexité des opérations en raison des changements de composition. La longueur des hivers est un élément qui préoccupe le secteur forestier, la proportion de la récolte de bois annuelle réalisée pendant l'hiver (ainsi que le transport du bois sur des routes d'hiver) étant importante. La difficulté d'accès au territoire à la suite des précipitations extrêmes qui mènent à

la destruction ou la dégradation de routes forestières représente aussi un enjeu. Il en va de même de l'interaction des travaux en forêts quand le danger d'incendie de forêt est élevé. Dans un contexte où les hivers vont raccourcir et que la fréquence des événements extrêmes de précipitation et des sécheresses est appelée à augmenter, il est probable que les impacts des changements climatiques risquent de complexifier les opérations avec les conséquences qui en découlent sur le coût des opérations.

2.1.1.3 Pistes d'adaptation

Comme les écosystèmes forestiers seront vraisemblablement très affectés par les changements climatiques, il est nécessaire d'adapter la gestion forestière pour réduire la vulnérabilité de la forêt et du secteur forestier, afin de maintenir la viabilité des activités forestières. Les stratégies d'adaptation devront comprendre des efforts de sensibilisation, de surveillance et d'aménagement de la forêt. Cependant, la grande étendue et la grande complexité des écosystèmes forestiers, ainsi que l'incertitude qui existe quant aux impacts spécifiques des changements climatiques, représentent un énorme défi. Les adaptations possibles incluent de rendre la forêt plus résistante au climat futur en adaptant tout de suite des stratégies d'aménagement appropriées. Des travaux récents montrent que les forêts diversifiées sont généralement plus résistantes aux stress climatiques, ce qui laisse également entrevoir des pistes d'aménagement pour maintenir une diversité de structure et d'essences quand la situation est favorable. Par exemple, des travaux menés en Europe ont montré que l'épinette de Norvège avait un meilleur taux de survie en peuplement mixte qu'en peuplement pur sous un climat plus sec et plus chaud (Neuner *et al.*, 2014). Certaines solutions existent déjà, par exemple, pour améliorer la résistance aux feux de forêt en minimisant leur propagation. On peut à titre d'exemple favoriser un réseau routier perpendiculaire aux vents dominants ou favoriser une plus grande proportion de feuillus (qui sont moins inflammables) dans le paysage (Le Goff *et al.*, 2005). Il est aussi possible de réduire les pertes économiques dues aux feux de forêts (ou aux épidémies d'insectes) en procédant à des coupes de récupération. Une étude récente suggère cependant que la coupe de récupération ne serait pas suffisante pour maintenir la récolte au niveau actuel (Leduc *et al.*, 2015).

La migration assistée, qui consiste à déplacer intentionnellement des espèces afin de faciliter leur progression vers le nord de façon à favoriser leur expansion dans leur aire de distribution potentielle, fait aussi partie des solutions d'adaptation envisageables (voir le tableau 2-6). La migration assistée offre la possibilité de favoriser la présence de provenances (même espèce qu'on déplace à l'intérieur de son aire de répartition) ou carrément de nouvelles espèces qui seront mieux adaptées au climat futur ce qui peut contribuer à assurer un meilleur rendement ainsi que de limiter la fragmentation des habitats (Spittlehouse et Stewart, 2004).

À court terme, l'adaptation devra surtout se faire au sein du secteur forestier. Un exemple concret serait d'adapter les opérations forestières aux conditions changeantes, en modifiant les infrastructures et la machinerie. À ce jour, beaucoup de vulnérabilités du secteur ou encore au niveau des localités qui dépendent de la forêt, restent à déterminer. La sensibilisation du secteur forestier au sens large aux impacts des changements climatiques est un élément essentiel pour motiver l'action. Étant donné la longévité des forêts, il est clair que l'aménagement forestier s'inscrit dans un contexte de planification à long terme et que les décisions prises aujourd'hui auront des effets sur la forêt de demain. Mieux comprendre les mécanismes de décisions et la souplesse du régime de gouvernance actuel devient crucial dans ce contexte.



2.1.2 Agriculture

Auteure principale : Anne Blondlot (Ouranos)

Collaboratrice : Beatriz Osorio (Ouranos)

Réviseurs : Claude Desjarlais (Ouranos), Gilles Bélanger et Gaétan Bourgeois (AAC), Christopher Bryant (Université de Montréal), Gérard Goyette (MAPAQ)

Faits saillants

- ▶ Les changements climatiques seront à l'origine de nouvelles opportunités pour la production agricole au Québec, mais viendront aussi accentuer certains risques sans qu'il soit possible d'affirmer, à ce jour, si le bilan sera globalement positif ou négatif.
- ▶ Des saisons de croissance plus longues et plus chaudes augmenteraient, à moyen terme, le potentiel de rendement de cultures comme le maïs, le soya ou les cultures fourragères pérennes et permettraient l'introduction de nouvelles variétés ou de nouvelles cultures, y compris dans des régions plus nordiques où le climat est pour l'instant limitant (à condition que le type de sol et la topographie le permettent).
- ▶ Le risque d'établissement de nouveaux ennemis des cultures (insectes ravageurs, mauvaises herbes et maladies) serait amplifié, de même que la pression exercée par certains ennemis déjà présents au Québec.
- ▶ L'accentuation attendue de la fréquence et l'intensité de conditions climatiques extrêmes seraient dommageables pour les cultures, les élevages ou encore pour la qualité de l'eau de surface (transfert d'éléments nutritifs et de pesticides).
- ▶ Les productions animales seraient également affectées par le biais des ressources en alimentation (en lien notamment avec l'augmentation du risque de mortalité hivernale des plantes fourragères pérennes) ou encore de la sensibilité des animaux aux vagues de chaleur.
- ▶ Jusqu'ici, le secteur agricole a fait preuve d'un très grand dynamisme pour s'adapter aux aléas climatiques, mais aussi aux évolutions des marchés ou aux changements technologiques. Pour continuer à s'adapter, il pourra s'appuyer sur les mécanismes et outils déjà en place après s'être assuré de leur robustesse.
- ▶ Toutefois, le rythme et l'intensité des changements climatiques attendus représentent des défis importants et il serait également souhaitable d'innover d'une façon proactive en s'inspirant notamment des technologies et des pratiques mises en œuvre dans des régions soumises actuellement aux conditions climatiques appréhendées pour le Québec.
- ▶ L'adaptation aux changements climatiques requiert l'implication de tous les acteurs du secteur (producteurs agricoles, institutions, organismes de recherche ou des intervenants du secteur privé).

L'agriculture joue un rôle de premier plan dans la vitalité économique et sociale du Québec et de ses régions, de même que dans la protection et la mise en valeur du territoire. La production agricole est un des piliers du secteur bioalimentaire, qui englobe aussi les pêcheries et les activités de transformation et de distribution. Ainsi, ce secteur représentait 7 % du produit intérieur brut (PIB) total et 12 % de l'emploi total du Québec en 2012 (MAPAQ, 2013). Les recettes monétaires agricoles représentaient à elles seules 7,6 milliards de dollars en 2012 sur 21,8 milliards de dollars pour l'ensemble du secteur bioalimentaire du Québec (MAPAQ, 2013). Le secteur de la production agricole était composé de 28 700 exploitations en 2012 et de 60 619 emplois (MAPAQ, 2013). Comme dans la plupart des pays industrialisés, la taille des exploitations agricoles augmente alors que leur nombre diminue de façon constante depuis 1940 (Statistique Canada, 2012). Elles se sont aussi spécialisées au fil du temps.

Avec 3,5 millions d'hectares, la superficie utilisée pour la production agricole occupe 2 % de tout le territoire québécois (MAPAQ, 2013). Présente dans l'ensemble du Québec méridional (au sud du 50° de latitude nord), l'activité agricole est prédominante dans la vallée du Saint-Laurent où les conditions climatiques sont propices et les terres fertiles. Les pressions exercées par le développement urbain sont fortes, car on y retrouve aussi la majorité de la population. Trois régions (Montérégie, Chaudière-Appalaches et Centre-du-Québec) génèrent plus de 60 % des recettes agricoles (MAPAQ, 2013). Les productions animales et végétales représentaient respectivement 66 % et 34 % des recettes en 2012 (MAPAQ, 2013). Le secteur des productions animales est constitué d'une grande variété de productions dont les principales sont le lait, le porc, l'aviculture et l'élevage de bovins de boucherie et de veaux (ISQ, 2014a). Environ 1,16 million d'hectares étaient occupés en 2011 par des cultures fourragères pérennes destinées aux élevages (CQPF, 2012). Le secteur des productions végétales regroupe une multitude d'autres productions, notamment le maïs-grain, le soya, les céréales, les légumes, les produits de l'érable, les pommes de terre, les pommes, les petits fruits et l'horticulture ornementale (ISQ, 2014a).

2.1.2.1 Le climat, un élément déterminant pour les activités agricoles

Avec la nature et la qualité des sols, le climat est un élément déterminant des activités agricoles pouvant être exercées dans un lieu donné. Les productions végétales sont particulièrement sensibles au climat, à sa variabilité et aux événements climatiques extrêmes qui influencent directement leur productivité (Almaraz *et al.*, 2008; Romero-Lankao *et al.*, 2014) et leur répartition sur le territoire. Les productions animales sont également affectées par le climat, notamment par le biais des ressources en alimentation, mais aussi par la sensibilité des animaux aux vagues de chaleur. Par conséquent, les changements climatiques auront des impacts sur le secteur agricole québécois.

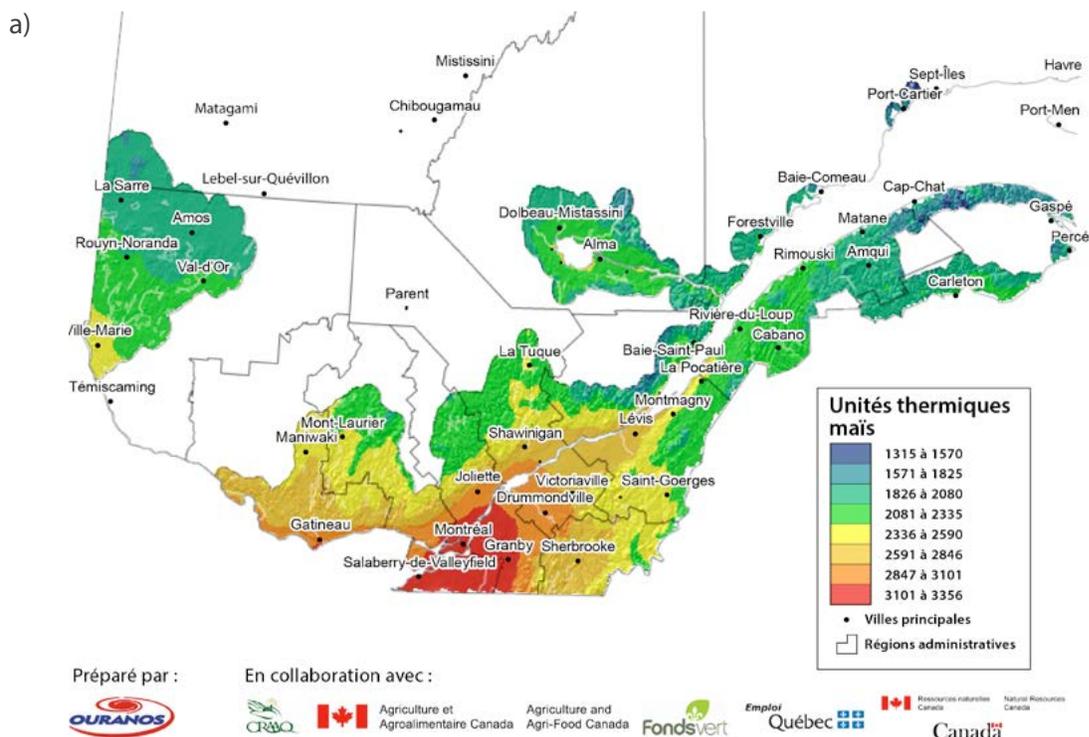
Plusieurs études récentes (Qian *et al.*, 2012, 2010; Yagouti *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2011) ont montré que certains changements significatifs ont déjà été observés au cours des dernières décennies : une saison de croissance plus longue (allongement de l'ordre de 6 à 21 jours entre 1971 et 2000) (Qian *et al.* 2012), des conditions de croissance plus chaudes (gain de l'ordre 100 à plus de 200 degrés-jours de croissance (Qian *et al.*, 2012), un allongement de la saison sans gel et un réchauffement des températures minimales, particulièrement en hiver. Plusieurs de ces résultats peuvent être visualisés sur le site de l'*Atlas Agroclimatique du Québec* (www.agrometeo.org/atlas) qui a été lancé en 2012. En outre, bien qu'il subsiste une variabilité interannuelle importante, le débourrement et la floraison des pommiers sont devancés respectivement d'environ 12 et 9 jours dans le sud de la province au cours des cinquante dernières années (Lamothe *et al.*, 2007).

2.1.2.2 Impacts potentiels des changements climatiques sur l'agriculture

Productions végétales

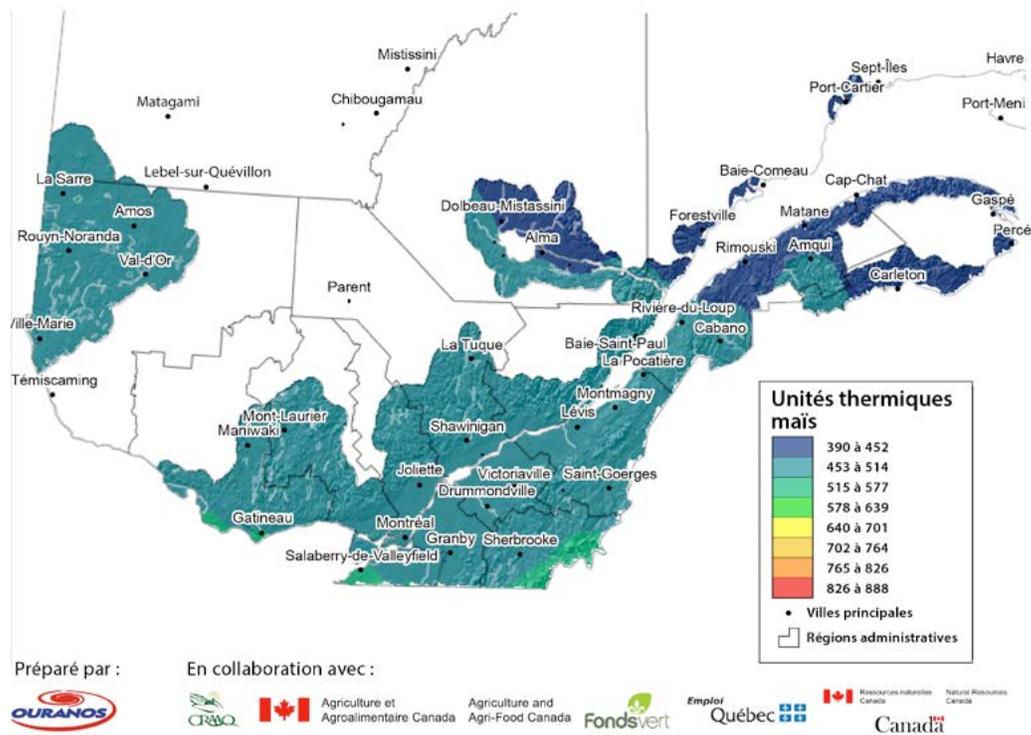
Les températures

Les scénarios de changements climatiques pour le Québec à l'horizon 2050 indiquent que l'allongement de la saison de croissance se poursuivra avec une augmentation de l'accumulation de chaleur, caractérisée par les degrés-jours de croissance ou les unités thermiques maïs² (Atlas agroclimatique du Québec, 2012; Qian *et al.*, 2013) (figure 2-5). Les cultures vont réagir de manière différenciée à ces nouvelles conditions de croissance. Ces dernières seront favorables à l'accroissement des rendements potentiels de cultures dont la croissance et le développement sont actuellement limités par la température, comme le maïs ou le soya (Bootsma *et al.*, 2005a, 2005b). Toutefois, les rendements moyens de ces cultures pourraient plafonner, ou même décliner au-delà de 3 500 unités thermiques maïs (UTM) alors que les risques de stress thermiques et hydriques pourraient augmenter (Bootsma *et al.*, 2004; Gameda *et al.*, 2007). L'extrême sud du Québec pourrait être concerné par cette situation, advenant que les scénarios de réchauffement les plus élevés se réaliseraient puisqu'il y fait déjà plus chaud.



² L'unité thermique maïs (UTM) est un indice thermique calculé chaque jour et accumulé durant la saison de croissance des végétaux. Il est notamment utilisé pour sélectionner des hybrides de maïs adaptés aux régions de production.

b)



c)

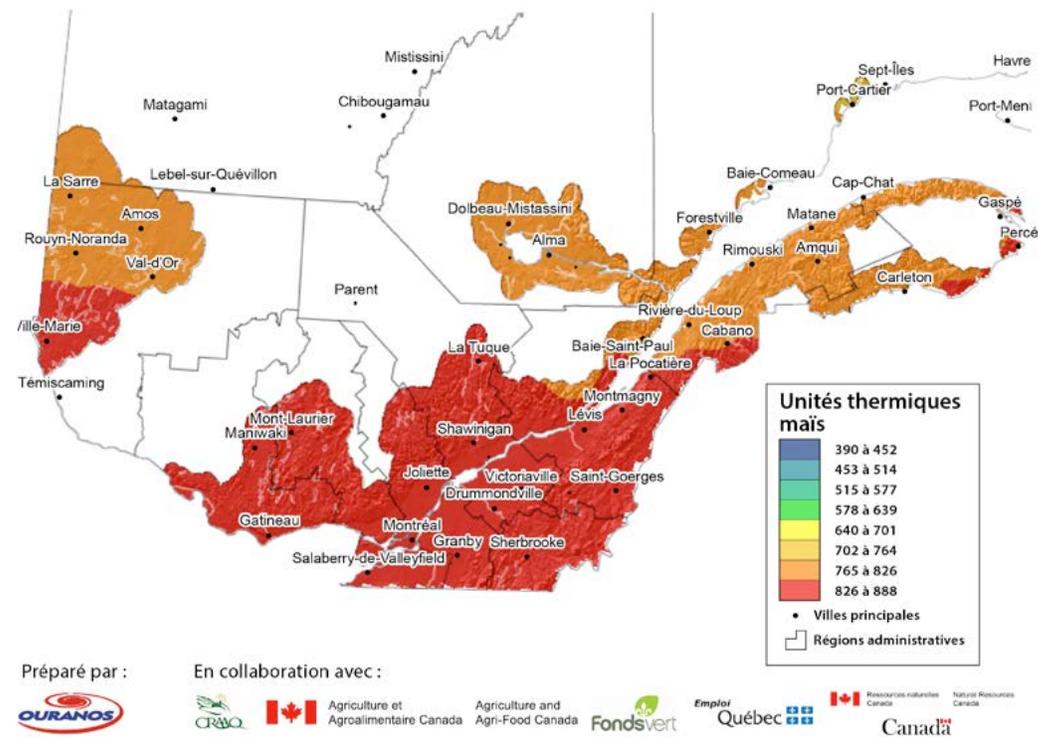


Figure 2-5 Normales 1971-2000 (a) du cumul des unités thermiques maïs (UTM) et scénarios de changement inférieur (b) et supérieur (c) pour l'horizon 2041-2070 vs 1971-2000

Source : Atlas agroclimatique du Québec (2012)

Le rendement annuel des cultures fourragères (par exemple la luzerne ou la fléole des prés, qui sont des cultures fourragères importantes au Québec) sera également amélioré par la possibilité d'ajouter une coupe supplémentaire, mais leur qualité nutritive pourra diminuer (Bertrand *et al.*, 2008; Bootsma *et al.*, 2005a; Jing *et al.*, 2014, 2013). Par contre, les rendements de cultures, telles que l'orge ou le blé, qui sont mieux adaptées aux régions fraîches, ne seront pas favorisés par l'allongement de la saison de croissance et seront même pénalisés par des conditions de croissance plus chaudes (Bootsma *et al.*, 2005a, 2005b; Charbonneau *et al.*, 2013; Qian *et al.*, 2012).

En plus d'une augmentation des températures moyennes, on observera une augmentation significative du nombre de jours où la température sera supérieure à 30 °C en été dans l'ensemble du Québec agricole, mais de façon plus marquée dans le sud de la province (Atlas agroclimatique du Québec, 2012). La sensibilité des cultures aux épisodes de stress thermique dépend de l'espèce, de la variété (Porter *et al.*, 2014) et du stade de développement de la culture. Ainsi, la pollinisation est un des stades les plus sensibles aux températures élevées (Thornton *et al.*, 2014; Walthall *et al.*, 2012).

À condition que les sols et la topographie s'y prêtent, ces nouvelles conditions de croissance permettront l'introduction de nouvelles variétés ou de nouvelles cultures, y compris dans des régions plus nordiques où le climat est pour l'instant limitant (Gameda *et al.*, 2007; Kulshreshtha et Wheaton, 2013). Par exemple, la culture du maïs et du soya pourraient se développer au Saguenay-Lac-Saint-Jean, en Abitibi ou dans le Bas-Saint-Laurent/Gaspésie (Bootsma *et al.*, 2004; Mimee *et al.*, 2014) alors que la zone de production commerciale de pommes pourrait également s'étendre plus au nord (Rochette *et al.*, 2004).

Les modifications des conditions climatiques en dehors de la saison de croissance auront aussi des répercussions importantes, notamment pour les plantes pérennes. Les risques de mortalité hivernale des plantes fourragères pérennes devraient augmenter relativement à différents phénomènes : des températures plus élevées à l'automne et moins favorables à l'endurcissement au froid des plantes, des redoux hivernaux accompagnés d'épisodes de pluie plus fréquents entraînant une perte d'endurcissement et possiblement des dommages au système racinaire et enfin, une diminution de la couverture neigeuse qui protège les plantes lorsqu'elles sont exposées à des températures létales (Bélanger *et al.*, 2002). De plus, l'augmentation de la teneur en CO₂ diminuerait l'acclimatation au froid de la luzerne (Bertrand *et al.*, 2007). Les résultats sont plus contrastés concernant l'évolution possible du risque de dommages hivernaux pour les arbres fruitiers, tels que les pommiers (Lease *et al.*, 2009). Certains éléments, comme l'arrivée plus tardive des premiers gels à l'automne et les froids moins intenses en hiver, auront tendance à faire diminuer le risque alors qu'inversement, l'augmentation de la fréquence des épisodes de dégels hivernaux ou la diminution de l'accumulation de neige au sol pourront le faire augmenter. Le risque de gel printanier des bourgeons floraux ne serait pas modifié dans le Sud du Québec, où se situe actuellement la majorité des vergers à vocation commerciale. La production de sirop d'érable sera aussi affectée par les changements climatiques (voir la section 2.1.1).

Les précipitations

Au Québec, le bilan hydrique est généralement excédentaire sur une base annuelle. Toutefois, la distribution saisonnière des précipitations et des températures fait en sorte que, certaines années, des déficits hydriques surviennent pendant la saison de croissance des cultures (Michaud *et al.*, 2012). La probabilité de stress hydrique pourrait augmenter dans le futur du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration occasionnée par les températures plus élevées alors que les modèles climatiques ne prévoient pas de changement significatif des précipitations durant la période estivale (Houle *et al.*, 2014). À court terme, ce phénomène est jugé moins

problématique au Québec que dans d'autres provinces canadiennes, comme les Prairies ou le sud de l'Ontario. De plus, il pourrait être atténué par une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau par les plantes sous une atmosphère enrichie en CO₂. Les dommages causés par un stress hydrique dépendent également du stade de développement de la culture (Walthall *et al.*, 2012). En outre, dans le contexte où les besoins en eau pour l'irrigation de certaines cultures augmenteraient, les conflits avec d'autres usagers de la ressource en eau pourraient devenir localement plus fréquents dans la mesure où les étiages seront plus sévères et plus longs dans le sud du Québec (CEHQ, 2013a, voir la section 2.5.1).

Par ailleurs, les excès d'eau sont aussi dévastateurs en agriculture de par leur impact direct sur les cultures, sur le ruissellement de surface et sur l'érosion des sols qui favorisent le transfert d'éléments nutritifs et de pesticides vers les eaux de surfaces (Michaud *et al.*, 2012; Walthall *et al.*, 2012). Les changements climatiques pourraient accentuer le risque de contamination de l'eau de surface dans la mesure où ils augmenteraient la fréquence et l'intensité des pluies orageuses, particulièrement dans le sud du Québec (Mailhot *et al.*, 2012; Mailhot *et al.*, 2007; Michaud *et al.*, 2013 — voir aussi la section 1.3) ou encore favoriseraient l'occurrence d'épisodes de redoux hivernaux accompagnés de pluie (Michaud *et al.*, 2012).

La vulnérabilité des sols au ruissellement et à l'érosion hydrique varie en fonction d'autres facteurs comme la topographie, les pratiques de conservation des sols mises en place par les producteurs, mais aussi du type et de la qualité des sols et de l'occupation du territoire agricole (Mehdi *et al.*, 2014; Rousseau *et al.*, 2007). Ces deux derniers facteurs seront également influencés par les modifications du climat. Par exemple, la teneur en matière organique des sols est sensible à la température, à la disponibilité en eau du sol et à la quantité de matière organique provenant des cultures (Walthall *et al.*, 2012). Par ailleurs, les changements climatiques pourront modifier la répartition des cultures sur le territoire.

L'évolution des régimes de précipitations pourra aussi avoir des répercussions sur les infrastructures agricoles. Une étude récente de Godbout *et al.* (2013) a montré que les changements qui surviendront dans les régimes de précipitations et de températures augmenteront la quantité d'eau accumulée dans les installations d'entreposage des fumiers à ciel ouvert à l'horizon 2030, nécessitant une mise à jour des critères de conception de ces dernières.

Le dioxyde de carbone (CO₂)

Les études concernant l'impact de l'augmentation de CO₂ atmosphérique ont confirmé un effet globalement positif de l'enrichissement en CO₂ sur les rendements des cultures concernant la stimulation de la photosynthèse ou encore l'amélioration de l'utilisation de l'azote et de l'eau par la plante (Hatfield *et al.*, 2011; Leakey *et al.*, 2009; Piva *et al.*, 2013; Porter *et al.*, 2014; Walthall *et al.*, 2012). Toutefois, elles ont aussi montré que cet effet varie selon l'espèce, sa capacité d'adaptation et les interactions avec la température, la disponibilité en eau et en éléments fertilisants ou encore le niveau de pollution de l'air en ozone troposphérique. Par exemple, l'effet de l'augmentation de la concentration en CO₂ est plus important pour les espèces cultivées de type C3 (notamment blé, orge, soya, pomme de terre, riz, coton), qui sont les plus abondantes à l'échelle mondiale, que pour celles de type C4 (notamment maïs, sorgo, canne à sucre). Toutefois, une étude en conditions contrôlées réalisée au Québec a démontré qu'une augmentation de la concentration en CO₂ de 400 à 600 ppm n'a pas affecté le rendement de la fléole des prés, une graminée fourragère de type C3 largement cultivée au Québec (Piva *et al.*, 2013). Par ailleurs, un niveau élevé en CO₂ pourrait avoir un impact négatif sur la qualité de la production, par exemple sur la teneur en fer, en zinc ou en protéines (Myers *et al.*, 2014; Walthall *et al.*, 2012), avec là encore des différences entre les espèces et même les variétés.

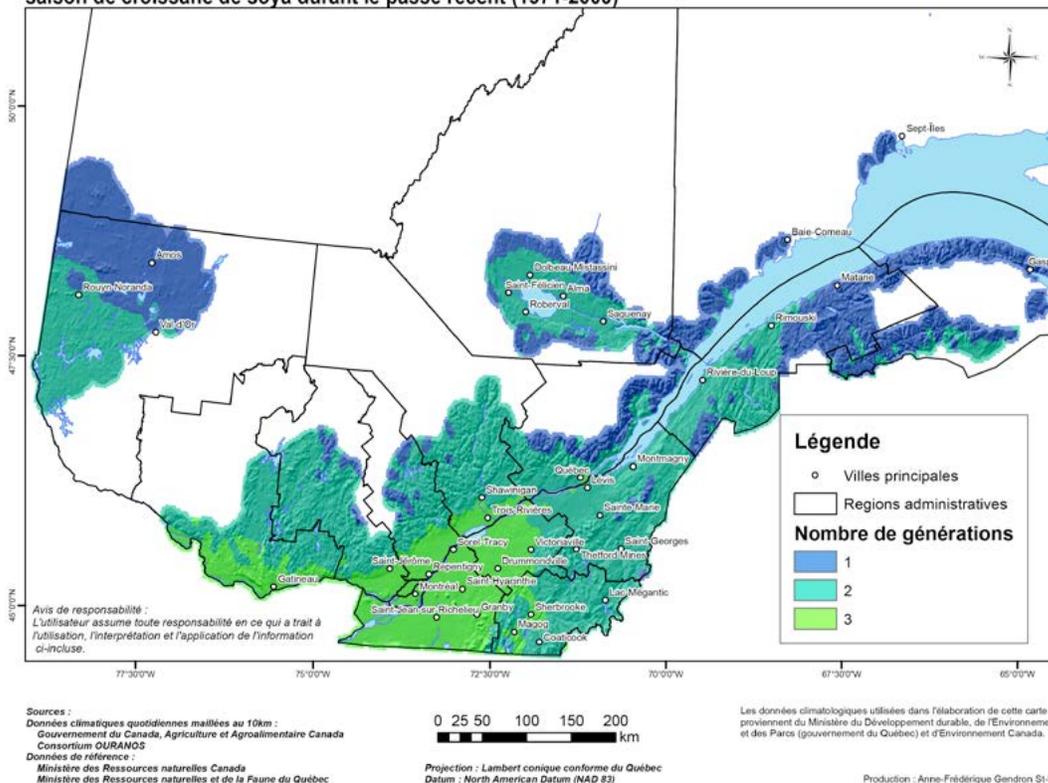
Les ennemis des cultures (insectes, maladies et mauvaises herbes)

Les ennemis des cultures sont très sensibles aux variations du climat, mais aussi, pour certains d'entre eux, à la teneur en CO₂ atmosphérique. Par conséquent, les changements climatiques auront des répercussions directes sur leur développement et leur répartition et donc sur la pression qu'ils exerceront sur les cultures (Brodeur *et al.*, 2013; Gagnon *et al.*, 2011; Walthall *et al.*, 2012).

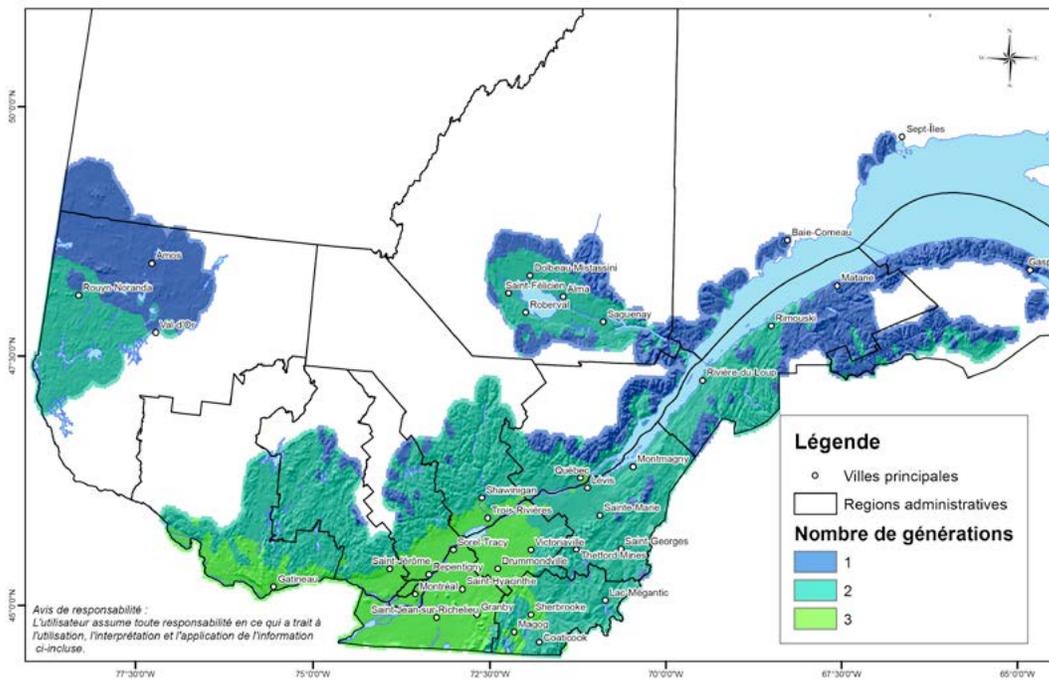
En tant qu'organismes poikilothermes², les insectes sont particulièrement sensibles à la température. Une étude récente menée au Québec montre, par exemple, que la pression exercée par la pyrale du maïs sucré et le doryphore de la pomme de terre sera plus grande à l'horizon 2050, car les adultes arriveront plus tôt en saison, ils connaîtront un développement plus rapide et pourront donc compléter un plus grand nombre de générations par saison estivale (Gagnon *et al.*, 2013). Le réchauffement climatique augmenterait également le nombre de générations par année du nématode à kyste du soya, avec jusqu'à quatre ou cinq générations annuelles dans le sud de la province en 2041-2070 (Mimee *et al.*, 2014) (figure 2-6).

De la même manière, le développement, la survie et l'activité des insectes pollinisateurs pourront également être affectés par les changements climatiques alors même qu'ils sont un facteur déterminant des rendements de certaines cultures (Potts *et al.*, 2010; Walthall *et al.*, 2012).

a) Nombre moyen de générations de nématodes à kyste du soya produites durant une saison de croissance de soya durant le passé récent (1971-2000)



b)



c)

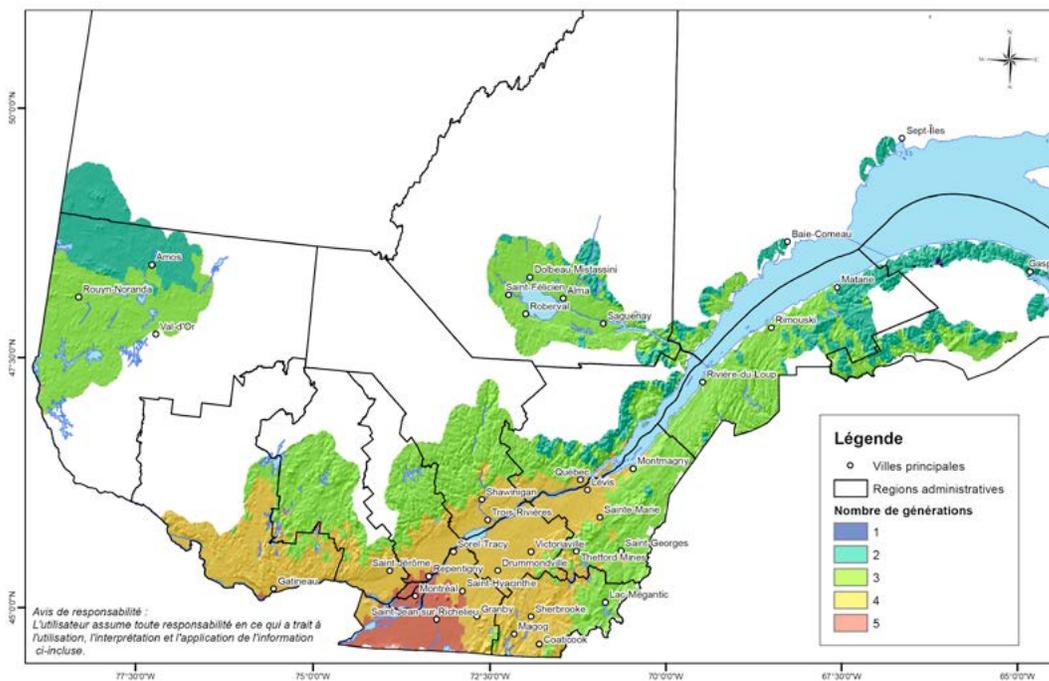


Figure 2-6 Nombre moyen de générations du nématode à kyste du soya par saison de croissance durant le passé récent (1971-2000) (a) et pour le futur proche (2041-2070) selon les scénarios de changements inférieur (b) et supérieur (c).

Source : Mimee et al. (2014)

La compétitivité des mauvaises herbes par rapport aux cultures serait avantagée par les modifications dans le régime des températures et des précipitations et par l'augmentation de la concentration de la teneur en CO₂ atmosphérique (Hatfield *et al.*, 2011; Porter *et al.*, 2014).

Les changements climatiques auront aussi des répercussions sur certaines maladies des plantes, en affectant par exemple la survie, la reproduction ou la dissémination des agents pathogènes (Chakraborty, 2013).

Par ailleurs, le réchauffement du climat favorisera l'expansion vers le nord de l'aire de répartition de certains ennemis des cultures déjà présents au Québec (de Blois *et al.*, 2013; Gagnon *et al.*, 2013; Malcolm *et al.*, 2013). Les changements climatiques amplifieront également le risque d'établissement de nouvelles espèces potentiellement envahissantes au Québec (Brodeur *et al.*, 2013; de Blois *et al.*, 2013; Malcolm *et al.*, 2013; Mimee *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2012), qui sont par ailleurs également favorisées par l'augmentation des échanges mondiaux. En modélisant la répartition actuelle et future de 40 espèces végétales en fonction d'un ensemble de scénarios climatiques, une étude récente de de Blois *et al.* (2013) a montré que le risque d'invasion biologique augmenterait au Québec au cours des prochaines décennies (voir le chapitre 2.4). Mimee *et al.* (2014) ont identifié 13 ravageurs ou maladies déjà présents aux États-Unis, dont l'aire de répartition ne cesse de s'accroître, et qui représentent une menace sérieuse pour la production de soya au Québec. Selon ces mêmes auteurs, si la punaise marbrée ne peut pas actuellement s'implanter de façon pérenne au Québec, son aire de répartition pourrait s'étendre à l'ensemble du territoire où le soya est actuellement cultivé puisqu'à l'horizon 2050, elle atteindrait dès le mois de septembre le stade adulte qui lui permet de survivre en hiver.

Les changements climatiques auront d'autres impacts sur les ennemis des cultures. Par exemple, le réchauffement du climat pourrait affecter le synchronisme entre le cycle biologique de certains insectes et celui de leurs ennemis naturels qui contribuent au contrôle des populations d'insectes ravageurs (Brodeur *et al.*, 2013). L'efficacité de certains herbicides pourrait également diminuer du fait de l'augmentation de la croissance racinaire de certaines mauvaises herbes dans un environnement enrichi en CO₂ (Gagnon *et al.*, 2011; Malcolm *et al.*, 2013; Porter *et al.*, 2014). Les espèces de trichogrammes utilisées actuellement au Québec pour lutter contre la pyrale du maïs pourraient s'avérer moins performantes sous un climat plus chaud (Gagnon *et al.*, 2013).

L'identification de patrons généraux concernant la réponse des ennemis des cultures aux changements climatiques demeure laborieuse. Cette réponse implique un grand nombre de facteurs qui interagissent entre eux dont « la nature et la diversité des insectes ravageurs, la réponse des ennemis naturels, l'importance des changements des divers paramètres climatiques, ainsi que la capacité des cultures... et des insectes à s'adapter...» (Brodeur *et al.*, 2013).

Productions animales

Alimentation

Les changements climatiques pourraient avoir un impact sur la disponibilité et le coût des aliments en affectant la production et la qualité des céréales fourragères et des plantes fourragères pérennes (Proulx *et al.*, 2013; Thornton *et al.*, 2009; Walthall *et al.*, 2012). Selon une étude préliminaire réalisée par Charbonneau *et al.* (2013), les répercussions sur le bénéfice net des fermes laitières dépendront des caractéristiques de la ferme et de l'adaptation de ses pratiques. Ainsi, les fermes laitières du Centre-du-Québec pourraient profiter de ces nouvelles conditions, car elles pourraient vendre davantage de maïs-grain et de soya et ainsi accroître leur revenu. S'ils introduisaient du maïs-grain et du soya dans leurs rotations, du fait d'une saison de croissance plus longue et plus chaude, les producteurs du Bas-St-Laurent pourraient aussi vendre une partie de la production et ainsi augmenter le bénéfice de leur entreprise (figure 2-7).

Les répercussions d'un manque d'eau peuvent être importantes pour la santé des animaux et pour la production. Même si la situation à court terme apparaît moins alarmante au Québec que dans des provinces de l'ouest du Canada, il est important de considérer l'enjeu de l'eau pour les élevages pour limiter les conflits d'usages de la ressource en eau (CAC, 2013). Les élevages pourront, par ailleurs, être affectés par des modifications de la qualité de l'eau (Proulx *et al.*, 2013).

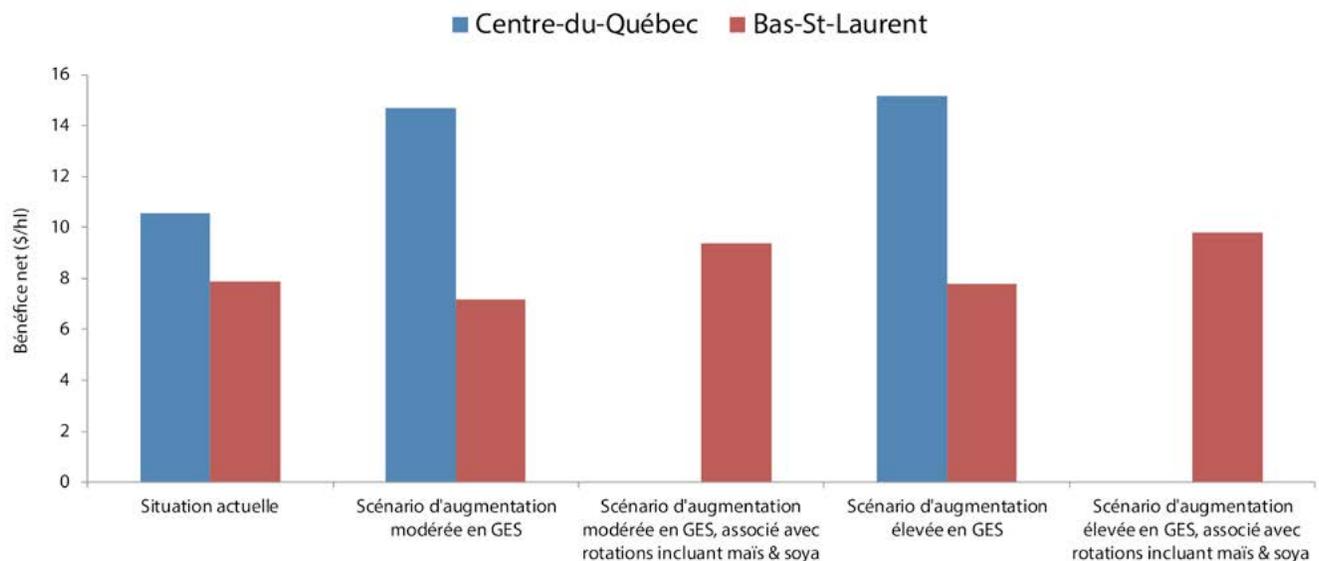


Figure 2-7 Impact de deux scénarios de changements climatiques sur le bénéfice net des fermes laitières du Centre du Québec et du Bas-St-Laurent

Source : d'après Charbonneau *et al.* (2013)

Stress thermique

Des épisodes de chaleur intense, particulièrement lorsqu'ils sont associés à une humidité importante de l'air, perturbent la productivité (gain de poids, production de lait ou d'œufs, en outre), la reproduction, la santé et le bien-être des animaux et peuvent aller jusqu'à provoquer leur mort en cas de canicule particulièrement intense et prolongée (Porter *et al.*, 2014; Proulx *et al.*, 2013; Walthall *et al.*, 2012). En augmentant la fréquence et l'intensité des canicules, les changements climatiques pourront avoir un impact non négligeable sur les élevages. Le risque est réduit lorsque les bâtiments d'élevage sont équipés de systèmes de rafraîchissement, comme la ventilation ou la brumisation, à condition de s'assurer qu'ils restent efficaces dans ces nouvelles conditions. L'utilisation de ces systèmes pourra engendrer une augmentation de la consommation d'énergie qui pourra cependant être compensée par la diminution du chauffage avec des hivers plus cléments.

Maladies et infections

Le réchauffement du climat et la modification des précipitations pourraient aussi affecter indirectement la santé et la productivité des élevages en modifiant la fréquence, l'intensité ou la distribution d'agents pathogènes ou de parasites (Porter *et al.*, 2014; Walthall *et al.*, 2012). En plus de favoriser la dispersion

géographique de certaines maladies et infections existantes, ils pourraient aussi en provoquer l'émergence de nouvelles. Certaines de ces maladies ou infections sont transmissibles à l'homme et constituent alors un enjeu de santé publique (voir la section 2.2.4.3). De manière générale, les impacts des changements climatiques sur les maladies du bétail restent difficiles à évaluer (Porter *et al.*, 2014).

Impacts économiques

Les impacts décrits dans les sections précédentes exposeront les producteurs agricoles à des risques opérationnels et financiers. À l'heure actuelle, les estimations des effets sur la valeur foncière et le revenu agricole au Canada sont divergentes (Lemmen et Warren, 2004; TRNEE, 2010). Ainsi, Da Silva (2009) conclut que «l'agriculture canadienne devrait connaître une baisse importante de ses revenus avec une hétérogénéité régionale importante», tandis que Reinsborough (2003) et Weber et Hauer (2003) proposent le contraire. Ces résultats opposés, dus en partie à la prise en compte ou non de l'adaptation spontanée, soulignent la complexité associée à la détermination de l'effet économique réel des changements climatiques sur l'agriculture, à laquelle il faut ajouter également les effets des événements extrêmes (inondations, pluies intenses, sécheresse, etc.) et des marchés internationaux (Lemmen et Warren, 2004). En effet, la production agricole étant une activité primaire, il est important de tenir compte des impacts économiques indirects que la volatilité des rendements agricoles aura sur les coûts des intrants pour les industries qui utilisent les produits agricoles comme matières premières (fabricants d'aliments et de boissons, producteurs de bioénergie, etc.) (TRNEE, 2010). De même, la production agricole est également sensible à des événements extrêmes comme les tornades, la foudre ou le verglas, mais des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer le comportement futur pour ce type d'événements (voir la section 1.3.3).

Les impacts des changements climatiques sur l'agriculture à l'extérieur du Québec pourraient également avoir des répercussions importantes sur la compétitivité de certaines filières agricoles québécoises. Par exemple, selon Debailleul *et al.* (2013), la position concurrentielle du Québec risque d'évoluer favorablement d'ici 2050 sous l'effet des changements climatiques pour la production de maïs-grain et de pommes. En effet, les nouvelles conditions climatiques en Iowa et en Illinois devraient désavantager la culture du maïs dans ces États alors qu'elles avantageraient le Québec. En ce qui a trait à la pomme, ce résultat serait lié à une amélioration des rendements, des coûts de production plus compétitifs, un allongement de la saison de croissance et une extension de la superficie propice à la pomiculture au Québec.

2.1.2.3 Adaptation

L'agriculture est l'un des secteurs de l'économie où l'adaptation est une constante et qui, à cet égard, a fait preuve au cours des décennies d'un très grand dynamisme. Les agriculteurs sont constamment à l'affût des adaptations nécessaires aux évolutions des marchés, aux changements technologiques et aux aléas climatiques. La mise en œuvre de mesures d'adaptation permettra donc, comme pour le reste, d'atténuer certains risques et vulnérabilités liés à l'évolution du climat et donc de réduire les coûts qui y sont associés. Certaines mesures permettront aussi de saisir les opportunités qui se présenteront (Bizikova *et al.*, 2011; Ignaciuk, 2014; Porter *et al.*, 2014; Walthall *et al.*, 2012).

Si ultimement, la décision de s'adapter revient aux producteurs agricoles, ils devront pouvoir bénéficier de l'appui des différents paliers gouvernementaux, des institutions et organismes de recherche ou encore des intervenants du secteur privé (Crawford et MacNair, 2012 — voir aussi la section 3.2.2).

Les producteurs agricoles ne décident pas de s'adapter en fonction uniquement de l'évolution des conditions et des risques climatiques. Ils considèrent également d'autres facteurs externes de nature économique, politique, sociale, technologique (Berrang-Ford *et al.*, 2011; Bryant *et al.*, 2007; Kulshreshtha et Wheaton, 2013; Porter *et al.*, 2014), le contexte local dans lequel ils évoluent ainsi que leur situation personnelle (Walthall *et al.*, 2012). Ainsi, Mehdi *et al.* (soumis) ont mené une enquête auprès d'agriculteurs du Québec et de Bavière pour connaître les facteurs qui influencent leur choix de cultures pour leur ferme. En plus de l'accès au marché et de la rentabilité, le climat, l'expérience et l'équipement disponibles sur la ferme, l'accès à des informations agronomiques sur la culture ou encore le temps nécessaire pour la cultiver sont aussi ressortis comme des éléments importants. Il est nécessaire de bien comprendre cet environnement décisionnel pour identifier et évaluer les mesures d'adaptation les plus prometteuses, y compris à l'échelle locale (Bizikova *et al.*, 2014; Bryant *et al.*, 2007).

Un grand nombre de mesures et stratégies d'adaptations potentielles qui ont été répertoriées permettent de réduire les conséquences négatives des changements climatiques et d'en accroître les bénéfiques (Porter *et al.*, 2014). Plusieurs d'entre elles constituent une amélioration spontanée de la gestion des risques climatiques actuels par les entreprises agricoles (Kulshreshtha et Wheaton, 2013; Porter *et al.*, 2014). Toutefois, les institutions ont également un rôle proactif primordial à jouer pour renforcer la capacité d'adaptation du secteur agricole (Kulshreshtha et Wheaton, 2013; Porter *et al.*, 2014; Walthall *et al.*, 2012).

Exemples d'adaptation du côté des entreprises agricoles

L'expérience réussie de gestion de la variabilité climatique a amené une certaine confiance chez les producteurs agricoles qui estiment pouvoir s'adapter aux changements climatiques avec les outils et les moyens actuellement disponibles, du moins à moyen terme (Bryant *et al.*, 2007; Walthall *et al.*, 2012). Ainsi, on estime que les dates des semis et des récoltes, peuvent être modifiées en fonction de l'évolution de la saison de croissance (Porter *et al.*, 2014). Lorsqu'elles sont disponibles, les producteurs pourront également choisir des variétés mieux adaptées à certains effets des changements climatiques, par exemple des cultivars plus productifs actuellement utilisés plus au sud ayant besoin d'un cumul de chaleur plus important durant la saison de croissance (Porter *et al.*, 2014) ou encore des variétés plus tolérantes à certaines maladies, aux extrêmes de température, aux conditions hivernales dans le cas des cultures fourragères ou au manque d'eau.

Même si elle s'inscrit à contre-courant d'une forte tendance observée de spécialisation des exploitations, la diversification des cultures est souvent considérée comme une stratégie de gestion des risques accrus liés aux changements climatiques (Lepage *et al.*, 2012). En ce sens, une saison de croissance plus longue et plus chaude offrira de nouvelles opportunités que les producteurs pourront prendre en compte au moment de faire leur choix cultural.

Avec la rotation, la diversification des cultures constitue également un outil efficace de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. D'autres exemples sont le devancement du dépistage et du piégeage de certains insectes afin de mieux cibler la date des interventions phytosanitaires ou encore la rotation des groupes de pesticides afin de diminuer le risque d'apparition de résistances (Gagnon *et al.*, 2013).

Certaines pratiques agricoles, telles que l'établissement de bandes riveraines, la gestion des résidus au champ ainsi que les dates, les méthodes d'application et les doses des engrais seraient à réévaluer et à renforcer dans un contexte d'augmentation de l'intensité des précipitations. De même, 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.

Dans une étude menée dans un sous-bassin versant de la Baie Missisquoi, Mehdi *et al.* (2014) ont évalué que soustraire 10 % du territoire le plus sensible au ruissellement à la production agricole permettrait de réduire les charges en phosphore, nitrates et sédiments dans les eaux de surface. Une de leurs conclusions est que toute combinaison de pratiques agricoles permettant de réduire le ruissellement de surface au moment de la fonte de la neige (bandes riveraines, travail réduit du sol, gestion des résidus de culture au champ, cultures de couverture) devrait être minimalement ciblée dans les zones à risque.

Des travaux récemment réalisés par Michaud *et al.* (2013) ont permis de mettre à jour des outils utilisés par les ingénieurs et agronomes responsables de la conception des ouvrages hydro-agricoles sur les exploitations agricoles, comme les courbes, intensité, durée et fréquence (IDF) de précipitations. Cette étude a également démontré l'importance de considérer à terme les redoux hivernaux dans la conception de ces ouvrages, au regard des scénarios de changements climatiques attendus. Par ailleurs, en réponse à une disponibilité d'eau plus restreinte, une amélioration de la gestion de l'eau, telle que la micro-irrigation en horticulture, devient primordiale (Michaud *et al.*, 2012).

Dans le cas des élevages, certaines recommandations, notamment sur la densité des animaux à l'intérieur des bâtiments, leur alimentation, la ventilation et la brumisation des bâtiments sont susceptibles d'aider les producteurs à diminuer le stress de leurs animaux dans les périodes de chaleur, lesquelles seront plus fréquentes et intenses en été (Walthall *et al.*, 2012), alors que davantage d'abris et d'abreuvoirs seront nécessaires pour les élevages en plein air (Porter *et al.*, 2014). Comme les risques de mortalité hivernale de la luzerne et autres espèces fourragères sensibles à l'hiver augmenteront avec le réchauffement climatique (Bélanger *et al.* 2002), il est à prévoir que les producteurs laitiers seront amenés à modifier leurs rotations des cultures, incluant le nombre d'années en plantes fourragères pérennes dans chaque cycle de rotation (Charbonneau *et al.* 2013). De plus, la fléole des prés, la graminée fourragère la plus utilisée au Québec, sera moins compétitive dans un climat plus chaud. Il sera donc nécessaire de développer des variétés améliorées de plantes fourragères pérennes pour leur tolérance à l'hiver et leur croissance pendant l'été, ou encore de remplacer les espèces couramment utilisées par d'autres espèces mieux adaptées aux conditions climatiques futures.

Certains modes de gestion des entreprises agricoles peuvent également être mis en œuvre pour faire face aux changements et à la variabilité climatique. Les entreprises agricoles ayant des sources de revenus diversifiées y sont par exemple moins sensibles. Lorsque les cultures sont admissibles, de nombreux producteurs participent également aux programmes d'assurance gouvernementaux qui visent à verser une compensation en cas de faibles revenus (assurance stabilisation du revenu agricole) ou de pertes associées aux conditions climatiques (assurance récolte). Plusieurs auteurs remettent toutefois en question l'intérêt de ces programmes qui pourraient, dans certains cas, conduire à la maladaptation (Crawford et MacNair, 2012; Rickards et Howden, 2012 — voir aussi la section 3.4.3).

Les producteurs, appuyés par leurs conseillers, prendront des décisions plus éclairées en matière de gestion de risques climatiques s'ils ont accès à de l'information sur la météorologie ou l'évolution du climat (Porter *et al.*, 2014) ou bien à des outils d'aide à la décision qui les prennent en compte (Lepage et Bourgeois, 2012; Plouffe et Bourgeois, 2012). On peut citer à titre d'exemple, le site internet Agrométéo Québec (www.agrometo.org) qui a comme objectif de diffuser des observations et des prévisions climatiques pour la saison agricole en cours ainsi que des modèles prévisionnels ou encore le nouvel atlas agroclimatique du Québec qui présente sous forme cartographique les normales et les scénarios climatiques futurs à l'horizon 2050 de plusieurs indices agroclimatiques d'intérêt (Audet *et al.*, 2012).

Enfin, il existe diverses méthodologies pour sélectionner les mesures d'adaptation qui sont les plus appropriées à la situation de chaque entreprise agricole, par exemple l'analyse coût-avantage ou l'analyse multicritère qui inclut des projections des changements climatiques. Ces méthodologies permettent d'adopter une combinaison de mesures d'adaptation, ce qui est souvent plus efficace en termes de productivité et de profit (Porter *et al.*, 2014). Il est important aussi de considérer des solutions sans regret, c'est-à-dire qui sont pertinentes et rentables dans les conditions climatiques actuelles et aussi futures (Walthall *et al.*, 2012). Il convient également de tenir compte des barrières qui pourraient limiter la mise en œuvre des mesures d'adaptation retenues. Crawford et MacNair (2012) mentionnent, par exemple, que le faible niveau de revenu de certains producteurs agricoles est un facteur qui limite l'adaptation en Colombie-Britannique ou que des producteurs agricoles proches de la retraite sont moins enclins à investir dans de nouvelles technologies ou de nouvelles approches sauf si leur relève est assurée.

Exemples d'adaptation du côté des institutions

Les organisations gouvernementales peuvent renforcer la capacité d'adaptation des différents acteurs du secteur agricole en soutenant des activités de recherche et développement, en diffusant des informations ou en mettant en place des conditions (politiques publiques, lois et règlements, programmes de soutien, modes de gestion et de gouvernance, etc.) qui appuient l'adaptation aux changements climatiques (Crawford et Beveridge, 2013; Kulshreshtha et Wheaton, 2013; Walthall *et al.*, 2012). Ainsi, le *Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012* (Gouvernement du Québec, 2008a) a permis de financer des activités de recherche et développement appliquées visant à mieux comprendre les changements climatiques, leurs effets et les options d'adaptation notamment en matière de gestion des ennemis des cultures ou de gestion intégrée des sols et de l'eau.

Les connaissances et les outils développés dans le cadre de ces projets ont été largement diffusés auprès des usagers agricoles concernés à travers différents supports et activités de sensibilisation et de formation dans le but de favoriser leur adaptation. Parmi les activités réalisées, on peut citer l'exemple de deux colloques en agroclimatologie, organisés en 2011 et 2012 sur le thème « *Outils disponibles et changements climatiques* » et qui ont permis de sensibiliser et d'informer plus de 200 intervenants du secteur agricole (professionnels gouvernementaux, producteurs et conseillers agricoles, chercheurs et étudiants, etc.) (Bachand *et al.*, 2012).

Par ailleurs, plusieurs programmes et règlements pourraient être réévalués en fonction de l'évolution climatique et éventuellement modifiés afin de favoriser une adaptation appropriée des pratiques par les producteurs (Kulshreshtha et Wheaton, 2013). Ainsi, afin d'intégrer l'évolution récente du climat, la Financière agricole du Québec, qui gère les programmes d'assurance agricole gouvernementaux, a mis à jour en 2013 certains documents de soutien de ses programmes sur la base de la carte des unités thermiques maïs qui est disponible dans le nouvel atlas agroclimatique du Québec (Audet *et al.*, 2012). Des travaux de Godbout *et al.* (2013) ont permis de mettre à jour les valeurs d'accumulation d'eau utilisées pour le dimensionnement des structures d'entreposage de fumier et de lisier à ciel ouvert en fonction des scénarios climatiques anticipés à l'horizon 2016-2044. De plus, Gagnon *et al.* (2013) ont identifié une bonne cohérence entre certaines actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 et les options d'adaptation, telles que favoriser le développement d'autres méthodes que les pesticides pour lutter contre les ennemis des cultures, mettre en place des incitatifs pour soutenir les producteurs qui adoptent la gestion intégrée des ennemis des cultures ou encore renforcer les activités de Réseau d'avertissements phytosanitaires et maintenir l'accès à des services spécialisés d'identification des ennemis des cultures.

2.1.2.4 Conclusion

Les conditions climatiques des prochaines décennies au Québec auront à la fois des effets positifs et négatifs sur la production agricole. L'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique, l'allongement et le réchauffement de la saison de croissance permettront d'augmenter le potentiel de rendement de certaines cultures et d'en modifier la distribution sur le territoire. Il est important de mentionner que cet effet positif sur les rendements potentiels reste vrai tant que certains seuils critiques ne sont pas atteints (Kulshreshtha et Wheaton, 2013; Porter *et al.*, 2014), ce qui vient renforcer l'importance de poursuivre les efforts pour réduire la production de gaz à effet de serre en vue de limiter le réchauffement global. Inversement, les changements climatiques vont exacerber certains risques liés par exemple aux insectes, maladies ou mauvaises herbes, aux modifications des conditions hivernales, mais surtout à l'augmentation de la fréquence et l'intensité de conditions climatiques extrêmes qui sont particulièrement dommageables en agriculture (Thornton *et al.*, 2014). Ainsi, le potentiel de rendement permis par le climat devrait augmenter pour plusieurs cultures au Québec, mais l'effet des changements climatiques sur d'autres facteurs de risques pourrait empêcher les producteurs québécois de tirer avantage de ce plus grand potentiel.

Tout ceci aura des répercussions économiques pour les entreprises agricoles et le secteur agroalimentaire dans son ensemble (Mendelsohn et Dinar, 2009), mais aussi des conséquences sociales et environnementales. Une étude canadienne a conclu que les changements climatiques devraient favoriser la productivité des cultures, mais cela serait accompagné d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans le cas des céréales (Smith *et al.*, 2013). Toutefois, il est difficile d'évaluer si l'effet net des changements climatiques sera globalement positif ou négatif pour le secteur du fait du nombre et de la complexité des interactions existantes au sein des écosystèmes agricoles. La vulnérabilité aux changements climatiques est variable (Bryant *et al.*, 2007; Délusca, 2010) et dépendra à la fois de l'intensité et de la rapidité de ces changements, de la sensibilité du système agricole considéré ainsi que de la capacité d'adaptation des producteurs agricoles et des autres intervenants du secteur (Walthall *et al.*, 2012). Par ailleurs, les impacts des changements climatiques sur l'agriculture à l'extérieur du Québec pourraient également avoir des répercussions importantes sur la compétitivité de certaines filières agricoles québécoises.

Jusqu'ici, les producteurs québécois, appuyés par de nombreux intervenants, y compris les institutions, ont démontré une forte capacité d'adaptation à l'évolution du climat et à de nombreux facteurs socio-économiques, y compris les marchés agricoles, les technologies, la réglementation et les programmes d'appui gouvernementaux ou encore la demande et les préférences alimentaires des consommateurs (Bryant *et al.*, 2010; Crawford et MacNair, 2012; Walthall *et al.*, 2012). À court terme, cette capacité d'adaptation constitue un atout important pour faire face aux risques et saisir les opportunités liées à l'évolution du climat.

Toutefois, le rythme et l'intensité des changements climatiques attendus au cours des prochaines décennies représentent de nouveaux défis qui devront être relevés avec la collaboration de nombreux acteurs du secteur agricole, incluant les producteurs, les institutions, les organismes de recherche et autres intervenants du secteur privé (Bryant *et al.*, 2013; Porter *et al.*, 2014; Walthall *et al.*, 2012). Les mécanismes et outils qui ont permis au secteur agricole de s'adapter jusqu'ici aux risques climatiques conserveront leur importance même si certains devront éventuellement évoluer en fonction du contexte climatique et pourraient s'avérer de plus en plus onéreux si les effets des changements climatiques continuent de s'intensifier (Howden *et al.*, 2007; Ignaciuk, 2014; Walthall *et al.*, 2012). De nouvelles mesures d'adaptation s'avèreront nécessaires, par exemple l'augmentation de la diversité des productions sur la ferme ou encore le déplacement des zones de certaines cultures vers le nord (Porter *et al.*, 2014; Romero-Lankao *et al.*, 2014). En ce sens, innover d'une façon proactive, c'est-à-dire, en évaluant en amont les avantages potentiels des technologies à développer pour aider les

agriculteurs à s'adapter, est souhaitable (Kaminski *et al.*, 2012). Le secteur agricole québécois peut s'inspirer des technologies et des pratiques déjà mises en œuvre dans les régions subissant à l'heure actuelle les conditions climatiques appréhendées au Québec.

Par ailleurs, il conviendra d'éviter les incohérences, mais aussi de profiter du potentiel de synergie entre les actions visant l'adaptation aux changements climatiques et celles visant l'atténuation (Olesen *et al.*, 2011; Smith et Olesen, 2010; Smith, 2012; Walthall *et al.*, 2012).

Il subsiste de nombreuses lacunes concernant les connaissances en matière d'impacts et d'adaptation du secteur agricole québécois aux changements climatiques. Parmi les idées de pistes de recherche, on peut citer à titre d'exemple, et de manière non exhaustive :

- ▶ La productivité des cultures en tenant compte de la fréquence et de l'intensité future des événements climatiques extrêmes et d'autres facteurs de risque comme les ennemis des cultures.
- ▶ Les répercussions des changements climatiques sur la qualité des récoltes.
- ▶ La prise en compte de l'effet combiné de l'augmentation du CO₂ et des changements climatiques sur les insectes, mauvaises herbes et maladies ou encore les niveaux trophiques pour les insectes.
- ▶ Les modifications de l'aire de répartition des cultures en lien avec les changements climatiques et les conséquences économiques, sociales et environnementales.
- ▶ Les effets des changements climatiques sur la qualité des sols, les besoins en eau et la qualité de l'eau.
- ▶ La sensibilité de la régie et des infrastructures d'élevage au stress thermique.
- ▶ Les impacts des changements climatiques sur la transformation et la distribution bioalimentaires.
- ▶ Les coûts économiques des impacts des changements climatiques sur le secteur agricole.
- ▶ L'identification et l'analyse (performance technique, coûts et bénéfices économiques, sociaux et environnementaux, acceptabilité sociale, barrières et opportunités pour leur mise en œuvre, etc.) de mesures d'adaptation en se basant sur les pratiques et les technologies qui sont déjà disponibles au Québec, mais aussi en étudiant celles déjà mises en œuvre avec succès dans les régions subissant à l'heure actuelle les conditions climatiques appréhendées pour le Québec.
- ▶ L'expérimentation et le suivi de la mise en œuvre des mesures d'adaptation qui seront retenues (projets pilotes).
- ▶ L'étude des activités et des outils de transfert des connaissances disponibles pour vérifier s'ils contribuent à préparer les différents acteurs du secteur agricole à s'adapter aux changements climatiques.

2.1.3 Pêches et aquaculture

Auteurs principaux : Robert Siron et Valérie Bourduas Crouhen (Ouranos)

Réviseurs : Anne Blondlot (Ouranos), Julie Boyer (MAPAQ) et Marc Mingelbier (MFFP)



Faits saillants

- ▶ Les changements climatiques ont des impacts sur les propriétés physico-chimiques de l'eau et la qualité de l'habitat du poisson, mais aussi des effets directs sur la physiologie, la phénologie et la répartition des espèces.
- ▶ Ces impacts entraînent à leur tour des modifications au niveau de la dynamique des populations, des interactions entre les espèces et de la composition des communautés ichtyologiques, qui affecteront ultimement la productivité des pêches (tant sportive que commerciale) et des activités aquacoles.
- ▶ Plusieurs facteurs hydroclimatiques (variation des niveaux d'eau) et écologiques (arrivée d'espèces envahissantes) auront des conséquences directes sur la qualité et la disponibilité des habitats essentiels, tels que les frayères naturelles et les marais aménagés le long du fleuve Saint-Laurent. Cette dégradation de l'habitat du poisson pourrait se traduire par des impacts sur la reproduction, la survie et la croissance de différentes espèces d'importance économique, dont la perchaude, l'éperlan, les esturgeons jaunes et noirs et le grand brochet.
- ▶ En raison de la hausse des températures, on anticipe une augmentation des espèces exotiques envahissantes et de leurs impacts sur les pêches et l'aquaculture.
- ▶ Certaines espèces traditionnellement pêchées seront moins accessibles, notamment les salmonidés d'eaux froides, alors que leur habitat thermique préférentiel diminuera avec le réchauffement des températures, autant dans les lacs nordiques qu'en rivières, ce qui aura des impacts autant sur la pêche sportive que de subsistance.
- ▶ Certains mollusques et crustacés économiquement importants au Québec sont sensibles à l'acidification des océans provoquée par l'augmentation des concentrations en gaz carbonique.
- ▶ Les aléas climatiques comme les tempêtes, les vents violents ou le verglas représentent aussi une menace pour les équipements de pêche et les installations portuaires et aquacoles.
- ▶ L'adaptation du secteur des pêches et de l'aquaculture peut se décliner à travers des actions très variées, mais puisqu'on anticipe des impacts directs et indirects à tous les niveaux (espèces, habitats, processus écologiques), celle-ci devrait reposer avant tout sur une approche écosystémique, qui prenne en compte tous ces facteurs dans les pratiques et la gestion des pêches.

2.1.3.1 L'importance économique des pêches et de l'aquaculture au Québec

La contribution du secteur des pêches commerciales et de l'aquaculture à l'industrie bioalimentaire est significative, notamment sur le plan régional (Gouvernement du Québec, 2013c). Le secteur fournit de l'emploi à environ 3 800 pêcheurs et aides-pêcheurs, ce qui représente environ 7% des emplois canadiens pour ce domaine (Gouvernement du Québec, 2013d) et également 7 % de la valeur totale des captures canadiennes (MAPAQ, 2013). La pêche maritime, essentiellement côtière, est de loin la plus importante économiquement. Elle représentait en 2012 près de 162 millions de dollars en valeur des débarquements (ISQ, 2013b), constitués à plus de 85 % de crustacés (crabe des neiges, homard d'Amérique, crevette nordique, crabe commun) et, dans une moindre mesure, de poissons (hareng, flétan du Groenland, maquereau, morue) et de mollusques (buccin, mactre de Stimpson, pétoncle). Pour la même période, la pêche commerciale en eau douce ne représentait que 1,4 million de dollars en captures, dont les principales espèces étaient la barbotte brune, l'esturgeon jaune, l'esturgeon noir, l'anguille d'Amérique et la perchaude.

En 2012, les ventes des produits de l'aquaculture en eau douce (truite arc-en-ciel, omble de fontaine, omble chevalier) s'élevaient à 10,6 millions de dollars tandis qu'en eaux marines (moule et autres mollusques), elles ne représentaient que 0,6 million de dollars (Gouvernement du Québec, 2013d; ISQ, 2014a).

La pêche sportive au Québec permet la création ou le maintien de 8 655 emplois et représente une valeur ajoutée de 548,5 millions de dollars (Gouvernement du Québec, 2013i). Pour le Québec, cela représente 112 millions en revenus fiscaux et parafiscaux (Gouvernement du Québec, 2013i). Quant à la pêche sur glace, elle permet la création ou le maintien de 380 emplois et représente une valeur ajoutée de 24 millions de dollars et de 5 millions en revenus fiscaux et parafiscaux (Gouvernement du Québec, 2013i).

2.1.3.2 Impacts des changements climatiques sur les propriétés physico-chimiques de l'eau et sur l'habitat du poisson

Globalement, la réduction de la biodiversité marine et la redistribution globale des espèces dues aux changements climatiques projetés pour le milieu du XXI^e siècle et au-delà représentent un défi pour maintenir la productivité et la durabilité des pêcheries et de l'aquaculture, rendant ces secteurs encore plus vulnérables aux autres sources de stress comme la pollution et la surexploitation des stocks (Holmyard, 2014; IPCC, 2014a). Les changements climatiques ont des impacts sur les propriétés physico-chimiques de l'eau et la qualité de l'habitat du poisson, mais aussi des effets sur la physiologie, la phénologie et la répartition des espèces (Benoît *et al.*, 2012; Brzeski, 2011; Curran et Azetsu-Scott, 2012). Ces impacts entraînent à leur tour des modifications au niveau de la dynamique des populations, des interactions entre les espèces et de la composition des communautés écologiques (Shackwell et Loder, 2012). Cette cascade d'impacts affectera ultimement la productivité halieutique et aquacole. En milieu marin, le phénomène de la « tropicalisation » des prises est déjà observé à l'échelle globale et en particulier dans les régions tempérées (Cheung *et al.*, 2013).

Au Québec, plusieurs impacts physico-chimiques ont été étudiés dans les lacs, les rivières, le fleuve et le golfe du Saint-Laurent. Un impact direct de la hausse des températures est le réchauffement des eaux de surface avec une stratification thermique accrue de la colonne d'eau. Cela entraîne alors une diminution du volume des habitats thermiques propices à certains poissons, notamment les salmonidés (Bélanger *et al.*, 2013a; Lapointe *et al.*, 2013). De manière générale, les salmonidés sont des espèces très sensibles à la température de

l'eau ce qui les rend particulièrement vulnérables aux changements climatiques anticipés. Les impacts du réchauffement de l'eau ont été documentés en particulier pour le touladi (*Salvelinus namaycush*) (Bélanger *et al.*, 2013a) (voir aussi le chapitre 2.4) et l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*), deux espèces qui soutiennent une pêche de subsistance importante pour les populations autochtones du Nord du Québec et qui représentent un fort potentiel pour la pêche sportive. Dans les rivières de l'est du Canada, les salmonidés sont aussi affectés par l'augmentation de la température de l'eau qui, lors de canicules prolongées, peut dépasser localement les seuils létaux de ces espèces et conduire dans les cas extrêmes à des mortalités massives (Lapointe *et al.*, 2013). Cela est vrai aussi pour des espèces plus résistantes comme la carpe commune (*Cyprinus Carpio*) qui a subi une mortalité massive dans le Saint-Laurent durant l'été 2001 (Mingelbier *et al.*, 2001b).

L'augmentation de la température de l'eau entraîne aussi une diminution de la concentration en oxygène dissous dans l'eau. Cette hypoxie est tolérée à différents seuils selon les espèces (Shackwell et Loder, 2012) et influence leur répartition, leur alimentation et leur croissance. Dans des cas extrêmes, l'hypoxie peut provoquer une mortalité massive des poissons. Ce phénomène est plus présent dans les régions côtières qu'en mer, et touche surtout des espèces benthiques de crustacés comme le homard et la crevette, deux espèces qui sont commercialement importantes au Québec (Dupont-Prinet *et al.*, 2013; Shackwell et Loder, 2012). Certains poissons sont également sensibles à ce paramètre et pourraient être aussi affectés par une diminution de l'oxygène dissous; c'est le cas notamment de la morue (Chabot et Claireaux, 2008).

Parallèlement à l'augmentation des concentrations en gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère, les quantités absorbées par les océans augmentent également et conduisent au phénomène d'acidification des océans (voir la partie 1). Selon le GIEC, pour les scénarios d'émissions les plus élevés (RCP 4.5, 6.0 et 8.5), l'acidification des océans pose des risques significatifs aux écosystèmes marins, notamment aux écosystèmes polaires (IPCC, 2014b). Les poissons marins se retrouvent avec une plus forte concentration de CO₂ dans leurs tissus ce qui a un impact sur leur respiration, leur circulation et leur métabolisme (Curran et Azetsu-Scott, 2012). L'acidification a aussi un impact important sur le plancton marin, en favorisant notamment les espèces non calcifiées au détriment des espèces pour lesquelles le calcium est un élément clé du métabolisme (p. ex. certaines espèces de phytoplancton, les mollusques à coquille, les crustacés). Cet impact sélectif aura pour effet la réorganisation des premiers maillons de la chaîne trophique (bactéries, phytoplancton et zooplancton) qui se répercutera ensuite à travers toute la chaîne alimentaire (Blackford, 2010).

Les fluctuations naturelles saisonnières et interannuelles du niveau d'eau dans le système Grands Lacs – Saint-Laurent ont des effets immédiats sur les patrons d'écoulement de l'eau et jouent donc un rôle déterminant dans l'écologie des poissons et leur abondance. Entre autres, elles déterminent la répartition et la disponibilité des habitats de reproduction et d'alimentation, le moment de la migration, la croissance, la survie, la composition des communautés et l'abondance des espèces (Hudon *et al.*, 2010; Petts et Calow, 1996; Stalnaker, 1979). Les changements climatiques pourraient donc entraîner des conséquences sur la disponibilité des habitats essentiels tels que les frayères naturelles et les marais aménagés le long du fleuve Saint-Laurent et, par le fait même, sur le succès reproductif et la croissance de différentes espèces d'importance économique dont la perchaude, l'éperlan, les esturgeons jaune et noir et le grand brochet (Brodeur *et al.*, 2004; Mingelbier *et al.*, 2001a; Nilo *et al.*, 1997; Verreault et Trencia, 2011). De plus, les changements climatiques et la diminution anticipée des niveaux d'eau offrent des conditions très favorables à l'expansion de plusieurs espèces envahissantes en rendant disponibles certaines franges du littoral. C'est le cas du roseau commun dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent, entraînant à terme, une perte significative des frayères naturelles pour les

multiples espèces utilisant la plaine d'inondation. De manière générale, la diminution des zones de fraie entraîne des déplacements significatifs vers les limites des aires de répartition des espèces et une diminution de leur recrutement et de leur survie (FAO, 2011; RCIP Project, 2003; Tougas-Tellier *et al.*, 2013).

Les effets des changements climatiques sur la pluviométrie, la fonte des glaces et les courants marins auront également des répercussions sur le mélange des masses d'eaux. C'est le cas en particulier dans les plus hautes latitudes où l'arrivée d'eau douce en surface réduit les échanges avec les couches d'eaux plus froides et salées en profondeur. Le brassage des eaux plus limité et la diminution de la salinité vont affecter la croissance du phytoplancton qui est à la base des chaînes trophiques marines dont dépend une grande partie de l'industrie des pêches (Brzeski, 2011). Il pourrait alors y avoir un déphasage entre le pic de productivité de ces espèces-fourrages et le cycle de vie des espèces qui les consomment habituellement (mollusques, larves de poissons et crustacés), conduisant ultimement à des impacts sur les stocks et le rendement des pêches (Brzeski, 2011; FAO, 2011).

Les modifications des propriétés physico-chimiques des eaux et de la qualité de l'habitat du poisson entraînent des impacts différents selon l'espèce considérée, aussi bien au niveau de la reproduction, du développement, de la croissance et donc du taux de survie (Gouvernement de l'Ontario, 2013). Par conséquent, la composition des communautés de poissons sera aussi affectée et l'abondance des différentes espèces va diminuer ou augmenter en fonction de leur capacité d'adaptation aux nouvelles conditions ambiantes. Entre autres, les espèces d'eaux froides comme le touladi seront remplacées par des espèces d'eaux plus chaudes comme la perchaude, l'achigan, la carpe, la barbotte brune et la lamproie (Campbell *et al.*, 2014; Gouvernement de l'Ontario, 2013). D'un autre côté, certains stocks de poissons pourraient bénéficier du réchauffement des eaux qui pourrait allonger la saison de croissance. Cela pourrait être le cas en particulier des populations de morue du Saint-Laurent qui vivent dans des conditions très froides comparées à d'autres stocks et qui ont une croissance beaucoup plus lente. Des modèles de croissance indiquent en effet qu'un réchauffement de 2 à 4°C augmenterait la productivité du stock de morue (Brander, 2005). Il pourrait aussi y avoir une modification des trajets migratoires de certaines espèces en lien avec un réchauffement des eaux, notamment des espèces exploitées pour les appâts comme le hareng ou le maquereau (Jansen et Gislason, 2011; Melvin *et al.*, 2009), ou encore des inadéquations alimentaires.

2.1.3.3 Conséquences sur les pêches et l'aquaculture

Les modifications des propriétés physico-chimiques de l'eau et de la qualité des habitats dues aux changements climatiques auront donc des répercussions sur ce secteur économique important au Québec. De plus, les aléas climatiques, dont on prévoit une augmentation de l'intensité et de la fréquence dans le climat futur, représentent une menace pour les équipements de pêche et les installations portuaires et aquacoles.

Pêche de subsistance

Pour la pêche de subsistance, qui représente une source de nourriture importante pour les populations autochtones et inuites du Québec, la hausse des températures de l'eau de surface et la diminution de la couche de glace entraîneront une diminution du territoire de pêche. Certaines espèces traditionnellement pêchées seront donc moins accessibles, tandis que leur habitat préférentiel pourrait diminuer (Bélanger *et al.*, 2013a). C'est le cas de l'omble chevalier dans le Nord du Québec, où les projections de la demande pour combler les besoins nutritionnels des populations locales augmentent, alors que la hausse de la température de l'eau influence directement plusieurs processus vitaux pour cette espèce (croissance, cycle de vie, migration, taux de survie) avec au final, le risque d'une diminution de la quantité et de la qualité de la ressource (Doigde et Power, 2013).

En plus, des impacts directs sur la biologie des espèces, les changements de température influencent également la préparation et la conservation des poissons qui risquent de pourrir et de fermenter plus rapidement, ce qui pourrait augmenter le risque de botulisme (Krupnik et Jolly, 2002). En raison de la chaleur, certains poissons ne sont plus propices à être séchés pour la consommation, alors que d'autres sont parasités par des vers d'eaux chaudes qui causent des réactions allergiques et ces poissons doivent donc être séchés avant d'être consommés ce qui complique les habitudes alimentaires des populations autochtones et inuites (Furgal et Seguin, 2006; Nickels *et al.*, 2005).

Pêche sportive

La pêche sportive au saumon est une activité qui génère d'importantes retombées économiques dans certaines régions du Québec et du Nouveau-Brunswick reconnues mondialement pour leurs « rivières à saumon ». Les épisodes de canicules risquant d'être plus longs et plus fréquents dans le sud du Québec, le stress subit par les poissons et les mortalités massives vont augmenter avec les dépassements de la température de l'eau au-delà des seuils létaux (Breau *et al.*, 2011; Lapointe *et al.*, 2013). Cela pourrait localement réduire la quantité et la qualité du produit et, par conséquent, affecter l'ensemble des activités de pêche.

La colonisation des rives du fleuve Saint-Laurent par le roseau envahisseur pourrait réduire de moitié les frayères à grand brochet et à perchaude dans certains secteurs du fleuve (Tougas-Tellier *et al.*, 2013). Cela vient s'ajouter aux autres impacts découlant des activités humaines que subissent déjà ces espèces, notamment la disparition d'habitats essentiels, avec des conséquences sur le taux de survie des poissons et donc sur les pêches. De plus, dans différents cours d'eau, la ressource que représente les poissons peut s'avérer très variable dans le temps et l'espace et être fortement assujettie aux phénomènes cycliques des crues et des étiages, eux-mêmes influencés par les changements climatiques (Boyer *et al.*, 2010), forçant souvent les pêcheurs à se déplacer (Talbot, 2006).

Pêches commerciales

Le déphasage entre les « floraisons » hâtives de phytoplancton et les espèces qui s'en nourrissent pourrait conduire à des impacts sur les pêches commerciales (FAO, 2011). C'est le cas par exemple du homard, pour lequel la saison de pêche a évolué dans le temps. Les récoltes ont été devancées et une adaptation du marché a été nécessaire (RCIP Project, 2003). Selon Brzeski (2011) le réchauffement des eaux de surface a entraîné un devancement de la mue des homards qui a lieu maintenant de 4 à 6 semaines plus tôt, en plus d'augmenter les maladies (maladie de la carapace, acidité des fluides corporels, maladies respiratoires et diminution du système immunitaire) entraînant un impact sur la qualité de la ressource.

Certains mollusques (p. ex. moules, pétoncles, huîtres) et crustacés (p. ex. homard) économiquement importants au Canada et au Québec sont sensibles à l'acidification des océans (Curran et Azetsu-Scott, 2012; Gardner *et al.*, 2009). Or, l'acidification des océans vient se superposer aux autres sources de stress, autant à l'échelle globale (p. ex. réchauffement des eaux, diminution de l'oxygène dissous), que locale (p. ex. pollution, eutrophisation, surexploitation) auxquelles font déjà face les espèces marines, avec des conséquences potentiellement négatives pour les pêches (IPCC, 2014a). De plus, l'acidification peut aussi affecter la qualité gustative de certains fruits de mer comme l'ont démontré de récents travaux (voir p. ex. Dupont *et al.*, 2014), avec de possibles conséquences sur la consommation et la mise en marché de ces produits.

Parallèlement, le coût de la pêche augmente en raison de l'augmentation des distances pour accéder au même produit et aussi de l'augmentation des coûts liés à la réfrigération des produits (Brzeski, 2011). De plus, les aléas climatiques ont des répercussions importantes sur l'efficacité des pêches et l'entretien des embarcations, des quais et des équipements nécessaires à l'exploitation de cette filière (FAO, 2011).

Aquaculture

Bien que l'aquaculture soit considérée comme une activité plus facile à adapter puisqu'elle repose sur des structures modifiables et ajustables avec le temps, elle sera tout de même soumise à diverses conséquences des changements climatiques. Un des principaux enjeux est l'augmentation des espèces exotiques envahissantes (EEE) anticipée avec la hausse des températures des eaux de surface et de leurs impacts potentiels sur les espèces cultivées. Les risques sont dus au fait que les espèces invasives aquatiques sont normalement exotiques et possèdent peu de prédateurs, se reproduisent et s'étendent rapidement (processus favorisés dans des eaux plus chaudes), perturbent la structure et le fonctionnement des écosystèmes, s'adaptent facilement aux nouvelles conditions environnementales et rentrent donc en compétition avec les espèces indigènes pour la nourriture et l'habitat (MacDonald, 2010). En 2012, on répertoriait 162 EEE dans le système Grands Lacs/Saint-Laurent seulement (Ricciardi, 2001). Or, ces espèces entrent en compétition directe avec les populations de poissons indigènes pour la nourriture et les habitats. C'est le cas par exemple du gobie à taches noires (*Neogobius melanostomus*) et des espèces de carpes asiatiques. Leur prolifération peut aussi mener à une diminution de la qualité de l'eau ambiante ce qui affectera rapidement le rendement des activités aquacoles dans la zone en question. On anticipe aussi que certains phénomènes de santé publique se manifesteront plus fréquemment : p. ex. la floraison (blooms) de cyanobactéries en eau douce et de phytoplancton produisant des toxines en milieu marin; la présence de bactéries provoquant des infections digestives (huîtres et fruits de mer mal cuits) entraînant la fermeture à la récolte des zones coquillères; l'invasion des cultures par la moule zébrée ou encore le gobie à tache noire (Brzeski, 2011; Hutchings *et al.*, 2012; RCIP Project, 2003). La culture des mollusques est particulièrement sensible à ces nouveaux agents pathogènes (MPO, 2013), avec le risque d'une diminution de la qualité du produit et de la récolte. Comme pour certaines espèces pêchées, l'acidification des eaux marines va affecter les espèces calcifiées qui sont cultivées, comme la moule bleue et l'huître américaine (Curran et Azetsu-Scott, 2012). Les aléas climatiques peuvent également entraîner des dommages aux installations aquacoles, notamment des tempêtes et des ouragans plus intenses et plus fréquents dans les zones côtières (FAO, 2011).

Ces conséquences sont valables pour plusieurs types d'aquaculture, mais la pisciculture (en eau douce) subira également d'autres types d'impacts liés à la baisse des niveaux d'eau, comme une diminution du rendement, de la productivité et de l'alimentation en eau de qualité des bassins d'élevage. Cela pourrait entraîner une hausse des maladies, une diminution de la qualité et donc de la valeur du produit piscicole (RCIP Project, 2003).

2.1.3.4 Mesures d'adaptation

Puisqu'on anticipe des impacts se répercutant sur la composition des communautés animales et végétales, sur les stocks exploités et sur l'ensemble des chaînes alimentaires, les mesures d'adaptation devraient reposer sur une approche écosystémique, qui prenne en compte tous ces facteurs dans les pratiques et la gestion des pêches (MPO, 2013). De manière plus spécifique, l'adaptation du secteur des pêches et de l'aquaculture peut se décliner à travers de multiples actions, prises à des niveaux et à des échelles très variés; la liste ci-dessous récapitule les principales mesures d'adaptation décrites dans la littérature scientifique.

Pour les pêches :

- ▶ Améliorer les politiques et la gestion des pêches, incluant les systèmes de surveillance dans un contexte de changements climatiques (Holmyard, 2014);
- ▶ Diversifier les espèces pêchées, aussi bien pour les pêches commerciales que de subsistance (Brzeski, 2011);
- ▶ Ajuster la saison de pêche; p. ex. : devancement en fonction de la température, en fonction du déphasage avec les floraisons de phytoplancton, ou de l'abondance et de la répartition des espèces-fourrages (Brzeski, 2011);
- ▶ Se préparer à des changements dans les espèces importantes économiquement et préparer l'adaptation nécessaire des habitudes de consommation à ces nouvelles espèces (Collie *et al.*, 2008; Payne, 2013);
- ▶ Revoir l'approche de conservation des poissons en fonction du climat dans les régions les plus exposées aux changements climatiques telles que le Nord (modalités de pêches, choix des espèces à protéger ou à mettre en valeur) (Bélanger *et al.*, 2013a);
- ▶ Effectuer des suivis périodiques; p. ex. suivre le recrutement des poissons afin d'ajuster à l'avance les modalités d'exploitation (Genivar, 2013; Nilo *et al.*, 1997);
- ▶ Faire une gestion serrée de toute la chaîne d'exploitation : quotas, limites de taille, saison d'exploitation, contrôle de la pêche et des grossistes, rachat de permis, etc. (Mailhot *et al.*, 2011);
- ▶ Modéliser l'habitat pour diverses conditions climatiques afin d'anticiper les impacts et recommander des mesures pour atténuer ces impacts (voir par ex. Bélanger *et al.* 2013a; Lapointe *et al.* 2013 pour l'habitat thermique des salmonidés);
- ▶ Étudier les événements extrêmes; p. ex. mortalités massives de poissons (Mingelbier *et al.*, 2001b; Monette *et al.*, 2006; Ouellet *et al.*, 2010; 2013; 2014);
- ▶ Prendre en compte les effets des crues hâtives qui peuvent conduire à une inadéquation alimentaire et à des expositions à des températures plus froides entraînant une augmentation de la mortalité (Boyer *et al.*, 2010);
- ▶ Proposer des stratégies à long terme pour la gestion de la pêche de subsistance et de la pêche sportive en eaux intérieures tenant compte des effets des changements climatiques; p. ex. sur la disponibilité des habitats (Bélanger *et al.*, 2013a), sur l'évolution des frayères (Tougas-Tellier *et al.*, 2013);
- ▶ Revoir le plan de régularisation du système Grands Lacs/Saint-Laurent pour permettre des variations plus naturelles des niveaux d'eau et des débits et atténuer les niveaux extrêmes, ce qui offrirait des conditions plus favorables – car plus proches des conditions naturelles – aux écosystèmes riverains et aux milieux humides et par conséquent faciliterait l'adaptation de la faune aquatique qui les fréquente (CMI, 2014);
- ▶ Préserver l'environnement naturel des rivières et des bandes riveraines pour maintenir les poches d'eau plus fraîches servant de refuges thermiques dans lesquels les poissons et juvéniles se rassemblent pour survivre lors des canicules; voire en créer artificiellement dans les cas de températures extrêmes, par pompage d'eau souterraine fraîche (Lapointe *et al.*, 2013);
- ▶ Protéger et rétablir la connectivité des habitats (Foubert *et al.*, 2014; Roy *et al.*, 2013).

Pour l'aquaculture :

- ▶ Élever de nouvelles espèces adaptées aux nouvelles conditions climatiques ambiantes (Brzeski, 2011);
- ▶ Implanter des systèmes de recirculation de l'eau pour la production piscicole en eau douce;
- ▶ Réduire les sources de stress non liées aux changements climatiques pour réduire les impacts cumulatifs (Holmyard, 2014); p. ex. réduction des charges toxiques et de la contamination des eaux;
- ▶ Protéger et restaurer des chaînes d'habitats (reproduction/élevage/croissance)(Dumont *et al.*, 2011);
- ▶ Déplacer les installations aquacoles lorsque cela est possible; p. ex. des lagunes vers la mer.

2.1.3.5 Conclusion

Les modifications des propriétés physico-chimiques de l'eau et de la qualité des habitats dues aux changements climatiques auront des répercussions sur ce secteur économique important au Québec. De plus, les aléas climatiques, dont on prévoit une augmentation de l'intensité et de la fréquence dans le climat futur, représentent une menace pour les équipements de pêche et les installations portuaires et aquacoles. De manière générale, dans le contexte d'une utilisation durable des ressources vivantes, la première mesure d'adaptation aux changements climatiques est de préserver la biodiversité, la qualité des habitats et la capacité de support des écosystèmes aquatiques afin que nous puissions continuer, sous le climat futur, à bénéficier des services écologiques qu'ils nous procurent et sur lesquels repose entièrement le secteur des pêches et de l'aquaculture, notamment les services d'approvisionnement, récréatifs et culturels (Siron, 2014; Siron et Bourduas-Crouhen, 2015).

Compte tenu de l'importance socio-économique de ce secteur dans certaines régions du Québec, on doit constater qu'il y a encore peu d'études qui se sont penchées sur l'impact des changements climatiques sur les espèces et les populations exploitées au Québec et encore moins sur les impacts des changements climatiques sur l'aquaculture. Pourtant, la littérature scientifique nous indique, sur la base de recherches faites ailleurs, qu'on doit anticiper des impacts assez marqués sur la productivité halieutique. Ces impacts devront être précisés selon les espèces, les méthodes de pêches utilisées et les écosystèmes aquatiques concernés afin de recommander les mesures d'adaptation les plus pertinentes pour ce secteur au Québec.



2.1.4 Énergie

Auteur principal : René Roy (Hydro-Québec/Ouranos)

Réviseurs : Jacinthe Clavet-Gaumont, Élyse Fournier et Claude Desjarlais (Ouranos)

Faits saillants

- ▶ Une suite d'événements météorologiques extrêmes, ainsi qu'une succession inhabituelle d'années de faible hydraulité, ont amené les autorités concernées à prendre conscience de la vulnérabilité du système d'approvisionnement en hydroélectricité du Québec ainsi que des infrastructures de transport et de distribution d'électricité au climat.
- ▶ L'industrie de l'électricité au Québec et au Canada pourrait être l'une des plus directement touchées par les changements climatiques, alors que les impacts toucheraient à la fois la capacité de production ainsi que les infrastructures de transport et de distribution d'électricité.
- ▶ À l'horizon 2050, des augmentations (très probables) des débits annuels moyens de l'ordre de 12 % sont anticipées dans la portion Nord du Québec, alors que pour le sud, les augmentations (probables) sont de l'ordre de 5 %.
- ▶ On anticipe des crues printanières plus hâtives d'une ou deux semaines et une augmentation au nord de leur volume et intensité dans la majorité des cas, ainsi que des débits hivernaux plus élevés.
- ▶ Une augmentation des températures en hiver aura pour conséquence une baisse de la demande en énergie pour le chauffage qui ne sera compensée que partiellement en été par une augmentation de la demande pour la climatisation.
- ▶ Globalement, la demande en énergie dans l'ensemble des secteurs (résidentiel, industriel, commercial et institutionnel) serait réduite de 2,7 % par rapport à ce qu'elle serait sans changements climatiques selon le scénario médian à l'horizon 2050.
- ▶ La fréquence et l'intensité de certains événements climatiques extrêmes tels que vents violents, orages, sécheresses, feux de forêt majeurs, pluies torrentielles/déluges, inondations, verglas, ouragans, tornades, foudres, durée et amplitude des températures extrêmes, etc., pourraient avoir des conséquences importantes pour les infrastructures de transport et de distribution d'électricité exposées aux aléas climatiques.
- ▶ Au Québec et au Canada, la stratégie globale de la gestion des actifs (équipements, composants, structures) dans un environnement plus hostile pourrait exiger des mesures d'adaptation de nos pratiques de conception et d'entretien.
- ▶ Il est important de considérer les avantages d'adapter le mode de gestion et/ou de conception des centrales et réservoirs hydroélectriques à l'évolution des régimes hydrologiques. Tant les mesures non structurales (adaptation des règles de gestion) que structurales (ajout de turbines ou redimensionnement d'équipements) pourraient permettre de tirer avantage des conditions hydrométéorologiques à venir.

Une suite d'événements météorologiques extrêmes, ainsi qu'une succession inhabituelle d'années de faible hydraulité, ont amené les autorités concernées à prendre conscience de la vulnérabilité du système d'approvisionnement en hydroélectricité du Québec ainsi que des infrastructures de transport et de distribution d'électricité au climat. C'est ainsi que les acteurs du secteur de l'énergie ont développé les connaissances permettant d'anticiper les impacts potentiels des changements climatiques pour mieux s'y adapter. C'est dans cet esprit que des efforts significatifs ont été mis en place chez Ouranos pour approfondir les impacts des changements climatiques sur l'ensemble de l'industrie de l'énergie et plus particulièrement sur la production hydroélectrique et sur la demande des diverses formes d'énergie. Malgré les développements récents du potentiel éolien du Québec, nous avons consacré peu d'efforts à l'analyse des impacts des changements climatiques étant donné les incertitudes élevées associées à la projection des vents au cours des prochaines décennies.

2.1.4.1 Les impacts

La production hydroélectrique

Les impacts des changements climatiques sur les ressources hydriques sont multiples et affecteront divers domaines comme l'approvisionnement en eau potable, la navigation, l'irrigation agricole et la préservation des habitats fauniques. La disponibilité des ressources hydriques notamment exploitées à des fins de production hydroélectrique sera aussi affectée et son évolution intra-annuelle se situe au cœur des préoccupations des gestionnaires et des usagers de cette précieuse ressource. Depuis 2002, les chercheurs d'Ouranos et leurs collaborateurs ont réalisé plusieurs travaux d'analyse sur les impacts des changements climatiques sur les ressources hydriques. Au cours des dernières années, le nombre de projections climatiques, de modèles d'hydrologie et de méthodes d'analyses s'est multiplié. Une plus grande confiance règne maintenant quant à l'utilisation des résultats et il devient alors possible de les utiliser comme intrants pour l'évaluation des conséquences sur la gestion et la conception des ouvrages hydrauliques, ainsi que sur la planification du parc d'équipements.

En considérant la durée de vie des installations hydroélectriques, il est permis de croire que les changements climatiques modifieront la productivité des installations déjà existantes. La pertinence et la nécessité de prendre en compte les impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique de certaines rivières dans un contexte de réfection d'ouvrages hydrauliques doivent être évalués dans cette perspective d'évolution du régime hydrologique. Les chercheurs du consortium Ouranos et leurs collaborateurs se sont penchés sur cette importante question.

Les plus récentes analyses issues du projet (cQ)²³ sur les impacts des changements climatiques sur l'hydrologie au Québec, qui met en commun les efforts en matière de recherche hydroclimatique d'Ouranos, Hydro-Québec, du Centre d'expertise hydrique du Québec et de Rio Tinto Alcan indiquent à l'horizon 2050 des augmentations des débits annuels moyens de l'ordre de 12 % dans la portion nord qui sera la plus affectée (secteur de la Baie-James) et de 5 % dans le sud (secteur de l'Outaouais), tel qu'illustré à la figure 2-8.

Ces projections ont été obtenues à l'aide d'un ensemble de scénarios de températures et de précipitations provenant de différents modèles climatiques globaux et régionaux utilisés comme intrants pour simuler les débits futurs à l'aide du modèle hydrologique HSAMI.

³ (cQ)² désigne un projet de collaboration dont l'acronyme signifie Impact des changements climatiques sur l'hydrologie (Q) au Québec

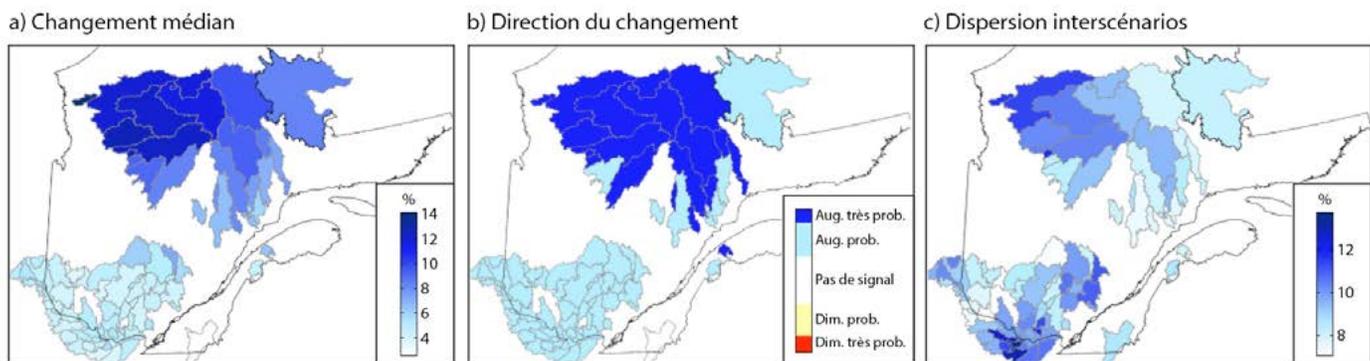


Figure 2-8 Changement des débits à l'horizon 2050 a) changement médian des débits moyens par l'ensemble (cQ)² sur les bassins hydrologiques d'Hydro-Québec, b) consensus entre les différents scénarios climatiques sur la direction du changement et c) écart entre les scénarios.

Source : Guay et al. (2015).

Au-delà du signal de changement du débit annuel moyen à l'horizon 2050, la figure 2-8 permet également de qualifier le niveau de consensus parmi l'ensemble des simulations réalisées. Ainsi, la figure 2-8b montre que dans le Nord du Québec, le signal de changement est très probable puisque plus de 90 % des scénarios hydrologiques projetant un changement positif alors que dans le sud cette augmentation est qualifiée de probable avec plus de 60 % des scénarios qui pointent dans le sens d'un changement positif. Le panneau c) de la figure 2-8 illustre l'amplitude des différences entre les projections de changements pour chacun des bassins versants considérés. En comparant les figures 2-8a) et 2-8c) on constate que l'ampleur du changement de débit annuel moyen (a) pour le Nord du Québec est supérieure à l'écart entre les divers scénarios (c), ce qui nous donne confiance dans l'information produite. Cette conclusion ne s'applique néanmoins pas pour le sud du Québec, région pour laquelle le changement est relativement faible alors que l'écart entre les divers scénarios est grand et même supérieur.

Il est important de noter que l'horizon 2050 a été ciblé pour quantifier les changements attendus, mais que ceux-ci persistent au-delà de 2050, de sorte que les apports pourraient encore augmenter de manière importante à l'horizon 2100.

La figure 2-9 permet d'apprécier pour sa part l'évolution du cycle annuel des débits pour quelques rivières de la Côte-Nord. Chacun des panneaux de la figure 2-9 représente l'enveloppe des hydrogrammes annuels moyens de la période de référence (1971-2000 : enveloppe bleue) ainsi que de la période future (2041-2070 : enveloppe rouge). Les principaux changements apparaissent là où les deux enveloppes ne se superposent pas. Les résultats de ces travaux, valables pour le reste du Québec, suggèrent des crues printanières plus hâtives d'une ou deux semaines et une augmentation de leur intensité dans la majorité des cas, ainsi que des débits hivernaux plus élevés. Les changements significatifs dans le cycle annuel pourraient nécessiter de revoir les règles de gestion afin d'optimiser l'usage de la ressource (Roy et al., 2008). Les conclusions découlant d'études plus récentes vont dans le même sens (Arsenault et al., 2013).

Au-delà de l'évolution de la disponibilité en eau ou du régime hydrologique annuel évoqué plus haut, l'estimation des impacts de l'évolution du climat sur des débits extrêmes s'avère essentielle dans une perspective de dimensionnement d'ouvrages de contrôle hydraulique. Dépendamment de l'envergure de

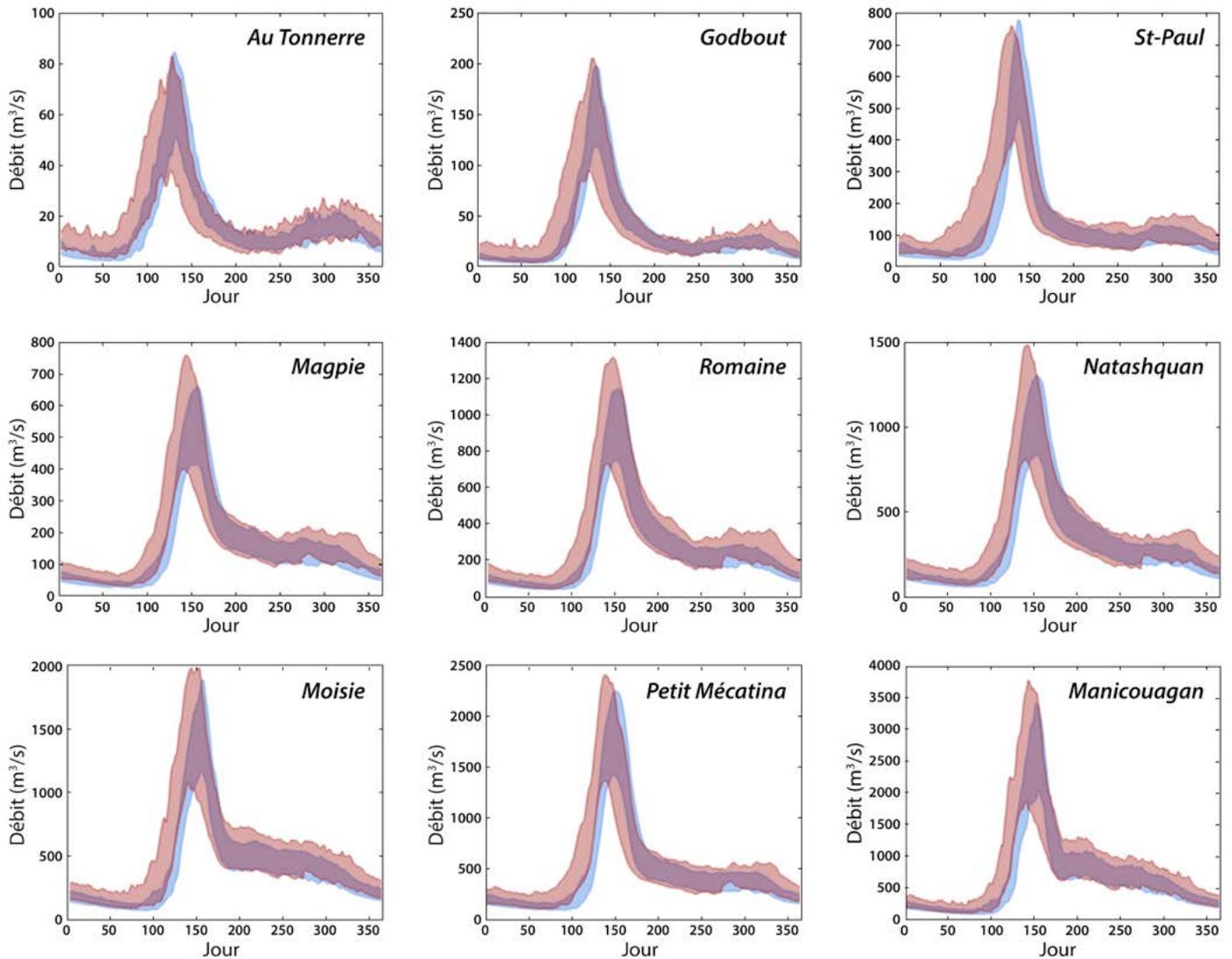


Figure 2-9 Comparaison de l'ensemble des débits simulés pour la période de référence (1971-2000 enveloppe bleue) avec les débits simulés pour la période future (2041-2070 enveloppe rouge) pour 9 bassins de la région de la Côte-Nord. Source : Thiémonge et Clavet-Gaumont (2014).

l'ouvrage considéré, on peut vouloir qu'il soit conçu de manière à pouvoir résister à des débits élevés de faible récurrence. Par exemple, un grand barrage hydroélectrique est généralement dimensionné pour des crues extrêmes ayant une chance sur 10 000 de survenir, ou dans le jargon des concepteurs d'ouvrages, de débit ayant une période de retour de 10 000 ans. Clavet-Gaumont et Thiémonge (2014) ont analysé l'évolution des volumes de crues printanières de périodes de retour de 2, 10, 20, 50, 100, 1000 et 10 000 ans pour les neuf bassins de la Côte-Nord traités à la section précédente (Clavet-Gaumont et Thiémonge, 2014; Thiémonge et Clavet-Gaumont, 2014). On conclut de façon générale à une augmentation de l'intensité d'événements de faible récurrence pour l'ensemble de la région d'étude pour chacune des périodes de retour.

La figure 2-10 illustre le changement projeté pour les événements de récurrence de 20 ans pour les bassins versants étudiés. À l'horizon 2050, on peut constater une augmentation d'environ 5 % des volumes de crue pour l'ensemble des bassins (à une exception près). Compte-tenu des conséquences majeures associées aux bris d'ouvrages hydrauliques, il y aurait certainement avantage à prévoir des mesures d'adaptation à ces événements de grande intensité, afin d'assurer l'intégrité des ouvrages hydrauliques de cette région.

Alternativement à l'estimation statistique des événements hydrologiques extrêmes évoquée plus haut, la conception d'ouvrages hydrauliques d'importance peut également reposer sur une approche à base physique, soit l'estimation de la crue maximale probable (CMP). Ainsi, les barrages de plusieurs provinces canadiennes sont conçus de manière à résister à une CMP conformément aux recommandations de l'Association canadienne des barrages. Cette approche est exigée afin d'assurer la sécurité de certains

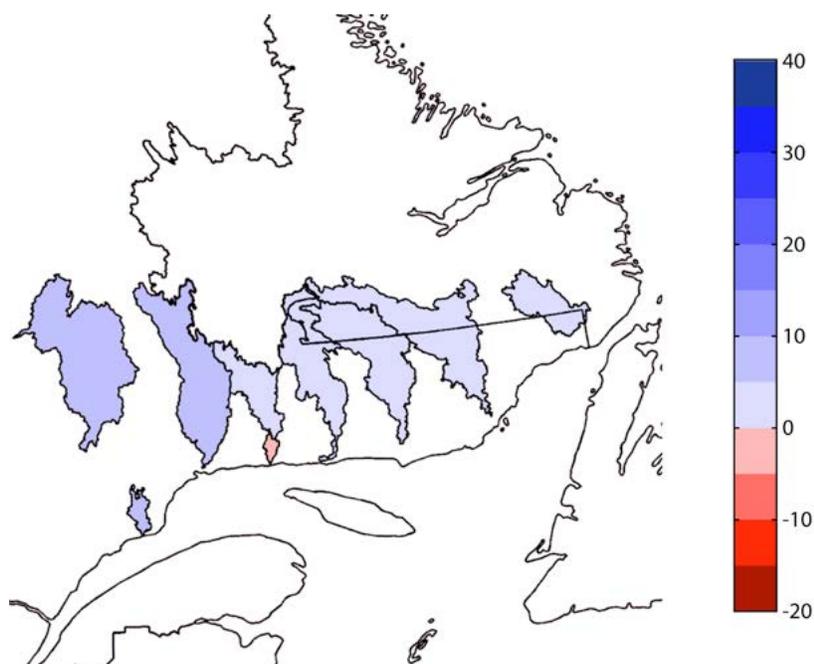


Figure 2-10 Moyenne des changements projetés (en %) des volumes de crue printanière pour quelques bassins versants de la Côte-Nord associés à une période de retour de 20 ans

Source : Clavet-Gaumont et al. (2013)

ouvrages de retenue au Canada et dans plusieurs états américains. Une CMP est définie comme étant la crue qui se produirait si les conditions météorologiques les plus sévères étaient observées à un endroit et à une heure spécifique. Généralement, la CMP se produit au Québec soit au printemps, suite à la fonte d'un important couvert neigeux ou bien plutôt en automne en raison des précipitations extrêmes. Il est évident qu'en cas de rupture de barrage, les impacts sur la sécurité des citoyens, sur l'environnement, et conséquemment sur l'économie seraient substantiels et la détermination de la CMP constitue donc un enjeu important de sécurité publique pour les propriétaires et exploitants de structures hydrauliques.

Rousseau *et al.* (2012) ont analysé la sensibilité du calcul de la CMP au changement climatique pour les bassins versants du lac Kénogami (région du Saguenay) et du réservoir Choinière (région de l'Estrie), au Québec. La figure 2-11 montre les résultats de ces calculs pour le bassin du lac Kénogami (résultats pour le réservoir Choinière non illustrés) à partir de trois simulations du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC4), utilisées en intrant par deux modèles hydrologiques SSARR et HYDROTEL, pour deux horizons temporels et pour les périodes été-automne et hiver-printemps. Chacun des bâtonnets indique le

changement (%) maximal, minimal et intermédiaire de la CMP selon les 3 simulations du MRCC4. L'analyse du graphique suggère une augmentation relative pour les deux types de CMP (hiver-printemps vs été-automne) avec une variation positive plus importante pour la CMP d'été-automne et à l'horizon 2040-2080. Ces résultats semblent peu sensibles au choix du modèle d'hydrologie (SSARR vs Hydrotel).

Notons par ailleurs que pour toutes les périodes et tous les modèles hydrologiques confondus, une augmentation moyenne de 18 % est prévue pour le bassin Kénogami alors que le bassin Choinière ne connaîtrait qu'une augmentation de l'ordre d'environ 3 % (non illustrés sur la figure 2-11). Ceci démontre la sensibilité des résultats au bassin versant à l'étude. Une nouvelle étude en cours permettra de tester l'approche pour un plus grand nombre de bassins à travers le Canada en utilisant un plus grand nombre de simulations régionales du climat.

Ces changements projetés quant aux diverses variables présentées précédemment laissent présager des impacts importants pour les entreprises hydroélectriques. En particulier, en ce qui concerne Hydro-Québec, l'hydraulité joue un rôle majeur dans le calcul des bénéfices de l'entreprise. Dans son tout dernier plan stratégique (2009-2013), Hydro-Québec à l'aide d'une analyse de sensibilité a quantifié les nombreux risques qui pourraient affecter son bénéfice net. Outre les risques liés au volume des ventes, à l'exportation ainsi que les risques financiers, les conditions d'hydraulité représentent l'un des risques principaux. Dans ce contexte et en connaissance de cause de l'impact des changements climatiques sur l'hydraulité, il est capital d'inclure dans les prévisions un facteur de changement climatique.

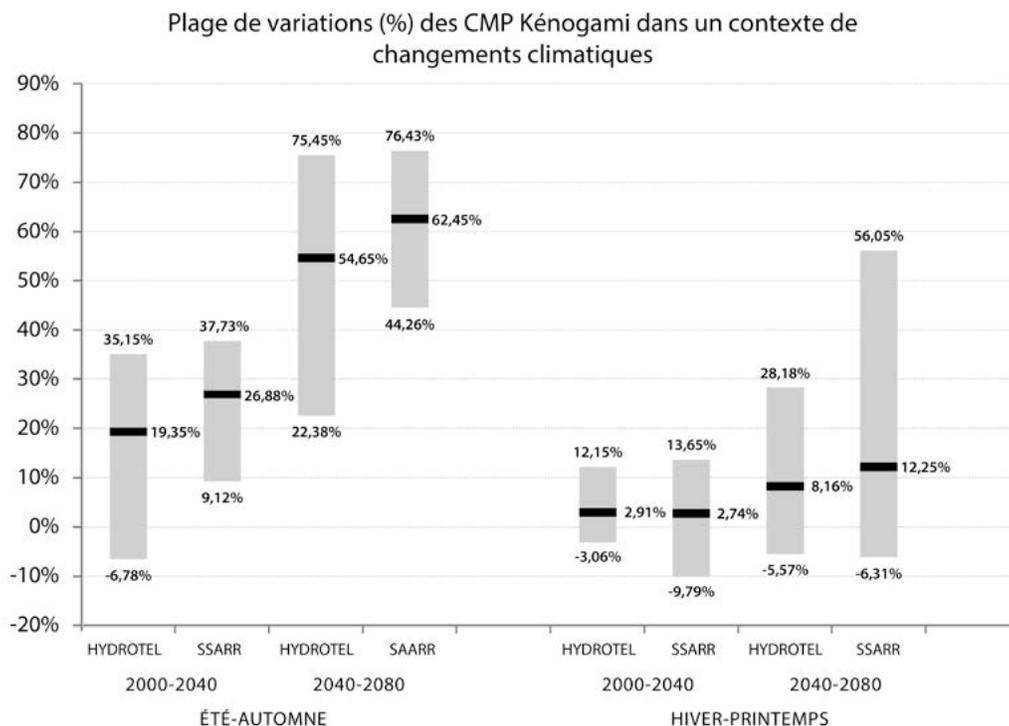


Figure 2-11 Changement projeté (en %) des CMP été-automne et CMP hiver-printemps du bassin Kénogami selon trois simulations du MRCC4, à l'aide de deux modèles hydrologiques (SSARR et HYDROTEL) et pour deux périodes (2000-2040 et 2040-2080)

Source : Rousseau et al. (2012)

Comme mentionné précédemment, les risques liés à la vente et à l'exportation d'électricité sont également des facteurs clés qui sont aussi influencés par le climat. La demande en énergie au Québec, ailleurs au Canada, ainsi que dans les états américains a un impact significatif sur les revenus d'Hydro-Québec. La section suivante porte justement sur la question de la demande énergétique au Québec.

La demande énergétique

Au Québec, outre l'effet sur la production d'électricité, l'impact des changements climatiques sur la demande en énergie sera aussi très significatif d'un point de vue économique. La demande d'énergie est étroitement liée à l'économie d'une région ou d'un pays, mais aussi au climat, les régions jouissant d'un climat plus tempéré ayant, pour un même niveau de développement économique et d'efficacité énergétique ainsi qu'une structure industrielle comparable, une consommation d'énergie inférieure. L'étude réalisée en 2006 sur l'impact des changements climatiques sur la demande en énergie (Lafrance et Desjarlais, 2006) démontre qu'une augmentation des températures en hiver aura pour conséquence une baisse de la demande en énergie pour le chauffage qui ne sera compensée que partiellement en été par une augmentation de la demande pour la climatisation. De même, le rapport technique sur les impacts des changements climatiques publié par la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie en 2011, soulignait que le Canada, situé dans un climat plus froid, peut s'attendre à bénéficier davantage de besoins réduits pour le chauffage qu'il ne risque de perdre en raison d'une augmentation des besoins en climatisation (TRNEE, 2011b).

En effet, les besoins de chauffage sont en fonction du nombre de degrés de température inférieurs à une température minimale de confort (degrés-jours de chauffage) pour une région et un type d'habitation donnés. Une augmentation des températures inférieure à ce niveau de confort se traduit donc par une diminution du besoin de chauffage. 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 du taux de pénétration des équipements qui est lui-même en bonne partie fonction du niveau de températures, notamment en ce qui concerne l'usage d'un climatiseur central, comme le démontre sa prévalence dans les régions plus au sud.

Ainsi, d'après l'étude réalisée en 2006 (Lafrance et Desjarlais, 2006) dans un scénario climatique médian, les besoins en énergie du secteur résidentiel au Québec diminueraient en 2030 dans un scénario médian de 6,7 % et de 6,9 % en 2050. On notera dans le tableau 2-1 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 %.

Pour sa part, selon la même étude, la demande d'énergie dans le secteur commercial et institutionnel dans un scénario médian baisserait en 2050 de 10 % en raison des économies de chauffage et augmenterait 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.

L'impact sur la demande d'électricité du secteur résidentiel et du secteur commercial et institutionnel est également significatif, quoique moindre, en raison de l'utilisation importante des combustibles aux 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 pénétration des systèmes de climatisation dans les établissements de santé expliquent en partie les résultats.

Tableau 2-1 Impact (%) des changements climatiques sur le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel

	Sur la demande totale d'énergie (%)			Sur la demande d'électricité (%)		
	Chauffage	Climatisation	Net	Chauffage	Climatisation	Net
Scénario						
2030						
Optimiste	-7,5	3,4	-4	-5,8	4,3	-1,5
Médian	-11	4,4	-6,7	-8,6	5,5	-3,1
Pessimiste	-15,7	6,4	-9,2	-12,1	8,1	-4
2050						
Optimiste	-10,5	5,5	-5,1	-8,5	6,6	-1,9
Médian	-15,2	8,3	-6,9	-12,3	10	-2,3
Pessimiste	-21,1	12,3	-8,8	-17,1	14,8	-2,3

Source : Lafrance et Desjarlais (2006)

Enfin, il est intéressant de noter que l'impact sur la demande de pointe en hiver pourrait être encore plus important, car les vagues de froid au sud du Québec sont appelées à diminuer de façon encore plus marquée que la réduction des degrés-jours, avec une quasi-disparition des températures inférieures à -25 °C.

Globalement, la demande en énergie dans l'ensemble des secteurs (résidentiel, commercial, institutionnel et industriel) serait réduite selon le scénario médian à l'horizon 2050 de 2,7 % par rapport à ce qu'elle serait sans changements climatiques. De plus, comme la réduction des besoins en chauffage affecte à la fois les combustibles fossiles et l'électricité, alors que l'augmentation des besoins en climatisation ne touche que cette dernière forme d'énergie, 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. Par ailleurs, comme ces économies touchent davantage les combustibles importés, elles contribuent à l'amélioration de la balance commerciale du Québec de façon très significative.

Un nouveau projet d'étude sur la demande d'énergie est en voie de réalisation permettant de mieux tenir compte de certains aspects moins analysés lors de la première étude notamment la diffusion des climatiseurs et l'évolution de la demande de pointe.

Par ailleurs, des scénarios de changements climatiques à plus court terme produits par Ouranos ont été utilisés par la division Distribution d'Hydro-Québec pour simuler les impacts de ces derniers sur les prévisions de demande d'électricité. Selon le scénario de 2007, l'augmentation prévue de la température moyenne réduirait les besoins énergétiques de près de 1 TWh (0,5 % de baisse) par an en raison de la réduction des besoins de chauffage. Par ailleurs, Hydro-Québec prévoit une réduction de 350 MW des charges de pointe (1,0 % de baisse) dans un contexte de changements climatiques (ESMAP, 2012). Ces prévisions d'une réduction de la demande d'électricité ont été intégrées à l'établissement des tarifs annuels d'Hydro-Québec, ainsi qu'à son plan d'approvisionnement pour 10 ans qui ont tous deux été approuvés par la Régie de l'Énergie.

Dans le but d'étudier l'effet des changements climatiques sur la demande de pointe hivernale, Ouranos a étudié les projections climatiques de températures quotidiennes minimales hivernales ainsi que leur variabilité sur le sud du Québec (Casati et de Elía, 2014). Pour la période hivernale, la tendance des minimums annuels des températures moyennes quotidiennes, ainsi que la tendance de leur variabilité ont été analysées en utilisant les distributions généralisées des valeurs extrêmes. Pour les mois de décembre, janvier et février, les projections climatiques montrent une augmentation significative des températures minimales et moyennes. De plus, l'augmentation anticipée des températures minimales est plus importante que l'augmentation des températures moyennes hivernales. D'autre part, la variabilité des températures minimales hivernales ne montre pas de tendance significative. En conséquence, les demandes de pointes hivernales associées au chauffage électrique résidentiel pourraient bien être moins importantes à l'avenir.

Dans l'évaluation nationale américaine du *United-States Global Research Program* (Dell *et al.*, 2014), on estime au contraire, en raison d'une situation plus méridionale, que les changements de température entraîneront un accroissement net de la demande d'électricité aux États-Unis dans le secteur résidentiel. L'augmentation de la demande pour la climatisation excédera les économies d'électricité réalisée dans le chauffage. Une étude sur la consommation par État indique une augmentation de 11 % de la demande énergétique (Deschênes et Greenstone, 2011). Une autre rapporte une augmentation de la dépense énergétique de 10 % vers la fin du siècle avec une augmentation des températures de 4,5 °F et de 22 % pour un réchauffement global de 9 °F (Mansur *et al.*, 2008). Des technologies plus efficaces énergétiquement pourraient contribuer à réduire cette croissance. D'ailleurs, l'*Energy Information Agency*, en réponse à l'augmentation des températures des dernières décennies, a commencé à utiliser les moyennes des dix dernières années plutôt que les moyennes sur trente ans pour estimer les besoins en énergie de chauffage et de climatisation, considérant que cette période plus courte était plus cohérente avec la tendance observée.

Le transport et la distribution d'électricité

La fréquence et l'intensité de certains événements climatiques extrêmes tels que vents violents, orages, sécheresses, feux de forêt majeurs, pluies torrentielles/déluges, inondations, verglas, ouragans, tornades, foudres, durée et amplitude des températures extrêmes, etc., pourraient avoir des conséquences importantes pour les infrastructures de transport et de distribution d'électricité. De nombreuses recherches sont réalisées aux niveaux national et international afin d'essayer de comprendre et de quantifier l'impact de ces changements sur les secteurs et infrastructures vitaux de la société (Aecom, 2012; Hawes *et al.*, 2014; Hoffman *et al.*, 2010; Kenward et Raja, 2014; National Grid, 2010; DOE, 2013; Western Power Distribution, 2011).

Au Québec et au Canada, la stratégie globale de la gestion des actifs (équipements, composants, structures) dans un environnement plus hostile, pourrait exiger des mesures d'adaptation de nos pratiques de conception et d'entretien. Malheureusement, peu d'analyses d'impacts ont à cette date été réalisées dans ce domaine au Québec. Au nombre des questions auxquelles la science devra répondre au profit des transporteurs et distributeurs d'électricité, celles-ci s'avèrent particulièrement pertinentes :

- ▶ La performance attendue des équipements se dégrade-t-elle au-delà des tolérances admissibles dans les conditions d'opération hostiles?
- ▶ La fiabilité et la disponibilité seraient-elles affectées et comment?
- ▶ L'intégrité physique et structurelle serait-elle menacée?
- ▶ La durée de vie serait-elle diminuée?

À défaut d'avoir à ce jour des réponses précises à ces questions, on doit s'y attarder de manière proactive, plutôt que réactive et envisager les mesures d'adaptation requises. Il est donc important de bien définir un programme de recherche afin d'établir un lien clair entre les variables décrivant les changements climatiques, leur fréquence et leur intensité avec les paramètres et variables techniques liés à la gestion des actifs des entreprises transportant et distribuant l'électricité. Les résultats de ces recherches fourniront les éléments de réponses aux questions énumérées ci-dessus et permettront d'identifier les pistes prioritaires qui aideront les entreprises à améliorer leurs programmes de gestion des actifs. De plus, des outils d'aide à la décision devront être développés ou ceux existants améliorés afin d'intégrer l'aspect des changements climatiques.

Les connaissances insuffisantes de l'impact des changements climatiques sur les infrastructures de transport et de distribution d'électricité risquent d'engendrer, à moyen et long terme, des pertes considérables reliées au maintien de l'aptitude au service des actifs ainsi qu'à des interruptions de service accrues. L'utilisation de modèles prédictifs permettra d'atténuer ces effets négatifs en identifiant les domaines où les plus grandes pertes sont anticipées et de les réduire en apportant ou modifiant nos règles de gestions actuelles.

2.1.4.2 L'adaptation

Il est intuitif de croire qu'en augmentant le débit annuel moyen, il y aura nécessairement une augmentation de production d'hydroélectricité au Québec. En vérité, si cette augmentation survient à des moments où les réservoirs sont près de leur capacité d'emmagasinement maximal, les bénéfices associés à ces surplus d'eau pourraient s'avérer limités. Il est donc important de considérer les avantages d'adapter le mode de gestion des centrales et réservoirs hydroélectriques à l'évolution des régimes hydrologiques. Une étude de cas (Minville, Leconte) a permis de constater qu'en 2050, sans mesure d'adaptation des pratiques de gestion, la production d'hydroélectricité pourrait diminuer jusqu'à 14 % (ESMAP 2012) en raison notamment de l'augmentation des déversements improductifs. Cependant, l'adaptation du mode d'exploitation pourrait prévenir les pertes de production et même augmenter la production de 1 à 15 % (ESMAP 2012).

Arsenault *et al.* (2013) ont analysé les bénéfices potentiels associés à des mesures d'adaptation structurales et non structurales pour trois centrales exposées aux impacts attendus de l'évolution des conditions hydroclimatiques. À partir de cette expérience, on en conclut que tant les mesures non structurales (adaptation des règles de gestion) que structurales (ajout de turbines) permettent d'accroître la production hydroélectrique et qu'à elle seule, l'adaptation des règles de gestion, mesure relativement beaucoup moins coûteuse que l'ajout de surcapacité, permet de tirer l'essentiel des bénéfices induits par une augmentation de la disponibilité des ressources en eau projetée.

Bien que les connaissances des impacts associés à l'évolution des conditions de régime hydrologique aient progressé considérablement au cours des dernières années, il reste encore beaucoup de travail à accomplir pour valoriser convenablement l'information pour la mise en œuvre de mesures d'adaptation. À cet égard, du côté de la prévision à plus long terme de la demande électrique, Ouranos s'est engagé à produire des scénarios d'évolution des températures (moyennes et extrêmes) afin d'aider Hydro-Québec Distribution à réaliser les analyses d'impacts proprement dites ainsi que les mesures d'adaptation à mettre en œuvre.

Dans un climat en constante évolution, une méthode de gestion adaptative est à favoriser. Les avantages d'une telle approche sont décrits dans un rapport de Roy *et al.* (2008). Le tableau suivant (tableau 2-2) présente une liste non exhaustive de diverses mesures d'adaptation des ouvrages hydrauliques classées en deux catégories : structurales ou non structurales

Tableau 2-2 Instruments d'adaptation des ouvrages hydrauliques aux conditions hydroclimatiques en évolution

<i>Instruments non structureaux</i>	<i>Intruments structureaux</i>
<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 (conditions et 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 composants 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'aménée ou des conduites • Modification du nombre ou de la taille des turbines • Augmentation de la capacité de l'évacuateur de crue

Source : adapté de Roy et al. (2008).

Du côté de la demande, diverses mesures d'adaptation peuvent aussi être envisagées. Si la diminution des besoins en chauffage en hiver ne demande pas d'adaptation particulière, il est possible de réduire l'augmentation anticipée des besoins en climatisation par diverses mesures d'efficacité énergétique des bâtiments, l'amélioration de la performance des systèmes de climatisation ou encore par des aménagements urbains permettant de réduire les températures ambiantes en été.

2.1.4.3 Conclusion

Depuis les dernières années, beaucoup d'efforts ont été déployés afin de comprendre et de cerner l'impact d'un climat en évolution sur le régime hydrique et les conséquences connexes sur la production, la demande ainsi que sur le transport de l'électricité produite par Hydro-Québec. Des efforts moindres ont aussi été consacrés à l'étude des impacts des changements climatiques sur la demande d'énergie sous toutes ses formes. Généralement, il en résulte que le Québec connaîtra une augmentation de ses débits moyens, avec une plus grande augmentation pour les bassins nordiques. Du côté des extrêmes, l'analyse sur les bassins de la Côte-Nord a montré une augmentation d'environ 5 % des événements de récurrence 20 ans. Aussi, la saisonnalité sera affectée avec un devancement de l'ordre d'une à deux semaines du début de la crue printanière.

Les vulnérabilités des activités reliées au domaine de l'hydroélectricité au Québec ont été mises de l'avant et bien que les bases méthodologiques pour effectuer les analyses d'impact ne cessent de s'améliorer, il est maintenant possible de penser à mettre en place des méthodes d'adaptations pour réduire le risque des changements climatiques sur l'ensemble des sphères de cette industrie et même en tirer profit. Dans cette optique, des efforts au sein d'Ouranos sont consacrés pour recenser les mesures d'adaptation aux changements climatiques mis en œuvre dans le domaine de l'énergie à travers le monde. Cela permettra de bénéficier de nouvelles idées et d'exemples concrets de méthodes d'adaptation à utiliser dans le cadre d'une gestion adaptative.



2.1.5 Tourisme et loisirs

Auteure principale : Kate Germain (Chaire de tourisme Transat ESG-UQAM)

Collaboratrice : Stéphanie Bleau (Chaire de tourisme Transat ESG-UQAM)

Faits saillants

- ▶ Trop peu d'informations existent actuellement au sujet des impacts des changements climatiques et de leurs conséquences pour les PME touristiques du Québec en dépit des effets en cascade sur cette industrie. Les plus dynamiques cherchent d'abord et avant tout à conserver la qualité de l'offre, à développer des produits plus résilients et à saisir certaines opportunités nouvelles causées par le changement climatique.
- ▶ La diversification des activités avec une programmation étendue sur quatre saisons est une mesure d'adaptation souvent employée par l'industrie touristique.
- ▶ Selon les projections pour 2020, les régions des Cantons-de-l'Est et des Laurentides, reconnues pour leur villégiature et leurs activités de plein air diversifiées, profiteront de gains économiques estivaux tandis que l'on anticipe des pertes pour les activités hivernales, davantage pour le ski de fond et la motoneige. Toutefois, en l'absence de mesures d'atténuation et d'adaptation face aux changements climatiques anticipés, les gains estivaux risqueraient de ne pas être suffisants pour compenser les pertes hivernales dans ces deux régions.
- ▶ Les répercussions diversifiées spatialement pourraient influencer les relations concurrentielles entre les grandes destinations récréotouristiques de plein air des différentes régions touristiques du Québec.

2.1.5.1 La situation actuelle en tourisme

Les activités touristiques saisonnières jouent un rôle moteur pour l'économie des communautés et des régions (CQRHT, 2010; Gouvernement du Québec, 2012b). En effet, 65 % des 29 500 petites et moyennes entreprises de l'industrie touristique du Québec se situent à l'extérieur des régions de Montréal et de Québec. Au total, ce secteur génère 12,4 milliards de dollars de recettes touristiques, dont 30 % proviennent de la clientèle hors Québec, ainsi que 423 000 emplois, incluant 140 000 emplois directs (Tourisme Québec, 2013).

Ce n'est que récemment que l'intérêt pour l'enjeu climatique et ses effets directs et indirects sur l'offre et la demande s'est manifesté au sein même de la communauté assez restreinte de chercheurs et d'acteurs du milieu des affaires. Dans le secteur touristique, le gestionnaire doit s'adapter rapidement à des facteurs exogènes tels la progression démographique, l'évolution technologique, la pénurie de main-d'œuvre annoncée (CQRHT, 2010), la compétitivité accrue entre les destinations et désormais, le réchauffement climatique global. Les observations maintenant appuyées par plusieurs études scientifiques récentes confirment la vulnérabilité des patrimoines biologique et écologique québécois aux changements climatiques (Allard et Pollard, 2011; Berteaux *et al.*, 2014; Clerc *et al.*, 2012a; Savard, 2010; Savard *et al.*, 2014). Toutefois, on recense peu d'information actuellement au sujet des impacts des changements climatiques et leurs implications pour les PME touristiques du Québec en dépit des effets sur cette industrie (REDD, 2011). Les plus dynamiques cherchent d'abord et avant tout à conserver la qualité de l'offre, à développer des produits plus résilients et à saisir certaines opportunités nouvelles causées par le changement climatique.

2.1.5.2 Impacts et vulnérabilités

Une étude récente s'est penchée sur l'analyse des risques et des vulnérabilités socioéconomiques associés aux pratiques saisonnières dans les Cantons-de-l'Est et les Laurentides, deux régions reconnues pour leur villégiature et activités de plein air diversifiées (Bleau et al., 2012). Réalisé en étroite collaboration avec des gestionnaires des milieux public et privé (plus de 200 PME) et des associations régionales et locales, ce projet énumère un certain nombre de répercussions sur les cinq secteurs étudiés dont le camping, le golf, la motoneige, les parcs nationaux, les attrait thématiques, le ski alpin et le ski de fond (tableau 2-3). Selon les participants, le nombre de menaces dépasse celui des opportunités et 84 % d'entre eux ont déjà vécu un événement météorologique causant des conséquences importantes au sein de leur entreprise. Dès lors, les exploitants réagissent à certains phénomènes tels la réduction des accumulations de neige au sol, les saisons décalées, l'intensité des vents, la variation des niveaux d'eau et l'imprévisibilité interannuelle des conditions climatiques saisonnières.

Ces conditions climatiques influencent la demande (comportement et flux de la clientèle), l'offre de certains produits, la structure administrative et opérationnelle, l'image et la réputation de l'entreprise, les coûts d'exploitation et les revenus nets (Bleau et al., 2012). La transformation de la chaîne d'approvisionnement de même que les aspects financiers (hausse des primes d'assurances, accès aux capitaux, crédit, rendement financier à long terme, liquidité), environnementaux (écosystèmes sensibles à haute valeur touristique), juridiques, politiques et réglementaires sont également des risques potentiels à considérer (REDD, 2011; TRNEE, 2012; UKCIP, 2010).

À ce jour, le climat et les événements météorologiques majeurs ne sont pas perçus comme un risque stratégique par le gestionnaire touristique québécois bien qu'ils influencent les entreprises à divers niveaux et ne puissent être maîtrisés par ces derniers. Ce sont plutôt la communication médiatique des conditions météorologiques et son imprévisibilité qui préoccupent le secteur, d'où l'importance d'agir sur les impacts à court, moyen et à long terme.

2.1.5.3 Impact projeté sur la demande

D'entrée de jeu, les scénarios climatiques de cette section fournissent des indications sur l'impact socioéconomique possible des changements climatiques sur les activités récréotouristiques, excluant tout autre facteur d'influence (économie, politique, technologie, investissement, etc.). Selon les projections pour 2020, les deux régions profiteront de gains économiques estivaux tandis que l'on anticipe des pertes pour les activités hivernales, davantage pour le ski de fond et la motoneige (cette dernière représente plus de 70 % des pertes). En l'absence de mesures d'atténuation et d'adaptation face aux changements climatiques anticipés, les gains estivaux risqueraient de ne pas être suffisants pour compenser les pertes hivernales, et ce, dans les deux régions (tableau 2-4).

- ▶ *Activités hivernales* : la saison raccourcira, mais plutôt dans les périodes limitrophes. Pour la motoneige, la baisse d'achalandage est proportionnelle au changement prévu de la durée de la saison. Or, les pratiques actuelles des motoneigistes se concentrent majoritairement en janvier et février, ce qui pourrait réduire les pertes estimées. Pour les stations de ski alpin et le ski de fond, la période de congés scolaires (Noël, semaine de relâche, etc.) constitue une fenêtre de haute fréquentation.
- ▶ *Activités estivales* : alors que les hausses anticipées de la pratique du golf et des visites dans les parcs thématiques (par exemple les parcs aquatiques, les zoos et autre petits parcs thématiques) étaient similaires, peu importe l'emplacement, les parcs nationaux et les campings situés dans la partie sud des Cantons-de-l'Est devraient, en général, enregistrer des hausses de fréquentation plus importantes. Néanmoins, la saisonnalité institutionnelle (notamment le début de l'année scolaire) aura une incidence sur la fréquentation de ces attractions.

Tableau 2-3 Effets des phénomènes climatiques observés sur les activités récréotouristiques pour les saisons hivernale et estivale

<i>Comportement de la clientèle</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Modification du comportement de la clientèle : déplacement vers d'autres régions/destinations • Variabilité de la durée des séjours et annulation spontanée • Augmentation de la fréquentation des sites naturels, des activités et des attraits • Hausse de la demande d'activité aquatique et nautique
<i>Gain ou perte d'activité</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de jours pour pratiquer les activités hivernales : la pêche blanche, le patin (glaces, niveaux d'eau) • Maintien de la qualité de l'offre (gel/dégel) • Réduction du nombre de jours avec une couverture de neige, allongement de la saison estivale • Possibilité de départ tardif et fermeture prématurée
<i>Administration, gestion des opérations et ressources humaines (entreprises)</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des coûts d'entretien et d'exploitation (damage, transport de neige, défis techniques) • Variation des investissements et des revenus • Modification de la durée de la saison d'opération (recrutement, mobilité, durée de l'emploi) • Hausse potentielle des coûts aux intersaisons • Évolution des stratégies marketing et des conditions d'embauche (expertise, flexibilité)
<i>Énergie et innovation technologique</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Accroissement du besoin de fabriquer et d'emmagasiner de la neige • Variation de la consommation énergétique (\$) • Besoin de technologie de pointe
<i>Environnement bâti et naturel</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Modification ou dégradation de la qualité des ressources naturelles et de l'esthétisme visuel des paysages • Dommage aux infrastructures d'accès et de services touristiques • Arrêt et interruption des services • Réorganisation spatiale, aménagement et entretien des pistes et sentiers (ski, motoneige, vélo, randonnée pédestre) • Diminution de la quantité et de la qualité de l'eau; érosion des berges et des plages • Modification des aires de répartition écologique et biologique
<i>Évènements météorologiques majeurs et sécurité publique</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Risques pour la clientèle et les employés (p. ex. feu de forêt, tornade, coup de vent violent, inondation, verglas) • Mise en place de mesures d'urgence préventives pour les PME • Communication et logistique — relai d'information rapide dans les médias et réseaux sociaux • Initiatives de relance des activités économiques des PME suite à un sinistre

Source : Blangy et. al. (2011)

Les répercussions diversifiées spatialement pourraient influencer les relations concurrentielles entre les grandes destinations récréotouristiques de plein air des différentes régions touristiques du Québec. Également, la comparaison avec les stations de ski du Nord-Est américain est stratégique, car un important bassin de skieurs s'y trouve. Dans cette région, seulement 56 des 103 stations pourraient être en mesure de maintenir une saison de 100 jours, jugée nécessaire pour la rentabilité, quant au scénario de changement climatique fort des années 2020 à l'exception des stations de ski du Vermont, moins vulnérables aux changements climatiques. Effectivement, dans cet État, 90 % seraient en mesure de maintenir une saison de plus de 100 jours même dans le scénario de changement climatique fort pour les années 2050, en raison du terrain élevé et de la capacité de pointe de fabrication de neige. Au Québec, trois stations sur les cinq analysées conservent une saison de plus de 100 jours⁴ dans un scénario moyen pour 2020. Pour ce même scénario, les occasions de fabrication de neige en début de saison sont en baisse de 13 % à 20 % ou de 8 à 12 journées entre novembre et janvier (Scott *et al.*, 2011). Des paramètres liés à la température minimale (-5 °C) et à la quantité de neige au sol (60 cm) pour construire et assurer l'entretien des pistes ont été considérés pour la production de ces scénarios.

2.1.5.4 Le processus d'adaptation de l'industrie touristique

La recherche et les actions en adaptation appliquées au tourisme à l'international accusent un certain retard par rapport à d'autres secteurs économiques dominants, tels que l'agriculture ou la foresterie (Becken et Hay, 2012; Berrang-Ford *et al.*, 2011; Scott *et al.*, 2012). Au Québec, les activités sectorielles mettent en place des mesures préventives et d'atténuation (ressource énergétique) mais très peu en matière d'adaptation. Une combinaison des deux semble nécessaire afin d'améliorer la résilience de l'industrie à plus long terme. Le Québec pourrait même tirer avantage du climat changeant dans un contexte de concurrence et d'accroissement de la demande par des investissements adéquats et des stratégies opérationnelles et marketing.

Au Québec, le secteur du ski alpin est le plus innovant en termes de stratégies d'adaptation. Les stratégies telles des partenariats ou des alliances, misent sur la diversification des activités offertes, le renouvellement des technologies et de l'environnement bâti, pratiquent l'éco-responsabilité ou encore appliquent des actions novatrices de marketing. Ces stratégies permettent d'attirer une clientèle diversifiée à différentes périodes de la saison hivernale. Toutefois, les connaissances quant à l'efficacité, à la viabilité et au coût de ces alternatives sont encore très limitées pour l'industrie.

La diversification des activités avec une programmation étendue sur quatre saisons est une mesure d'adaptation souvent employée par l'industrie touristique (Alber *et al.*, 2011; Lépy *et al.*, 2014). Actuellement, le Québec touristique (Gouvernement du Québec, 2012a) se positionne par pôle d'activité porteur (p. ex. hiver, fleuve Saint-Laurent, milieu nordique) et par le tourisme de niche (p. ex. le cyclotourisme). Plusieurs stratégies locales ou régionales s'appuient sur un portefeuille de produits complémentaires, basé sur les spécificités biophysiques et structurelles de son territoire. Ainsi, les entreprises qui sauront intégrer le risque climatique et l'adaptation aux changements climatiques à leurs grandes décisions d'investissements et aux décisions ayant des conséquences à long terme profiteront d'une meilleure résilience économique et seront en meilleure position que leurs concurrents (TRNEE 2012, p.55).

⁴ La règle selon laquelle une station de ski doit maintenir une durée de saison annuelle d'au minimum 100 jours pour être rentable (Erickson, 2005; Köning et Abbeg, 1997)

Tableau 2-4 Impacts économiques estimés des changements climatiques – Laurentides et Cantons-de-l'Est

Secteurs touristiques	Valeur estimée Québec (millions) ⁽¹⁾	Cantons-de-l'Est			Laurentides		
		Valeur actuelle estimée (millions)	Changements anticipés (2020)	Valeur estimée scénario 2020 (millions)	Valeur actuelle estimée (millions)	Changements anticipés (2020)	Valeur estimée scénario 2020 (millions)
Golf	735 \$	77,2 \$	6 %	81,8 \$	94,8 \$	6 %	100,5 \$
Parcs nationaux	244 \$	52,1 \$	10 %	57,3 \$	100,5 \$	7,5 %	108 \$
Camping	525 \$	70,9 \$	6%	75,2 \$	50,9 \$	4 %	52,9 \$
Parcs thématiques	S.O.	25 \$	12 %	28 \$	18,5 \$	12 %	20,7 \$
Ski alpin	800 \$	176 \$	- 10 %	158,4 \$	256 \$	-10 %	230,4 \$
Motoneige	723 \$	50,6 \$	- 65 %	17,7 \$	159,1 \$	-45 %	87,5 \$
Total	3 027 \$	451,8 \$	- 7,4 %	418,4 \$	679,8 \$	- 12 %	600 \$

Source : Scott et al. (2011)

(1) Provenance des données : golf — Chaire de Tourisme (2006), camping — Chaire de Tourisme (2005), ski – Archambault et al (2008), motoneige – FCMQ et Léger Marketing (2005). Ces estimations comprennent les dépenses directes et indirectes associées aux activités de chaque secteur, mais n'incluent pas les incidences économiques secondaires. La valeur dans les parcs nationaux du Québec et les parcs thématiques a été estimée selon le niveau de dépenses d'exploitation et des investissements annuels.

(2) En l'absence de données pour estimer la pratique réelle de la motoneige dans chacune des régions, l'hypothèse suggère que la fréquentation pourrait connaître un déclin similaire à la durée de la saison.

Six éléments ont été identifiés par les acteurs touristiques comme étant essentiels à la prise de décision en adaptation aux changements climatiques :

1. Comparaison avec des études de cas internationales et locales.
2. Acquisition d'informations quantifiées à partir d'études économiques (p. ex. analyse coûts/bénéfices de mesures d'adaptation ou autres méthodes).
3. Partenariat (connexion) entre les entreprises et les régions (p. ex. forfait hôtelier/attraction flexible pour la clientèle selon le contexte météorologique).
4. Adaptation et transformation des mécanismes existants (p. ex. modèles d'affaires ou de gestion).
5. Outils appliqués pour les utilisateurs (complexité de la gestion des risques au quotidien).
6. Mobilisation et formation sur les changements climatiques en entreprise, au sein de la fonction publique, des associations sectorielles et de développement économique local.

2.1.5.5 Vers une meilleure planification des risques climatiques

Même si les incertitudes subsistent quant aux prévisions relatives aux changements climatiques et, que l'évaluation précise des risques futurs est ardue, la planification de l'adaptation doit être suffisamment flexible pour faire face aux conséquences variées des changements climatiques dans l'avenir (EEA, 2013). Dans ce contexte, le démarrage d'un programme scientifique en tourisme permettra de sélectionner des projets pertinents et d'assurer la continuité d'une réflexion orchestrée autour du tourisme, du climat et de l'adaptation aux changements climatiques. Les connaissances développées devront doter le secteur d'information stratégique favorable à son développement, dresser un meilleur portrait des vulnérabilités et des risques sectoriels, intersectoriels et régionaux et stimuler l'intégration multi-niveaux du risque climatique dans la prise de décision. La mise en commun des connaissances ainsi que la mobilisation et l'accompagnement des acteurs dans la mise en œuvre de stratégies, de mesures ou d'initiatives d'adaptation seront essentiels aux avancées dans ce domaine (Bleau *et al.*, 2014). Les décideurs des secteurs touristiques public et privé sont aussi appelés à travailler en étroite collaboration pour mieux planifier les investissements structurants pour l'avenir.



2.2 La santé des individus et des communautés

Auteurs principaux : Pierre Gosselin (INSPQ), Marie-Eve Levasseur (INSPQ) et Diane Bélanger (INRS-ETE)

Faits saillants

- ▶ L'augmentation des températures, dans le contexte des changements climatiques, contribuera à rallonger la saison pollinique, à augmenter les risques de feux de forêt, et possiblement à augmenter les pics de smog en milieu urbain, ce qui risque d'augmenter au total la pollution atmosphérique et les concentrations de pollens allergènes; ces divers polluants occasionneront surtout des problèmes respiratoires et cardiovasculaires.
- ▶ La hausse des températures aura aussi un impact négatif sur la mortalité et la morbidité, notamment en raison des îlots de chaleur urbains et des vagues de chaleur en augmentation.
- ▶ Bien qu'en développement, l'adaptation aux événements météorologiques extrêmes reste encore un défi d'importance afin de réduire les impacts sur la santé des populations, en termes de connaissances des risques, de préparation aux urgences, de prévention et d'aménagement urbain, tant pour les organisations que pour les individus et ménages.
- ▶ Une forte convergence existe entre plusieurs adaptations en milieu urbain qui visent la lutte contre les effets de la chaleur. Ainsi, le verdissement urbain, la promotion du transport actif, la gestion des précipitations localement sur les terrains et la lutte contre la pollution atmosphérique améliorent la santé physique et mentale de la population et deviennent très priorités dans certaines villes ; ils contribuent simultanément à la réduction des GES. Leur intégration efficace aux réglementations municipales et fiscales ou à la pratique quotidienne demeure cependant à réaliser.
- ▶ L'évolution des précipitations et de la température sur certaines portions du territoire aura pour effet d'accroître les risques liés aux inondations et aux pluies abondantes, pouvant occasionner des impacts sur la santé humaine (blessures, décès, maladies infectieuses d'origine hydrique et zoonotique). L'adaptation à ces événements devra passer notamment par la prévention et la préparation des individus et des ménages, mais aussi par une réflexion sur la planification et la gestion de l'utilisation des territoires à risque.
- ▶ Dans le nord du Québec, les changements climatiques affecteront davantage les populations autochtones notamment en raison des difficultés grandissantes d'accès au territoire (dégel du pergélisol et modification des chemins hivernaux) et à la nourriture traditionnelle. Certains outils ont vu le jour dans les dernières années pour appuyer l'adaptation.
- ▶ La santé et la sécurité des travailleurs du Québec seront aussi affectées dans certains secteurs par les rayons ultraviolets, les polluants de l'air, les événements météorologiques extrêmes, les maladies vectorielles transmissibles et les zoonoses.

Le réchauffement et la plus grande variabilité climatiques affectent déjà les populations. En été, les impacts proviennent surtout de l'augmentation du nombre de journées chaudes, de la fréquence et de l'intensité des canicules (Romero-Lankao *et al.*, 2014). De plus, une saison estivale allongée favorise les activités extérieures, ce qui peut être bénéfique pour l'exercice physique et la production de vitamine D, mais augmente aussi l'exposition individuelle aux rayons ultraviolets solaires. Les fortes chaleurs ambiantes dans les quartiers très pollués situés dans des zones d'îlots de chaleur urbains peuvent occasionner des problèmes de santé importants au sein des groupes vulnérables. L'accentuation d'autres événements météorologiques extrêmes (EME), dont les précipitations abondantes en été comme en hiver, et d'événements climatiques extrêmes (ECE), comme la sécheresse, agit sur la santé des populations directement touchées, mais aussi sur l'ensemble de la population de façon plus insidieuse, par exemple par une hausse du coût des aliments liée à la baisse de la production alimentaire. La contribution de l'ensemble de ces conséquences sur la morbidité et la mortalité n'est pas à sous-estimer, et ces changements climatiques peuvent aussi avoir un impact sur l'apparition ou le déplacement de vecteurs de maladies et sur l'augmentation des maladies hydriques. Une récente revue de 236 études menées chez nos voisins américains depuis 2009 évalue ainsi que les impacts sanitaires seront surtout négatifs, mais que d'importants co-bénéfices pour la santé découleront de la diminution des GES, étant donné que les choix de transport sans combustibles fossiles, par exemple, diminuent les polluants atmosphériques nocifs et favorisent davantage l'exercice physique quotidien (Patz *et al.*, 2014).

Ainsi, l'adaptation aux changements climatiques s'avère des plus nécessaires, dès maintenant. Au cours des dernières années, diverses mesures ont été implantées à cette fin, notamment dans une perspective de santé publique (Boyer et Villa, 2011; Toloo *et al.*, 2013) et de promotion de la qualité de vie (GIRBa et École d'architecture de l'Université Laval, 2013; Ouranos, 2010; Richardson et Otero, 2012; Richardson, 2010). Au Québec, la principale mesure a été, sans contredit, la mise sur pied du *Plan d'Action sur les Changements Climatiques* (PACC) 2006-2012 (Gouvernement du Québec, 2008a). Plusieurs des projets mentionnés ci-après découlent d'ailleurs de son volet santé. Certes, aucune évaluation de l'impact quant à chacun de ces projets sur le terrain ne semble exister. L'évaluation de la mise en œuvre de ce volet s'est toutefois avérée des plus positives à plusieurs égards (Kishchuk, 2013). Certaines de ces initiatives, à l'exemple des systèmes de surveillance (Leclerc, 2012; Toutant *et al.*, 2011), auraient même avantage à être mieux diffusées pour le bien-être commun, car les initiatives d'adaptation aux Changements climatiques semblent encore préliminaires à l'échelle mondiale, en plus d'être essentiellement axées sur la mesure du risque (Lesnikowski *et al.*, 2011). Certains projets vont dans cette direction et visent l'implantation de systèmes de surveillance québécois en Afrique (Danner, 2013).

Cette section présente des vulnérabilités, des impacts sanitaires et des adaptations mises en place pour faire face aux conséquences relatives aux modifications du climat actuel et futur. Ces aspects sont abordés d'abord à l'échelle du Québec et de ses régions, puis à l'échelle des ménages et des individus, sur la base de la littérature scientifique et grise produite ces dernières années au Québec et dans les pays de l'OCDE.

2.2.1 Exposition aux polluants atmosphérique et aux pollens

2.2.1.1 Combustibles fossiles

Le Québec et ses régions

Vulnérabilités et impacts sanitaires

La pollution atmosphérique au Québec est en partie d'origine transfrontalière, les émissions en provenance des États-Unis ayant une forte influence sur la qualité de l'air (Gouvernement du Canada, 2012). Il faut cependant noter que les émissions canadiennes et américaines de SO_x et de NO_x affectant le corridor Windsor-Québec ont

diminué de 2000 à 2010 (Bourque et Morneau, 2013). De plus, les émissions et la formation de l'ozone et des $PM_{2,5}$ (particules fines respirables d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètres) au niveau local dans certaines régions de l'Est canadien jouent un rôle significatif dans la dégradation de la qualité de l'air (Gouvernement du Canada, 2012). À l'échelle continentale nord-américaine, les résultats de modèles et d'analyses d'observations indiquent, à niveau d'émissions polluantes constantes, qu'un réchauffement climatique pourrait augmenter les pics de concentration d' O_3 et de $PM_{2,5}$ dans les zones polluées, donc surtout dans les villes.

Aux États-Unis, une étude montre que les impacts sanitaires des polluants atmosphériques supplémentaires occasionnés par les changements climatiques toucheraient plus des deux tiers du pays d'ici 2050. Cela signifierait l'ajout annuel de quelque 4 000 décès prématurés en raison des $PM_{2,5}$ et de 300 décès pour l'ozone (Tagaris *et al.*, 2009). De plus, environ 7,3 % des visites à l'urgence pourraient être causées par l'asthme relié à l'ozone chez les New-Yorkais de moins de 18 ans, d'ici 2020 (Sheffield *et al.*, 2011). Cependant, une autre modélisation climatique sur l'Amérique du Nord soulève la possibilité que des réductions simultanées des GES et des précurseurs de la pollution de l'air puissent réduire davantage les niveaux de pollution de l'air, et aussi les impacts sur la santé humaine et les écosystèmes (Kelly *et al.*, 2012). Ceci repose toutefois sur l'hypothèse d'une application stricte des politiques actuelles et futures de réduction des polluants pendant plusieurs décennies. Au Canada, les principaux résultats des impacts sanitaires de projections de la pollution atmosphérique en climat futur ne sont pas encore disponibles, même si des études à cet effet sont en cours (Silva *et al.*, 2013).

Encadré 2-1. Changements climatiques, pollution atmosphérique et pollens allergènes

Dans le contexte des changements climatiques, la combustion accrue des combustibles fossiles et la hausse des températures pourront augmenter le niveau des polluants atmosphériques et accélérer le processus de formation du smog. De plus, l'augmentation de la température et du dioxyde de carbone dans l'air auront pour effet d'allonger la saison pollinique et de fertiliser les plantes, faisant en sorte d'accroître les concentrations de pollens allergènes dans l'air que l'on respire. Enfin, l'augmentation des feux de forêt libèrera davantage de particules fines en suspension dans l'air. L'ensemble de ces phénomènes aura des effets sur la santé respiratoire et cardiovasculaire des individus vulnérables. Ainsi, ces problèmes de santé, déjà présents, s'accroîtront vraisemblablement dans un contexte de changements climatiques (Romero-Lankao *et al.*, 2014), à moins d'agir rapidement pour les contrer, en déployant des mesures de mitigation et d'adaptation. En effet, comme le mentionne l'Organisation mondiale de la Santé depuis 20 ans, la première adaptation consiste à fermer le robinet des gaz à effet de serre (GES).

Sur le plan des politiques, diverses mesures en élaboration, ou mises en place récemment, pourraient contribuer à diminuer les polluants atmosphériques et les risques sanitaires qui leur sont associés, comme la mortalité cardiovasculaire (Brook *et al.*, 2010). L'extension de l'Accord sur la qualité de l'air Canada-États-Unis, discutée actuellement, mettrait l'accent sur la réduction des matières particulaires transfrontalières (Environnement Canada, 2013a). Dans la foulée du PACC 2006-2012 et du PACC 2020, la mise à niveau, après 30 ans, du Règlement québécois sur l'assainissement de l'atmosphère (MDDELCC, 2011, 2012) et la politique québécoise sur la qualité de l'air prévue au PACC 2020, influenceront sur la pollution atmosphérique en général. La Politique québécoise de mobilité durable agira aussi en ce sens, en invitant les municipalités à intégrer les transports à l'aménagement du territoire, à améliorer le transport collectif régional et à favoriser le transport actif (MTQ, 2013a). L'un des co-bénéfices de l'augmentation du transport actif (marche, vélo, etc.) est la diminution de la morbidité et de la mortalité (Grabow *et al.*, 2012; Reynolds *et al.*, 2010).

Mitigation et adaptation

Une boîte à outils dédiée à la réalisation d'audits de potentiel piétonnier actif et sécuritaire est déjà disponible pour les responsables municipaux et les groupes de citoyens de Montréal désirant connaître les caractéristiques favorables à la marche dans leur quartier (ASSS de Montréal, 2012). De plus, la ville de Montréal envisage la possibilité d'encourager davantage le vélo quatre saisons (p. ex. entretien des pistes cyclables l'hiver), comme plusieurs villes canadiennes et européennes le font déjà (Vélo Québec, 2013). Enfin, le marché du carbone du Québec, depuis janvier 2013, la Stratégie québécoise d'électrification des transports 2013-2017 (Gouvernement du Québec, 2013j) et le classement des gaz d'échappement des moteurs diesel comme substances cancérigènes pour l'homme (CIRC, 2012) représentent des mesures incitatives supplémentaires pour réduire cette pollution. Le gouvernement du Québec reconnaît aussi les multiples bénéfices environnementaux et sanitaires de l'écomobilité et a publié un guide de bonnes pratiques en aménagement du territoire à cet effet (Boucher et Fontaine, 2011), mais leur mise en application ne semble pas encore documentée.

Certains auteurs recommandent d'améliorer significativement le réseau de surveillance de la qualité de l'air pour mieux tenir compte de la santé publique au Canada (Busque *et al.*, 2010) et, pour le Québec, de réaliser une meilleure adéquation du *Programme de surveillance de la qualité de l'air* (PSQA) aux besoins du réseau de santé publique (Buteau, 2011; Lebel *et al.*, 2012), car les stations d'échantillonnage ne sont pas souvent localisées en fonction de la densité de la population. Enfin, des mesures plus vigoureuses montrent déjà un grand potentiel, tant pour la mitigation que pour l'adaptation, car des bénéfices majeurs pour la santé humaine et la production agricole pourraient découler de mesures de contrôle des particules fines et du méthane à court terme (Shindell *et al.*, 2012; Thurston et Bell, 2014).

Les ménages et les individus

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Dans une étude réalisée dans les aires de diffusion (la plus petite région géographique lors du recensement) les plus défavorisées des villes québécoises les plus peuplées en 2011, 30,8 % des répondants considéraient que la pollution de l'air due aux manufactures, restaurants et commerces était un assez, ou très gros problème dans leur quartier de résidence (Bélanger *et al.*, 2013b). De même, 50,3 % qualifiaient la pollution de l'air due à la densité du trafic urbain d'assez ou de très problématique. La pollution de l'air touche plus particulièrement certains groupes d'individus. Ainsi, les moins de 18 ans, les 65 ans et plus, les personnes à faible revenu, peu scolarisées, les gens atteints d'une maladie respiratoire, d'une maladie cardiovasculaire, de diabète ou d'obésité seraient plus sensibles aux particules fines (Sacks *et al.*, 2011).

Mitigation et adaptation

À l'échelle individuelle, diverses mesures contribuent à réduire la pollution de l'air, notamment le covoiturage, le transport actif et le transport en commun (Lebel *et al.*, 2012). Dans une étude sur les vulnérabilités à la chaleur en milieu défavorisé, 57,7 % des répondants utilisaient déjà les transports en commun comme principal mode pour voyager localement (raisons personnelles ou par affaires) (Bélanger *et al.*, 2013b), surtout ceux qui avaient un revenu annuel de moins de 15 000 \$, peu importe le genre et l'âge.

D'autres mesures visent plutôt à soutenir les plus vulnérables lors de pics de pollution, notamment les personnes atteintes de problèmes respiratoires ou cardiovasculaires. Certains suggèrent d'utiliser la climatisation ou la filtration de l'air lors de pics (IOM, 2011), ou de consulter un indicateur de la qualité de l'air

afin de mieux planifier les activités extérieures, comme l'indice de la qualité de l'air (MDDELCC, 2002a), l'avertissement de smog (MDDELCC, 2002b) ou la Cote air santé (CAS) (Environnement Canada, 2013b). Selon certains sondages, quelque 40 % des Canadiens seraient déjà plutôt portés à croire qu'il faut rester à l'intérieur du domicile afin de limiter l'exposition à la pollution (Environics Research Group, 2012).

2.2.1.2 Incendies de forêt

Le Québec et ses régions

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Le risque d'incendie de forêt augmenterait en Amérique du Nord en raison des changements climatiques (Bernstein et Rice, 2013; de Groot *et al.*, 2013; Stephens *et al.*, 2013; Wotton *et al.*, 2010). Au Canada, une hausse du nombre et de la gravité des incendies serait prévisible d'ici la fin du siècle (Ressources naturelles Canada, 2009), notamment dans certaines régions du nord et du centre du Québec.

Une augmentation de l'exposition aux polluants qu'émettent ces incendies s'avère donc vraisemblable, et spécialement aux particules fines, qui sont qualifiées d'au moins aussi toxiques pour le système respiratoire à court terme que les particules de source urbaine (Benmarhnia *et al.*, 2013). Une forte utilisation des services hospitaliers et de nombreuses consultations médicales pour cause d'affections pulmonaires et cardiovasculaires leur est d'ailleurs associée.

Aux coûts de santé que représentent ces services supplémentaires, s'ajoutent les coûts associés à la suppression des feux, qui atteignaient plus de 2 G\$ aux États-Unis en 2012 (Stephens *et al.*, 2013), de 500 M\$ à 1 G\$ annuellement au Canada (Wotton, 2012) et environ 38 M\$ au Québec (SOPFEU, 2012).

Adaptation

En ce qui concerne le Québec, l'Ontario et les Maritimes, les hausses de risque appréhendées sont moindres que pour l'Ouest canadien. Cependant, vu les vents dominants de l'ouest qui se déploient l'été, les feux survenant à l'ouest du Québec (Prairies, Midwest, Ontario) produisent des impacts de pollution pouvant être ressentis dans toute la vallée du Saint-Laurent.

Encadré 2-2. Incendies de forêt : impacts sur la santé et la foresterie

L'augmentation du risque de feux de forêt dans le contexte des changements climatiques nécessitera la mise en place de mesures d'adaptation, tant sur les plans de la santé que de la foresterie (voir la section 2.1.1).

Au Canada, la cartographie des projections d'incendies de forêt en 2090-2999 en fonction des lieux habités (Ressources naturelles Canada, 2009) rend possible la mise en place graduelle de méthodes de contrôle ou d'aménagements forestiers d'ici là.

La cartographie des points chauds du Système canadien d'information sur les feux de végétation soutient la prévention des risques associés aux incendies de forêt en temps réel (Ressources naturelles Canada, 2014), tout comme le système québécois SUPREME en santé publique, dont les données sont mises à jour en temps réel par la SOPFEU (SOPFEU, 2014; Toutant *et al.*, 2011). Les stratégies d'aménagement et les mesures visant à accroître la résistance des forêts aux feux contribuent à réduire les impacts sur le secteur forestier canadien, en plus d'avoir des impacts indirects sur la santé par la réduction de l'émission de particules fines dans l'atmosphère.

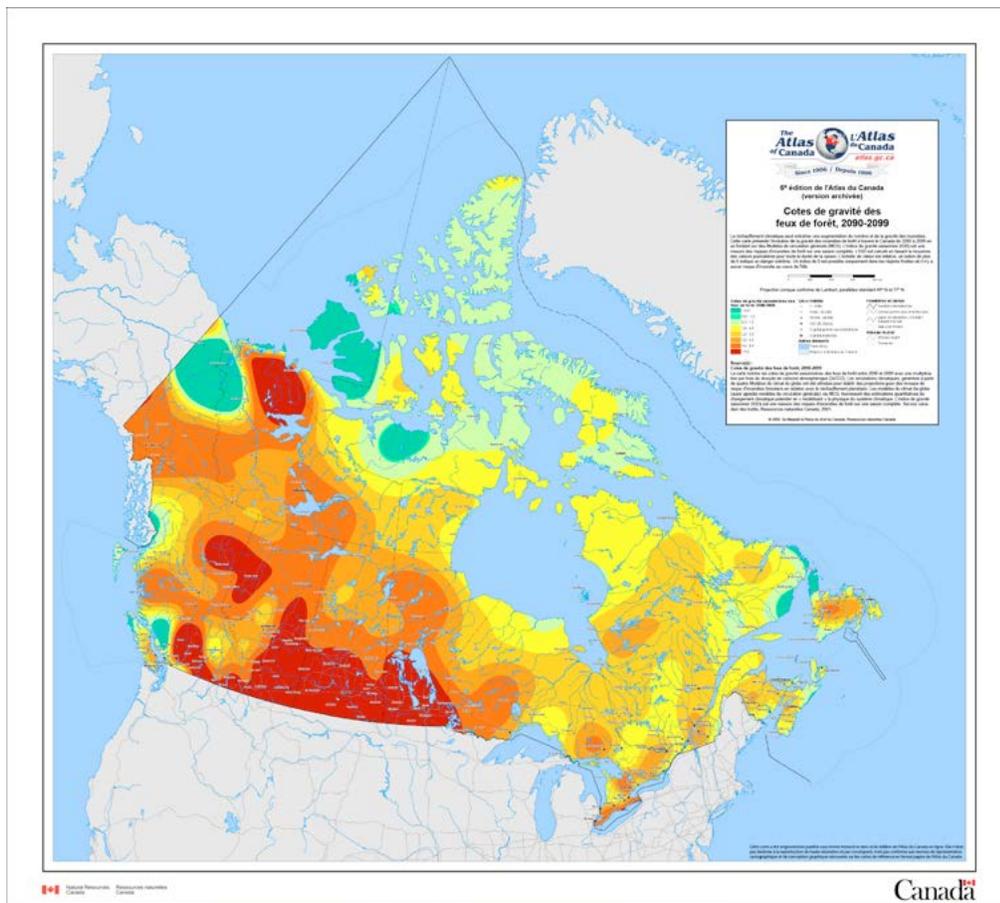


Figure 2-12 Carte de l'Atlas du Canada pour la projection de la cote de gravité des feux de forêt 2090-2099

Source : Ressources naturelles Canada (2009)

Les ménages et les individus

Vulnérabilités et impacts sanitaires

L'augmentation des feux de forêt dans un contexte de changements climatiques pourrait accroître la quantité de particules fines en suspension dans l'air, ce qui en retour peut affecter la santé respiratoire et cardiovasculaire. En Australie, la présence de fumée provenant de feux de brousse dans le New South Wales, en 2003, a duré 38 jours. Des 389 personnes interviewées à ce sujet, 70 % disaient avoir subi au moins un effet de la fumée sur sa santé, principalement les personnes atteintes de maladies respiratoires (surtout d'asthme) et cardiovasculaires, et 5% ont dû être traitées médicalement (Kolbe et Gilchrist, 2009). Aucune étude équivalente n'a été réalisée au Québec. Il est toutefois connu que d'importants incendies de forêt ou de brousse ravagent annuellement son territoire et que, dans certains cas, des populations sont touchées directement. C'est le cas de l'incendie survenu près d'Eastmain en 2013 (voir figure 2-13), qui a forcé l'évacuation de plusieurs centaines de personnes pendant 10 jours (Radio-Canada, 2013).

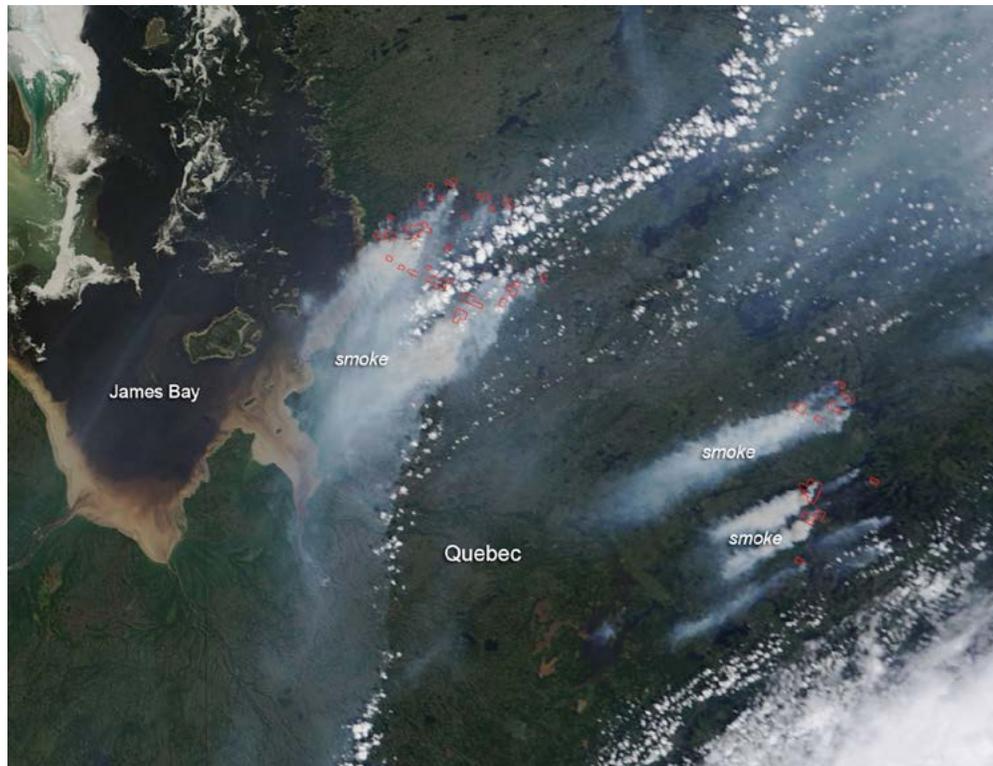


Figure 2-13 Image satellitaire d'incendies de forêt près d'Eastmain, été 2013

Source: NASA, image courtesy Jessy Schmaltz (2013), Crédit: NASA/Goddard, Lynn Jenner

Adaptation

Dans le contexte de l'étude australienne citée précédemment, 74% des répondants ont eu connaissance des avis de santé publique fondés sur les alertes de pollution de l'air transmises dans les principaux médias. Ces personnes, et particulièrement les parents d'enfants de moins de 16 ans, étaient 2,7 fois plus susceptibles d'avoir modifié leurs comportements (réduction des activités extérieures, fermeture des fenêtres, etc.), comparativement aux répondants qui n'avaient pas eu connaissance des avis (Kolbe et Gilchrist, 2009).

De tels avis sont aussi émis au Québec, notamment en Abitibi-Témiscamingue, mais leur impact sur l'adoption de comportements préventifs n'a pas encore été étudié. Une telle étude, tout comme l'identification des personnes ayant des antécédents respiratoires ou cardiovasculaires (Bustinza *et al.*, 2010), pourrait être utile à la santé et la sécurité publiques.

Enfin, des mesures d'adaptation plus avancées existent dans le reste du Canada, comme le programme IntelliFeu (FireSmart) qui propose diverses mesures supplémentaires, au-delà de la surveillance, des interdictions de circuler ou de faire des feux, et de la lutte contre les feux, pouvant être appliquées par les acteurs de la communauté afin de réduire les risques d'incendie. Il s'agit, par exemple, de l'analyse locale des risques et du design de l'aménagement spatial des communautés, de la gestion préventive de la végétation, du choix de matériaux de construction résistants à la combustion, ou d'une sensibilisation accrue aux risques. Ce programme n'est pas encore utilisé au Québec, même si certaines de ses composantes le sont (Partners in Protection Association, 2014).

2.2.1.3 Pollens allergènes

Le Québec et ses régions

Vulnérabilités et impacts sanitaires

En raison de la hausse des températures, l’allongement de la saison de croissance et la présence d’un climat plus humide constituent un terreau favorable à l’augmentation des concentrations de pollens allergènes dans l’air, à l’échelle mondiale (Oswalt et Marshall, 2008; Ziska *et al.*, 2011). Ainsi, l’étendue géographique de l’herbe à poux (*Ambrosia*) pourrait s’accroître dans le contexte des changements climatiques. Conséquemment, la rhinite allergique saisonnière, souvent appelée « rhume des foins », touchera de plus en plus de gens. Au Québec, cette affection est déjà un problème de santé publique dans plusieurs régions (voir figure 2-14), comme en témoignent les quelques 13 % de la population de 15 ans et plus qui en sont affectés (Canuel et Lebel, 2012; MSSS, 2011). Les coûts estimés pour la société sont aussi très élevés : seulement pour l’allergie à l’herbe à poux (ou ambroisie), ils étaient de l’ordre de 156 à 240 M\$ en 2005 (Demers, 2013a; Tardiff, 2008), ce qui signifierait de 185 à 285 M\$ en 2014. Seulement sur le territoire de la Montérégie, il en coûte 33 M\$ annuellement, incluant les consultations médicales, les médicaments et l’absentéisme (ASSS de la Montérégie, 2013).

En climat futur, vers 2050, des simulations d’Ouranos montrent que le climat actuel de la grande région montréalaise, présentement très affecté par l’herbe à poux, se retrouvera aussi vers les Hautes- Laurentides, l’Abitibi-Témiscamingue, la Haute-Mauricie et le Bas-Saint-Laurent, ce qui favorisera vraisemblablement l’expansion de la plante.

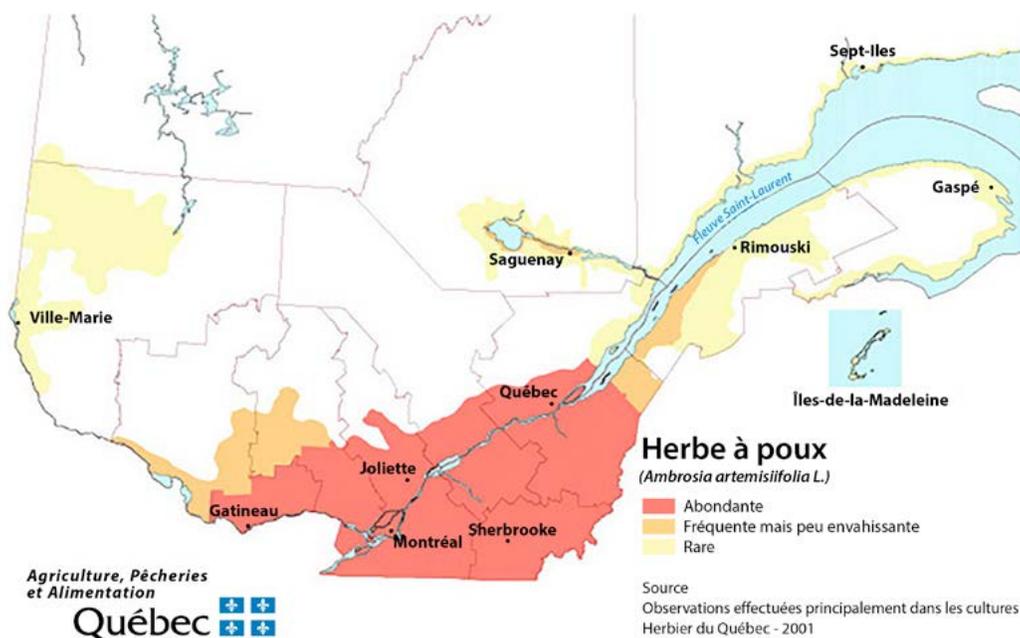


Figure 2-14 Distribution géographique de l’herbe à poux au Québec

Source : MAPAQ (2005)

Adaptation

Un projet de Stratégie québécoise pour la réduction des pollens allergènes a été entériné par les autorités de santé publique (Demers, 2013b), et son implantation est prévue au cours des prochaines années avec divers partenaires. Axée surtout sur l'herbe à poux (la principale source de symptômes liés aux pollens allergènes), cette stratégie vise à mobiliser les acteurs concernés et à intégrer des mesures concrètes et ciblées dans les pratiques courantes d'entretien des grands propriétaires de terrains publics et privés, en harmonie avec les mesures déjà existantes (p. ex. campagnes d'éradication de l'herbe à poux) (I. Demers, comm. pers.). Cette prise en charge de la problématique par les instances provinciales répond aux besoins exprimés en 2012 par des décideurs municipaux (De Léry, 2012). Maintenir et bonifier le volet de la rhinite allergique dans les enquêtes populationnelles (Canuel et Bélanger, 2010) pourrait soutenir l'évaluation de cette démarche.

Le projet Herbe à poux 2007-2010 à Salaberry-de-Valleyfield est un exemple concret d'intervention pour la réduction des pollens. Grâce à un projet de gestion concertée entre divers partenaires de la municipalité, des réductions dans la densité de plants et les concentrations de pollens ont pu être observées (Noisel *et al.*, 2013), ces dernières ayant diminué de 58 % en milieu résidentiel et de 16 % dans les espaces verts publics et privés (ASSS de la Montérégie, 2011). Ces efforts ont permis de réduire les symptômes nasaux et oculaires et d'augmenter la qualité de vie des adultes allergiques du milieu expérimental (DSP de la Montérégie, 2013). En effet, pour 57 % et 45,7 % des participants de ce groupe, l'amélioration était significative en ce qui a trait aux symptômes oculaires et à la qualité de vie, respectivement (Noisel *et al.*, 2013).

Afin d'optimiser adéquatement la prédiction de la présence d'herbe à poux, même en milieu urbanisé complexe, le développement de méthodes semi-automatisées ou automatisées utilisant la télédétection optique est une avancée notable pour la surveillance en santé publique (Ngom et Gosselin, 2014). Produire ainsi les cartes de prédiction sur une base périodique (p.ex. aux cinq ans) permettrait de localiser avec une bonne probabilité (de l'ordre de 70 à 80 % présentement, quand on compare les images satellitaires aux relevés sur le terrain) les secteurs les plus infestés (voir figure 2-15), puis d'optimiser les ressources humaines affectées à cette problématique, tout en améliorant l'efficacité des coupes et arrachages de cette plante envahissante. L'évaluation des émissions de pollens et de leur transport (Efstathiou *et al.*, 2011), comme celui – très allergisant – du bouleau (Potier *et al.*, 2013), pourrait également s'avérer très utile. Parmi les diverses activités d'adaptation promues dans cette Stratégie et le PACC 2020, signalons des campagnes d'information et de sensibilisation; un système d'information sur le développement de l'herbe à poux; la promotion de mesures de contrôle de l'herbe à poux telles l'implantation d'un couvert végétal compétitif, le recouvrement du sol par des matériaux inertes, l'arrachage, la tonte et le fauchage, la protection et la restauration des milieux humides et des zones de grande diversité biologique, et la création de corridors écologiques. D'autres moyens de lutte existent (p.ex. pesticides, règlements) mais ne font pas partie de la Stratégie.

Les ménages et les individus

Adaptation

Connaître les causes et les symptômes de la rhinite allergique saisonnière et les consignes émises à ce sujet n'est pas suffisant pour que les personnes à risque d'en être atteintes modifient leurs comportements. Les résultats d'une étude réalisée auprès de propriétaires résidentiels de Lanaudière en attestent. Malgré les campagnes de sensibilisation, seulement 25 % des participants avaient une très forte intention d'éliminer l'herbe à poux sur leur terrain (Hakizimana *et al.*, 2012). En fait, la motivation à agir préventivement découlerait

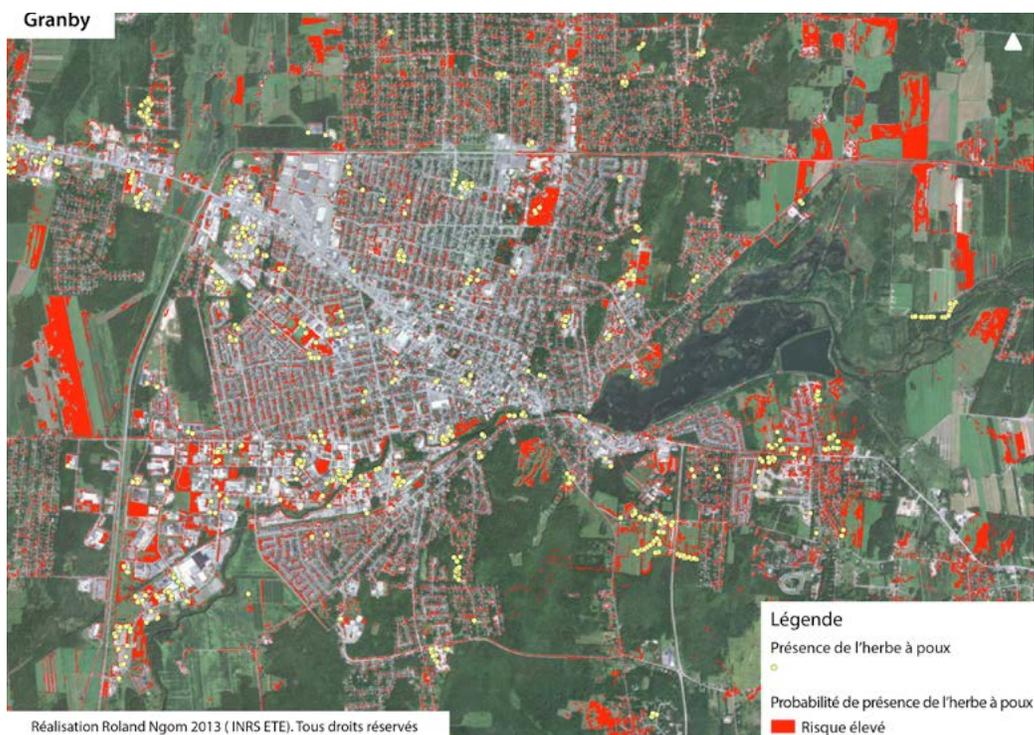


Figure 2-15 Exemple de carte de prédiction pour la ville de Granby : probabilité de présence de l'herbe à poux.

Source : Ngom (2013)

d'autres facteurs que la connaissance et dont les interventions de santé publique devraient tenir compte. Ainsi, les interventions devraient favoriser les actions visant à permettre de reconnaître la plante, amener les individus à reconnaître les bénéfices de l'élimination de l'herbe à poux pour améliorer leur santé et améliorer la reconnaissance des symptômes pour les individus et les membres de leur entourage. Il est sûr que les individus peuvent contribuer de diverses façons aux mesures d'adaptation énoncées à la section précédente, notamment sur leurs propres terrains.

2.2.2 Exposition à la chaleur et aux ultraviolets solaires

2.2.2.1 Réchauffement moyen, vagues de chaleur et îlots de chaleur urbains (ICU)

Réchauffement moyen de la température, vagues de chaleur et îlots de chaleur urbains (ICU) sont des phénomènes qui se différencient l'un de l'autre de diverses manières, notamment par des horizons spatiotemporels distincts. En matière de santé, tous trois ont toutefois la même connotation : une plus forte exposition à la chaleur qui agit sur la santé des organisations, des systèmes et des populations. Pour contrer ces impacts, des adaptations diversifiées ont été implantées.

Le Québec et ses régions

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Le réchauffement moyen, estimé sur plusieurs décennies, a été associé au Québec à l'augmentation du nombre d'admissions hospitalières, notamment pour causes respiratoires (Lin *et al.*, 2012) ou cardiovasculaires (Bayentin *et al.*, 2010), et dans les salles d'urgence pour problèmes de santé mentale (Vida *et al.*, 2012). Il est aussi lié à une hausse de la mortalité significative, notamment chez les aînés, et pour plusieurs hypothèses de climat futur, comme le confirment plusieurs études menées au Québec (Benmarhnia *et al.*, 2014; Doyon *et al.*, 2008; Goldberg *et al.*, 2011) ou à l'étranger (Gasparrini *et al.*, 2012; Iñiguez *et al.*, 2010; Zanobetti *et al.*, 2012), ce qui suggère une demande accrue de services dans le futur en lien avec le climat.

Les impacts sanitaires des canicules font maintenant l'objet de surveillance dans plusieurs pays (CDC, 2014; WHO/WMO, 2012). Au Québec (Lebel et Bustinza, 2011, 2012, 2013), cette surveillance a permis d'observer un excès de 280 décès (33 %) et de 3 400 hospitalisations (4 %) sur 5 jours lors de la canicule de 2010 (Bustinza *et al.*, 2013) et une augmentation de 15 % du taux brut de transports ambulanciers à l'été 2012 (Lebel et Bustinza, 2013). Enfin, le risque de mourir lors de fortes chaleurs estivales est plus important dans les régions avec des températures de surface élevées (Smargiassi *et al.*, 2009), même de nuit (Laaidi *et al.*, 2012). Le nombre de journées chaudes est en augmentation marquée depuis quelques décennies, et cette tendance se poursuivra (figure 2-16), avec environ trois fois plus de journées et de nuits chaudes vers 2050 par rapport à la fin du 20^e siècle.

Adaptation

Les systèmes de veille-avertissement canicule contribuent à l'adaptation, et ils sont appuyés par un guide d'intervention officiel (Comité chaleur accablante de la TNCSE, 2006). À la suite de quelques canicules vécues depuis 2010, la mise en œuvre de ce guide commence à être formellement évaluée (Price *et al.*, 2014), et montre que certains défis pratiques demeurent, dont la mobilisation importante nécessaire pour les appels ou visites à domicile des clientèles à risque élevé, comme les personnes en appartement supervisé, celles ayant un problème de santé mentale, ainsi que les itinérants.

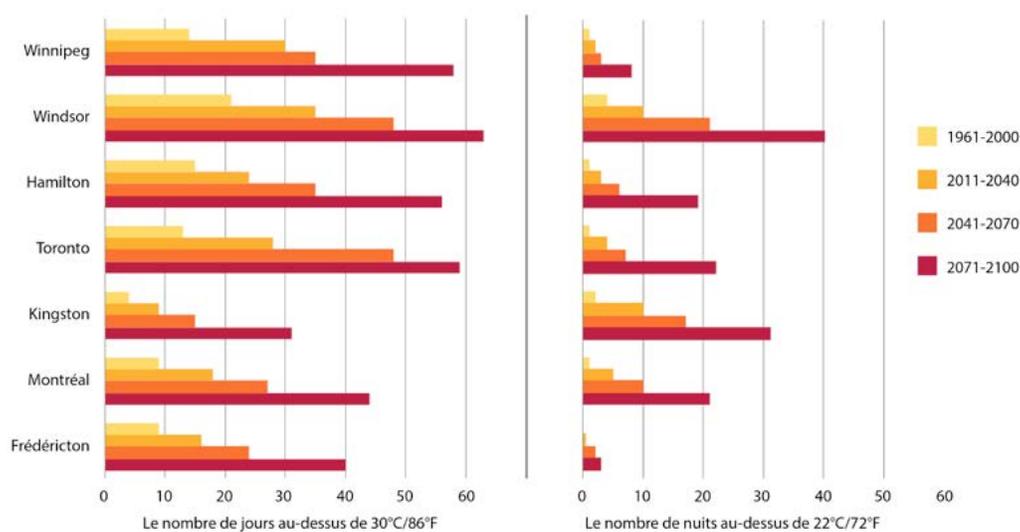


Figure 2-16 Évolution du nombre annuel de journées chaudes entre 1961 et 2100 dans quelques villes canadiennes, dont Montréal.

Source : adapté de Casati *et al.* (2013)

Au Québec, le PACC 2006-2012 a permis de développer le système SUPREME, dont les seuils, définis par région socio-sanitaire (Chebana *et al.*, 2013; Martel *et al.*, 2010), appuient les actions préventives des Directions de santé publique utilisatrices, notamment lors du passage en état d'alerte ou de mobilisation et d'un avertissement de chaleur extrême (Toutant *et al.*, 2011). En outre, l'évaluation annuelle de son utilisation permet de l'améliorer, si bien que ce genre de système apparaît déjà efficace pour contrer les impacts sanitaires à la chaleur (Toloo *et al.*, 2013). Enfin, l'outil cartographique de SUPREME aide déjà des régions à circonscrire les ICU à l'échelle municipale et à y bonifier les îlots de fraîcheur (Bouffroy *et al.*, 2013; Gouvernement du Québec, 2013a; Kestens *et al.*, 2011). Sur cette base, diverses mesures de lutte contre les ICU ont été suggérées, entre autres pour la région métropolitaine de Montréal (Anquez et Herlem, 2011), et divers conseils ont été promulgués par l'organisme (Nature Québec, 2013) afin de créer ou de conserver des îlots de fraîcheur.

Toujours dans le cadre du PACC, plus d'une quarantaine de projets de démonstration de lutte contre les îlots de chaleur urbains ont été réalisés. Leur évaluation montre qu'ils ont réduit la chaleur nocturne et que certains projets ont réduit l'effet d'îlot de chaleur urbain lorsque la superficie aménagée était importante, en plus de montrer l'efficacité de certaines méthodes pour évaluer la performance des projets de lutte contre les îlots de chaleur urbains, soit l'imagerie thermique satellitaire et la modélisation numérique de surface (Environnement Canada, 2014b). De plus, ces projets ont encouragé l'initiation d'autres projets similaires et ont permis d'informer et de mobiliser la population générale à ce sujet (Kishchuk, 2013; McMeekin et Juteau, 2013), sans compter que les cartes d'ICU (figure 2-17) ont été très utiles pour les municipalités (Gouvernement du Québec, 2013a) et très populaires de façon générale.

Enfin, diverses instances fournissent des consignes préventives relatives à la chaleur accablante et extrême à l'aide de guides destinés à la prise de décision, de campagnes ciblées pour certains groupes vulnérables et de matériel informatif (dépliants, etc.) pour la population générale (p. ex. la réduction des activités physiques et l'hydratation accrue). C'est le cas du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec (MSSS), de ses agences de santé et de services sociaux (ASSS) (Gouvernement du Québec, 2013f; MSSS, 2014a), et également de Santé Canada (Santé Canada, 2011a, 2011b).

Maladaptation à la chaleur

Très peu de choses sont connues sur les effets indésirables des stratégies d'adaptation à la chaleur. Quelques publications ont toutefois fait des mises en garde contre l'encouragement à outrance de la climatisation. Bien qu'elle soit utile et essentielle aux personnes dont la santé est fragilisée par la chaleur (Lundgren et Jonsson, 2012), elle aurait augmenté la température extérieure et engendré des pannes électriques, en été, en Australie (Maller et Strengers, 2011). Des simulations sur Paris (France) et Houston (É.-U.) montrent qu'une généralisation de la climatisation pourrait amener une augmentation de la température extérieure de l'ordre de 2 degrés Celsius dans les zones urbaines denses, sous certains scénarios (De Munck *et al.*, 2013; Salamanca et Martilli, 2011). Bien sûr, la population du Québec est loin d'être aussi dense et l'été y est moins long et moins chaud ; le danger de pannes électriques par surcharge en été y est peu plausible, puisque la pointe de consommation se situe en hiver. Malgré cela, il sera important de mieux analyser le cycle de vie des différentes stratégies d'atténuation des impacts d'îlots de chaleur urbains, afin de déterminer quelles mesures en accusent le moins, à la fois pour l'environnement et la santé humaine. Un premier effort en ce sens est déjà disponible (Martineau, 2011) et permet d'identifier certaines options à moindre impact, comme les toits blancs ou pâles, la gestion locale des eaux de pluie, et le verdissement.

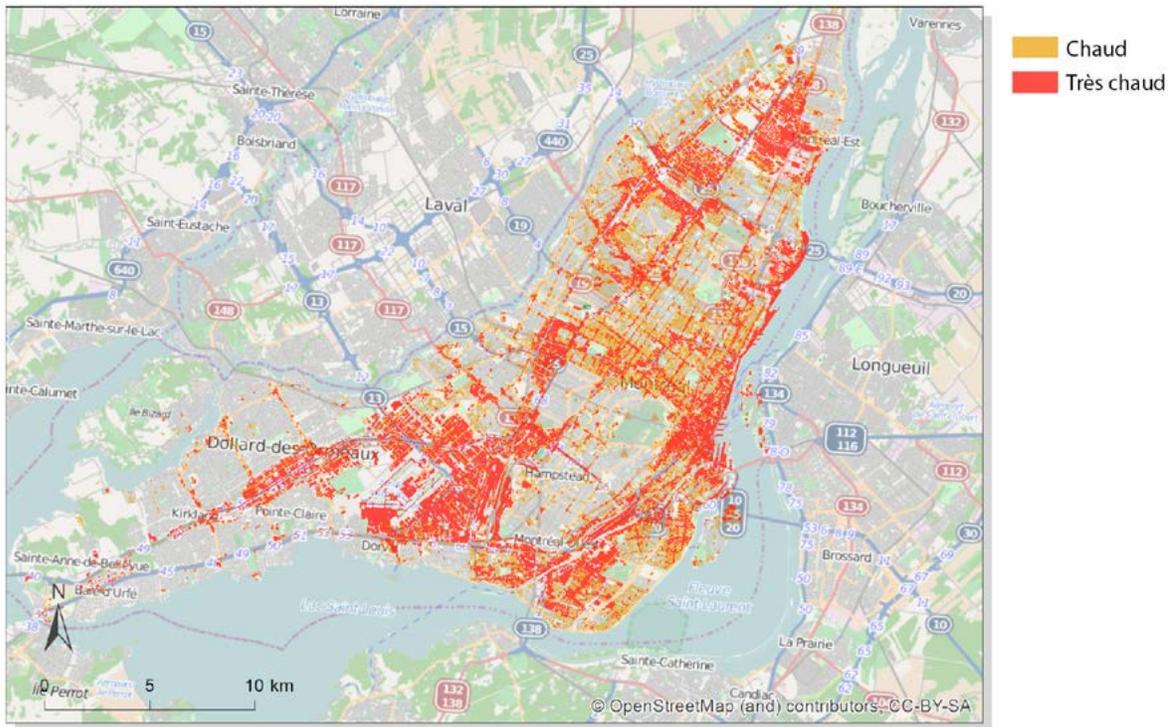


Figure 2-17 Carte des îlots de chaleur, Montréal
 Source : Gouvernement du Québec (2013a)⁵

Les ménages et les individus

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Dans le cadre du PACC, un groupe d'experts et de chercheurs a procédé à une revue systématique de la littérature scientifique et à une recension des effets indésirables dans les sources de référence sur les pharmacothérapies afin d'identifier quels médicaments doivent être pris avec précaution en période caniculaire (Blachère et Perreault, 2010, 2012a, 2012b, 2013). Parmi leurs conclusions, on relève tout spécialement certains risques liés aux médicaments des systèmes cardiovasculaire (p. ex. diurétiques, antiarythmiques) et nerveux (p. ex. anticonvulsivants, lithium). La diffusion de ces informations auprès des professionnels de la santé de première ligne sous forme de synthèses et de cours en ligne, fondée sur les résultats d'une étude de besoins (Valois *et al.*, 2014a, 2014b), est en préparation pour 2015.

Par ailleurs, une étude sur les vulnérabilités à la chaleur, menée auprès de 3 485 répondants de 18 ans et plus, a permis d'estimer que la prévalence d'impacts sanitaires perçus lors de fortes chaleurs estivales s'élève à 46 % dans les aires de diffusion (plus petite région géographique lors du recensement) les plus défavorisées

⁵ Comprends des données ouvertes octroyées sous la licence d'utilisation des données ouvertes de l'Administration gouvernementale disponible à l'adresse Web : www.donnees.gouv.qc.ca. L'octroi de la licence n'implique aucune approbation par l'Administration gouvernementale de l'utilisation des données ouvertes qui en est faite.

des neuf villes québécoises les plus peuplées en 2011. La prévalence d'impacts ayant amené à consulter un professionnel de la santé (le médecin traitant 3 fois sur 4) y atteint 12 % (Bélanger *et al.*, 2015; Bélanger *et al.*, 2014; Bélanger *et al.*, 2013b, 2013c). Ces prévalences très élevées sont corroborées par une étude menée dans cinq villes canadiennes hors Québec (Alberini *et al.*, 2011). La présence de climatisation ne semble pas avoir d'effet bénéfique sur la morbidité ressentie, dans ces deux études, ce qui reste à expliquer. Les effets de la chaleur peuvent se faire sentir de manière plus importante dans les ménages plus défavorisés notamment en raison de revenus inférieurs limitant la capacité à s'adapter efficacement (p. ex. climatisation, bonne isolation du logement, etc.), et de leur localisation très majoritaire dans les quartiers urbains avec grande proportion d'îlots de chaleur urbains et peu de canopée.

Adaptation

Au niveau de l'adaptation à l'échelle individuelle, l'étude des vulnérabilités à la chaleur, citée précédemment, montre que la climatisation à domicile était présente dans 50 % des logements visités, logements qui étaient majoritairement situés à l'intérieur, ou à moins de 50 mètres, d'un îlot de chaleur urbain. En plus de la climatisation, les auteurs du rapport recommandent d'adapter la diffusion de consignes préventives selon les caractéristiques des groupes à haut risque, de diversifier les sources d'information (car 35 % des répondants n'avaient pas d'ordinateur à la maison), de rappeler les bonnes pratiques de réduction des sources de chaleur à domicile et de bonifier l'offre de services et d'infrastructures (aménagement urbain favorisant l'ombrage, les abreuvoirs, etc.) pouvant soutenir les résidents des quartiers très défavorisés lors d'une canicule.

2.2.2.2 Exposition aux ultraviolets solaires

Les risques sanitaires d'une surexposition au soleil et aux ultraviolets (UV), dont les cancers cutanés, diffèrent des risques associés aux îlots de chaleur urbains. Les considérer globalement permet toutefois le développement de stratégies d'adaptation contribuant à prévenir les premiers, et à atténuer les seconds.

Le Québec et ses régions

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Au Québec, on estime qu'environ 930 mélanomes (le plus sévère et mortel des cancers cutanés) seront diagnostiqués en 2014. Quant aux cancers non mélaniques, les chiffres pour le Québec semblent généralement sous-estimer le nombre de cas. À l'échelle canadienne, on évalue cependant qu'environ 76 100 Canadiens recevront un diagnostic de cancer de la peau autre que le mélanome en 2014 (Société canadienne du cancer, 2014). Au Québec, les coûts directs et indirects pour le système de santé associés aux cancers de la peau étaient estimés en 2004 à plus de 92 millions de dollars par an. Au Canada, on prévoit que cette somme pourrait augmenter à plus de 920 millions de dollars par année d'ici 2031 (Krueger *et al.*, 2010).

Or, cette situation pourrait encore s'aggraver. L'augmentation de la température moyenne due aux changements climatiques serait associée à une hausse de l'incidence des cancers cutanés (autres que le mélanome), notamment des carcinomes basocellulaires et spinocellulaires (Norval *et al.*, 2011). L'idée sous-jacente à cette observation est qu'une hausse de la température encouragerait les activités extérieures par un allongement de la période estivale, ce qui peut être bénéfique en termes de la pratique de l'exercice physique et de la formation de la vitamine D. Cependant, cela signifierait aussi une plus grande exposition au soleil et aux UV (Thomas *et al.*, 2012; Williamson *et al.*, 2014) et une plus grande probabilité d'avoir de graves coups de soleil (Dobbinson *et al.*, 2008), soit deux facteurs de risque des cancers cutanés à l'âge adulte (Société canadienne du cancer, 2014), surtout si la surexposition débute dès l'enfance ou l'adolescence (Jinna et Adams, 2013).

Ceci surviendrait en dépit du fait que la quantité totale de rayons UV arrivant à la surface diminuera possiblement dans le climat futur en lien avec une couverture nuageuse variable et en fonction des aérosols (voir section 1.5). Pour les résidents de haute latitude (Baie James, Nunavik), la diminution d'exposition aux UV liée aux nuages et aérosols pourrait même réduire leur dose quotidienne de radiations UV, alors qu'elles sont déjà faibles (McKenzie *et al.*, 2011). Cela pourrait nécessiter de la part de ces personnes une plus longue durée d'exposition au soleil pour produire la vitamine D (De Paula Correa *et al.*, 2013). Pour les résidents de moyenne latitude (soit la majeure partie du Canada habité), cela pourrait aggraver des carences existantes, car selon une récente enquête de Statistique Canada, 32 % (40 % en hiver et 25 % en été) des Canadiens auraient déjà une concentration sanguine de vitamine D inférieure à la valeur optimale pour maintenir la santé des os (Santé Canada, 2012a; Statistique Canada, 2013). Avant de pouvoir conclure à ce sujet, d'autres recherches considérant l'incertitude des modèles climatiques et les changements de mode de vie des populations en raison du réchauffement sont toutefois nécessaires.

Adaptation

Divers programmes de création d'ombre en milieu urbain aident à diminuer les ICU et indirectement, l'exposition aux UV (Giguère, 2009; Toronto cancer prevention coalition, 2010). La mise en œuvre des politiques de plantation d'arbres dans certaines municipalités québécoises (p. ex. : Terrebonne (2009); Ville de Sainte-Julie (2013); Ville de Saint-Jean-sur-Richelieu (2013)) aura des effets bénéfiques en ce sens, tout comme la récente norme du BNQ sur l'aménagement des aires de stationnement (BNQ, 2013). Le calcul de l'indice de canopée de la ville de Montréal est aussi un outil précieux pour optimiser la plantation. Si l'objectif fixé pour 2025 est atteint, cela signifiera que l'indice montréalais passera de 20 % à 25 % (Ville de Montréal, 2010), ce qui viendra renverser la tendance lourde vécue depuis 20 ans (figure 2-18), qui a vu diminuer la végétation dans plusieurs villes. Enfin, la création ou la consolidation des ruelles vertes et des trames vertes (réseaux cyclable et pédestre) et bleues (réseau navigable) dans les régions métropolitaines de Montréal et de Québec (CMM, 2013; CMQ, 2013) pourrait devenir une stratégie d'adaptation d'envergure. Certains obstacles d'importance viennent cependant rendre ces projets plus difficiles à réaliser, comme l'infestation par l'agrile du frêne (*Agrilus planipennis Fairmaire*) qui affecte présentement l'Amérique du Nord et le sud du Québec (Donovan *et al.*, 2013; Ville de Montréal, 2014), ou les politiques de densification en cours dans certaines villes (Anquez et Herlem, 2011).

Les initiatives visant à augmenter l'étendue du couvert arborescent contribueront à diminuer l'exposition au soleil et aux UV, car le déploiement de grands arbres permet d'ombrager suffisamment. Cependant, ces arbres prennent du temps à atteindre leur pleine croissance. Espérons que les vieux spécimens tiendront le coup d'ici à ce que les arbres plantés récemment soient matures, car dans 15 états américains où les frênes ont été décimés ces dernières années, un excès de 6 000 décès par maladie pulmonaire et de 15 000 autres par maladie cardiovasculaire ont été observés (Donovan *et al.*, 2013), quoique les mécanismes causaux précis ne soient pas encore clairs.

À plus petite échelle, les projets de création de zones ombragées en milieux scolaires ou sportifs implantés en Australie et en Nouvelle-Zélande (Cancer Society of New Zealand, 2000; Greenwood *et al.*, 1998) sont très inspirants afin d'améliorer la protection contre les UV chez les jeunes et leurs parents. Le Québec commence aussi à s'y intéresser. La création de zones ombragées autour de sites aquatiques, dans le cadre du Projet de sensibilisation des surveillants-sauveteurs et des jeunes baigneurs aux mesures de protection solaire (le pendant du programme américain Pool Cool) en sera un exemple à partir de l'été 2014 (Marie-Christine Gervais, comm. pers).

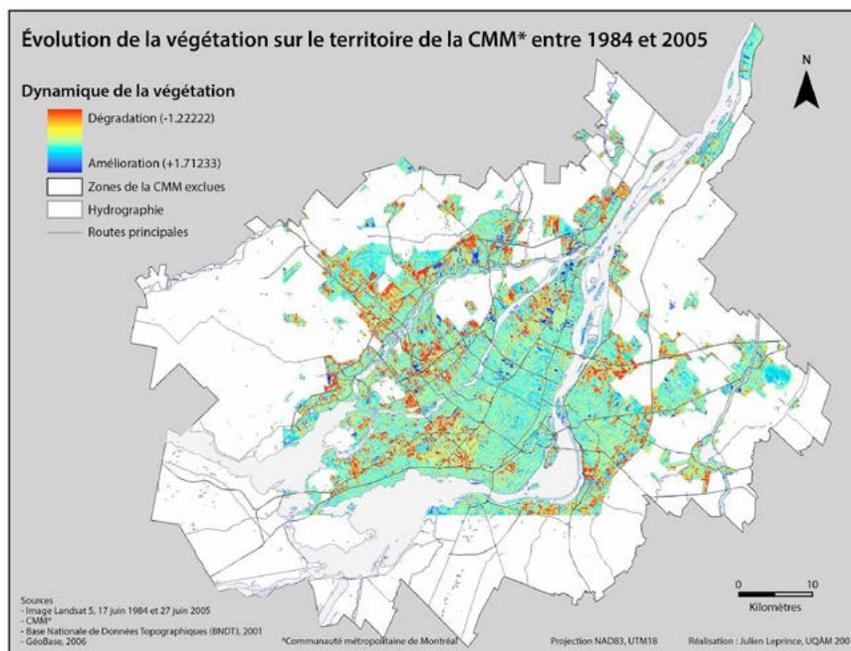


Figure 2-18 Évolution de la végétation sur le territoire de la CMM entre 1984 et 2005

Source : Baudouin et al. (2007)

Les ménages et les individus

Adaptation

Plusieurs organismes officiels encouragent l'adoption de mesures préventives contre le soleil (INPES, 2012; Ligue contre le Cancer, 2009; MSSS, 2013b; OMS, 2013a; Santé Canada, 2012b). Au Québec, divers professionnels de la santé le font également (BISE, 2010; Gervais et Rhainds, 2013; Association des Dermatologistes du Québec, <http://www.adq.org>). Il semble toutefois que l'indice UV soit peu utilisé par les médecins, en France du moins, comme le suggère une étude qui rapporte que seulement 12,1 % des dermatologues y référaient dans leurs consignes préventives, alors que ce renseignement pourrait être utile à leurs patients, notamment aux parents de jeunes enfants (Sin *et al.*, 2013).

De même, dans l'étude sur les vulnérabilités à la chaleur en quartiers défavorisés, 57 % des répondants utilisaient au moins une mesure d'adaptation sur leur balcon pour se protéger du soleil, 67 % de ceux qui avaient une cour s'y asseyaient sous les arbres et 37 % recherchaient de l'ombrage lorsqu'ils allaient s'asseoir dans un parc public. Par contre, 44 % jugeaient qu'il manquait d'arbres dans leurs quartiers. La moitié n'appliquait pas toujours un écran solaire avant la pratique d'activités physiques extérieures (Bélanger *et al.*, 2013a). Il semble donc que la promotion de mesures de protection contre les rayons UV soit encore justifiée pour encourager le changement des comportements individuels.

Encore aujourd'hui, très peu de choses sont connues sur l'étroite interrelation entre certains comportements préventifs et les déterminants psychosociaux qui leur sont communs, comme l'habitude (Bélanger *et al.*, 2006a). Le suivi des comportements de protection contre le soleil à l'aide des données d'enquêtes de Statistique Canada et de l'Observatoire sur les comportements d'adaptation de santé, dont l'implantation est prévue au PACC 2020, permettra toutefois d'aiguiller la réflexion de la santé publique à cet effet.

Encadré 2-3. Exposition aux UV et réduction des ICU

Bien que les initiatives de végétalisation soient louables pour la réduction des ICU, elles pourraient s'avérer peu utiles contre les UV, car très souvent elles ne visent que le type de recouvrement, la plantation d'arbustes et de petits arbres décoratifs. Il en est de même pour les zones récréotouristiques, lorsqu'elles sont construites en plein soleil. Dans une perspective intégrée et globale, il serait donc salubre de mettre en place des mesures complémentaires afin de réduire à la fois les problèmes de chaleur en milieu urbain et de fournir des moyens de se protéger des rayons solaires (p. ex. plantation d'arbres de grand calibre, construction de structures créatrices d'ombre faites de matériaux réfléchissants). Les mesures qui augmentent la réflectivité des surfaces, grâce aux matériaux réfléchissants des toitures, seraient aussi très efficaces pour réduire l'effet d'îlots de chaleur urbains, comme le démontre une étude portant sur ces mesures pour la ville de Chicago (Mackey *et al.*, 2012).

2.2.3 Événements météorologiques extrêmes (EME)

En raison de la plus grande variabilité climatique, davantage d'EME se produiront et leurs conséquences seront observées au Québec. L'éventail de mesures à déployer est donc large et leur application généralement très spécifique. Quelques-unes peuvent toutefois soutenir la planification d'adaptations de plusieurs EME.

Adaptation

La Base de données canadienne (BDC) sur les catastrophes demeure la plus exhaustive en ce qui concerne les catastrophes naturelles majeures (définies par plus de 100 personnes touchées, ou 10 décès ou plus), les incidents technologiques et les conflits (sauf les guerres), qui ont eu lieu depuis 1900 au pays ou à l'étranger et qui ont touché directement des Canadiens (SPC, 2014a). L'implantation récente d'un outil de repérage géospatial à la BDC facilite son exploration sur une carte du pays. Aucune base de données similaire n'existe malheureusement à l'échelle du Québec, ce qui limite les recherches en la matière, notamment sur les sinistres de plus petite ampleur, sur l'état de préparation des acteurs en protection civile et des ménages ainsi que les coûts qui y sont associés.

Des recherches sur la préparation aux désastres naturels de la population québécoise seraient également des plus utiles afin d'orienter les messages de santé et de sécurité publiques, comme le démontrent les résultats de deux études américaines. La première étude est une enquête nationale réalisée en 2010 auprès d'un sous-échantillon de 1 304 Américains de 70 ans en moyenne de l'étude longitudinale *Health and Retirement Study*. Seulement 34 % des répondants ont rapporté avoir participé à un programme ou lu de la documentation relativement à la préparation aux désastres naturels. 15 % de l'échantillon avaient des appareils médicaux nécessitant un apport externe d'électricité (à risque lors de pannes). L'étude montre que quatre caractéristiques décrivent les plus bas niveaux de préparation aux désastres, selon un score global calculé dans l'étude, soit l'avancement en âge, la présence d'un handicap physique, la faible scolarisation et un faible revenu (Al-rousan *et al.*, 2014).

La deuxième étude a été effectuée dans le comté de Jefferson en Alabama, après que le département de santé publique eut lancé une campagne médiatique de masse, *Get10*, pour promouvoir la préparation personnelle lors de désastres naturels, dans le contexte de l'après Katrina, ouragan de force 5 survenu en 2005, dans cette région. Plus de 1 500 personnes de tous âges, dont 26 % atteintes de handicaps de toute nature, ont été rejointes. Plus de 38 % des résidents avaient une trousse d'urgence complète. Malgré cela, ils n'étaient pas plus familiers avec les consignes transmises par *Get10* ou d'autres campagnes d'information que ceux qui n'avaient pas de trousse. De surcroît, les répondants les plus vulnérables n'étaient pas plus préparés aux désastres que la population générale (McCormick, *et al.*, 2013).

Encadré 2-4. Projet d'adaptation d'envergure

Le *Projet K*, lancé en 2012, vise à renforcer la résilience de la ville de Québec face aux situations d'exception d'ici 2022 (Ville du Québec, 2013), qui se multiplient. Ainsi, de janvier 2010 à octobre 2012, 429 situations d'exception potentielles ou avérées sont survenues sur le territoire de la ville, dont 205 alertes météo en moyenne par année, 9 épisodes météorologiques extrêmes et 5 débordements de rivières (Néron, 2013). Par ce projet, la ville vise à mieux connaître les risques potentiels sur son territoire et à optimiser l'atténuation de leurs conséquences. Les EME peuvent avoir des réactions en chaîne sur les services et infrastructures essentielles des municipalités, au point que des chercheurs étudient actuellement cet « effet domino » dans le but ultime de mieux les outiller à ce sujet, notamment par des simulations informatiques (Robert *et al.*, 2012).

2.2.3.1 Vagues de froid intense

Le Québec et ses régions

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Il y aura encore des vagues de froid intense et des précipitations hivernales abondantes, même si l'hiver sera en moyenne plus doux en climat futur, et que ces événements diminuent déjà en nombre et en sévérité (voir section 1.2). Peu de recherches sont disponibles sur les liens entre le froid et la santé. La mortalité due aux vagues de froid intense serait plus importante en début de saison et diminuerait au cours de l'hiver, si bien qu'elle s'avérerait généralement faible et non statistiquement significative aux États-Unis (Barnett *et al.*, 2012). Au Canada, on note que les excès de mortalité aux extrêmes sont très variables d'une ville à l'autre, pouvant s'avérer faibles à Québec aux températures les plus froides (+18 %) et plus sérieux à Montréal (+53 %), ou quasi inexistant à Halifax; des diminutions modestes seraient donc possibles en climat futur à l'horizon 2050 - de l'ordre de -4 % - (Martin *et al.*, 2012), mais ne compenseraient pas les augmentations prévisibles lors de canicules (Doyon *et al.*, 2008). Au Québec, les hospitalisations pour cause de maladies cardiaques ischémiques (MCI) augmenteraient toutefois durant une vague de froid intense, particulièrement chez les 45-64 ans et surtout chez les hommes de ce groupe d'âge (Bayentin *et al.*, 2010). Concrètement, l'effet de la diminution de 1 °C de la température moyenne journalière sur quelques jours de froid intense contribuerait davantage à augmenter le risque d'hospitalisations par MCI qu'une seule journée très froide isolée.

Adaptation

Divers portails régionaux (ASSS de Lanaudière, 2013; ASSS de Montréal, 2014) et provinciaux (INSPQ, 2010) promulguent des consignes de sécurité pour contrer les impacts sanitaires du froid intense, dont celui du ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP, 2009). Le site du MSP communique aussi des conseils de sécurité lors de pannes de courant (MSP, 2011). Dans une perspective de santé publique, il serait toutefois important d'optimiser le transfert de ces connaissances (p. ex. en diverses langues ou en utilisant des pictogrammes) et de s'assurer que les clientèles les plus vulnérables sont rejointes au moment opportun, particulièrement lorsqu'elles manquent d'électricité (Tairou *et al.*, 2010a). Un guide d'intervention sur le froid intense (CDC, 2012; Environnement Canada, 2014a; Ressources naturelles Canada, 2012; Santé Canada, 2013; UK Department of Health, 2012), mais adapté pour la santé publique du Québec, comme celui sur la chaleur accablante (Comité chaleur accablante de la TNCSE, 2006), serait aussi un atout. Par ailleurs, il n'existe aucun

seuil météorologique officiel de surmortalité par le froid au Canada, et seule la France semble en avoir établi un (Laaidi *et al.*, 2013). Les itinérants constituent un groupe particulièrement à risque dans ces situations (Rouquette *et al.*, 2011) et des mesures concrètes d'hébergement sont fort utiles et peuvent sauver des vies, comme le démontrent certains programmes existants (ASSS de Montréal, 2013).

Les ménages et les individus

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Chaque année au Canada, plus de 80 personnes meurent des suites d'une surexposition au froid, et un nombre beaucoup plus important de personnes sont affectées par l'hypothermie et les gelures (Environnement Canada, 2014c).

Adaptation

Au niveau personnel, il existe plusieurs façons de s'adapter au froid intense, tant sur le plan individuel (p. ex. vêtements chauds) que sur le plan du ménage (p. ex. calfeutrage des fenêtres et des portes) (Conlon *et al.*, 2011), notamment lors de pannes d'électricité. Le nouvel avis qui sera émis par Environnement Canada pourrait mieux soutenir l'adaptation, car déjà il y a 10 ans, une enquête réalisée sur l'adaptation aux vagues de froid au Québec méridional suggérait que la connaissance de la température ajustée selon le facteur vent, de même que les recommandations émises simultanément lors d'un avertissement de froid intense, agissaient peu ou pas sur le choix des vêtements portés lors des sorties extérieures (Bélanger *et al.*, 2006b). Aux fins de surveillance de santé publique, il serait d'ailleurs souhaitable de relancer cette enquête populationnelle. Il s'avérerait également important d'étudier l'étroite interrelation entre certains comportements préventifs au froid extrême et les déterminants psychosociaux qui leur sont communs, à l'instar des comportements déployés lors de fortes chaleurs estivales, afin d'optimiser le contenu des messages de santé publique (Bélanger *et al.*, 2006b). Un observatoire de l'évolution des adaptations en santé (notamment les comportements individuels) est d'ailleurs prévu au Québec dans les prochaines années (Gouvernement du Québec, 2012a).

2.2.3.2 Précipitations hivernales et épisodes de gel-dégel

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Selon les projections d'Ouranos, les changements climatiques amorcés se manifestent par une plus grande variabilité annuelle des précipitations et des modifications dans la saisonnalité des épisodes de gel-dégel (voir section 1.2.3). Cette variabilité amènera son lot de conséquences sur les services et infrastructures, comme les bris de conduites d'aqueduc (Radio Canada, 2014a), mais aussi sur la santé. Les blessures et décès lors de carambolages en sont un exemple (Radio Canada, 2014b). La hausse de certaines fractures osseuses en hiver pendant la dernière décennie au Québec en témoigne aussi (Modarres *et al.*, 2012; Vanasse *et al.*, 2011). Pour Montréal et à Laval, sur une période de 10 ans, le verglas expliquait 6 % des hospitalisations pour cause de fracture de la hanche, qui demeure très sérieuse en termes de mortalité et de morbidité.

Adaptation

La promotion de projets comme le *Projet K* (Ville du Québec, 2013) permettra d'élargir la réflexion sur une diversité de contextes et soutiendrait les instances provinciales et municipales, tout comme le feront les résultats de l'étude de l'effet domino des EME (Robert *et al.*, 2012). L'augmentation marquée de la surveillance

policière pour diminuer efficacement les infractions routières commises par les automobilistes (Beaudoin et Blais, 2010) serait aussi une solution à envisager lors des premières chutes de neige et des fins de semaine en cours de saison, périodes où davantage d'accidents fatals surviendraient (Tairou *et al.*, 2010a). Les affichages électroniques en temps réel sur les boulevards et autoroutes semblent aussi une solution prometteuse. Enfin, certaines conditions et activités hivernales (p. ex. pelletage) s'avèrent éprouvantes pour les personnes atteintes de problèmes cardiovasculaires (Fondation des maladies du coeur et de l'AVC, 2013; Tairou *et al.*, 2010a). Les résultats du programme québécois de recherches appliquées à la relation entre maladies cardiovasculaires, météorologie et climat, financé dans le cadre du PACC, permettront de répondre à de nombreuses questions épidémiologiques et méthodologiques à ce sujet (Chebana, 2011).

2.2.3.3 Pluies abondantes et inondations

Le Québec et ses régions

Vulnérabilités et impacts sanitaires

En raison des changements climatiques, plusieurs régions du Québec peuvent s'attendre à des augmentations de la hauteur de la précipitation maximale annuelle (voir section 1.3.2) et les plus abondantes pourraient avoir de graves impacts sur l'environnement (p. ex. érosion, éboulements) et la santé, comme indiqué par la hausse de 17 à 28 % du nombre de collisions sur les routes d'ici 2055 liées aux précipitations, simulée pour le grand Vancouver (Hambly *et al.*, 2013).

Ce sont toutefois les inondations pouvant en résulter qui retiennent davantage l'attention, notamment les inondations printanières de 2011 en Montérégie, causées par plusieurs jours de pluies abondantes conjuguées à une fonte de quantités importantes de neige et à des vents constants. Ces inondations ont touché 40 municipalités dont 11 ont déclaré l'état d'urgence (Gouvernement du Québec, 2013g). 2 535 résidences principales ont été inondées. Sur les 3 927 personnes affectées, 1 651 ont été évacuées, et 3 145 ont reçu des services d'hébergement et d'alimentation d'urgence. La Sécurité civile du Québec, 3 centres de santé et de services sociaux (CSSS), diverses organisations (comme la Croix-Rouge) et des milliers de bénévoles ont prêté main-forte aux communautés. Près de 7 000 interventions psychosociales ont eu lieu, mais l'ampleur des impacts psychologiques, tout comme l'ampleur des impacts physiques, toxicologiques (p. ex. produits chimiques déversés dans l'eau) et microbiologiques (p. ex. microorganismes pathogènes dans les eaux stagnantes) associés à cette catastrophe demeure encore inconnue. Des études sont en cours visant à mieux quantifier ces impacts.

Les coûts des inondations de 2011 ont été estimés à quelque 82 M\$ de dommages pour un événement de 8 semaines. Au Québec, de 1974 à 2011, l'aide financière gouvernementale pour les inondations et les pluies abondantes s'élevait à environ 730 M\$ (Gouvernement du Québec, 2014b). Cette situation pourrait même s'aggraver à l'avenir, comme démontré aux États-Unis, où les coûts annuels liés aux inondations atteindraient de 7 à 19 G US\$ d'ici la fin du 21^e siècle, alors qu'ils varient actuellement de 2 à 2,7 G US\$ (Ntelekos *et al.*, 2010).

Adaptation

Diverses mesures ont été mises en place pour contrer les impacts des inondations; d'autres sont en phase d'élaboration, voire de proposition. Ainsi, des guides ont été produits, notamment sur les mesures relatives aux dimensions de la sécurité civile lors d'inondations (WHO, 2013), la gestion de risque associée aux EME et à leurs conséquences (WHO, 2011), l'intervention en matière d'inondations à l'intention des intervenants de santé environnementale du Québec (INSPQ, à paraître début 2015) et la gestion de l'utilisation du territoire à

risque d'inondations côtières (Ausenco Sandwell, 2011). À cet effet, la planification de l'aménagement du territoire constitue une avenue importante en termes d'adaptation (voir la section 2.3.2.2 sur les régions côtières). Des indicateurs d'impacts sanitaires liés aux inondations, identifiés par une revue systématique de la littérature (Tairou *et al.*, 2010b), ont été ajoutés au système SUPREME.

Enfin, le Programme de mise en valeur du lac Champlain a fait état de nombreuses recommandations à la suite des inondations de 2011. À propos de la santé humaine, le Programme relève notamment le besoin d'améliorer les plans d'intervention d'urgence en cas d'inondation dans le bassin du lac Champlain pour réduire les impacts sanitaires potentiels et le besoin de compiler des rapports sur les répercussions psychologiques (et les répercussions socioéconomiques qui en découlent) causées par les inondations et par d'autres catastrophes naturelles aux fins d'analyse à court terme et à long terme. La compilation du nombre total de problèmes de santé signalés relativement à la moisissure et la détermination des niveaux de moisissure toujours présents dans les habitations inondées sont aussi suggérées (Programme de mise en valeur du lac Champlain, 2013). Le suivi des recommandations présentées dans ce rapport, dont celles qui ont trait à la mise à jour des données hydrologiques et climatiques en fonction des changements climatiques, est en ce moment au cœur des travaux d'un comité interministériel sur le lac Champlain (Louise Lajoie, comm. pers.).

Les ménages et les individus

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Outre les décès et les blessures, divers impacts sur la santé physique ont été associés aux inondations dans la littérature scientifique, dont des intoxications, des problèmes respiratoires et des maladies gastro-intestinales (Tairou *et al.*, 2010b). Bien que peu documentés, les impacts sur la santé émotionnelle et la santé mentale semblent aussi importants. Selon le Programme de mise en valeur du lac Champlain, il n'existe pas de protocole standard concernant la gestion des problèmes de santé mentale à grande échelle suite à une catastrophe naturelle au Québec (Programme de mise en valeur du lac Champlain, 2013). Par ailleurs, les résidents habitant une zone à risque tendraient à sous-estimer ou à nier la probabilité qu'une inondation survienne. En outre, avoir fait l'expérience d'inondations s'avèrerait le principal déterminant d'une perception accrue du risque



Figure 2-19 Inondation à Saint-Jean-sur-Richelieu, Montérégie, Québec 4 mai 2011

Crédit photo: Aircam.ca

d'inondation et de l'adoption de comportements de protection. Les émotions négatives associées aux inondations, le sentiment d'attachement au milieu de vie ou encore la proximité des cours d'eau sont d'autres facteurs qui influeraient sur l'interprétation du niveau de risque et les comportements adoptés (Villa et Bélanger, 2012).

Adaptation

Diverses organisations québécoises fournissent de l'information sur les façons de se préparer ou de limiter les dégâts lors d'inondations ou de déferlements de vagues, événements qui risquent d'être plus fréquents dans le contexte des changements climatiques. C'est notamment le cas pour (Urgence Québec, 2013), le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP, 2012) et plusieurs ASSS et municipalités. Selon certaines études, les personnes mieux informées démontreraient d'ailleurs une perception accrue du risque d'inondation et seraient plus enclines à adopter des mesures de protection (Villa et Bélanger, 2012). Le contenu des informations et le format utilisé influenceraient, toutefois, la façon dont les personnes interprèteront le niveau de risque. Au Québec, aucune étude sur la perception du risque d'inondation ne porte sur les populations à risque, aucune ne documente le niveau de préparation des ménages à risque, et très peu ont évalué les impacts sanitaires qui leur sont associés. Les résultats d'une des études du programme québécois de recherches appliquées à la relation entre maladies cardiovasculaires, météorologie et climat (programme financé dans le cadre du PACC) permettront de combler partiellement ces lacunes (Chebana, 2011).

2.2.4 Contextes particuliers

2.2.4.1 Nord-du-Québec

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Dans la région Nord-du-Québec, les changements climatiques sont complexes et très préoccupants pour la santé publique, car leurs répercussions ont des conséquences sur des éléments aussi fondamentaux que l'eau, l'air, le sol, les denrées alimentaires, le logement, la sécurité et le bien-être (Auzel *et al.*, 2012; voir aussi la section 2.4 sur la biodiversité et les services écologiques). En particulier chez les autochtones, qu'ils soient Cris, Innus ou Inuits, puisque la majorité de leurs activités traditionnelles deviennent de plus en plus difficiles à maintenir. Les impacts sanitaires perçus dans la population crie (Foro *et al.*, 2013; Hébert *et al.*, 2013) sont d'ailleurs très similaires à ceux qui ont été documentés dans la population inuite depuis quelques années (Auzel *et al.*, 2012; Ford *et al.*, 2010; Ford, 2012) et probablement aussi à ceux qu'on observerait dans la population innue et chez les Naskapis, si une étude était réalisée à ce sujet. Ces impacts incluent notamment une hausse du nombre d'accidents et de blessures (p. ex. en raison du dégel du pergélisol, de routes de glace, etc.), ainsi que davantage de diabète et d'obésité en lien avec la perte des activités traditionnelles liées à l'alimentation. Diverses maladies infectieuses d'origine alimentaire ou hydrique et certaines zoonoses seraient aussi plus prévalentes, de même que le stress lié à l'environnement et à l'insécurité alimentaire exacerbée dans un contexte de changements climatiques (Ford et Beaumier, 2011; Furgal *et al.*, 2008).

Adaptation

Dans la région Nord-du-Québec, l'évaluation du parc immobilier du MSSS en fonction de la sensibilité au dégel du pergélisol permettra dorénavant de considérer cette donnée lors de rénovations ou pour de nouvelles constructions (Lemieux *et al.*, 2013). La cartographie des caractéristiques du pergélisol aidera à mieux planifier et gérer les infrastructures et l'environnement bâti, dont le parc du MSSS, et contribuera à réduire les impacts sanitaires liés au dégel du pergélisol (L'Hérault *et al.*, 2013). Aux fins de surveillance, il serait aussi important de bonifier les données sanitaires, notamment pour les maladies infectieuses liées à l'eau de

consommation (Harper *et al.*, 2011) et aux zoonoses. Enfin, les divers outils élaborés afin de prendre en compte les impacts sanitaires potentiels des changements climatiques dans les évaluations d'impacts environnementaux (Bouchard-Bastien et Brisson, 2014) pourraient être utilisés comme vecteurs de sensibilisation des populations et des gestionnaires locaux aux enjeux de ces changements.

2.2.4.2 Les changements climatiques, l'emploi et la santé au travail

Impacts

Une revue de la littérature, validée auprès de 13 experts québécois du domaine étudié, a identifié les groupes de travailleurs les plus exposés simultanément aux contraintes thermiques (froid et chaleur) et aux substances chimiques pouvant influencer les mécanismes de thermorégulation. Les travailleurs les plus exposés sont rattachés à 20 emplois des secteurs de la fabrication des produits minéraux non métalliques, de la première transformation des métaux, de la fabrication de produits métalliques, suivis par les couvreurs de toiture et les pompiers (Truchon *et al.*, 2013).

De même, une étude vient d'estimer les pourcentages de travailleurs potentiellement exposés à 38 substances ou circonstances cancérigènes reconnues ou probables (Labrèche *et al.*, 2012). Le rayonnement UV solaire y vient en tête de liste ; il toucherait au moins 230 000 travailleurs québécois (Labrèche *et al.*, 2012, 2013). Les rayons ultraviolets, ainsi que les polluants de l'air, les EME, les maladies vectorielles transmissibles et les zoonoses, constitueraient d'ailleurs les catégories de dangers qui affecteraient la santé et la sécurité des travailleurs au Québec (Adam-Poupart *et al.*, 2012, 2013).

À l'échelle internationale, les impacts négatifs à court et moyen termes pour l'emploi proviendraient surtout des EME (BIT, 2010). En milieu urbain, leurs dégâts sur les infrastructures et habitats (voir la section 2.3 sur les bâtiments et les infrastructures) nuiront à la capacité des travailleurs de se rendre sur leur lieu de travail, ou occasionneront des fermetures et déplacements d'entreprises. L'emploi rural, surtout les emplois saisonniers qui dépendent des récoltes et de leur traitement, sera aussi touché. Enfin, les changements climatiques pourraient aussi réduire la productivité (Lundgren *et al.*, 2013) et la sécurité des travailleurs, en plus d'augmenter la mortalité et la morbidité. Ainsi, une récente étude pour le Québec montre une augmentation de 42 % des compensations journalières en lien avec la chaleur pour chaque augmentation de 1 °C de la température maximale quotidienne. Ces problèmes liés à la chaleur étaient présents dans 14 régions sur 15 couvertes par le système de compensations au travail (Adam-Poupart *et al.*, 2014).

Adaptation

Dans un contexte de changements climatiques, l'identification des situations et des emplois à risque d'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques (Truchon *et al.*, 2013), tout comme l'estimation des risques encourus par les travailleurs (Labrèche *et al.*, 2012), permettra d'améliorer les interventions de santé publique et de cibler les recherches à développer dans ce domaine en plein essor. De façon plus générale, un cadre politique pour accompagner les marchés du travail en transition s'avèrerait important (BIT, 2010).

2.2.4.3 Maladies hydriques et zoonoses

La modification du régime pluviométrique due aux changements climatiques contribuera à l'éclosion de maladies hydriques. Les pluies torrentielles provoquent la mobilisation de nutriments propices aux floraisons d'algues présentes dans les lacs et cours d'eau (Bird *et al.*, 2009; Reichwaldt et Ghadouani, 2012). Elles font aussi pénétrer des polluants dans les eaux de surface et souterraines et libèrent ainsi de grandes charges microbiennes

pouvant contaminer les sources d'eau de consommation (Delpla *et al.*, 2009; Ferrouillet *et al.*, 2012), surtout durant l'automne au Québec (Febriani *et al.*, 2010). De faibles précipitations l'été après une sécheresse sont également à surveiller, particulièrement en milieu rural, car ces faibles précipitations conduisent à l'abaissement de la nappe phréatique et à la contamination des eaux souterraines par les eaux de surface, et concentrent les eaux usées municipales et agricoles pouvant contaminer les sources d'eau (p. ex. puits privés) (Febriani *et al.*, 2010).

Par ailleurs, la hausse des températures, des pluies et de l'humidité, combinée à d'autres facteurs, comme les changements dans l'utilisation des sols (Kilpatrick et Randolph, 2012), influencent la survie, la croissance et la transmission des vecteurs de certaines zoonoses, ainsi que le développement de conditions favorables à des populations d'animaux à risque pour la santé humaine (p. ex. les vecteurs du virus du Nil occidental (VNO) et de la maladie de Lyme).

Maladies hydriques

Vulnérabilités et impacts sanitaires

Les éclosions de maladies gastro-intestinales associées à la modification du régime pluviométrique et à la contamination des eaux de consommation, tant en milieu urbain qu'en milieu rural, constituent l'un des principaux impacts infectieux liés aux changements climatiques, selon une récente revue de la littérature (Tairou *et al.*, 2011). Ces éclosions peuvent même survenir jusqu'à quatre semaines après l'événement météorologique (Febriani *et al.*, 2010). Au Québec, 25 éclosions de maladies hydriques, dont 19 de nature infectieuse, ont été dénombrées en 2010-2011 ; elles ont touché 188 personnes et occasionné 4 hospitalisations et 1 décès (Canuel et Lebel, 2013).

L'augmentation potentielle de cas de légionelloses dans la communauté lors de certaines conditions météorologiques (chaleur et humidité élevées) est aussi relevée dans la littérature (Conza *et al.*, 2013; Karagiannis *et al.*, 2009; Tairou *et al.*, 2011), mais pas de façon constante (Fisman *et al.*, 2005). À Québec, l'éclosion de 2012 a infecté sérieusement 181 personnes et a conduit à 13 décès (ASSS de la Capitale-Nationale, 2012). La contamination de tours de refroidissement des systèmes de climatisation d'édifices commerciaux à proximité d'une place publique achalandée a été identifiée comme source de l'épisode.

Enfin, la contamination des lacs et des cours d'eau du Québec par les cyanobactéries, communément appelées algues bleu-vert, est aussi à surveiller, en raison des symptômes gastro-intestinaux associés à l'ingestion d'eau contaminée lors d'activités récréatives (Lévesque *et al.*, 2014) et des liens avec les variables météorologiques (Reichwaldt et Ghadouani, 2012; Zhang *et al.*, 2012).

Adaptation

Concernant les maladies hydriques, investir dans la formation des opérateurs des réseaux d'eau potable et la mise à niveau des infrastructures desservant des populations de 5 000 habitants ou moins s'avérerait nécessaire, car la majorité des éclosions de maladies hydriques leur serait attribuée au Canada (Moffatt et Struck, 2011). Améliorer les systèmes de surveillance serait aussi souhaitable, notamment en normalisant les définitions d'éclosions (Moffatt et Struck, 2011) et en étendant la fenêtre de vigie et de surveillance d'éclosions sur quelques semaines plutôt que quelques jours lors de pluies diluviennes automnales et de sécheresses suivies de faibles précipitations l'été (Febriani *et al.*, 2010). Par ailleurs, il serait important d'émettre des avis d'ébullition plus

détaillés. L'adaptation aux risques futurs accrus demandera ainsi d'agir sur les comportements individuels, puisque la prévalence d'observance complète des consignes transmises n'atteindrait que 35 % dans les municipalités québécoises de plus de 1 000 habitants soumises à un avis d'ébullition réglementaire (Tairou *et al.*, 2011).

Relativement aux cyanobactéries, il serait nécessaire d'informer la population des risques de symptômes gastro-intestinaux associés à un contact (complet ou limité) aux cyanobactéries (Lévesque *et al.*, 2014). Un plan de gestion des risques serait aussi requis pour les installations de traitement de l'eau qui tirent leur eau d'une source contaminée par les cyanobactéries.

Enfin, la création d'un répertoire provincial des tours aéro-refroidissantes et l'obligation réglementaire d'un programme d'entretien et de nettoyage périodique, validées par un contrôle de la qualité de l'eau, appuieront la surveillance et le contrôle du risque de légionellose (ASSS de la Capitale-Nationale, 2012; Gouvernement du Québec, 2013h).

Zoonoses

Vulnérabilités et impacts sanitaires

La maladie de Lyme et les arboviroses, dont le virus du Nil occidental (VNO), constituent en ce moment les principales zoonoses présentes au Québec, et sont des maladies à déclaration obligatoire au Canada (MADO) et au Québec.

L'infection liée au VNO évolue aussi à la hausse. Au Canada, le nombre de cas cliniques déclarés de VNO s'élevait à 428 cas en 2012, alors qu'il était de 36 cas en 2008 (ASPC, 2013). Au Québec, le VNO a également connu une recrudescence récemment, atteignant 133 cas en 2012 et 32 cas en 2013, parmi lesquels 24 présentaient une atteinte neurologique (MSSS, 2014b), par rapport à 2 cas en 2008 (ASPC, 2013). Pour l'été 2012, les coûts directs et indirects de l'infection à VNO s'élèveraient à 2 M\$ (Fortin *et al.*, 2013).

L'élargissement des aires de vie d'animaux porteurs de la rage (MADO) doit demeurer sous surveillance au Québec, particulièrement celles de chauves-souris (OMS, 2013b), présentes presque partout sur le territoire, de la mouffette rayée, du raton laveur et des renards roux et arctique (INSPQ, 2013a). En ce moment, la rage humaine est rare partout au Canada, soit 4 cas depuis 1985 au Canada (ASPC, 2008), dont un seul cas en

Encadré 2-5. Changements climatiques et gestion de l'eau

De manière générale, les changements climatiques affecteront divers aspects associés à la gestion de l'eau pour lesquels il sera important de s'adapter, notamment dans une perspective de protection et de prévention des risques pour la santé (voir la section 2.5.1 sur les ressources hydriques et les usages de l'eau).

Les changements climatiques pourront ainsi amplifier certaines vulnérabilités du régime hydrique, notamment en termes de disponibilité, de qualité et de salubrité de l'eau potable et de baignade, qui pourront se traduire en impacts sanitaires. L'augmentation prévisible des maladies hydriques et des problèmes de contamination des eaux (p. ex. cyanobactéries) sont des problèmes auxquels devront faire face tant le réseau de la santé que les municipalités. La mise à niveau des prises d'eau, des usines de traitement et des infrastructures de distribution, de même que la protection des sources d'approvisionnement contre l'eutrophisation, sont quelques-uns des défis auxquels sont déjà confrontées les municipalités. La surveillance accrue des plages publiques en est un autre.

2000 au Québec (Gouvernement du Québec, 2014a). D'excellents programmes de prévention et de lutte vaccinale chez les vecteurs (ASPC, 2008) expliquent ce bon résultat. La donne pourrait toutefois changer avec les changements climatiques, comme pour le VNO, en raison de l'augmentation des températures et donc, de la progression géographique des habitats des animaux et insectes vecteurs vers le nord.

Adaptation

En plus du système de surveillance des MADO qui permet de suivre l'évolution de la maladie de Lyme, le système québécois de surveillance intégré de vigie sanitaire pour le VNO, créé dès l'apparition du virus en 2003, a été remis en opération en 2013 à la suite de la recrudescence de cas en 2012. L'épandage de larvicides a également repris dans certaines régions du Québec afin de réduire les populations des vecteurs du VNO dans les zones à risque, comme suggéré dans le Plan d'intervention gouvernemental 2013-2015 à ce sujet (INSPQ, 2013b; MSSS, 2013a), et l'étude de leur efficacité pour réduire les populations de moustiques est en cours.

Encadré 2-6. Maladie de Lyme

Les changements climatiques risquent d'occasionner des impacts sur les espèces envahissantes et nuisibles (animales et végétales) qui pourront à leur tour augmenter les risques pour la santé lorsque les populations sont exposées à ces espèces, y compris les travailleurs œuvrant en milieu forestier ou agricole. Par exemple, en ce qui concerne la maladie de Lyme, les changements climatiques pourraient entraîner une augmentation substantielle du risque humain, car la principale tique vectrice de cette maladie étendrait son territoire de 46 km par année, en direction nord-est (Leighton *et al.*, 2012) (voir aussi figure 2-20). Au Québec, les tiques porteuses de la maladie de Lyme sont apparues dernièrement au sud du territoire (voir la section 2.4.2 sur la biodiversité), principalement en Montérégie. Une carte interactive permet aux résidents de savoir où sont les zones de tiques infectées, ce qui sera utile avant une randonnée en famille ou autre activité en nature (Gouvernement du Québec, 2008b). Des mesures simples peuvent alors être promues, comme de marcher uniquement dans les sentiers et éviter les herbes hautes; porter un chapeau, des souliers fermés et des vêtements longs dans ces secteurs plus à risque de contact avec les tiques; utiliser un chasse-moustiques pour les parties du corps exposées (sauf le visage). D'autres conseils sont offerts par le ministère de la Santé et des Services sociaux (<http://sante.gouv.qc.ca/problemes-de-sante/maladie-de-lyme/>)

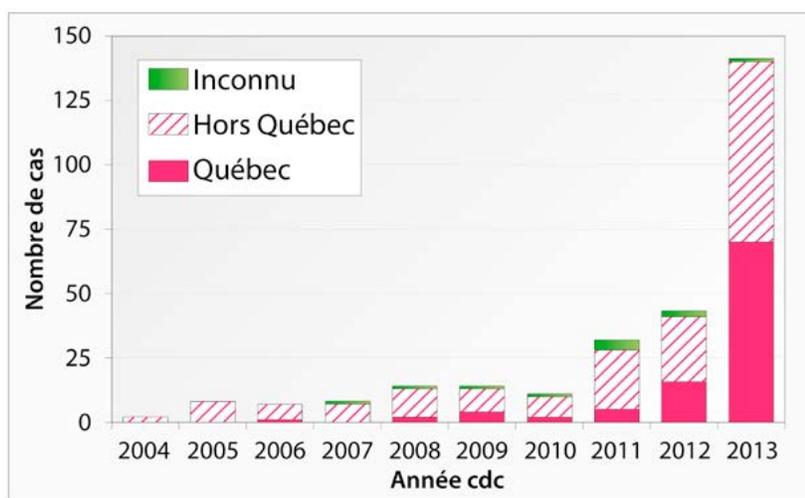


Figure 2-20 Évolution du nombre de cas de maladie de Lyme selon le lieu d'acquisition au Québec entre 2004 et 2013

Source : Bureau de surveillance et de vigie à partir de la liste des cas Infocentre du Québec (INSPQ), extraction MADO du 2 juin 2014

Conclusion

Les changements climatiques auront de nombreux impacts sur les populations de toutes les régions du Québec. L'adaptation des communautés dépend notamment de l'état des connaissances et de leur pénétration au sein des groupes vulnérables. Au cours des prochaines années, plusieurs mesures et projets pourront être mis en place afin de contribuer à la réduction des impacts sanitaires des changements climatiques. De plus, les stratégies d'adaptation intégrées sont à privilégier puisqu'elles permettent de répondre à plusieurs objectifs et favorisent des pratiques cohérentes en termes d'adaptation aux changements climatiques.

Ainsi, des stratégies concertées dans le domaine de l'aménagement du territoire pourraient contribuer, par exemple, à réduire le nombre d'incendies de forêt, diminuer les risques et les impacts des inondations et de l'érosion côtière, ou encore améliorer l'aménagement des villes dans une optique de réduction des ICU et de réduction de l'exposition aux rayons ultraviolets par le verdissement urbain accéléré, ces mesures contribuant en retour à la réduction de nombreux risques pour la santé humaine. La planification et la gestion des ressources en eau dans un contexte de changements climatiques devront aussi se pencher sur les maladies d'origine hydrique qui surviendront, par exemple, au niveau de la contamination des sources d'eau potable par les microbes et les algues. Au niveau individuel, les interventions de santé devront favoriser les comportements préventifs et la compréhension des risques sanitaires associés aux changements climatiques.

Alors que certains impacts des changements climatiques sur la santé sont davantage étudiés, notamment ceux associés à la chaleur extrême, d'autres domaines nécessiteront que l'on s'y attarde plus en profondeur. Ainsi, les impacts des changements climatiques sur la santé des populations vulnérables, sur les effets psychosociaux des EME ou encore sur les travailleurs, sont des avenues de recherche importantes pour l'évolution des connaissances et de l'adaptation. Les effets en cascade d'inondations ou de sécheresses sur la sécurité alimentaire constituent aussi un sujet à explorer et approfondir, vu notre grande dépendance à la production agricole extérieure.

Enfin, il ne faut pas nier que nous sommes très loin d'avoir stabilisé l'évolution du climat. Ceci nécessitera une mobilisation de la population et des gestionnaires qui n'existe pas présentement, et des efforts majeurs en ce sens demeurent prioritaires, notamment au chapitre de la diffusion et du transfert des connaissances et des compétences utiles à l'adaptation.



2.3 La pérennité et la sécurité des bâtiments et des infrastructures

Auteure principale : Caroline Larrivée (Ouranos)

Collaborateurs : Stéphane O'Carroll et Jean-Pierre Savard (Ouranos)

Réviseurs : Jean-Pascal Bilodeau (ULaval), Hervé Logé (Ville de Montréal) et Gilles Rivard (Dessau)

Faits saillants

- ▶ Les infrastructures jouent un rôle critique pour soutenir la compétitivité économique et la qualité de vie, mais l'interdépendance entre elles rend plus complexes les enjeux associés aux changements climatiques.
- ▶ La conception des bâtiments et des infrastructures, mais aussi tous les aspects d'opération, d'entretien, de gestion et de réhabilitation, sont et seront affectés par les changements climatiques.
- ▶ Une des principales sources de vulnérabilité identifiées dans de nombreuses analyses sur des infrastructures existantes est l'approvisionnement en énergie.
- ▶ Dans les régions nordiques, la dégradation du pergélisol, les modifications au couvert de glace et les changements aux régimes de tempêtes affectent les bâtiments, les infrastructures de transport terrestre, aérien et maritime ainsi que les infrastructures industrielles. Une cartographie caractérisant les zones de pergélisol aide à mieux planifier le développement, une composante essentielle de la protection des infrastructures dans cette région.
- ▶ En zone côtière, les pertes causées par la submersion marine et l'érosion côtière sont en augmentation et cette tendance devrait se poursuivre dans un contexte de changements climatiques. Les principales catégories d'options d'adaptation dans la zone côtière sont l'évitement, le retrait, l'accommodation et la protection.
- ▶ En milieu urbain, des pluies fréquentes et plus intenses provoquent des inondations localisées et des épisodes de surverses, une tendance appelée à s'accroître avec les changements climatiques. La gestion des eaux de pluie passe par un portfolio de mesures qui, combinées ensemble, permettent de gérer de manière plus efficace les eaux de pluie. Ces mesures se déclinent sur trois plans : des mesures de contrôle à la source, le recours aux réseaux mineurs (infrastructures en souterrain) et majeurs (routes, parcs), et des bassins de rétention en aval des réseaux.
- ▶ Les changements climatiques auront des effets pour les sources d'eau souterraines et de surface tant sur le plan de la disponibilité que de la qualité. La protection des sources d'eau et des écosystèmes naturels et une meilleure gestion de la demande, comme des mesures de conservation d'eau, sont des options d'adaptation « sans regret ».
- ▶ La performance des réseaux routiers est elle aussi fortement influencée par les facteurs climatiques qui comptent pour environ 50 % des dommages. Le bilan net des effets pour les infrastructures routières dans la partie Sud du Québec n'est toutefois pas clair, car les changements climatiques auront des effets positifs et des effets négatifs qui affecteront à la fois les coûts de construction et la durée de vie. Une intensification de l'entretien et des méthodes de détection précoce des défaillances peuvent aider à diminuer de manière significative la vulnérabilité de la structure.
- ▶ Pour les bâtiments, les changements climatiques affecteront l'enveloppe, la structure et les matériaux utilisés, principalement en ce qui concerne le rythme d'usure, mais aussi parfois la défaillance, surtout lorsqu'ils sont situés en zone à risque.

- ▶ Une analyse des normes et standards tend à montrer que les normes demeurent des outils très efficaces pour promouvoir et mettre en oeuvre des pratiques robustes face aux changements climatiques, mais le défi réside dans la prise en compte de l'évolution des paramètres climatiques pour bien appliquer la norme dans un contexte de risque évolutif.
- ▶ La méconnaissance de l'état des infrastructures (manque de données ou absence d'une documentation qui décrit les diverses interventions) de même que les pratiques de gestion et d'entretien parfois défailtantes apparaissent comme des sources de vulnérabilités importantes pour les infrastructures.
- ▶ Les impacts des changements climatiques sur les infrastructures ne peuvent pas être examinés isolément des autres facteurs (sociaux, politiques, culturels, environnementaux et économiques) qui influencent l'utilisation et la gestion des infrastructures.
- ▶ En réponse à des problèmes techniques, les réponses les plus durables résultent souvent de changements de comportements et d'une plus grande collaboration entre les parties prenantes.

Comme mentionné dans la section 2-1, le Québec possède un patrimoine bâti important (Desjarlais *et al.*, 2010; Doré *et al.*, 2014; Mailhot *et al.*, 2014) qui joue un rôle critique pour soutenir la compétitivité économique et la qualité de vie (Félio, 2012a; Gagné et Haarman, 2011).

Plusieurs exemples récents montrent combien les conditions climatiques peuvent provoquer une défaillance ou perte d'usage des infrastructures et générer plusieurs conséquences néfastes pour les communautés, tant pour les particuliers que pour les secteurs public et privé (Enviro-accès, 2013; SNC-Lavalin Environnement, 2013).

La conception, mais aussi tous les aspects d'opération, d'entretien, de gestion et de réhabilitation, sont et seront affectés par les changements climatiques. Ces éléments contribuent à augmenter la vulnérabilité ou peuvent s'avérer des moyens d'adaptation efficaces (Engineers Canada, 2008, 2011; Doré *et al.*, 2014). Plusieurs études et analyses suggèrent d'ailleurs que l'état des infrastructures vieillissantes les rend plus vulnérables lors d'événements plus intenses (Engineers Canada, 2008, 2012; Félio, 2012a).

Partant d'une description sommaire de ce que l'environnement bâti comprend, ce chapitre explique le lien avec l'environnement naturel et les spécificités régionales du Québec. Il aborde brièvement l'état actuel des infrastructures et résume, à partir d'études récentes, les perspectives en ce qui concerne le développement et la réhabilitation des infrastructures pour mieux saisir les vulnérabilités, risques, impacts et adaptations possibles face aux changements climatiques.

2.3.1 Un cadre bâti développé mais vieillissant, et des spécificités régionales

L'environnement bâti comprend, aux fins de cet ouvrage, l'ensemble des bâtiments (tous secteurs) et les systèmes qui les composent (mécaniques, électriques, etc.); les réseaux de transport (terrestre, maritime, aérien) et les infrastructures périphériques (panneaux d'affichage, etc.); les réseaux de télécommunication et d'énergie (production, transport, distribution); les infrastructures liées à l'eau (accès, traitement, distribution, collecte); de même que les infrastructures spécifiques à certains secteurs industriels (agricoles, miniers, etc.).

Les changements climatiques auront des effets sur l'intégrité, le rythme d'usure et la performance de l'environnement bâti (Desjarlais *et al.*, 2010; Larrivée *et al.*, 2013). Les impacts des changements climatiques seront directs – l'effet des conditions climatiques sur les matériaux et les structures – ou indirects – l'effet des

changements climatiques sur l'environnement naturel – souvent associés à la localisation des structures (voir aussi le chapitre 2.5.2.1 sur l'aménagement du territoire en milieu urbanisé). Les principaux impacts diffèrent d'une région à l'autre, en raison à la fois des infrastructures elles-mêmes (nature critique, absence de redondance, état du bâti, politiques et pratiques d'entretien en vigueur, utilisation faite, etc.), des caractéristiques biophysiques de l'environnement (nature du sol, topographie, proximité à des cours d'eau, etc.) et d'autres considérations socioéconomiques (démographie, situation économique).

Bien que conçues pour résister à des événements extrêmes, les infrastructures seront particulièrement affectées par des changements quant à l'intensité, à la durée et à la fréquence de certains événements comme des pluies intenses ou des tempêtes (Engineers Canada, 2008, 2012; Doré *et al.*, 2014; Dorner, 2013; Mailhot *et al.*, 2014; Michaud *et al.*, 2013). L'augmentation de la fréquence de certains événements moins extrêmes va aussi contribuer à accélérer le rythme d'usure des infrastructures, comme les épisodes de redoux hivernaux, qui ont des impacts sur les infrastructures routières et les revêtements de bâtiments, les rendant ainsi plus vulnérables aux défaillances lors d'événements extrêmes.

Les régions côtières du Québec, surtout dans l'Est de la province et dans le Nord, connaissent des problèmes importants associés aux risques littoraux appelés à s'aggraver avec les changements climatiques (voir la section sur l'érosion du littoral dans le chapitre 2.5.2.1 sur l'aménagement du territoire en milieu urbanisé). Dans l'Est du Québec où la majorité de l'environnement bâti se trouve à moins d'un kilomètre de la côte et où l'économie des villes et des villages dépend fortement de services sensibles aux aléas maritimes, plusieurs tronçons de routes et de voies ferrées ainsi que des infrastructures portuaires et quelques milliers de propriétés sont exposés aux problèmes d'érosion et de submersion. Des industries à proximité de la côte sont aussi à risque (aluminerie et autres industries de transformation) en raison d'infrastructures telles que barrages, alimentation en eau, traitement des eaux usées, etc.

Dans la région nordique du Québec, des problèmes de dégradation du pergélisol (Allard *et al.*, 2010, Allard *et al.*, 2013) s'ajoutent à l'érosion des zones côtières, à la fluctuation des niveaux d'eau (Allard *et al.*, 2013) et aux modifications des régimes de tempêtes (Savard *et al.*, 2014), et ils ont tous des conséquences pour le cadre bâti.

2.3.2 Risques, impacts, vulnérabilités et adaptation aux changements climatiques

Il est admis que le cadre bâti au Québec est généralement assez robuste, puisqu'il doit déjà faire face à une variabilité climatique importante (voir la Partie 1). Toutefois, ce cadre bâti est vieillissant et plusieurs infrastructures jugées essentielles atteignent la fin de leur vie utile ou nécessitent des travaux de réhabilitation considérables (Engineers Canada, 2008, 2011, 2012; Félio 2012a), ce qui augmente leur vulnérabilité face à des conditions climatiques changeantes. L'association des firmes d'ingénieurs-conseils du Canada (AFIC) estimait en 2004-2005 qu'environ la moitié des infrastructures publiques au pays auraient atteint la fin de leur vie utile avant 2027 (Félio, 2012a). Il est par ailleurs reconnu que le fait de retarder les investissements ou de ne pas entretenir rigoureusement les infrastructures génèrent des coûts plus importants à terme (Félio, 2012a).

Reconnaissant ces enjeux, le Québec a investi des sommes de l'ordre de quelques milliards de dollars au cours des dernières années, et plus particulièrement depuis les 10 dernières années, pour mettre à niveau plusieurs infrastructures dans la province (Gagné et Haarman, 2011). Toutefois, malgré les efforts consentis pour assurer un certain rattrapage, les besoins continuent de croître. Les changements climatiques et d'autres facteurs, comme une réglementation plus sévère notamment pour respecter des normes environnementales de plus

en plus élevées (CCME, 2009; Dagenais *et al.*, 2011; 2014), commanderont le remplacement ou la mise à niveau de plusieurs infrastructures au cours des prochaines années (Félio, 2012a).

Au-delà des différences régionales comme mentionnées au début de ce chapitre, le territoire du Québec n'est pas homogène et certaines zones présentent des sensibilités spécifiques face aux changements climatiques.

2.3.2.1 Les régions nordiques

Dans les régions nordiques, le rythme de développement – accéléré en raison de la croissance démographique et du potentiel de développement économique dans la région – combiné aux impacts des changements climatiques, complexifient les enjeux associés au cadre bâti. La dégradation du pergélisol (Allard *et al.*, 2010, 2013; Allard et Lemay, 2013), les modifications au couvert de glace (Clerc *et al.*, 2012b) et les changements aux régimes de tempêtes (Savard *et al.*, 2014) affectent les bâtiments, infrastructures de transport terrestre, aérien et maritime ainsi que les infrastructures industrielles. Pour les côtes du Nunavik et de la baie James, les infrastructures maritimes sont aussi exposées et ces problèmes affecteront l'accès au territoire, tant pour les activités traditionnelles et de récolte que pour les activités industrielles.

La dégradation du pergélisol, en raison de l'augmentation des températures et les changements au cycle de l'eau qui modifient les conditions de drainage, provoque des affaissements, des glissements ou des tassements de terrain (Allard *et al.*, 2010, 2013; Allard et Lemay, 2013). Selon le type de sol et la topographie, ces mouvements de terrain peuvent être plus importants, ce qui met en péril les bâtiments, routes et pistes d'atterrissage construits sur le sol gelé comme base d'assise (Allard *et al.*, 2010; Allard et Lemay, 2013; Dumais et Doré, 2013; L'Hérault *et al.*, 2013; Lemieux et Doré, 2013). Des infrastructures industrielles, comme les parcs à résidus miniers, pourraient aussi être affectées à terme par la dégradation du pergélisol, et les modifications aux conditions de drainage peuvent se traduire par le ruissellement d'eaux contaminées.

Des avancées majeures ont été réalisées en ce qui concerne la compréhension des processus de dégradation du pergélisol et de leurs impacts sur les infrastructures. Les types de fondations fréquemment utilisés pour les bâtiments dans cette région (sur vérins, voir figure suivante) permettent d'ajuster la hauteur des bâtiments au fur et à mesure que des tassements de sol se produisent. Par contre, ces techniques existantes pourraient ne pas s'avérer suffisantes en fonction de l'ampleur des changements climatiques attendus (SHQ, en élaboration) et des tassements qui en résultent.

Une cartographie caractérisant les zones de pergélisol selon leur capacité à soutenir des infrastructures ainsi que des analyses plus spécifiques concernant certaines infrastructures (routes, pistes d'atterrissage, bâtiments du secteur de la santé, etc.) ont contribué à l'identification puis à la sélection de zones appropriées pour le développement, ou encore à la priorisation des interventions de réhabilitation pour les infrastructures existantes en fonction des risques (Allard *et al.*, 2013; Allard et Lemay, 2013; de Grandpré *et al.*, 2010, Fortier *et al.*, 2011; L'Hérault *et al.*, 2013). Un guide développé par la Société d'habitation du Québec (en élaboration) propose un cadre de développement et des recommandations quant aux meilleures pratiques pour la construction sur pergélisol. D'autres guides et outils publiés par l'Association canadienne de normalisation (www.csa.ca) existent pour la construction et gestion des infrastructures dans les territoires nordiques.

Ces outils et une meilleure compréhension du rôle de la température et de la précipitation, du couvert de neige et des eaux de ruissellement dans le transfert de la chaleur vers le sol ont aussi permis de cibler des actions et des interventions réalisables à l'échelle des communautés locales ou des industries. Bâtissant sur ces travaux,



Figure 2-21 Vêris sur lesquels reposent les maisons dans le Nord québécois

Source : Paradis (2012), Crédit photo : Marie-Ève Paradis

l'Administration régionale Kativik (Barrett et Gagnon, 2013) a produit des outils pour sensibiliser les employés municipaux aux impacts des changements climatiques, dont la dégradation du pergélisol, et propose des bonnes pratiques de gestion municipale pour limiter l'ampleur des impacts, tels que la gestion de la neige ou du drainage dans les villages par de meilleures pratiques d'entretien des ponceaux et des fossés.

Le ministère des Transports a aussi revu la conception de certains éléments structuraux des routes et des pistes d'atterrissage (Allard *et al.*, 2013; Allard et Lemay, 2013; Dumais et Doré, 2013; Lemieux et Doré, 2013), comme la pente des remblais. Des instruments de suivi sur différents tronçons de route permettent aussi de surveiller l'évolution de la température dans le sol et l'état des infrastructures de transport dans le but de détecter les premiers signes de dégradation et d'intervenir tôt pour limiter l'ampleur des impacts.

Il demeure utile de poursuivre les travaux afin de bien comprendre les processus de dégradation du pergélisol, notamment concernant le rythme et l'ampleur (Allard *et al.*, 2010; Allard et Lemay, 2013). Avec la mise en place de différentes mesures d'adaptation, il sera essentiel de suivre, de documenter et d'évaluer la performance de ces mesures tant sur les plans environnementaux et sociaux qu'économiques. Des pratiques de gestion et d'entretien améliorées permettent de réduire le rythme de dégradation (Allard et Lemay, 2013; Barrett et Gagnon, 2013; Doré *et al.*, 2014) et les conséquences coûteuses pour les infrastructures.

La protection des infrastructures dans le Nord passera notamment par une meilleure planification urbaine (Allard et Lemay, 2013; voir aussi la section sur les glissements de terrain et les avalanches dans le chapitre 2.5.2.1 sur l'aménagement du territoire en milieu urbanisé). En outre, la préparation des terrains à l'avance (Barrett et Gagnon, 2013; CSA, 2010; SHQ, en élaboration), le recours à des techniques de construction

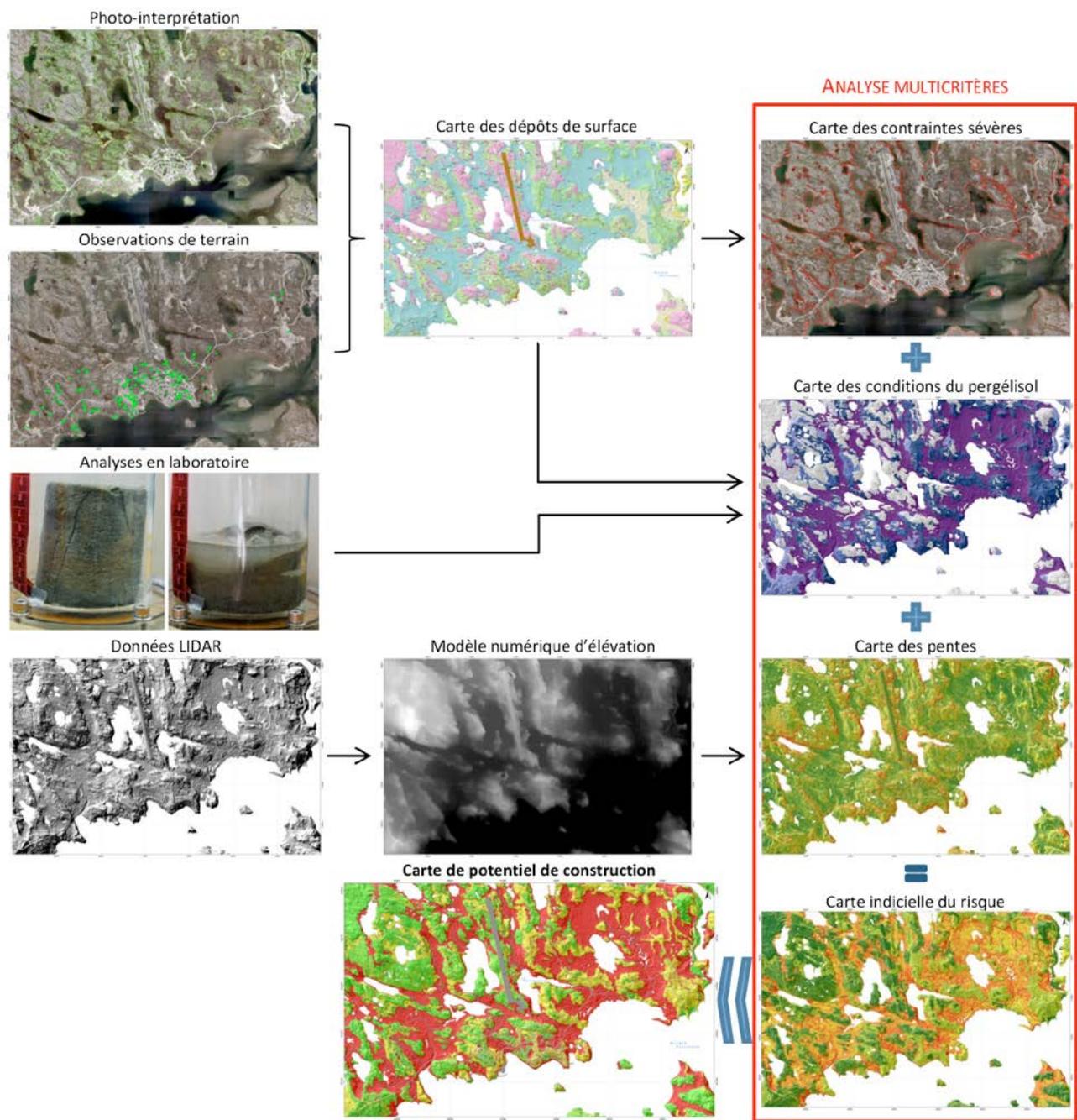


Figure 2-22 Schéma synthèse des différentes couches d'information géographique utilisées en vue de produire des cartes de potentiel de construction en fonction des risques de dégradation du pergélisol.

Source : L'Hérault et al. (2013)

appropriées pour le type de sol et l'évitement, en appliquant le principe de précaution, des zones les plus problématiques et les endroits où les risques sont méconnus s'avèrent des stratégies durables. En matière d'adaptation aux changements climatiques, plusieurs études (Barrett and Gagnon, 2013; CSA, 2010) rappellent l'importance de mettre en place les stratégies et techniques appropriées en fonction du contexte. Ainsi, il est important de considérer le risque qui évolue, la disponibilité de l'expertise et des matériaux requis pour la mise en place et l'entretien dans le temps à fin de déterminer et sélectionner les options les plus appropriées.

2.3.2.2 Les régions côtières

Beaucoup de travaux de recherche ont été effectués dans la région de la Côte-Nord, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine, ainsi que sur les côtes du Nunavik. Les recherches ont porté sur la compréhension des processus d'érosion, les liens avec le climat et l'évolution probable de ces facteurs dans un contexte de changements climatiques, de même que la recherche de solutions avec les autorités et populations concernées de la région. Une partie du patrimoine bâti et des infrastructures côtières est menacée par l'érosion et la submersion marine (Savard *et al.*, 2008). Ces phénomènes s'inscrivent dans l'évolution naturelle du littoral, mais ils se sont rapidement aggravés depuis quelques décennies à cause des changements climatiques et de l'attrait que représente la zone côtière pour la population (figure 2-23).

Dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, les changements climatiques vont globalement augmenter les risques de submersion des terres basses. Les changements climatiques vont aussi augmenter les taux d'érosion des berges constituées de falaises ou de dépôts meubles, comme les terrasses de plages, les flèches et tombolos, les falaises de grès, de schiste, d'argile, etc. Les infrastructures de transports terrestres et maritimes, comme les ports, les routes côtières et de nombreux bâtiments commerciaux (hôtels, restaurants, etc.) et gouvernementaux, seront exposées à plus de vagues de tempêtes à la suite de la réduction de 90 % du volume des glaces marines et côtières d'ici 2100. Les surcotes et les niveaux extrêmes, de plus en plus élevés, permettront aux vagues de tempêtes de déferler plus haut sur la côte et avec plus d'énergie, augmentant ainsi leur impact sur les infrastructures côtières et sur l'érosion de berges friables (figure 2-23).

À cause de l'attrait qu'exercent les zones côtières pour la villégiature et le développement résidentiel, le nombre de bâtiments et d'infrastructures construits dans les zones basses à risque de submersion et sur des terrains meubles exposés à l'érosion côtière a continuellement augmenté depuis quelques décennies. La valeur foncière des bâtiments s'accroît également en raison de la forte demande et de la raréfaction des terrains disponibles en bord de mer. Les routes régionales comme la 138, la 132 et la 99 (Îles-de-la-Madeleine) longent souvent les côtes et plusieurs sont menacées par l'érosion ou la submersion lors de tempêtes. Les pertes causées par la submersion marine et l'érosion côtière sont en augmentation et cette tendance devrait se poursuivre dans un contexte de changements climatiques. Les principaux impacts concernent les infrastructures de transport (terrestre, ferroviaire, maritime), les bâtiments et les infrastructures industrielles installés dans les zones soumises à l'érosion ou à la submersion.

Les options d'adaptation applicables à la zone côtière se divisent principalement en quatre groupes : l'évitement (ne pas s'installer dans les zones à risque); le retrait (se retirer de la zone à risque lorsqu'on y est déjà); l'accommodation (chercher des moyens de vivre dans la zone à risque en adoptant des méthodes qui atténuent le risque ou apprendre à le gérer); et finalement, la protection (éliminer le risque) (Burkett et Davidson, 2012; Farstad *et al.*, 2013; Macintosh, 2013; Nicholls, 2011; Niven et Bardsley, 2012; Vasseur et Catto, 2008). Aucune méthode n'est parfaite ni gratuite, mais certaines approches sont « sans regret » dans la mesure où elles procurent des bénéfices, peu importe si le risque se matérialise ou pas (Burkett et Davidson, 2012; Linham et



Figure 2-23 Recul de la côte de Val-Marguerite et de la plage Ferguson à la suite de l'événement des 15 et 16 octobre 2005

Source : Bernatchez et al. (2008)

Nicholls, 2010, p. 17). Par exemple, un parc linéaire le long de la côte procure des bénéfices à la population avec ou sans impacts des changements climatiques dans la mesure où l'on accepte d'éloigner les infrastructures permanentes de la zone à risque.

En général, les méthodes de protection en dur (murs, enrochements, déflecteurs de vagues) procurent un sentiment de sécurité et de durabilité (Cooper et Pile, 2014; Friesinger et Bernatchez, 2010; Linham et Nicholls, 2010), mais cette perception est souvent illusoire et ne tient pas compte des conséquences de ces méthodes souvent très coûteuses économiquement et au plan environnemental. Bernatchez et al. (2008) et Bernatchez et Fraser (2012) ont montré que 85 % des plages dont le talus est protégé par des murs ou des enrochements

se sont dégradées (abaissement, rétrécissement et parfois, disparition de la plage). Une étude coûts-avantages réalisée par Tecsuit Inc. (2008) a montré que lorsqu'on tient compte des coûts totaux, les protections en dur se révèlent souvent moins avantageuses économiquement (compte tenu des avantages) que des options de protection moins lourdes comme des recharges de plage ou des alternatives du type accommodement ou retrait. Parfois, certaines combinaisons de méthodes peuvent s'avérer avantageuses, comme des systèmes de rétention de sable accompagnés d'une recharge initiale, de plantations sur le haut de plage et de recharges d'appoint périodiques. Les systèmes de rétention de sable peuvent comprendre diverses sortes d'épis, des contrôles du drainage de plage, des méthodes basées sur des brise-lames ou des récifs artificiels formant des tombolos, des méthodes de pompage hydraulique visant à permettre au sable de traverser ou de contourner un obstacle nuisible au bilan sédimentaire, etc.

Actuellement, plus de 4 000 bâtiments, incluant des résidences principales et secondaires, des bâtiments commerciaux et de services publics, sont situés dans la zone à risque de submersion ou d'érosion projetée sur un horizon de 30 à 40 ans. La majorité de ces bâtiments ne sont pas suffisamment protégés pour résister aux risques auxquels ils sont exposés. De nouveaux bâtiments continuent d'être construits dans la zone à risque parce que les lois et règlements sur le zonage urbain et l'aménagement du territoire permettent encore aujourd'hui de développer des secteurs à risque dans plusieurs régions de la zone maritime. Par contre, des progrès ont été réalisés depuis quelques années pour mieux déterminer et cartographier les zones à risque de submersion marine et d'érosion. Des cartes de risque réalisées à partir de données LIDAR et des développements importants en matière de calcul de risque ont été réalisés (Bernatchez et Fraser, 2012; Neumeier *et al.*, 2013; Senneville *et al.*, 2014) ou sont en voie d'être bientôt complétés. La modélisation hydrodynamique des ondes de tempêtes, des vagues et de la dynamique des systèmes côtiers a progressé rapidement depuis une ou deux décennies et ces nouvelles méthodes permettent non seulement de quantifier le risque et de mieux évaluer les vulnérabilités pour le maintien de la continuité économique, mais elles peuvent aussi servir à alerter les populations et à planifier les interventions d'urgence lors de tempêtes majeures. Le défi, qui attend l'ensemble des acteurs, est surtout de concilier les motivations à court terme en matière de développement économique avec les contraintes à moyen et à long terme qu'imposeront les changements climatiques dans les zones maritimes.

2.3.2.3 Le Sud de la province

Pour le reste du Québec, les principaux risques pour les infrastructures sont liés aux événements extrêmes (tempêtes, orages) et aux changements au cycle de l'eau. Une des principales sources de vulnérabilité relevée dans de nombreuses analyses sur des infrastructures existantes est l'approvisionnement en énergie⁶ (voir le chapitre 2.1.4). D'autres impacts sont associés aux fluctuations des niveaux d'eau et peuvent avoir des répercussions variées, allant des enjeux d'approvisionnement en une eau de qualité aux enjeux d'accès aux infrastructures maritimes le long des plans et des cours d'eau.

Gestion des eaux de pluie

Il est attendu que le régime des précipitations change (voir la partie 1). En milieu urbain, des pluies fréquentes de même que des événements plus intenses provoquent des inondations localisées. Ces pluies provoquent souvent des épisodes de surverses. Lorsqu'il s'agit de réseaux combinés (eaux de ruissellement et eaux usées) comme c'est le cas dans plusieurs villes dans le Sud de la province, il peut y avoir des impacts sur les cours d'eau récepteurs et éventuellement, des effets sur la qualité de l'eau brute qui sert à produire de l'eau potable. On

⁶ Conclusions des études de cas du CVIIP (Engineers Canada, 2012)

s'attend notamment à une augmentation des épisodes de surverses quant à la fréquence et à la durée au mois de mai, peu de changements quant à la fréquence d'occurrences durant les mois d'été, et des variations de la durée pour le mois de juillet (diminution) et les mois de septembre et d'octobre (augmentation) (Mailhot *et al.*, 2014).

Le niveau de service d'un système de gestion des eaux de pluie évolue en raison non seulement du vieillissement de l'infrastructure, mais aussi des changements d'utilisation et d'aménagement du territoire. L'accroissement de l'imperméabilisation du sol et le développement en amont de réseaux existants augmentent les volumes de ruissellement et les charges vers le réseau. Le type et la fréquence de l'entretien du réseau peuvent aussi avoir des conséquences non négligeables sur le réseau (Dagenais *et al.*, 2014; Mailhot *et al.*, 2014).

La gestion des eaux de pluie passe par un portfolio de mesures qui, combinées ensemble, permettent de gérer de manière plus efficace les eaux de pluie. Ces mesures se déclinent sur trois plans : des mesures de contrôle à la source, qui empêchent une charge trop importante du réseau, le recours aux réseaux mineurs (infrastructures en souterrain) et majeurs (routes, parcs) permet d'acheminer l'eau vers les stations de traitement, et des bassins de rétention en aval des réseaux servent à stocker l'eau pour la relâcher après un certain temps. Dans certains cas, le redimensionnement des infrastructures souterraines peut être justifié pour réduire les risques d'inondation, mais cette solution génère souvent plus de surverses et doit considérer les impacts en aval (travailler sur un seul segment du réseau peut avoir pour effet de déplacer le problème) (Mailhot, sous presse). Plusieurs exemples montrent l'importance de la réglementation et l'encadrement à des échelles supramunicipales pour inciter les municipalités locales à déployer des stratégies à plus grande échelle afin d'améliorer la gestion des eaux de pluie. Des stratégies à plus grande échelle⁷ sont plus efficaces qu'une multitude de petites initiatives qui ne s'inscrivent pas dans une stratégie plus globale (Dagenais *et al.*, 2014).

Eau potable

La production d'eau potable est fortement dépendante des systèmes naturels et de la disponibilité ainsi que de la qualité de l'eau brute. Les changements climatiques auront des effets pour les sources d'eau souterraines et de surface (voir la section 2.5.1), tant sur le plan de la disponibilité que de la qualité. Les problèmes d'érosion des berges et de sédimentation causent aussi des problèmes de disponibilité d'eau selon la localisation des pompes qui puisent l'eau vers l'usine de traitement.

Dans la partie la plus habitée du Québec, les eaux de surface à partir desquelles les municipalités puisent souvent leur eau agissent aussi comme des milieux récepteurs pour les eaux usées (traitées et non traitées) (Dorner, 2013). Ainsi, les fluctuations des niveaux ont plusieurs répercussions pour l'approvisionnement en eau, tant sur la disponibilité que sur la qualité due aux changements dans l'écoulement des eaux. Cela peut avoir des conséquences sur les systèmes et procédés de traitement de production d'eau potable. En période de crue, il y a des changements dans les mécanismes de dispersion et en période d'étiage, une baisse de la dilution peut causer des problèmes, car les contaminants sont moins dilués. Il peut y avoir des conséquences pour les systèmes municipaux à traiter cette eau en plus des impacts sur les écosystèmes (Dorner, 2013).

Différentes mesures d'adaptation peuvent être envisagées pour composer avec ces changements. La protection des sources d'eau et des écosystèmes naturels devient encore plus critique dans un contexte de changements climatiques, et une meilleure gestion de la demande, comme des mesures de conservation d'eau, sont des stratégies sans regret, c'est-à-dire qui sont d'intérêt, peu importe l'ampleur des changements attendus (Parent

⁷ Par exemple la Stratégie pancanadienne sur la gestion des effluents d'eaux usées municipales (CCME, 2009)

et al., 2012). Les mesures de contrôle à la source sont efficaces pour diminuer les volumes de ruissellement, mais diminuent l'effet de lessivage dans les conduites; l'eau des surverses est donc plus contaminée lors des épisodes de forte pluie. Ainsi, cette mesure doit être combinée à des mesures de traitement pour éviter une concentration trop élevée de contaminants (Dorner, 2013) (voir section 2.5.1.2).



Figure 2-24 Exemples de mesures de gestion des eaux de pluie

Source : Dagenais (2012); Crédit photos : Danielle Dagenais

Infrastructures routières

La performance des réseaux routiers est, elle aussi, fortement influencée par les facteurs climatiques qui comptent pour environ 50 % des dommages (Doré et al., 2014). Les impacts des changements climatiques pour ces infrastructures dépendent du type de route, de la nature du sol (les conditions de drainage en particulier, qui varient substantiellement selon que le sol est argileux ou sableux) et de la position géographique (dans des zones de risques naturels comme des zones inondables, de glissements de terrain ou d'érosion des côtes), tant la surface que la structure de fondation seront affectées. Le tableau 2.5 résume les effets des changements climatiques sur les chaussées.

Les changements climatiques auront des effets positifs et négatifs qui affecteront à la fois les coûts de construction et la durée de vie (Doré et al., 2014). Le bilan net des effets pour les infrastructures routières dans la partie Sud du Québec n'est toutefois pas clair. Il existe néanmoins des solutions qui contribuent à rendre les infrastructures plus résilientes, mais encore une fois, il importe de considérer un ensemble de mesures complémentaires. La modification de la conception et le renforcement des chaussées et des structures de fondation (épaisseur des différentes couches, matériaux utilisés, pente des talus et drainage) peuvent contribuer à améliorer (ou à maintenir) la performance de la structure. Une intensification de l'entretien et des méthodes de détection précoce des défaillances peuvent aider à diminuer de manière significative la vulnérabilité de la structure. L'amélioration du drainage et la diminution de la sensibilité de la structure à l'eau sont aussi des options à envisager. Plus de travaux sont requis pour évaluer la performance (technique, économique, environnementale) des mesures d'adaptation possibles (Doré et al., 2014).

Tableau 2-5 Synthèse de certains effets des changements climatiques sur les chaussées

Causes	Possibles effets sur les chaussées
Augmentation de la température dans les régions froides et augmentation du nombre de redoux hivernaux	Diminution de l'indice de gel en hiver, diminution de la profondeur de gel qui résulte en moins de détérioration des chaussées due au soulèvement au gel et diminution de la fissuration thermique
	Possible augmentation des dommages dus au dégel partiel des fondations (orniérage ainsi que fissuration et affaiblissement des chaussées)
Augmentation des températures chaudes extrêmes	Augmentation des ornières de fluage
Augmentation de la disponibilité de l'eau durant les saisons estivales	Augmentation du niveau de la nappe phréatique provoquant un affaiblissement des couches structurales et diminution de la durée de vie Augmentation des ornières
Augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies extrêmes	Augmentation de la teneur en eau dans les sols de chaussées immédiatement après les pluies
	Augmentation de la teneur en eau dans les chaussées et réduction de leur rigidité

Bâtiments

Pour les bâtiments, les changements climatiques affecteront l'enveloppe, la structure et les matériaux utilisés, principalement en ce qui concerne le rythme d'usure, mais aussi parfois la défaillance, surtout lorsqu'ils sont situés en zone à risque (voir section 2.5.2.1). La performance de certains systèmes mécaniques et électriques peut être diminuée (Engineers Canada, 2008). Dans les zones argileuses, l'assèchement des sols peut provoquer des tassements de sol et causer des fissures dans les fondations des bâtiments.

Une des plus importantes sources de vulnérabilité pour l'environnement bâti est toutefois associée à l'approvisionnement en énergie (Engineers Canada, 2008; Félio, 2012b; voir chapitre 2.1.4 sur le transport et la distribution d'électricité à cet effet). La redondance et la diversification des sources et des types d'approvisionnement en énergie peuvent contribuer à rendre plus résilients les systèmes. Le recours à des systèmes passifs et à des méthodes plus traditionnelles de construction pour les bâtiments peut s'avérer des solutions d'intérêt. Bien que relativement peu documentées, nombre d'études de cas et d'analyses de vulnérabilité le font ressortir. L'interdépendance entre les systèmes et le concept d'effet domino (Morabito et Benoît, 2009; Petit, 2009) apparaissent comme des éléments importants à considérer pour la suite de la recherche en ce qui concerne les changements climatiques et l'environnement bâti (Andrey *et al.*, 2014; SPC, 2009, 2014b).

Une analyse des normes et des standards tend à montrer que les normes demeurent des outils très efficaces pour promouvoir et mettre en oeuvre des pratiques robustes face aux changements climatiques. Certaines normes de construction utilisent cependant des critères basés sur des statistiques de climat historique et le défi réside dans la prise en compte de l'évolution de ces paramètres pour bien appliquer la norme dans un contexte de risque évolutif, c'est-à-dire comment considérer de multiples futurs possibles sur différents horizons de temps (Félio, 2012a; Steenhof et Sparling, 2011).



Figure 2-25 Surverse en milieu naturel

Source : Mailhot (sous presse); Crédit photo : Samuel Bolduc

a)



b)



Figure 2-26 Exemples d'impacts des facteurs climatiques sur (a) les chaussées et (b) les zones côtières

Crédit photo : Guy Doré (a), Claude Colombe (b)

La méconnaissance de l'état des infrastructures (manque de données ou absence d'une documentation qui décrit les diverses interventions) de même que les pratiques de gestion et d'entretien parfois défectueuses apparaissent comme des sources de vulnérabilité importantes pour les infrastructures. La gestion des actifs et la production d'outils⁸ aideront à uniformiser la manière dont les informations sont colligées, faciliteront l'établissement d'un état de référence, leur évolution face aux changements climatiques, mais aussi aux autres facteurs non climatiques et permettront aussi de faire la comparaison avec d'autres contextes semblables.

Il importe de mentionner que les impacts des changements climatiques sur les infrastructures ne peuvent pas être examinés isolément des autres facteurs (sociaux, politiques, culturels, environnementaux et économiques) qui influencent l'utilisation et la gestion des infrastructures. En particulier, des choix de société quant à la tolérance au risque ou le coût politique sont des facteurs clés pour motiver l'action (ou l'inaction) prise pour gérer des enjeux comme la gestion des eaux pluviales et la récurrence des épisodes de refoulement (Mailhot *et al.*, 2014). Il est aussi important de rappeler qu'en réponse à des problèmes techniques, les réponses les plus durables ne sont pas nécessairement de nature structurelle ou très technique. Elles peuvent par exemple provenir d'approches de planification plus intégrée, de modifications sur le plan juridique, de changements dans les pratiques d'entretien, etc. Elles résultent souvent de changements de comportements et d'une plus grande collaboration entre les parties prenantes (ARCC Network, 2014; LGA, 2014).

La prise en compte des changements climatiques pour le cadre bâti permettra aussi d'atteindre de multiples autres objectifs (développement durable, qualité de vie et santé publique, protection des écosystèmes). Exiger cette prise en compte pour avoir accès au financement des travaux sur les infrastructures pourrait s'avérer un moyen efficace d'accélérer la mise en oeuvre d'actions d'adaptation. Le Plan québécois des infrastructures 2014-2024 (Conseil du Trésor, 2014) prévoit d'ailleurs des investissements de plus de 90 milliards de dollars au cours de la prochaine décennie pour des travaux d'infrastructures, ce qui peut s'avérer une bonne occasion pour tenir compte des effets des changements climatiques.

En guise de conclusion, il convient de retenir que les changements climatiques posent des risques pour les infrastructures dans toutes les régions du Québec. L'interdépendance entre les systèmes apparaît importante à considérer pour la suite de la recherche en ce qui concerne les changements climatiques et l'environnement bâti, car c'est ce qui complexifie les enjeux associés aux changements climatiques.

Le manque de connaissances sur l'état des infrastructures est aussi une source de vulnérabilité pour les infrastructures. L'établissement d'un état de référence pour les infrastructures et le suivi dans le temps permettent de mieux comprendre les vulnérabilités potentielles, d'évaluer la performance des mesures mises en place et d'intervenir de manière plus précoce et plus stratégique aux endroits qui présentent des problèmes. Une meilleure connaissance permet aussi de faire la comparaison avec d'autres contextes semblables et d'échanger des bonnes pratiques en matière de conception, de construction et d'entretien des infrastructures.

Les impacts des changements climatiques sur les infrastructures ne peuvent pas être examinés isolément des autres facteurs (sociaux, politiques, culturels, environnementaux et économiques) qui influencent l'utilisation et la gestion des infrastructures. D'ailleurs, la prise en compte des changements climatiques pour le cadre bâti permettra aussi d'atteindre de multiples autres objectifs rendant nos infrastructures et le cadre bâti beaucoup plus résilients.

⁸ Comme le Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable et d'égout publié par le CERIU (Al Amari *et al.*, 2013)



2.4 La biodiversité et le maintien des services écologiques

Auteur principal: Robert Siron

Collaborateurs : Dominique Berteaux (UQAR), Nathalie Bleau (Ouranos), Valérie Bourduas Crouhen (Ouranos), Jean-Pierre Savard (Ouranos) et Claude Villeneuve (UQAC)

Réviseur : Jean-Pierre Revéret (UQAM)

Faits saillants

- ▶ À l'échelle globale beaucoup d'espèces terrestres, d'eaux douces et marines ont déjà modifié leurs répartitions, leurs abondances, leurs activités saisonnières et leurs migrations.
- ▶ Le Québec présentera des conditions climatiques de plus en plus favorables à l'arrivée de nouvelles espèces venant du sud, tandis que certaines espèces indigènes n'auront pas la capacité de suivre le rythme des changements climatiques. Les niches bioclimatiques des espèces devraient se déplacer vers le nord de plus de 500 km d'ici un siècle.
- ▶ L'augmentation des températures et une saison de croissance allongée vont favoriser l'arrivée et la prolifération d'espèces exotiques envahissantes dont il faudra gérer les conséquences.
- ▶ Les impacts des changements climatiques sur la biodiversité et les défis d'adaptation qui y sont associés diffèrent selon les régions du Québec :
 - ▶ Dans le Nord, il y a un manque de données pour bien comprendre l'évolution rapide des écosystèmes nordiques et s'y adapter. Le défi est de préserver les services écologiques sur lesquels reposent la survie et la culture traditionnelle des populations nordiques. Cette région doit aussi composer avec les effets cumulatifs des changements climatiques et des activités industrielles en développement;
 - ▶ En zone boréale, les changements climatiques vont surtout se faire sentir sur l'écosystème forestier, avec des effets directs sur la croissance des arbres et la composition spécifique de la forêt, mais également à travers des impacts indirects comme les modifications dans le régime des feux et des épidémies d'insectes et de maladies;
 - ▶ Dans le Sud du Québec, où les écosystèmes naturels ont été fortement fragmentés par les activités humaines et l'urbanisation, le rétablissement de corridors écologiques bien planifiés aiderait les espèces à migrer avec le réchauffement climatique. Cela favoriserait la conservation de la biodiversité et le maintien des multiples services écologiques que les écosystèmes de cette région fournissent à des millions de personnes;
 - ▶ Dans le Golfe du Saint-Laurent, les écosystèmes côtiers les plus vulnérables, comme les marais, les dunes ou les lagunes, sont menacés par la submersion et l'érosion marine dues aux changements climatiques. Or, ces écosystèmes littoraux fournissent des services écologiques essentiels pour le développement durable des régions maritimes.

- ▶ Les stratégies d'adaptation pour la biodiversité sont déjà connues et reposent sur les grands principes de conservation. Plusieurs d'entre elles ont fait l'objet d'études récentes au Québec :
 - ▶ La réponse de certaines espèces est mieux connue, y compris des espèces commerciales et de subsistance, des espèces à statut précaire et des espèces envahissantes et nuisibles;
 - ▶ Des approches innovatrices sont à l'étude pour la première fois au Québec, p. ex. pour renforcer la connectivité écologique et adapter le réseau d'aires protégées;
 - ▶ De nouveaux outils d'aide à la décision permettent de quantifier le risque d'invasions biologiques, d'évaluer la valeur économique des milieux humides ou encore de planifier le suivi de la biodiversité en climat futur.
 - ▶ Toutes ces percées scientifiques représentent un premier pas vers « l'adaptation basée sur les écosystèmes » au Québec. Sa mise en oeuvre devra se faire aux niveaux régional et local, dans chaque secteur d'activités et impliquer tous les acteurs, des gouvernements jusqu'aux citoyens, en passant par le milieu municipal. Les services écologiques en sont la pierre angulaire.

2.4.1 Contexte général et enjeux globaux

2.4.1.1 Impacts des changements climatiques sur la biodiversité et les services écologiques

Les enjeux autour de la biodiversité et des changements climatiques sont étroitement liés. Les deux principales variables climatiques, la température et les précipitations, sont parmi les facteurs qui influencent les plus directement la vie animale et végétale : le métabolisme des espèces, leur répartition sur le territoire, la structure des communautés écologiques et le fonctionnement des écosystèmes. D'un autre côté, les écosystèmes et la biodiversité participent aux cycles naturels de l'eau et du carbone qui influencent directement le climat, autant au niveau local (évapotranspiration), que régional (modification de l'albédo) et global (capture du gaz carbonique). Les changements climatiques et la biodiversité sont donc des enjeux indissociables, qu'on doit aborder simultanément quand il s'agit de mettre en oeuvre les stratégies d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques (SCBD, 2009). Ces dernières sont étroitement liées à la conservation de la biodiversité et en partagent même certaines stratégies dans le but de maintenir, sous le climat futur, les services écologiques que nous procure la biodiversité et qui sont essentiels à notre survie et à notre bien-être.

Deux études majeures publiées récemment viennent confirmer que les changements climatiques ont des impacts de plus en plus marqués sur la biodiversité et les écosystèmes terrestres et aquatiques, tant à l'échelle globale que régionale (Groffman *et al.*, 2014; IPCC, 2014c). Selon le groupe de travail II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC – IPCC), les preuves des impacts des changements climatiques sont plus fortes et mieux documentées pour les systèmes naturels que pour les systèmes humains. Elles démontrent avec un degré de confiance élevé que beaucoup d'espèces terrestres, d'eaux douces et marines ont déjà modifié leurs répartitions géographiques, leurs abondances, leurs activités saisonnières, leurs migrations et leurs interactions avec d'autres espèces. Toutefois, malgré cette adaptation naturelle, les changements climatiques risquent d'être plus rapides que la capacité de certains groupes taxonomiques à suivre le déplacement projeté des isothermes, notamment les arbres, les plantes herbacées ainsi que certains petits mammifères (IPCC, 2014c).

Sur cette base, le GIEC conclut avec un degré de confiance élevé qu'une grande proportion des espèces terrestres et d'eaux douces sont à risque d'extinction avec les changements climatiques projetés au cours du 21^e siècle et au-delà, notamment là où ceux-ci vont interagir avec les autres pressions sur la biodiversité comme la modification des habitats, la surexploitation des ressources, la pollution et les espèces envahissantes. Malgré la forte mobilisation internationale autour du *Plan stratégique 2011-2020* pour la diversité biologique des Nations-Unies, le dernier constat indique globalement que ces pressions continuent et que le déclin de la biodiversité va se poursuivre dans les prochaines années, mettant en péril l'atteinte des objectifs fixés pour 2020 (SCDB, 2014). D'ailleurs, les experts ont évalué que le taux d'extinction des espèces était déjà environ 100 fois plus élevé que lors des grandes extinctions de biodiversité que la Terre a déjà connues dans le passé, et qu'il pourrait même être beaucoup plus élevé à la fin du siècle (SCDB, 2010). Toutefois, contrairement aux précédents, le déclin actuel de la biodiversité est dû aux activités humaines et non à la variabilité naturelle du climat. L'ampleur et la vitesse des changements climatiques associés aux scénarios d'émissions les plus pessimistes (RCP4.5, 6.0 et 8.5 ; voir la partie 1 pour plus de détails) posent en effet un risque élevé de changements abrupts et irréversibles à l'échelle régionale dans la composition, la structure et le fonctionnement des écosystèmes terrestres et d'eaux douces, y compris les milieux humides. Le GIEC affirme avec un haut degré de confiance que la gestion des ressources naturelles telles que la maintenance de la diversité génétique, la migration assistée des espèces, le contrôle de certaines perturbations (p. ex. feux, inondations) et la réduction des autres sources de stress, permet de réduire, mais n'éliminera pas les risques dus aux impacts des Changements climatiques sur les écosystèmes terrestres et aquatiques. À l'échelle de l'Amérique du Nord, les changements climatiques, associés aux autres perturbations, dépassent déjà la capacité des écosystèmes d'atténuer les impacts des événements extrêmes comme les feux, les inondations et les tempêtes (Groffman *et al.*, 2014). D'autre part, la perte d'intégrité des écosystèmes, notamment par les feux de forêt, est considérée comme un risque majeur, alors que la capacité institutionnelle pour soutenir l'adaptation des écosystèmes reste encore limitée en Amérique du Nord (IPCC, 2014c).

Prédire comment les espèces et les écosystèmes vont évoluer sous l'effet des changements climatiques est devenu un champ de recherche très actif ces dernières années, conduisant à un nombre croissant d'articles sur le sujet qui reflète la grande variété des approches méthodologiques disponibles (Bellard *et al.*, 2012; Cardinale *et al.*, 2012; Dawson *et al.*, 2011). Les méta-analyses montrent que les changements climatiques ont déjà des effets significatifs sur la biodiversité à l'échelle globale. Chen *et al.*, (2011) ont compilé plus de 2 000 réponses d'espèces appartenant à des dizaines de groupes taxonomiques sur plusieurs continents : les changements climatiques ont conduit à un déplacement moyen de 11 mètres en altitude et de 16,7 km vers les latitudes plus élevées par décennie. Ces taux de déplacement sont de 2 à 3 fois plus élevés que ceux qui étaient rapportés dans des études antérieures. Ces observations globales viennent confirmer sur le terrain ce que prédit la modélisation des niches bioclimatiques pour de nombreuses espèces en fonction de scénarios de changements climatiques (Berteaux *et al.*, 2014; Thuiller, 2004) ou de modèles mécanistiques appliqués par exemple à des espèces vulnérables (Molnár *et al.*, 2010). Toutefois, ces réponses sont très variables selon les taxons, les régions, les variables et les échelles spatiales et temporelles étudiées (Bellard *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2011). Même au sein d'un même groupe taxonomique, les effets du réchauffement des températures sur la phénologie et la répartition des espèces varient selon les exigences écologiques propres à chaque espèce, comme cela a déjà été montré chez les plantes (Houle, 2007), les arbres (Chambers *et al.*, 2013; McKenney *et al.*, 2011), les oiseaux (Berteaux *et al.*, 2014; DesGranges et Morneau, 2010), les amphibiens (Berteaux *et al.*, 2014), les papillons (Kharouba *et al.*, 2014) et les petits mammifères (Myers *et al.*, 2009).

Bien que les impacts des changements climatiques soient encore relativement peu documentés sur le plan génétique, on peut s'attendre à ce que la diversité génétique soit également affectée par les changements climatiques. Une étude portant sur les espèces nordiques a montré que la réduction de la diversité génétique était deux fois moins prononcée chez les espèces qui avaient les plus fortes capacités de dispersion (Alsos *et al.*, 2012). Or la composante génétique est importante dans le fonctionnement et la résilience des communautés écologiques (Hughes *et al.*, 2008), et donc potentiellement dans leur capacité d'adaptation aux changements climatiques. On sait en effet que la diversité génotypique est importante dans le mécanisme de résistance au stress, notamment pour les espèces subissant un stress thermique (Ehlers et Worm, 2008). Une étude récente portant sur les deux principales lignées génétiques du caribou Rangifer tarandus fréquentant la zone arctique a montré que ce sont dans les régions qui sont restées sous un climat relativement stable au cours des 21 000 dernières années que l'espèce a maintenu une diversité génétique élevée, ce qui peut laisser présager des impacts sur la diversité génétique de cette espèce sous un climat évoluant rapidement (Yannic *et al.*, 2014).

Les espèces exotiques envahissantes (EEE) posent un risque biologique très important pour l'ensemble de la diversité biologique. Les changements climatiques pourraient favoriser la croissance, l'établissement et l'expansion rapide de certaines plantes envahissantes, plus susceptibles de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques, notamment aux marges nordiques de leurs aires de répartition (Diskin *et al.*, 2012; Groeneveld *et al.*, 2014; Lovat, 2013; Panchen *et al.*, 2012). Ces plantes extrêmement prolifiques entrent alors en compétition avec des espèces indigènes, dont elles peuvent occuper complètement la niche écologique. Le déséquilibre engendré par ces invasions biologiques relativement rapides peut se répercuter à l'échelle de tout un écosystème (Aguilera *et al.*, 2010; Svenning et Sandel, 2013).

Les espèces menacées ou vulnérables (qualifiées aussi d'espèces à statut précaire) sont également à risque, car les changements climatiques viennent exercer des pressions qui s'exercent déjà sur elles, souvent de manière chronique. Il en résulte des impacts qui peuvent affecter leur cycle de vie, leurs caractéristiques, la taille de leurs populations ou leurs répartitions spatiales, et qui sont autant de facteurs contribuant à augmenter leurs vulnérabilités face aux changements climatiques projetés (Pearson *et al.*, 2014). Globalement, une proportion non négligeable des espèces, évaluée entre 7 et 15 % selon les méthodes utilisées, pourrait être à risque d'extinction d'ici 2100 (Maclean et Wilson, 2011).

Ultimement, tous ces impacts aux niveaux génétique, spécifique et écosystémique, vont se répercuter sur le fonctionnement des écosystèmes et leur capacité à fournir les biens et services écologiques dont les humains ont toujours bénéficié pour assurer leur survie et leur prospérité (Cardinale *et al.*, 2012). Or actuellement, à l'échelle globale, la biodiversité décline à une vitesse largement supérieure à ce que la Terre a déjà connu dans le passé, malgré les efforts de conservation mis en oeuvre dans les dernières années qui ne semblent pas être suffisants pour arrêter cette tendance lourde (Pimm *et al.*, 2014). L'érosion continue de la biodiversité entraîne à son tour la perte de services écologiques (CDB, 2010). Au-delà des considérations strictement écologiques, cela entraînera des répercussions importantes sur les économies mondiale et nationale si cette tendance lourde n'est pas rapidement renversée. Aussi longtemps que nous serons en mesure de préserver ces services écologiques et de maintenir le même niveau de services que dans le passé, voire l'améliorer par des mesures d'adaptation appropriées, nous pourrons en bénéficier et ainsi éviter les coûts de remplacement s'ils étaient perdus ou dégradés par les activités humaines et les changements climatiques (voir l'encadré 2-7).

Encadré 2-7. L'importance des services écologiques dans le contexte des changements climatiques

La notion de services écologiques (ou services écosystémiques) a pris son essor à la suite de l'initiative internationale sur L'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (MEA, 2005). Pour faciliter l'utilisation de ce concept, celle-ci a identifié quatre grands types de services, qui sont fournis par la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes et dont nous bénéficions pour notre survie, notre bien-être et notre épanouissement. Tout d'abord, les services d'auto-entretien, intrinsèques à l'écosystème, qui soutiennent les processus écologiques (p. ex. cycle des nutriments, production primaire) et ceux dont nous tirons des bénéfices plus directs et tangibles, soit les services d'approvisionnement (p. ex. bois, nourriture), de régulation (p. ex. purification de l'eau, pollinisation) et culturels (ces derniers incluant les aspects esthétiques, spirituels, éducatifs et récréatifs). Plusieurs services écologiques sont d'une importance cruciale dans le contexte des changements climatiques, autant pour la réduction des GES (p. ex. capture et stockage du carbone) que pour l'adaptation. En effet, certains de ces services contribuent à réduire nos vulnérabilités face aux changements climatiques, p. ex. la régulation du régime hydrique par les milieux humides ou la création d'espaces verts pour contrer les îlots de chaleur urbains (voir aussi l'encadré sur les toits verts dans le chapitre 3.3). Or, certains services écologiques risquent d'être significativement affectés par les changements climatiques (Siron, 2014).

De cette nouvelle « économie de la biodiversité » (Sukhdev *et al.*, 2010), les services écologiques sont devenus la pierre angulaire et le défi consiste à en évaluer la valeur économique, une étape essentielle pour la prise de décision dans le cadre du développement durable (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009). Le développement d'analyses appropriées nous permet maintenant d'intégrer la valeur économique des services écologiques dans les décisions d'adaptation pour divers secteurs d'activités au Québec (Dupras *et al.*, 2013b). Alors que l'agriculture, la foresterie et les pêches reposent entièrement sur la productivité des écosystèmes, d'autres secteurs dépendent surtout de leur qualité, comme la santé publique, la gestion des ressources en eau ou le tourisme. À l'échelle globale, les premières tentatives d'évaluation des services écologiques datent d'une vingtaine d'années, avec les travaux de Costanza *et al.*, (1997) qui estimaient la valeur moyenne globale des services écologiques à 33 trillions \$US/an, soit environ le double du PIB global de l'époque. Une mise à jour récente fait maintenant état d'une valeur autour de 135 trillions \$US (Costanza *et al.*, 2014). Ces travaux montrent aussi que de 1997 à 2011, c'est plus de 20 trillions \$US qui ont été perdus en services écologiques, à cause notamment des changements dans l'utilisation des terres et de la perte d'habitats à forte valeur comme les forêts, les milieux humides et les océans. À l'échelle canadienne, on estimait en 2010 que les 39 parcs nationaux du Canada permettaient de séquestrer à eux seuls 4,4 milliards de tonnes de carbone, soit une valeur comprise entre 39 et 87 milliards \$US (Dudley *et al.*, 2010). L'écosystème boréal canadien produit quant à lui des services écologiques dont la valeur totale était estimée à plus de 700 milliards de dollars en 2002. Cette valeur est près de 14 fois plus grande que la valeur marchande nette des activités d'extraction du capital naturel, incluant la foresterie, les mines et la production hydroélectrique (Anielski et Wilson, 2009). À l'échelle d'une région ou d'une métropole, les forêts rurales et les parcs urbains offrent aussi des services écologiques de grande valeur : p. ex. pour la ville de Toronto les arbres retirent 46700 t C/an et séquestrent environ 1,1 million t C, ce qui est évalué à 25 millions de dollars, auxquels il faut aussi rajouter une réduction des coûts d'énergie résidentiels de 9,7 millions de dollars/an (Nowak *et al.*, 2013). Pour la grande région de Montréal, les 11 principaux services écologiques fournis par la « ceinture verte » sont estimés à 2,2 milliards de dollars/an, mais ils ne cessent de diminuer depuis les années soixante sous la pression de l'étalement urbain (Dupras *et al.*, 2014; Dupras et Alam, 2014). Ce sont les services écologiques issus des terres cultivées et des forêts qui ont le plus diminué sur ce territoire. La rareté de certains écosystèmes est à l'origine de leur forte valeur, en particulier les forêts et parcs urbains ainsi que les milieux humides qui fournissent les services

non marchands ayant la plus grande valeur économique à l'hectare. À l'échelle d'un écosystème, l'évaluation des services écologiques est fonction de sa localisation, de son état et aussi de son évolution dans le temps. À titre d'exemple, la valeur économique des milieux humides, calculée sur la base de trois services écologiques importants pour l'adaptation aux changements climatiques (habitats pour la biodiversité, rétention des sédiments et régulation des crues), a été évaluée entre 11,1 et 18,9 millions de dollars pour des bassins versant dans le sud du Québec (Dupras *et al.*, 2013b).

Avec le déclin de la biodiversité globale, les perspectives ne sont pas très optimistes. Il y a dix ans, les experts estimaient déjà qu'environ 60 % des services écologiques avaient été dégradés en cinquante ans (MEA, 2005). Si l'érosion de la biodiversité n'est pas arrêtée à l'horizon 2050, la valeur des services écologiques perdus atteindrait au moins 7 % du PIB global et le monde bénéficierait alors d'un niveau de services écologiques moindre qu'il était en 2000 (Bakkes *et al.*, 2008; Sukhdev *et al.*, 2010). Ceci n'est pas incompatible avec un rehaussement de la valeur de certains services écologiques, notamment dans le domaine récréotouristique. Ainsi, certains parcs nationaux du Canada pourraient voir leur nombre de visiteurs multiplié par deux d'ici 2080 grâce à une saison «estivale» plus longue (TRNEE, 2011a). Ces effets positifs restent toutefois limités à certains secteurs, notamment ceux qui reposent sur la croissance végétale (voir les sections sur l'agriculture et la foresterie dans le chapitre 2.1). Toutes ces estimations sont encore assez grossières et entachées d'incertitudes inhérentes à l'évaluation de services qui sont le plus souvent non marchands et intangibles. Elles nous permettent néanmoins de prendre conscience de l'importance environnementale, mais aussi socioéconomique des services écologiques dans le contexte de l'adaptation de notre société aux changements climatiques.

2.4.1.2 Stratégies d'adaptation

Rappelons que la stratégie qui doit être considérée en tout premier lieu est de préserver la structure et les fonctions des écosystèmes afin de maintenir leur résilience et de favoriser leur adaptation naturelle aux changements du climat. Il convient donc de gérer les activités humaines pour minimiser leurs impacts sur les milieux naturels, en particulier sur les écosystèmes qui nous procurent les services écologiques les plus importants dans un contexte de changements climatiques : les forêts, les milieux humides, les écosystèmes aquatiques et les milieux côtiers. Autrement dit, la conservation de la biodiversité et l'adaptation aux changements climatiques sont deux approches indissociables, chacune pouvant contribuer au succès de l'autre si elles sont coordonnées à l'échelle régionale et dans un cadre intégré (Siron, 2013). D'ailleurs, les stratégies d'adaptation dans la gestion de la biodiversité sont déjà bien connues (SCBD, 2009) et relèvent des grands principes de conservation (tableau 2-6).

Les mesures d'adaptation pour la gestion de la biodiversité s'articulent toujours autour des quatre grands types de réponses suivants (Mawdsley *et al.*, 2009) :

- 1) la protection et la gestion des terres et de l'eau, p. ex. renforcer la perméabilité du territoire par la mise en place d'un réseau d'aires protégées;
- 2) la gestion directe des espèces, p. ex. protéger les espèces menacées et réduire les autres sources de stress;
- 3) le monitoring et la planification, p. ex. intégrer les changements climatiques dans les plans de gestion des espèces et l'aménagement du territoire;
- 4) la révision et l'ajustement des lois et politiques relatives à la gestion des ressources naturelles et de la biodiversité.

Tableau 2-6 Stratégies d'adaptation pour la gestion de la biodiversité les plus recommandées par les experts. Une centaine de recommandations ont été proposées dans cette étude qui a compilé plus de 500 stratégies d'adaptation décrites dans 112 articles scientifiques parus en 22 ans.

Stratégie d'adaptation	Nb. d'articles
Augmenter la connectivité (p.ex. : élaborer des corridors, enlever les barrières à la dispersion, localiser les «réserves» ⁹ proches les unes des autres, reboiser)	24
Intégrer les changements climatiques dans les exercices de planification (p.ex. pour les «réserves»; lors des proliférations d'espèces nuisibles, les dates de récoltes, dans les programmes incitatifs)	19
Atténuer les autres menaces (p.ex.: espèces envahissantes, fragmentation, pollution)	17
Étudier la réponse des espèces aux changements climatiques (réponses physiologique, comportementale et démographique)	15
Pratiquer une gestion intensive pour protéger les populations	15
Relocaliser les espèces	15
Augmenter le nombre de «réserves»	13
Aborder les enjeux d'échelle dans les modélisations pour améliorer la capacité de prédiction	12
Améliorer la coordination régionale et inter-organisationnelle	12
Accroître et maintenir les programmes de monitoring de base	11
Mettre en pratique la gestion adaptative	11
Protéger de grandes régions et augmenter la taille des «réserves»	11
Créer et gérer les zones tampons autour des «réserves»	10

Source: Heller et Zavaleta (2009)

Comme les écosystèmes répondent aux changements climatiques de manière très dynamique, il est important de rappeler que les interventions dans la gestion de la biodiversité ne devraient pas avoir pour but d'empêcher le changement, mais bien de maximiser la capacité adaptative des espèces afin qu'elles soient capables de vivre la transition vers le nouveau climat avec succès (Schneider, 2014).

Le maintien de la connectivité écologique est la stratégie d'adaptation la plus recommandée par les experts (tableau 2-6). Dans les faits, les corridors écologiques, qu'ils soient terrestres (boisés, forêts) ou aquatiques (lacs et cours d'eau) peuvent avoir de multiples fonctions et de nombreux effets – quelquefois contraires – sur le déplacement des espèces (Bennett, 2003; Gonzalez et al., 2013; Vos et al., 2008). Établir ou même restaurer des corridors écologiques est une stratégie longue et coûteuse en ce qui a trait aux efforts de concertation, de planification et de mise en oeuvre. Il faut donc agir en amont en préservant les zones les plus riches en biodiversité et les écosystèmes naturels qui sont potentiellement les plus résilients face aux changements climatiques, tout en diminuant les autres perturbations anthropiques (Heller et Zavaleta, 2009; Hodgson et al., 2009; Schneider, 2014).

⁹ Dans la formulation de cette étude, le mot « réserves » est utilisé de manière générique pour désigner tout statut officiel visant la conservation de l'environnement naturel, ce qui inclut par exemple les aires protégées.

La protection de grands écosystèmes abritant une riche biodiversité est une des mesures de conservation les plus appliquées dans le monde. Les aires protégées permettent de maintenir l'intégrité écologique, de préserver des paysages représentatifs ou de protéger des espèces menacées et leurs habitats. Les aires protégées font aussi partie de la réponse globale aux changements climatiques, car d'un côté elles participent à la réduction des GES par stockage du carbone (atténuation) et de l'autre, elles contribuent à maintenir des services écologiques essentiels pour la société en général (adaptation). En ce sens, le renforcement des aires protégées représente la « solution naturelle » la plus efficace face aux changements climatiques (Dudley *et al.*, 2010). Toutefois, ceux-ci viennent bouleverser les approches classiques qui ont été utilisées pour la conservation jusqu'à présent, comme en témoigne le vif débat d'experts à ce sujet (Hagerman et Satterfield, 2014). On observe maintenant l'émergence d'un nouveau paradigme de la conservation, celle-ci devant prendre en considération un environnement dynamique et non plus statique, sous l'impulsion des changements climatiques (Berteaux *et al.*, 2014; Glick *et al.*, 2011; Hannah, 2010; Hodgson *et al.*, 2009; Schneider, 2014). Cela demande par exemple de repenser les aires protégées au Canada (Lemieux *et al.*, 2011; 2010) et au Québec (Bélanger *et al.*, 2013d), car elles doivent dorénavant être planifiées et gérées en tenant compte de cette nouvelle dynamique écologique et climatique. Pour ce faire, de nouvelles approches sont nécessaires, comme le renforcement de la connectivité écologique (Gonzalez *et al.*, 2013), la gestion adaptative des parcs (Gendreau *et al.*, 2012; Lemieux *et al.*, 2011) ou la mise en oeuvre de nouvelles catégories d'aires protégées (Bélanger, L. *et al.*, 2013). Les critères de priorisation basés sur la vulnérabilité des espèces et des écosystèmes face aux changements climatiques devront aussi être revus dans un tel contexte (Berteaux *et al.*, 2014; Glick *et al.*, 2011; Keppel *et al.*, 2012; Ricard, 2014).

La diversité des réponses biologiques et écologiques aux changements climatiques, la complexité des processus en jeu (Bellard *et al.*, 2012) et les multiples facteurs de sensibilité et de vulnérabilité qui en résultent (Glick *et al.*, 2011) plaident pour développer une science intégrée au moyen de la mise en oeuvre de méthodologies diversifiées et complémentaires afin de cerner toute l'ampleur de cette problématique (Dawson *et al.*, 2011) : analyses paléoécologiques (climat passé), observations directes (climat actuel), modélisations et projections climatiques (climat futur), voire même des études expérimentales. Il est important de mentionner ici que l'incertitude entourant notre connaissance actuelle de la biodiversité vient s'ajouter aux incertitudes des modèles climatiques et à la variabilité climatique elle-même. Celles-ci devraient intégrer autant les aspects quantitatifs que des considérations qualitatives et s'appuyer sur un processus itératif afin de les réévaluer au fur et à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles (Joyce *et al.*, 2011). De plus, un nombre limité d'indicateurs de changements climatiques bien choisis en fonction des échelles spatiales (locale vs régionale), temporelles (p. ex. saisonnalité), de magnitude et d'analogie climatique permettrait d'intégrer la grande variabilité des réponses des espèces dans l'évaluation des risques et des opportunités pour la biodiversité (Garcia *et al.*, 2014).

Finalement, compte tenu des multiples sources de perturbations s'exerçant sur les espèces, les écosystèmes et les paysages, il est important de baser nos décisions de plus en plus sur l'évaluation des impacts cumulatifs, de manière à prendre en compte l'ensemble des activités anthropiques (p. ex. changements climatiques, évolution démographique, exploitation des ressources) venant perturber simultanément les processus écologiques naturels (Yamasaki *et al.*, 2008b).

2.4.1 Risques, impacts, vulnérabilités et adaptation au Québec

2.4.2.1 La position particulière du Québec dans le continent nord-américain

La biodiversité au Québec est caractérisée par un faible taux d'endémicité et par sa nordicité, c'est-à-dire sa capacité à composer avec une forte saisonnalité et une longue période froide (Berteaux *et al.*, 2014). Ces caractéristiques sont déterminantes pour comprendre comment la composition des écosystèmes et la répartition des espèces seront influencées dans un contexte de changements climatiques. Abritant autour de 60 000 espèces décrites, la richesse spécifique des écosystèmes varie fortement selon une gradation latitudinale du sud vers le nord. Comme le territoire du Québec ne présente pas de barrières géographiques infranchissables par rapport aux territoires voisins, l'évolution de la composition spécifique dans l'Est de l'Amérique du Nord influencera la biodiversité du Québec à mesure de l'évolution des températures moyennes annuelles.

Avec la migration des isothermes vers le nord, le Québec fait face au « paradoxe de la biodiversité nordique » (Berteaux *et al.*, 2010), c'est-à-dire que la progression des espèces périphériques, dont l'aire de répartition s'étendra vers le nord, enrichira la diversité des écosystèmes dans la partie sud du territoire. Dans sa partie maritime, le réchauffement des eaux se traduira par une migration des espèces plus méridionales vers le golfe du Saint-Laurent. Ces migrations profiteront aussi du fait qu'il n'y a pas de grandes barrières géographiques qui délimitent le territoire québécois sur ses frontières sud, ouest et est, ce qui favorise la connectivité à grande échelle avec le reste du continent nord-américain (États-Unis, Canada, région des Grands Lacs) et avec les régions côtières de l'Atlantique. Ce réarrangement des aires de répartition des espèces s'accompagnera de changements phénologiques, notamment des avancées printanières et des allongements de la saison estivale à l'automne pour les espèces migratrices en particulier, comme cela est observé ailleurs dans le monde.

2.4.2.2 À l'échelle du Québec

Au Québec, les connaissances dans ce domaine ont progressé de façon très significative dans les 5 dernières années en profitant d'un contexte favorable grâce notamment au *Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012* du gouvernement du Québec et à sa mesure 26 (PACC26-Ouranos) qui a permis de mobiliser de nombreux acteurs académiques, gouvernementaux, institutionnels et communautaires pour arrimer les besoins en adaptation des usagers, notamment les ministères, avec les expertises en science de la biodiversité. Cet effort collectif, faisant suite aux travaux pionniers du projet CC-Bio (Berteaux *et al.*, 2010; 2014), a permis d'acquérir dans un laps de temps relativement court de nouvelles connaissances sur les impacts des changements climatiques sur les espèces et sur la vulnérabilité de certains écosystèmes et de développer des outils d'évaluation des risques et d'aide à la décision. L'ensemble des résultats acquis durant cette phase intense de développement des connaissances a été présenté lors d'un colloque public rassemblant la communauté scientifique et les acteurs de la conservation de la biodiversité et de l'adaptation (CSBQ-Ouranos, 2013).

Des revues de littérature sur l'impact des changements climatiques sur la biodiversité du Québec ont été réalisées dans les dernières années, parallèlement au nombre grandissant de recherches dans ce domaine. En 2010, Ouranos, le Ministère du Développement durable de l'environnement et des parcs et le CSBQ ont produit une revue de littérature très complète sur les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. Elle s'articule autour de quatre chapitres thématiques portant sur les écosystèmes québécois, les aires protégées, les populations autochtones nordiques et les corridors écologiques (voir Auzel *et al.* (2012) pour une synthèse de cette revue). Le livre publié récemment par Berteaux *et al.* (2014) fait aussi le tour de la question avec des chapitres sur l'importance biologique des changements climatiques, les projections écologiques dans un climat futur et les mesures d'adaptation. Finalement, dans la nouvelle évaluation réalisée par Ressources naturelles Canada, un des chapitres est consacré à la biodiversité et aux aires protégées (Nantel *et al.*, 2014).

Impacts sur la biodiversité

Compte tenu de la complexité des processus écologiques en jeu, mais aussi de l'étendue du territoire québécois, étudier les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec est en soit tout un défi, car cela implique d'étudier divers types de réponses, physiologiques, phénologiques, comportementales et démographiques provenant d'une grande diversité d'espèces et de taxons vivants dans des écorégions très différentes, des basses-terres du Saint-Laurent jusqu'à la toundra arctique, en passant par la forêt boréale.

Selon Berteaux *et al.* (2014), qui ont étudié des centaines d'espèces de plantes, d'arbres, d'oiseaux et d'amphibiens, les niches climatiques des espèces, c'est-à-dire les zones dans lesquelles le climat leur est favorable, devraient se déplacer au Québec de 500 à 800 km vers le nord en un peu plus d'un siècle (soit à des vitesses de 45 km à 70 km par décennie). Le Québec devrait ainsi présenter à la fin du XXI^e siècle des conditions climatiques favorables à l'arrivée de nombreuses nouvelles espèces, alors que le climat deviendra simultanément défavorable pour des espèces et populations actuellement bien établies (figure 2-27). Cette importante pression exercée par les changements climatiques sur la répartition des espèces est le premier facteur de risque envers le maintien des services écologiques essentiels.

D'autre part, le fonctionnement des écosystèmes dépend fortement des régimes de température et d'humidité qui caractérisent les sites où ils sont implantés. Ainsi, la fréquence et l'intensité des feux, le niveau d'eau des milieux humides, la probabilité que des épidémies d'insectes ravageurs surviennent, ou la présence de pergélisol, sont autant de facteurs qui déterminent le fonctionnement des écosystèmes tout en étant susceptibles de fortement changer à cause des changements climatiques. C'est là le second facteur de risque concernant le maintien des services écologiques essentiels. Chacun de ces deux risques a de nombreuses spécificités québécoises, puisque les services écologiques essentiels découlent d'un assemblage d'espèces et d'un type de fonctionnement des écosystèmes qui sont enracinés dans l'histoire postglaciaire et la géographie du Québec.

Bien que la grande majorité des études se soit penchée jusqu'à présent sur la réponse phénologique et le déplacement des niches bioclimatiques, les changements climatiques ont également des effets sur le comportement des espèces et l'utilisation de leur habitat, en réponse aux modifications des caractéristiques de ces habitats. C'est le cas notamment des salmonidés qui habituellement sont des poissons très territoriaux, mais qui, durant les canicules, adoptent un comportement grégaire pour survivre en se regroupant dans les panaches d'eaux plus fraîches qui leur servent de refuges thermiques (Breau *et al.*, 2011; Lapointe *et al.*, 2013). Cela pourrait être aussi le cas du caribou migrateur (*Rangifer tarandus*) qui a modifié ses patrons de migration et ses aires d'hivernage dans les dernières années (Le Corre *et al.*, 2013). Toutefois, comme la taille des deux grands troupeaux du Nord du Québec et du Labrador fluctue beaucoup avec le temps et que d'autres facteurs peuvent aussi intervenir, il est encore difficile d'établir avec certitude le lien causal avec les changements climatiques dans ce cas-ci.

Quand on vise l'adaptation aux changements climatiques dans le domaine de la biodiversité, force est de constater que nous sommes face à une nouvelle réalité : les processus climatiques et écologiques, que nous considérons comme statiques à l'échelle d'une génération par exemple, sont en fait dynamiques, car ils réagissent au rythme d'une évolution du climat plus rapide qu'auparavant. Comme l'ont souligné récemment quelques auteurs (Berteaux *et al.*, 2014; Schneider, 2014), il s'agit d'un changement de paradigme dont il faut dorénavant tenir compte dans la gestion des ressources et dans la conservation de la biodiversité.

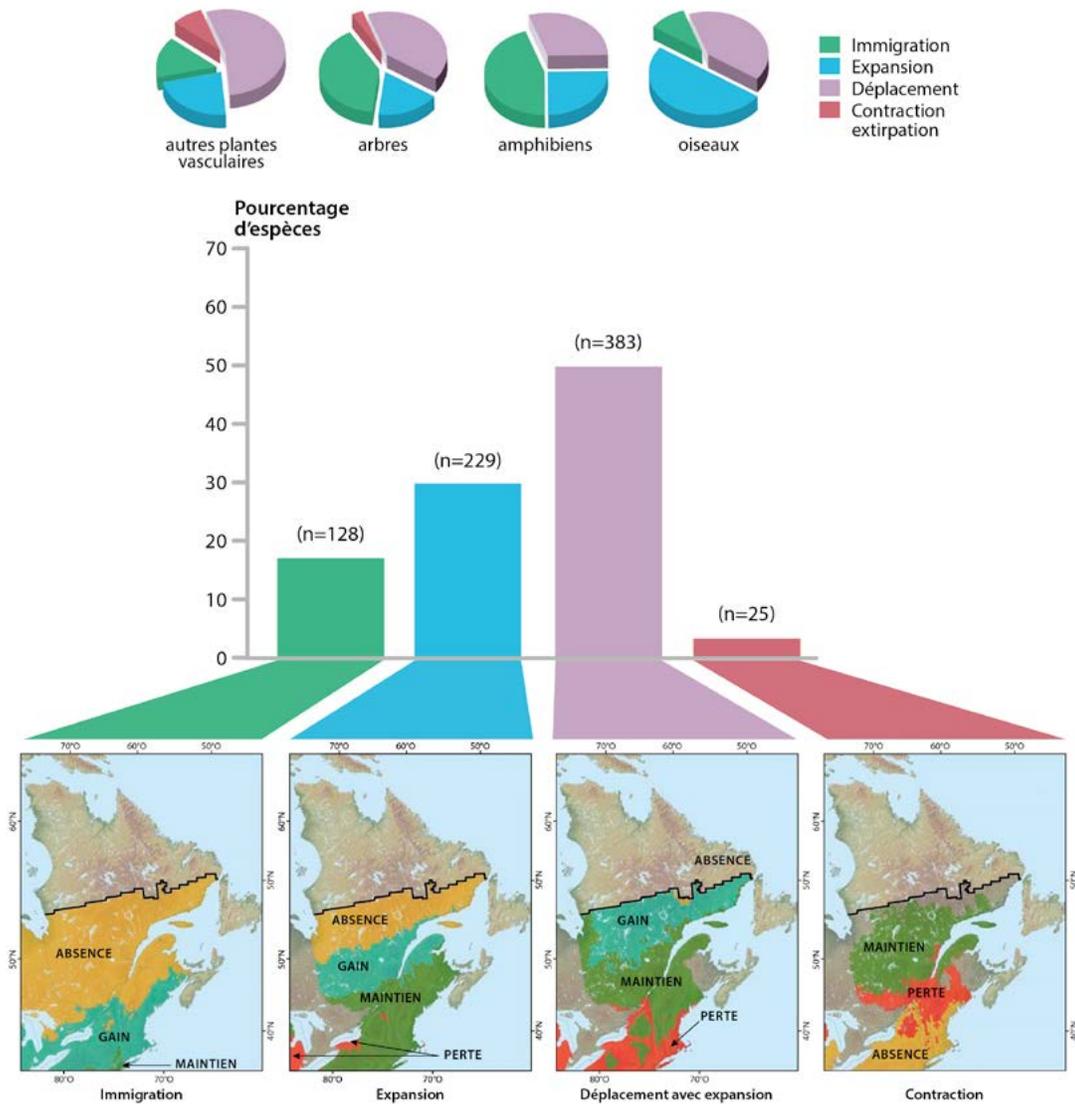


Figure 2-27 Effets des changements climatiques sur la répartition potentielle des espèces au Québec.

Légende : Le diagramme à barres au centre indique la proportion d'espèces (parmi les 765 considérées) qui pourraient soit immigrer (en vert), s'étendre (en bleu), se déplacer (en mauve) ou diminuer (en rouge) au Québec. Les diagrammes en haut de la figure donnent la proportion de chacun de ces 4 types de réponses pour les quatre grands taxons étudiés. Les cartes du bas montrent des exemples de changements modélisés entre les périodes 1961-1990 (référence) et 2071-2100 (avec changements climatiques) pour les aires de répartition de 4 espèces représentatives de chacun des 4 groupes et types de réponses : la mésange de Caroline (immigration), la grenouille des marais (expansion), l'iris versicolore (déplacement avec expansion) et l'épinette noire (contraction).

Source : D'après Berteaux et al. (2014)

Stratégies d'adaptation

Mentionnons d'emblée qu'il est impossible d'anticiper tous les effets – multiples, cumulatifs et en cascade – des changements climatiques sur la biodiversité et les écosystèmes, et il est important de se préparer à faire face à des événements écologiques inattendus. Comme le notent Berteaux *et al.*, (2014), s'y préparer est déjà en soi une stratégie d'adaptation.

Il est à noter que la plupart des stratégies d'adaptation (tableau 2-6) sont théoriquement pertinentes pour le Québec, mais des études sont nécessaires pour s'assurer de leur faisabilité et les ajuster au contexte environnemental et climatique du Québec (Berteaux *et al.*, 2010). Certaines de ces stratégies ont fait l'objet de recherches dans les dernières années au Québec, avec de gros efforts investis notamment pour mieux comprendre la réponse de certaines d'espèces aux changements climatiques (Berteaux *et al.*, 2014), incluant les espèces arborescentes (Périé *et al.*, 2014), les plantes vasculaires et invasives (Marchand *et al.*, 2013), les plantes exotiques envahissantes (de Blois *et al.*, 2013; Tougas-Tellier *et al.*, 2013), des espèces vectrices de maladie (Millien, 2013), des espèces commerciales et de subsistance (Bélanger *et al.*, 2013a; Lapointe *et al.*, 2013; Le Corre *et al.*, 2013) et des espèces menacées ou vulnérables (Bhiry *et al.*, 2013; Larocque *et al.*, 2013).

Des études se sont également penchées sur certaines stratégies d'adaptation prometteuses qui n'ont pas encore été déployées à grande échelle au Québec, mais qui font l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique et des gestionnaires engagés dans le processus de l'adaptation. Il s'agit par exemple d'établir des réseaux de corridors écologiques (Gonzalez *et al.*, 2013) et d'aires protégées (Bélanger *et al.*, 2013d) robustes aux changements climatiques. Les enjeux d'échelle pour la conservation des milieux humides ont aussi été mis en lumière (Fournier *et al.*, 2013). Le suivi de la biodiversité a fait l'objet d'une réflexion collective pour identifier les éléments de la biodiversité qui devraient être échantillonnés et suivis en priorité pour mieux appréhender les effets des changements climatiques sur la biodiversité. Cet effort de consultation (plus de 600 répondants) a mis en lumière la difficulté de s'entendre sur des priorités communes pour un territoire aussi vaste que le Québec, reflétant la diversité d'opinions et d'intérêts des acteurs du domaine (Boivin *et al.*, 2014). Il en ressort néanmoins que l'emphase devrait être mise sur les espèces offrant de grands services écologiques, les espèces menacées ainsi que les espèces envahissantes. Par ailleurs, la migration assistée des espèces suscite actuellement une grande réflexion, tant sur le plan des enjeux scientifiques qu'opérationnels et éthiques (Berteaux *et al.*, 2014). Quant à l'agroforesterie, elle fait actuellement l'objet d'études expérimentales afin de démontrer tous les bénéfices, environnementaux et économiques, qu'on pourrait en tirer dans le contexte de l'adaptation aux changements climatiques (Olivier, 2013).

Toutes ces recherches visent donc à appuyer la gestion et la conservation de la biodiversité, pour en faciliter l'adaptation, notamment au ministère responsable de la mise en oeuvre de la *Convention sur la diversité biologique* (Gouvernement du Québec, 2011, 2013b) et au ministère responsable de la gestion de la faune. Toutefois, la mise en oeuvre de certaines de ces stratégies ne peut se concevoir qu'à l'échelle régionale et en impliquant l'ensemble des acteurs et des usagers concernés. Elles doivent donc s'insérer dans un cadre plus large de planification et d'aménagement du territoire (voir section 2.5.2).

Compte tenu de la complexité des enjeux liés aux EEE et des conséquences potentielles sur la biodiversité, il est essentiel de compléter nos connaissances sur la biologie et l'écologie de ces espèces, notamment celles qui montrent les risques d'invasion ou d'expansion les plus grands pour mieux prédire leur évolution avec les changements climatiques (Smith *et al.*, 2012). Au Québec, la modélisation des niches bioclimatiques d'une quarantaine de plantes jugées prioritaires à cause de leur fort potentiel invasif (sélectionnées à partir d'une

liste initiale de 228 plantes nuisibles) a permis d'évaluer pour chacune d'elles le risque d'invasion potentielle sous divers scénarios de changements climatiques (de Blois *et al.*, 2013). Selon cette étude, les nouvelles conditions climatiques permettraient la survie au Québec d'au moins sept nouvelles espèces de plantes envahissantes et à l'horizon 2080, une grande partie du territoire québécois présenterait des conditions climatiques favorables à la croissance et à l'expansion de 90 % des plantes répertoriées. Ces projections fournissent une première estimation du risque d'invasions biologiques au Québec sous les conditions climatiques actuelles, mais aussi futures. Sur la base de ces premiers résultats, ce risque doit être pris très au sérieux par les autorités gouvernementales, car il va aller en augmentant avec le temps, alors que les conditions climatiques seront de plus en plus favorables aux plantes envahissantes et nuisibles. Cette évaluation des risques, maintenant possible grâce à l'outil développé par de Blois *et al.*, (2013), permettra d'appuyer des stratégies de prévention, de détection précoce et de contrôle des espèces envahissantes. Ce risque d'invasions biologiques devra également être intégré dans les politiques et les mesures visant la protection et le suivi des milieux naturels ainsi que dans la gestion des aires protégées au Québec (de Blois *et al.*, 2013). Dans tous les cas, nous devons nous préparer à en gérer les conséquences écologiques, mais aussi économiques.

Pour proposer les stratégies d'adaptation les plus adéquates qui vont répondre aux besoins de la conservation à long terme et pouvoir en évaluer les résultats, il est primordial de mieux comprendre les interactions entre biodiversité et climat et d'identifier les éléments de la biodiversité les plus vulnérables aux changements climatiques anticipés. Des efforts ont été investis récemment dans ce sens : des lignes directrices et un cadre méthodologique pour suivre l'évolution de la biodiversité au Québec ont été élaborés (Peres-Neto *et al.*, 2013) et demandent maintenant à être appliqués et testés. Ce cadre propose des indicateurs pour sélectionner et suivre les groupes taxonomiques, les divers types d'écosystèmes et les processus écologiques et décrit une méthode pour déterminer l'emplacement des stations d'échantillonnage en fonction de l'évolution climatique régionale. Bien que cette approche vise à optimiser les ressources et les coûts inhérents aux échantillonnages sur le terrain, les ressources allouées à la maintenance d'un système de suivi à long terme restent toujours l'un des principaux défis à relever.

Le tableau 2-7 compile les travaux de recherche réalisés au Québec qui contiennent de l'information d'intérêt pour l'étude des services écologiques dans le contexte des changements climatiques. Il faut noter que la plupart de ces recherches ne visaient pas spécifiquement l'étude des services écologiques, toutefois, elles sont pertinentes pour alimenter l'évaluation des services écologiques, que ce soit en matière d'impacts biophysiques, de valeur économique ou de stratégies d'adaptation.

2.4.2.3 À l'échelle régionale

À l'échelle régionale ou même plus locale, les changements climatiques peuvent aussi avoir des effets indirects sur les espèces et les écosystèmes, en modifiant notamment des phénomènes naturels dont ils augmentent la fréquence ou l'intensité. Dans l'écosystème forestier, il s'agit notamment des feux et des épidémies d'insectes (Bergeron *et al.*, 2013; Samson, 2012), mais aussi des grands vents et des chablis (Samson, 2012). D'autres perturbations exacerbées par les changements climatiques ont un impact sur la qualité des habitats et l'intégrité des écosystèmes, avec là aussi des conséquences sur les espèces qui les fréquentent, p. ex. la hausse des températures de l'eau des rivières (Beauregard *et al.*, 2013; Dugdale *et al.*, 2013; Kurylyk *et al.*, 2013; Lapointe *et al.*, 2013), la stratification thermique accentuée dans les lacs nordiques (Bélanger. *et al.*, 2013a), le dégel du pergélisol dans l'Arctique (Allard et Pollard, 2011), la hausse du niveau marin, la modification du régime des vagues (Neumeier *et al.*, 2013), la disparition des glaces côtières dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Senneville *et al.*, 2014) et l'érosion côtière qui en résulte (Savard *et al.*, 2008).

Les sections suivantes soulignent les enjeux propres aux grandes régions du Québec et présentent quelques études de cas pour illustrer les impacts des changements climatiques sur les espèces et les habitats représentatifs de chaque région.

Le Nord du Québec - La région Arctique

Le défi des études dans le Nord

Étudier la biodiversité d'un territoire de plus d'un million de km² en tenant compte des changements climatiques, qui sont particulièrement rapides dans le Nord québécois, pose de nombreux défis. Le manque de données en est probablement un des plus gros. *L'Atlas de la biodiversité du Québec nordique*, projet piloté par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs de l'époque, en collaboration avec Ouranos, contribue à relever ce défi (Poisson *et al.*, 2012). En effet, le peu de données d'observations météorologiques, obtenues à quelques stations très dispersées, ne permet pas de bien valider les modèles climatiques couvrant le nord. Une voie de recherche prometteuse est d'optimiser la combinaison de données

Tableau 2-7 Services écologiques et changements climatiques

Services écologiques (note 1)	Type d'écosystème étudié fournissant le service écologique	Références d'intérêt (note 2)
<i>Services d'auto-entretien (de l'écosystème)</i>		
Habitat pour la biodiversité	Forêts, milieux humides, systèmes agroforestiers, sources et ruisseaux, écosystèmes littoraux du tronçon fluvial et de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent	Bélanger <i>et al.</i> (2013d) (A) Bhiry <i>et al.</i> (2013) (I) Dupras <i>et al.</i> (2013b) (A, \$) Fournier <i>et al.</i> (2013) (I, \$) Gonzalez <i>et al.</i> (2013) (I, A, \$) Larocque <i>et al.</i> (2013) (I) Olivier (2013) (I, A, \$) Tougas-Tellier <i>et al.</i> (2013) (I)
Connectivité écologique	Massifs forestiers et agroécosystèmes et de la Montérégie	Dupras <i>et al.</i> (2013b) (A, \$) Gonzalez <i>et al.</i> (2013) (I, A, \$) Olivier (2013) (I, A, \$) voir section sur l'aménagement du territoire
Fertilité des sols	Écosystèmes forestiers	Houle <i>et al.</i> (2014) (I) voir section sur la foresterie
<i>Services d'approvisionnement</i>		
Pêche de subsistance (salmonidés)	Lacs nordiques, Arctique	Bélanger <i>et al.</i> (2013a) (I) Power <i>et al.</i> (2013) (I) voir section sur les pêches et l'aquaculture
Chasse et subsistance (Caribou migrateur)	Écosystèmes arctiques, toundra	Côté <i>et al.</i> (2013b) (I) Le Corre <i>et al.</i> (2013) (I) Mameamskum (2013) (I, A)
Cultures céréalières et production de bois	Systèmes agroforestiers	Dupras <i>et al.</i> (2013b) (A, \$) Olivier (2013) (I, A, \$)
Approvisionnement en eau (eau potable, irrigation)	Rivières du Sud du Québec, fleuve Saint-Laurent	Brissette <i>et al.</i> (2012) (I, A) Côté <i>et al.</i> (2013a) (I, A) Parent <i>et al.</i> (2012) voir section sur la gestion de l'eau Mehdi <i>et al.</i> (2014) (A) voir section sur l'agriculture

<i>Cueillette de petits fruits</i>	<i>Écosystèmes nordiques</i>	<i>Lévesque et al. (2013) (I)</i>
<i>Production de fruits</i>	<i>Vergers de pomiculture</i>	<i>Lease et al. (200) (I, A) voir section sur l'agriculture</i>
<i>Production de bois</i>	<i>Forêt boréale, écosystèmes forestiers exploités</i>	<i>Bergeron et al. (2011) (I, A) Bergeron et al. (2013) (I) LeGoff et Leduc (2012) (I, A) Morin et al. (2012a); Morin et al. (2012b) (I) Yamasaki et al. (2008a) (I, A) Boisvert-Marsh et al. (2014) (I) Terrier et al. (2013) (I, A) voir section sur la foresterie</i>
Services de régulation		
<i>Régulation du climat (capture et stockage du CO₂)</i>	<i>Forêt boréale, tourbières</i>	<i>Boucher et al. (2012) (A) Cliche Trudeau et al. (2014) (I) Lavoie et Pellerin (2011) (I) Magnan et Garneau (2014) (I)</i>
<i>Régulation des crues et des étiages</i>	<i>Plaines inondables, espace de liberté des cours d'eau, milieux humides</i>	<i>Biron et al. (2013) (A, \$) voir section sur la gestion de l'eau Dupras et al (2013b) (A, \$) Fournier et al. (2013) (I, \$)</i>
<i>Drainage des sols</i>	<i>Systèmes agroforestiers</i>	<i>Olivier (2013) (I, A, \$)</i>
<i>Filtration de l'eau</i>	<i>Milieux humides (riverains et isolés)</i>	<i>Dupras et al. (2013b) (A, \$) Fournier et al. (2013) (I, \$)</i>
<i>Contrôle de l'érosion et du transport sédimentaire</i>	<i>Rivières, bandes riveraines, agroécosystèmes</i>	<i>Roy et al. (2013) (I, A) voir section sur la gestion de l'eau Mehdi et al (2014) (A) voir section sur l'agriculture</i>
<i>Contrôle biologique</i>	<i>Agroécosystèmes</i>	<i>Brodeur et al. (2013) (I) voir section sur l'agriculture</i>
<i>Atténuation de la chaleur extrême et du rayonnement UV</i>	<i>Espaces verts en milieu urbain</i>	<i>Anquez et Herlem (2011) (A) Bélanger et al. (2013c) (I, A) BNQ (2013) (A) Giguère (2009) (A) voir section sur la santé</i>

Notes

(1) Les services écologiques sont classés ici selon les quatre catégories proposées par l'Évaluation des écosystèmes du millénaire (MEA, 2005). Ce tableau ne donne pas une liste exhaustive de tous les services écologiques, mais uniquement de ceux qui sont abordés dans les travaux cités dans l'ensemble du document.

(2) Publications contenant des informations d'intérêt sur les services écologiques dans le contexte des changements climatiques, abordé sous l'angle des impacts (I) et/ou de l'adaptation (A); quelques études incluent une évaluation économique (\$) des services écologiques. Certains de ces travaux sont décrits dans les autres chapitres ou sections thématiques du document.

d'observations et de modélisations climatiques pour reproduire le climat du passé récent et projeter le climat futur dans le Nord québécois (Rapaic *et al.*, 2012a; Rapaic *et al.*, 2012b). L'intégration de données climatiques (produites par les modèles) et écologiques (issues du cadre écologique de référence) permettra à terme d'obtenir un portrait bioclimatique régional pour appuyer les gestionnaires de la conservation dans leur exercice de priorisation des zones à protéger (Poisson *et al.*, 2012). En dépit des incertitudes et des biais inhérents à ce type d'approche qui superpose plusieurs couches d'information provenant de diverses sources, les premières applications sur des régions pilotes démontrent d'ores et déjà tout le potentiel de cet outil, notamment pour déterminer et quantifier les vulnérabilités des communautés végétales et des écosystèmes nordiques (Marchand *et al.*, 2013; Samson, 2012). À l'aube du développement économique du Nord québécois, ce type d'information est essentiel pour alimenter les études d'impacts et s'assurer que les éléments les plus représentatifs et les plus vulnérables de la biodiversité nordique seront protégés de manière durable.

L'impact du réchauffement des températures sur la limite nordique des arbres

Conséquence directe de la migration des isothermes vers le nord, l'allongement de la saison de croissance (augmentation du nombre de degré-jours) projeté favorisera la croissance des arbustes et des arbres, et l'expansion de la limite forestière nordique. Déjà, on observe que la végétation de faible biomasse a subi une augmentation de 20 à 60 % en surface foliaire verte dans le Nord du Québec entre 1986 et 2010 (McManus *et al.*, 2012) et tout porte à croire que l'expansion des arbustes dans la toundra s'accroîtra dans le Nord du Québec (Ropars et Boudreau, 2012). Plusieurs études semblent confirmer que la remontée vers le nord de la limite des arbres est une réponse directe des changements climatiques qui s'opèrent rapidement dans cette région (Boisvert-Marsh *et al.*, 2014; Gamache et Payette, 2005). Par exemple, à partir de plantations expérimentales et contrôlées (Dufour-Tremblay et Boudreau, 2011) ont démontré que la viabilité des graines de l'épinette noire (*Picea mariana*) était significativement plus élevée en 2006-2007 que de 1989 à 1995. Cela pourrait expliquer la régénération de cette espèce à la limite des arbres. Toutefois, ce phénomène ne se fera pas de manière uniforme, car il dépend de nombreux autres facteurs, abiotiques (p. ex. sol minéral et perturbé) et biotiques. Ainsi, il semble que l'activité du caribou (*Rangifer tarandus*), qui broute et détruit la couverture de lichens, a un effet synergique avec le réchauffement du climat pour favoriser l'établissement des semis et la régénération de l'épinette noire à la limite des arbres (Dufour-Tremblay et Boudreau, 2011). Toutefois, certaines particularités biologiques pourraient tout de même limiter la progression de l'épinette noire vers le nord puisque les arbustes présents dans la toundra libèrent des composés allélopathiques qui entravent la germination (Dufour-Tremblay *et al.*, 2012). Quant aux feux de forêt, qui sont un processus naturel essentiel dans la dynamique de l'écosystème forestier boréal, ils représentent le principal facteur de perturbation réduisant la capacité régénératrice de la forêt dans sa limite la plus nordique (Girard *et al.*, 2008). Tous ces facteurs pourraient aussi agir simultanément et dans certains cas se contrebalancer. Par exemple, la modélisation indique que les conditions climatiques futures seraient plus propices à l'augmentation des feux de forêt, mais aussi à la remontée vers le nord d'espèces d'arbres feuillus (Terrier *et al.*, 2013; Boisvert-Marsh *et al.*, 2014). Or, la principale conséquence de ce changement dans la composition spécifique de la forêt boréale pourrait être une réduction de l'impact global des feux sur la forêt, puisque les feuillus sont moins susceptibles à propager le feu que les conifères. Partant de ce constat, Terrier *et al.* (2013) proposent de baser les futures stratégies d'atténuation des feux et de protection des populations éloignées de la région boréale sur cette conséquence anticipée des changements climatiques.

L'impact du réchauffement sur l'écosystème de toundra

L'écosystème de la toundra arctique a beaucoup changé au cours des dernières décennies, avec notamment le dégel progressif du pergélisol (Allard *et al.*, 2013), une expansion générale vers le nord et une densification de la végétation et des arbustes (CCAP, 2012). La hausse des températures et l'accroissement de la couche active du pergélisol sont observés dans l'Est du Canada depuis 1993. Outre les conséquences négatives sur les bâtiments et les infrastructures dans les villages nordiques du Nunavik (voir le chapitre 2.3), le dégel du pergélisol en milieu naturel crée des dépressions et des étangs dus à l'eau de fonte, ce qui entraîne une modification des paysages et des sols de l'écosystème (Allard *et al.*, 2013). Ces profonds bouleversements vont modifier le cycle du carbone qui fait intervenir des processus écologiques complexes dont certains pourraient être favorisés par le réchauffement des températures. Ainsi, des recherches récentes menées dans le cadre de l'Année polaire internationale (API) ont démontré le rôle important joué par les microbes du sol et les champignons mycorhiziens, en association symbiotique avec les plantes, dans la décomposition du carbone organique complexe stocké dans le sol de la toundra. Comme le réchauffement climatique favorise ces associations symbiotiques entre arbustes et champignons, cela va entraîner la décomposition des réservoirs de carbone de la toundra arctique (CCAP, 2012). Les recherches menées durant l'API ont aussi montré que l'augmentation des GES émanant du dégel du pergélisol pourrait être atténuée par un autre phénomène : la toundra arctique croît maintenant plus vite que par le passé (CCAP, 2012). Tandis que la végétation va se répandre dans la toundra arctique, celle-ci agira comme piège à carbone au fur et à mesure de la croissance des plantes et des arbustes.

La saison de croissance plus longue n'aura pas que des effets positifs sur la flore nordique. Par exemple, les arbustes à petits fruits pourraient entrer en compétition avec des arbustes plus érigés et plus grands (Lévesque *et al.*, 2013). Par ailleurs, la croissance du couvert arbustif sous l'effet des changements climatiques pourrait favoriser des espèces plus tolérantes à l'ombre au détriment d'espèces ayant besoin de plus d'ensoleillement (Lévesque *et al.*, 2013; De Frenne *et al.*, 2013). Le manque d'humidité durant l'été ainsi que des événements extrêmes comme des précipitations intenses, des vents violents ou des gels très tardifs pourraient également réduire la productivité des petits fruits dans cette région (Lévesque *et al.*, 2013). En Jamésie, la quantité de précipitations est le facteur climatique prépondérant qui influence même davantage que la température la richesse spécifique de la végétation (Marchand *et al.*, 2013). Cette étude a montré que la réponse aux changements climatiques diffère selon les strates végétales : les herbacées seraient favorisées sur l'ensemble de la région, alors que les arbres, les arbustes et les fougères verraient leur nombre d'espèces augmenter dans le nord de cette région seulement, alors que pour la flore vasculaire (lichens et bryophytes), très peu de changements sont anticipés. Les perturbations naturelles par les feux jouent aussi un rôle clé dans la dynamique des écosystèmes de cette région (Marchand *et al.*, 2013).

L'impact du réchauffement sur la dynamique des populations : le cas du caribou migrateur

Les experts estiment que les populations de vertébrés en Arctique ont été réduites de 30 % depuis les années 1990 (CCAP, 2012). La modification rapide de leurs habitats pourrait en être une des principales causes, comme semble l'indiquer le cas du caribou migrateur. La dynamique des populations des deux grands troupeaux de caribou migrateur de la péninsule du Québec-Labrador est très complexe et elle est suivie depuis 2009 par le programme de recherche Caribou-Ungava (Côté *et al.*, 2013b). Une étude s'appuyant sur les données recueillies par ce programme a montré que les conditions climatiques ont pu affecter leurs trajets migratoires et leur cycle de vie (Le Corre *et al.*, 2013). On observe, par exemple, que les patrons et les corridors de migration tendent à

se stabiliser dans les années 2009-2011 par rapport aux années 1997-1999 avec l'abandon de certaines aires d'hivernage, et ce, pour les deux troupeaux étudiés. Un printemps hâtif et un hiver tardif semblent influencer les dates de départ et d'arrivée des troupeaux au printemps et à l'automne. En effet, le couvert de neige, la fonte de la neige, les débâcles et l'épaisseur de la glace sont des facteurs qui ont un impact sur la nourriture du caribou, ses dépenses énergétiques, sa vulnérabilité à la prédation, les blessures, les noyades, etc. Sur la base de ces connaissances récentes, les efforts pour la gestion de cette ressource importante devraient être mis dans la préservation de l'habitat du caribou, la réduction des autres pressions anthropiques et la gestion durable de la chasse (Côté *et al.*, 2013b).

L'impact du réchauffement sur la stratification thermique des lacs nordiques : le cas du touladi

Le réchauffement des températures de l'air et les modifications du couvert de glace projetés dans le Nord du Québec pourraient avoir des impacts sur la stratification thermique des lacs nordiques et possiblement sur les salmonidés qui font l'objet d'une pêche de subsistance et sont une ressource importante pour les populations nordiques. La modélisation des conditions thermiques des lacs selon les scénarios de changements climatiques montre en effet que la température de l'eau des 10 premiers mètres de profondeur pourrait être, à l'horizon 2050, de 3 °C plus élevée qu'elle l'était dans le passé récent (1979-2010) et jusqu'à 4,7 °C plus élevée à l'horizon 2080 (Bélanger *et al.*, 2013a). Cette augmentation de la température provient essentiellement d'un avancement de la période de réchauffement du lac au printemps et d'un refroidissement du lac plus tardif à l'automne. Des eaux de surface plus chaudes sur une plus longue période entraîneront un transfert de chaleur dans la colonne d'eau des lacs et, par conséquent, une réduction de l'habitat préférentiel du touladi (*Salvelinus namaycush*). Le rang des températures pour la croissance et la reproduction de cette espèce varie entre 6 et 14 °C (Power *et al.*, 2013) et son habitat préférentiel a été délimité par l'isotherme 12 °C pour cette étude. Pour les lacs relativement profonds (figure 2-28; A), le volume d'eau restant sous le seuil des 12 °C représente toujours au moins un tiers de la colonne d'eau totale du lac, même dans les lacs les plus au sud du gradient étudié. Par contre, dans le cas de lacs moins profonds, y compris pour des lacs très nordiques (figure 2-28; B), la température de 12 °C pourrait être dépassée durant environ 20 jours vers la fin de l'été, ne laissant alors aucun refuge thermique pour le touladi. Avec ces nouvelles données, la gestion de la faune aquatique par les autorités compétentes pourra ainsi être mieux ajustée; p. ex. le choix des espèces et des lacs à ensemercer selon la forme et la profondeur du lac. Par ailleurs, la concentration en oxygène dissous est également une variable clé dans le cycle de vie des salmonidés, mais son intégration dans les modèles climatiques reste encore un défi.

L'impact de la diminution des glaces marines : le cas de l'ours blanc

Souvent utilisé comme espèce emblématique du Nord canadien et plus récemment de la lutte contre les changements climatiques, l'ours blanc (*Ursus maritimus*) est fortement influencé par le réchauffement rapide qui s'opère dans le Nord. Les populations de cette espèce ne peuvent pas subsister sans glace marine saisonnière dont elles dépendent pour chasser et se nourrir. Or, les glaces sont en déclin et les modifications des cycles gel-dégel ont déjà un impact négatif sur cette espèce (Stirling et Derocher, 2012). En absence de glace, les ours n'ont plus d'accès direct à leur nourriture habituelle et ils doivent alors compter sur leurs réserves en graisse pour survivre (Derocher *et al.*, 2013). Dans le futur, le taux de mortalité chez les adultes mâles devrait augmenter de 28 à 48 % par rapport aux dernières décennies pour toutes les années où les périodes de jeûne dépasseront 30 jours (Molnár *et al.*, 2010). L'ours blanc a été désigné comme espèce préoccupante dès 1991 et ce statut a été confirmé depuis à plusieurs reprises en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* du Canada. Il est justifié par le déclin de l'espèce partiellement attribuable aux changements climatiques dans certaines régions de l'Arctique et de la baie d'Hudson (COSEPAC, 2011). Au-delà des enjeux de conservation, la présence grandissante de l'ours blanc sur la terre ferme soulève aussi des enjeux de sécurité humaine (Derocher *et al.*, 2013).

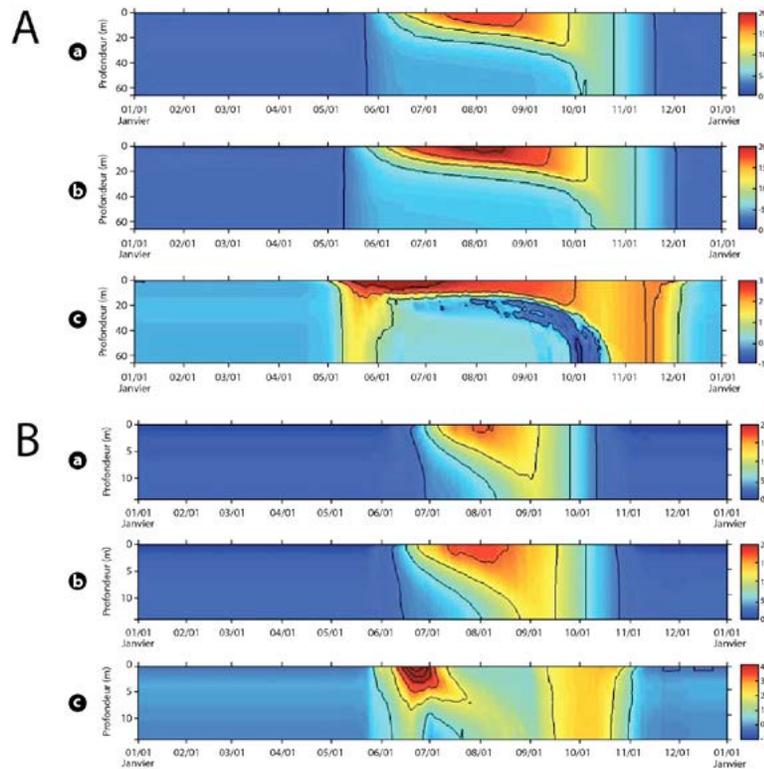


Figure 2-28 Profils thermiques passés et futurs pour deux lacs représentatifs du Sud et du Nord du Québec.

Légende : A) Lac Jacques-Cartier (47,5836 °N / 71,2200 °O; profondeur 68m) et B) Lac Stewart (28,1854 °N / 68,4309 °O; profondeur 15m). Pour les deux lacs, les profils de températures montrés sont : (a) les cycles annuels passés (1979-2010) et (b) futurs (2041-2070) de profils journaliers moyens, et (c) la différence de températures entre futur et passé. Les températures futures sont obtenues par la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

Source : Bélanger, et al. (2013a)

L'impact des précipitations intenses : le cas du faucon pèlerin

La productivité annuelle de la population de faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) en Arctique continue à décliner malgré le fait que les taux résiduels de produits organochlorés accumulés par cette espèce diminuent avec le temps. Or, une récente étude a montré qu'environ un tiers de la mortalité observée dans cette population est dû à l'effet direct des pluies intenses sur les nids (Anctil *et al.*, 2014). Les juvéniles seraient particulièrement touchés, à partir de précipitations supérieures à 8 mm par jour. Or, les modèles climatiques projettent une augmentation du nombre de jours dont l'accumulation quotidienne excède 10 mm dans cette région (voir tableau 1-6). Cette étude permet donc, pour une des toutes premières fois, d'établir un lien causal direct entre un aléa climatique et le taux de survie d'une espèce arctique.

L'impact des changements climatiques sur les écosystèmes arctiques et les services écologiques

De manière générale, toutes les études démontrent la grande sensibilité aux changements climatiques des espèces situées au sommet des chaînes trophiques arctiques, autant terrestres (Anctil *et al.*, 2014; Côté *et al.*, 2013b; Molnár *et al.*, 2010; Stirling et Derocher, 2012), lacustres (Bélanger *et al.*, 2013a; Power *et al.*, 2013) que marines (Ferguson *et al.*, 2012). Or, la plupart de ces espèces occupent une place centrale dans l'alimentation et la culture des Inuits. Leur déclin ou leur disparition entraîneraient des déséquilibres importants dans la structure de l'écosystème, ce qui pourrait réduire ou annuler les effets positifs de l'augmentation de la productivité globale de l'écosystème arctique et, en fin de compte, accentuer la vulnérabilité des populations nordiques dont la survie dépend très étroitement des ressources vivantes et des nombreux services écologiques qu'elles en retirent (Allard *et al.*, 2012; ACIA, 2004; CCAP, 2012; Côté *et al.*, 2013b; Downing et Cuerrier, 2011; Mathias *et al.*, 2008). Les principales activités de récolte des ressources vivantes (chasse, pêche et cueillette) et les principales espèces (petits fruits, omble chevalier, caribou, mammifères marins) qui participent à la sécurité alimentaire au Nunavik font l'objet de chapitres détaillés dans l'étude intégrée d'impact régional d'ArcticNet (Allard et Lemay, 2013).

Ainsi, malgré les efforts pour modéliser le climat futur et ses conséquences sur la biodiversité, il est encore très difficile, dans l'état actuel des connaissances, de décrire avec précision à quoi ressembleront les écosystèmes nordiques dans les prochaines décennies, car chaque espèce répond de manière spécifique aux changements climatiques et les nouvelles interactions qui vont s'établir entre espèces, qu'elles soient indigènes ou provenant du sud, engendreront des bouleversements écologiques encore impossibles à prévoir.

Le Centre du Québec - La forêt boréale

Les impacts directs et indirects sur l'écosystème forestier

L'écosystème forestier de la zone boréale va être affecté par les changements climatiques, dont les impacts vont se faire sentir sur plusieurs plans. D'une part, des impacts directs des changements dans les variables climatiques (température et précipitations) qui influencent la croissance des arbres et modifient la composition spécifique de la forêt boréale, actuellement fortement dominée par l'épinette noire; et d'autre part, des impacts plus indirects, provenant de perturbations naturelles telles que des changements dans le régime des feux et dans les épidémies d'insectes et de maladies, des phénomènes naturels eux-mêmes influencés par les changements climatiques. À ces impacts viennent s'ajouter des perturbations anthropiques liées à l'exploitation forestière et à l'ouverture du territoire forestier (voir la section 2.1.1). Ces multiples perturbations pourraient avoir des effets cumulatifs et se traduire par une évolution des superficies forestières avec une fragmentation progressive de l'écosystème. Afin de pouvoir continuer à bénéficier des services écologiques de grande valeur fournis par la forêt boréale (Anielski et Wilson, 2009; voir aussi l'encadré 2-7), il faudra être en mesure de minimiser les impacts sur cet écosystème forestier unique au monde. Cela requiert une stratégie d'adaptation basée sur l'écosystème qui intègre les effets des changements climatiques dans la gestion du territoire forestier

et l'exploitation durable des ressources. Les nouvelles mesures de gestion forestière devraient aussi tenir compte des conséquences potentielles sur le bilan de carbone afin d'éviter la maladaptation (voir la partie 3). Des recherches commencent à s'y intéresser. Par exemple, des projets de boisement dans la zone de la pessière à lichens avec des espèces d'arbres indigènes à croissance rapide peuvent être une option intéressante d'atténuation des GES pour maximiser le taux de séquestration et le stockage à long terme du carbone de la zone boréale (Boucher *et al.*, 2012; Gaboury *et al.*, 2009).

Les impacts sur la phénologie des espèces : le cas des oiseaux nicheurs

Pour les communautés d'oiseaux habitant les forêts matures d'épinette noire de la région boréale de la péninsule du Québec-Labrador, les variables climatiques semblent être importantes pour expliquer la distribution des espèces et leur abondance puisque près de 15 % de la variation dans la distribution des espèces étudiées (n = 44) sont expliqués par le climat (DesGranges et LeBlanc, 2012). Cette étude confirme la relation qui existe entre les conditions climatiques locales et la distribution des oiseaux en forêt et suggère que le nombre de migrateurs ainsi que les résidents seront significativement influencés par les températures printanières. Tous les migrateurs de courte distance arrivent plus tôt au printemps. De plus, par la proximité de leurs sites de reproduction, les variations climatiques ont un impact sur la distribution des migrateurs sur courtes distances (Jenni et Kéry, 2003). Cette tendance a été confirmée au Québec par les travaux de Berteaux *et al.* (2014) basés sur des observations d'ornithologues amateurs compilées depuis les années 1970. Ces données permettent de conclure que les migrateurs sur courtes distances, p. ex. le bruant à gorge blanche qui arrive en moyenne une dizaine de jours plus tôt qu'il y a 40 ans (figure 2-29), ont déjà commencé à s'adapter aux changements climatiques, contrairement aux migrateurs sur longues distances. Pour les mêmes raisons, le départ automnal des oiseaux se fait également de plus en plus tardivement. Toutes ces observations tendent à démontrer que les oiseaux sont de bonnes espèces indicatrices des impacts phénologiques des changements climatiques (Berteaux *et al.*, 2014; DesGranges et Morneau, 2010).

Les impacts sur les interactions entre espèces : le cas des ongulés

Les ongulés du Québec (caribou, orignaux, cerfs, etc.) pourraient voir leurs populations modifiées par les changements climatiques. En effet, la réponse des orignaux aux changements climatiques est d'intérêt par leur rôle potentiel dans la conservation du caribou (Rempel, 2011). L'augmentation des populations d'orignaux sur le territoire boréal fera augmenter la densité des populations de loups, ce qui se soldera en un taux de prédation supérieur sur les caribous déjà menacés (Courtois et Ouellet, 2007). Lankester (2010) a émis l'hypothèse que comme les hivers sont plus courts et plus chauds, les populations de cerfs vont augmenter et, du coup, avec des périodes plus humides et sans neige plus longues, les populations de gastéropodes augmenteront, ce qui créera des conditions favorables à certaines maladies parasitaires qui feront diminuer les populations d'orignaux. Les résultats de Simard *et al.* (2010) indiquent également que les changements climatiques favoriseront la croissance des populations de cerfs dans les régions plus au nord puisque les printemps et les automnes plus chauds et humides ainsi que les neiges tardives en automne ont un effet positif sur la croissance et la survie des cerfs.

Les impacts sur les relations prédateur-proie : l'exemple du porc-épic

Les variations de précipitations en hiver ont une incidence directe de 89 % sur le taux de survie du porc-épic (*Erethizon dorsatum*) dans l'Est du Québec (Simard *et al.*, 2010). En effet, le taux de prédation du porc-épic est grandement relié aux conditions de neige puisque 95 % des porcs-épics étaient tués lorsqu'il y avait de la neige au sol. Les taux de prédation étaient en effet plus élevés lorsqu'il y avait plus de précipitations hivernales (Mabille *et al.*, 2010), démontrant ainsi que la dynamique des populations de porcs-épics et la relation avec leurs prédateurs pourraient être influencées par des variations du régime des précipitations hivernales dans le climat futur.

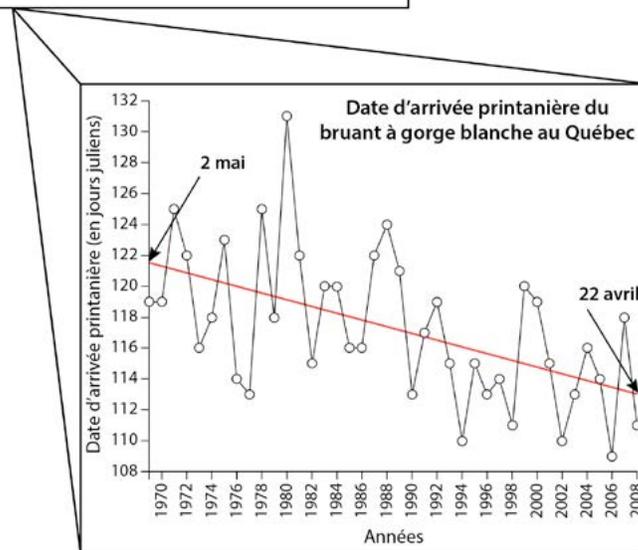
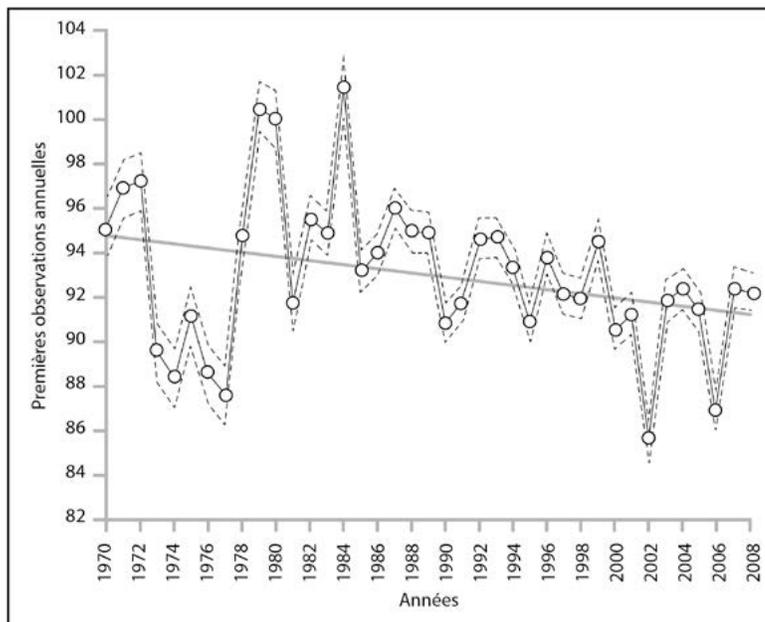


Figure 2-29 Date d'arrivée printanière des oiseaux migrateurs nichant au Québec..

Légende : Le graphique du haut illustre la date d'arrivée de 113 espèces d'oiseaux migrateurs nichant au Québec. Pour chaque espèce, la date d'arrivée est estimée selon la première observation d'une personne. Chaque point représente la moyenne des espèces et est exprimé en jour julien (1^{er} avril = 91^e jour julien lors d'une année non bissextile). Les pointillés indiquent l'écart-type autour de la moyenne. Les données proviennent de la banque de données ÉPOQ (Étude des populations d'oiseaux du Québec). Paramètres de la régression $R^2 = 0,09$; $p = 0,07$. Le graphique du bas illustre les données recueillies pour une espèce d'oiseau migrateur sur courte distance : le bruant à gorge blanche.

Source : Berteaux et al. (2014)

Le Sud du Québec - Les basses-terres du Saint-Laurent

Le Sud du Québec se caractérise par une grande urbanisation (la plus forte densité démographique au Québec), un étalement urbain dans la banlieue de Montréal et autour des municipalités de taille moyenne, et un haut degré de fragmentation des paysages par les activités humaines, notamment l'agriculture intensive qui a engendré une déforestation massive dans les dernières décennies ainsi que de nombreux axes routiers et autoroutiers. Le fleuve Saint-Laurent qui traverse la région de part en part est une des principales caractéristiques géomorphologiques de cette région. Il joue un rôle clé dans la biodiversité de tout le Sud du Québec, agissant comme corridor écologique et fournissant des habitats vitaux et d'une grande qualité à une multitude d'espèces aquatiques, terrestres et aviaires. C'est dans la zone tempérée nordique, à l'extrémité méridionale du Québec que l'on trouve la plus forte diversité biologique au Québec, environ 1 600 espèces végétales vasculaires (soit 57 % du nombre total pour l'ensemble du Québec) et 440 espèces d'animaux vertébrés (68 % du total), mais c'est également dans cette région que l'on dénombre le plus d'espèces menacées ou vulnérables (Mabille *et al.*, 2010). Sur le plan de la conservation, cette région se caractérise aussi par une proportion très faible du territoire protégé, p. ex. dans la province naturelle des basses-terres du Saint-Laurent, où plusieurs travaux de recherches sur les changements climatiques et la biodiversité ont été réalisés récemment, la proportion de la superficie d'aires protégées, bien qu'ayant doublée entre 2002 (2,2 %) et 2009 (4,5 %), restait néanmoins bien en-deçà de la moyenne provinciale (> 8 %) (Tardif *et al.*, 2005). C'est à peu près la même situation qui prévaut dans les deux autres régions naturelles du Sud du Québec, soit les Laurentides méridionales (6,5 %) et les Appalaches (4,9 % en 2009). Pourtant dans les Appalaches du Sud du Québec, il existe encore de grands massifs forestiers non fragmentés et relativement peu touchés par des activités humaines. Les milieux humides, autres écosystèmes très importants pour la biodiversité, sont en déclin constant dans le Sud du Québec, à la faveur des terrains agricoles et sylvicoles surtout, mais aussi des activités industrielles, commerciales et résidentielles (Brassard *et al.*, 2010). Finalement, dans le contexte du réchauffement des températures, il est important de rappeler que le Sud du Québec est une région de « passage obligé » des espèces qui vivent plus au sud et qui voient leurs niches bioclimatiques remonter avec le temps. Cela aura de grandes répercussions sur la biodiversité et les écosystèmes de cette région (Berteaux *et al.*, 2014).

Espèces menacées et vulnérables

Très peu d'études se sont penchées jusqu'à présent sur les espèces classées en vertu de la *Loi sur les espèces menacées ou vulnérables* du Québec. L'une d'elles s'est intéressée aux impacts locaux des changements climatiques sur l'habitat des salamandres, car c'est parfois à cette échelle que certaines stratégies d'adaptation doivent être mises en oeuvre, notamment pour la conservation d'espèces très peu mobiles. On trouve sur le Mont Covey Hill (une colline de 150 km² comprenant une tourbière), une espèce menacée, la salamandre sombre des montagnes (*Desmognathus ochrophaeus*) et une espèce vulnérable, la salamandre pourpre (*Gyrinophilus porphyriticus*). Ces amphibiens sont particulièrement sensibles à la qualité de l'eau des ruisseaux et les habitats propices à leur développement ne se trouvent que dans des endroits très localisés au Québec. L'hydrogéologie du site étudié repose sur un équilibre complexe entre la recharge de l'aquifère et les débits d'eau disponibles en surface, rendant ce système hydrologique très sensible aux variations de la recharge en eau (Pellerin et Poulin, 2013). Néanmoins, selon les modèles hydrogéologiques développés, les changements climatiques projetés pour l'horizon 2041-2070 généreront localement une activité de résurgence d'eau souterraine plus importante que celle observée dans le climat passé-récent et les résultats du couplage avec le modèle écologique indiquent une augmentation de l'abondance des salamandres et, par conséquent, une réduction du risque d'extinction de cette population (Levison *et al.*, 2013). Ce résultat encourageant a permis à

Conservation de la nature Canada, l'organisme qui a le mandat de protéger cet habitat essentiel pour les salamandres, d'orienter ses efforts de sensibilisation et de protection vers des facteurs anthropiques plus préoccupants qui pourraient venir contrebalancer les effets positifs des changements climatiques (Carine Deland, comm. pers.).

Les changements climatiques pourraient aussi affecter l'habitat de certaines espèces végétales menacées ou vulnérables, notamment trois plantes qui poussent dans les hauts marais du Saint-Laurent : la Cicutaire de Victorin, la Gentiane de Victorin et l'Ériocaulon de Parker. Une étude exploratoire suggère que la hauteur du talus d'érosion, la fréquence de submersion du talus et la durée de l'englacement sont les principaux facteurs qui semblent influencer l'érosion des hauts marais dans l'estuaire d'eau douce (Larocque *et al.*, 2013). La Cicutaire et la Gentiane pourraient être particulièrement vulnérables puisque ces plantes croissent à proximité du talus d'érosion. Les plans de conservation de ces espèces devraient donc tenir compte de la géomorphologie, de la météorologie et de l'hydrodynamisme des sites à protéger.

Corridors écologiques

Dans cette région où la couverture forestière a été fortement réduite et fragmentée par les activités humaines, le rétablissement de corridors écologiques bien pensés, dans un axe sud-nord, pourrait aider les espèces animales à migrer vers le nord pour s'adapter aux changements climatiques anticipés. Un projet exploratoire a proposé des options de corridors écologiques robustes aux changements climatiques anticipés à l'horizon 2050 pour la Montérégie. Les corridors ont été modélisés en tenant compte de l'évolution de l'occupation des terres à l'avenir et en intégrant les caractéristiques d'habitat de cinq espèces représentatives de la biodiversité de la région : le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*), la martre d'Amérique (*Martes americana*), la salamandre cendrée (*Plethodon cinereus*), la paruline couronnée (*Seiurus aurocapilla*) et le bourdon fébrile (*Bombus impatiens*) (Bhiry *et al.*, 2013). Ces résultats permettent d'alimenter la concertation et la mobilisation en alimentant tous les acteurs régionaux (universités, gouvernements, municipalités et municipalités régionales du comté, organismes environnementaux) avec différentes options de corridors à évaluer et à prioriser dans le contexte de la planification du territoire.

Par ailleurs, l'implantation de systèmes de cultures intercalaires – combinant des plantations d'arbres et des cultures – pourrait, à une échelle plus localisée, contribuer à rétablir la connectivité écologique et un certain niveau de biodiversité dans ce paysage d'agriculture intensive (Gonzalez *et al.*, 2013). Dans un contexte de changements climatiques, les corridors écologiques et l'agroforesterie pourraient ainsi maintenir – voire augmenter – la valeur économique totale des services écologiques que ces écosystèmes forestiers et agroforestiers fournissent à la société (Olivier, 2013).

Espèces envahissantes et nuisibles

Les changements climatiques vont favoriser également l'arrivée d'espèces nuisibles dans le Sud du Québec. Ainsi, le fleuve Saint-Laurent représente un corridor naturel qui peut favoriser l'expansion des espèces envahissantes des milieux aquatiques. C'est le cas notamment du roseau commun (*Phragmites australis*) dont la biologie et l'écologie sont très bien documentées puisqu'il s'agit d'une des plantes les plus envahissantes du Nord-Est de l'Amérique du Nord (Dupras *et al.*, 2013b). Le « roseau envahisseur », déjà bien implanté aux abords des autoroutes du Sud de la province, colonise également les rives de certains secteurs du tronçon fluvial, pour lesquels les modèles d'habitat prévoient une expansion rapide des superficies de roselières dans les prochaines années, en lien avec les faibles niveaux d'eau anticipés qui favorisent l'implantation de cette espèce (Groupe

Phragmites, 2012). Ainsi, entre le lac Saint-Louis et le lac Saint-Pierre, la superficie totale des roselières était d'un peu plus de 200 ha en 2010, ce qui est très peu par rapport à la superficie totale des milieux humides de cette région (18 500 ha), et montrait un état d'envahissement variable selon les secteurs (figure 2-30). Le modèle d'habitat développé suggère par contre que les conditions climatiques actuelles sont déjà propices à une expansion des roselières. Le phénomène d'envahissement risque d'être particulièrement important dans le lac Saint-Pierre où les roselières pourraient augmenter leurs superficies actuelles par un facteur 100 à l'horizon 2050 (Tougas-Tellier *et al.*, 2013), ce qui ferait de cette réserve mondiale de biosphère de l'UNESCO et également « site Ramsar » désigné en vertu de la Convention sur les zones humides d'importance internationale, paradoxalement, le lieu du plus vaste complexe de roselières sur le continent nord-américain avec plus de 13 000 ha (figure 2-30). Une grande partie des milieux humides du tronçon fluvial serait alors colonisée par le phragmite, conduisant à une communauté végétale uniforme et quasi monospécifique au détriment d'une biodiversité élevée et de l'habitat du poisson. Celui-ci pourrait être réduit de moitié dans le fleuve par les effets combinés des bas niveaux d'eau et de l'établissement de roselières (Tougas-Tellier *et al.*, 2013). La préservation des milieux humides riverains et une revégétalisation rapide des terrains dénudés, propices à l'établissement de cette espèce, semble être la mesure la plus efficace pour contrer l'envahissement. Par contre, une fois bien établie, il sera très difficile, voire impossible, d'arrêter la prolifération de cette espèce qui semble trouver avec les changements climatiques projetés dans le Sud du Québec des conditions très favorables à sa croissance et à sa reproduction. C'est aussi le cas d'une autre plante très envahissante, la renouée japonaise (*Fallopia japonica*).

Les plantes seront généralement favorisées par l'allongement de la saison de croissance. Or, certaines plantes indigènes peuvent causer des effets néfastes sur la santé humaine qui risquent donc d'être accentués avec les changements climatiques. C'est notamment le cas de l'herbe à poux qui libère de grandes quantités de pollen causant des réactions allergiques parmi la population (voir le chapitre 2.2 pour plus de détails).

Quant aux espèces animales nuisibles au Québec, nous savons encore très peu de choses. C'est probablement sur les vecteurs écologiques de la maladie de Lyme que les connaissances ont le plus progressé dans les dernières années (Millien, 2013). Cette maladie est très largement répandue aux États-Unis depuis le début des années 1980. Les premiers cas humains de maladie acquise au Québec sont plus récents, mais ils ne cessent d'augmenter, passant de 2 cas déclarés en 2004 à 136 cas déclarés (dont 68 acquis au Québec) en 2013, selon l'Institut national de santé publique du Québec. Alors que la maladie éclot surtout en Montérégie, les travaux de Millien (2013) et de Roy-Dufresne *et al.*, (2013) sur la souris à pattes blanches (*Peromyscus leucopus*) – principale espèce hôte de la tique porteuse de la maladie de Lyme – confirment que l'aire de répartition de cette espèce est en expansion rapide dans le Sud du Québec (figure 2-31). Sa progression vers le nord s'est faite à une vitesse d'environ 10 km par an dans les 40 dernières années. Cette étude vient confirmer, sur l'une des principales espèces hôtes, l'expansion projetée de la tique vectrice de la maladie (*Ixodes scapularis*) au Canada (Leighton *et al.*, 2012). Les principaux facteurs climatiques contraignant l'aire de répartition de cette espèce à sa limite nordique sont la longueur de la saison hivernale et les températures minimale et maximale. Or, avec les hivers moins rudes qui sont projetés dans le Sud du Québec, la niche bioclimatique de cette espèce pourrait s'étendre jusqu'au 51 °N d'ici 2050 (Roy-Dufresne *et al.*, 2013), augmentant le risque d'occurrence de la maladie sur une grande partie du territoire québécois. Les variables climatiques ne sont toutefois pas les seuls facteurs influençant l'expansion de cette espèce. Même si la souris à pattes blanches préfère les habitats forestiers, on la retrouve maintenant dans les habitats fragmentés de la Montérégie, et ni le fleuve Saint-Laurent, ni les champs agricoles, ni même les grands axes routiers de la région ne semblent être des barrières efficaces pour arrêter sa progression et avec elle la maladie de Lyme (Millien, 2013 ; Roy-Dufresne *et al.*, 2013). Les agences de santé publique du Québec et du Canada suivent de près l'expansion de cette maladie et mettent en place des actions appropriées pour sensibiliser la population et recommander des mesures préventives (voir la section sur les zoonoses dans le chapitre 2.2).

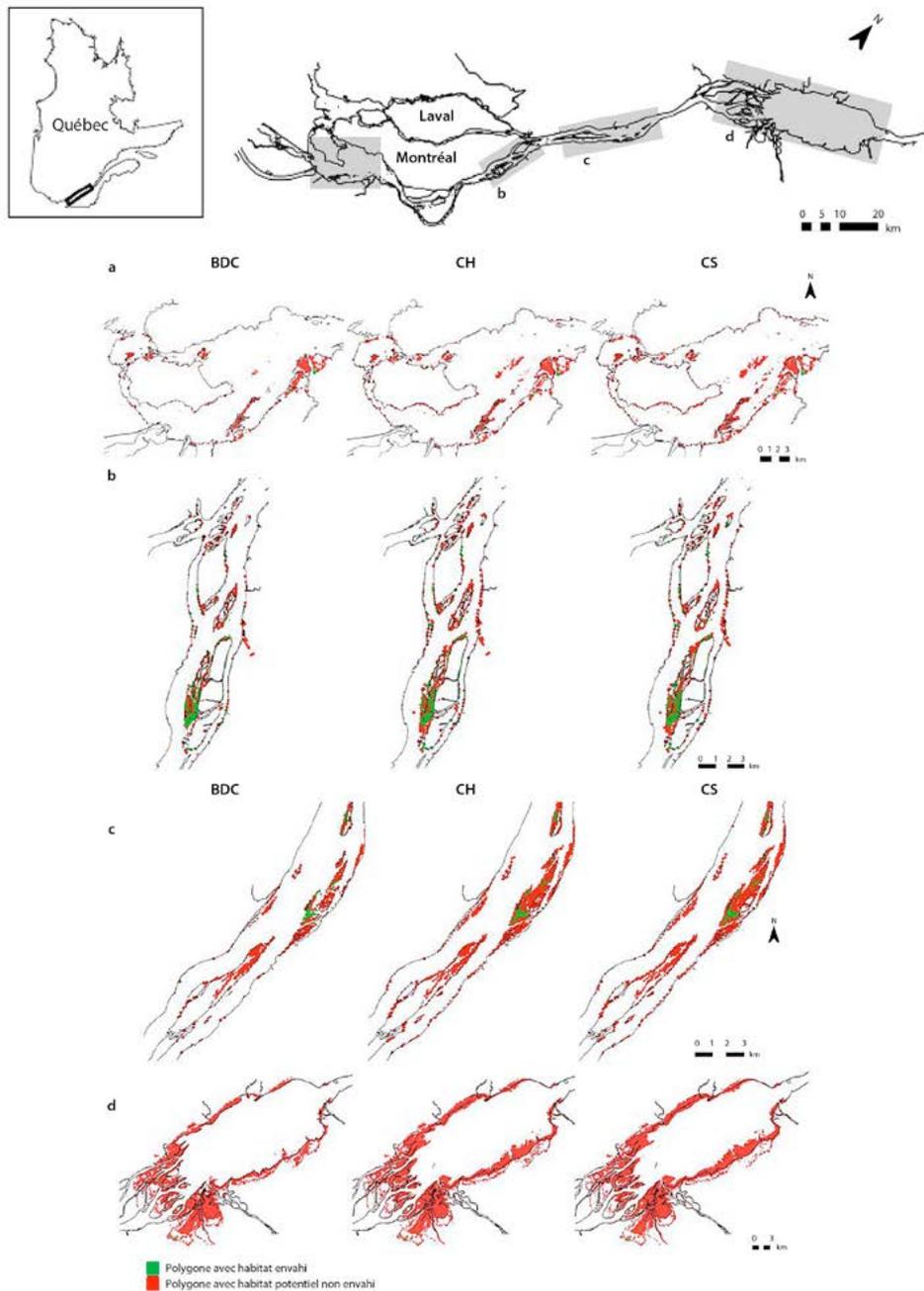


Figure 2-30 Expansion actuelle et potentielle du roseau envahisseur dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent

Légende : Localisation des secteurs du tronçon fluvial du Saint-Laurent où le roseau envahisseur a été étudié et modélisé : le lac Saint-Louis (a), les îles de Boucherville (b), les îles de Contrecoeur (c) et le lac Saint-Pierre (d). Pour chacun de ces secteurs, les résultats de la modélisation indiquent l'habitat envahi par le roseau en 2010 (en vert) et l'habitat potentiel, c'est-à-dire favorable à la germination du roseau, mais pas encore envahi (situation en 2010), en fonction de plusieurs scénarios climatiques: base de comparaison (BDC; climat de 1961–1989) et deux scénarios futurs simulant les conditions projetées pour la période 2040–2069 dans le cas d'un climat «chaud et humide» (CH; HadCM3 – A1F1) ou d'un climat «chaud et sec» (CS; CGCM2 2 – A21).

Source : Tougas-Tellier et al. (2013)

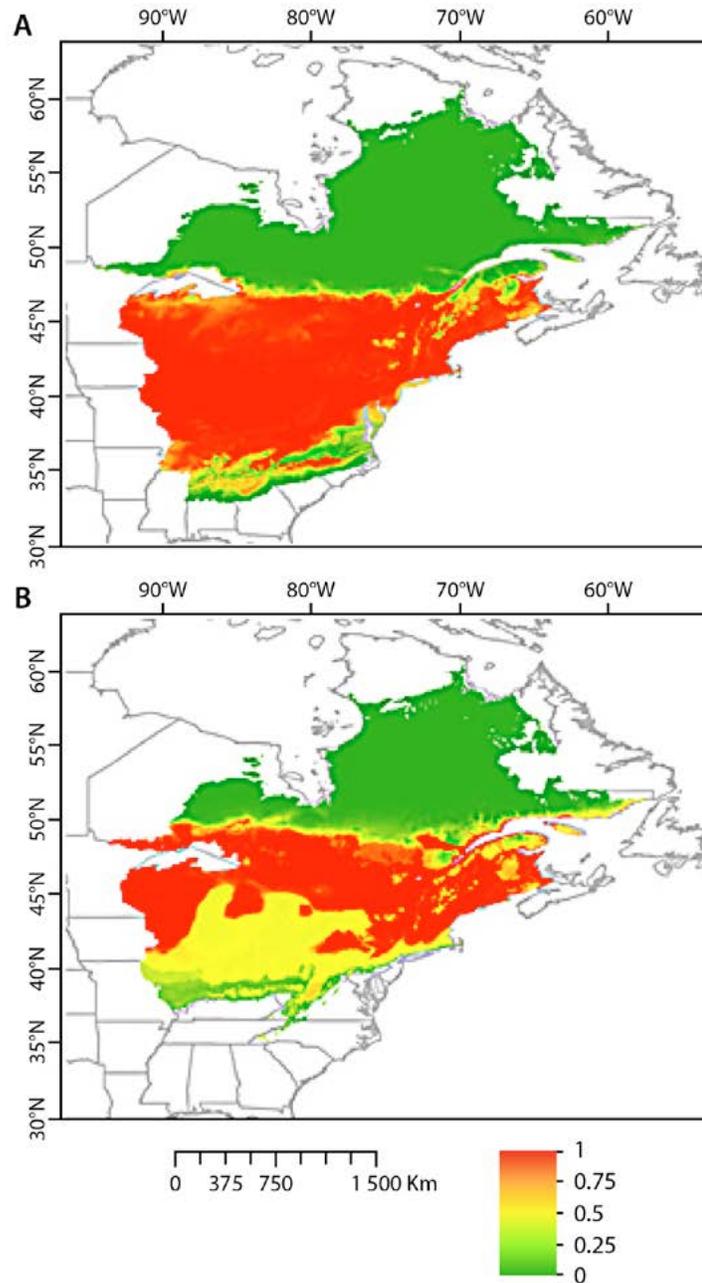


Figure 2-31 Distributions historique et future de la souris à pattes blanches dans l'Est de l'Amérique du Nord et au Québec.

Légende : Distribution de la souris à pattes blanches modélisée à l'aide de BIOMOD : (A) distribution historique prédite; (B) distribution projetée à l'horizon 2050 pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre A2. La probabilité d'occurrence (de 0 à 1) de la souris à pattes blanches est indiquée selon sa couleur : de la probabilité la plus faible (en vert) à la probabilité plus forte (en rouge).

Source : Millien (2013)

Milieux humides

Les milieux humides fournissent également des services écologiques essentiels tels que des habitats de qualité pour la biodiversité, la régulation des débits hydrologiques et la filtration des sédiments. Une démarche de R&D originale a abouti au développement d'un outil géomatique pour quantifier et cartographier ces trois services écologiques à l'échelle d'un bassin versant et pour modéliser leur évolution dans le temps (Fournier *et al.*, 2013). Cet outil a été appliqué sur les bassins versants des rivières Yamaska et Bécancour et la figure 2-32 montre, à titre d'exemple, le résultat de l'évaluation d'une fonction écologique et de son évolution sous divers scénarios. L'évaluation économique non marchande de ces services écologiques, basée sur la qualité et l'endroit où ils sont localisés, permet de fournir aux décideurs des informations essentielles pour mettre dans la balance conservation et développement (Fournier *et al.*, 2013). Parmi les nombreux services écologiques fournis par les milieux humides, certains sont de grande importance dans l'adaptation aux changements climatiques (voir l'encadré 2-7). Les milieux humides isolés des cours d'eau ont à cet égard un rôle-clé dans la régulation du régime hydrique (Fournier *et al.*, 2013). Or, étant donné que dans le Sud du Québec, les milieux humides ne représentent qu'une très faible superficie alors qu'ils produisent de nombreux services écologiques, leur valeur économique non marchande rapportée à l'hectare peut être assez élevée (Fournier *et al.*, 2013). C'est ainsi que dans la zone périurbaine ceinturant le grand Montréal, les milieux humides représentent les écosystèmes qui fournissent les services écologiques ayant la plus forte valeur économique par hectare et par an, devant les terres cultivées et les forêts (Dupras et Alam, 2014). Il convient donc d'apporter une attention particulière à ces écosystèmes et de mettre en place des stratégies de conservation pour qu'on puisse continuer à bénéficier de leurs services écologiques sous le climat futur. L'outil géomatique développé par Fournier *et al.* (2013), sur lequel peut s'appuyer la prise de décision pour l'aménagement du territoire, est une première percée dans cette voie.

Les tourbières du Québec sont des écosystèmes qui jouent un rôle primordial dans les processus de stockage/émission de gaz carbonique, particulièrement dans la zone nordique (voir p. ex. Dupras *et al.* 2013b). Par conséquent, elles ont surtout été étudiées jusqu'à présent dans le contexte de l'atténuation des GES, comme puits de carbone potentiels. Très peu de travaux les ont abordées sous l'angle des impacts ou de l'adaptation aux changements climatiques. Signalons à ce sujet l'étude paléocéologique de Lavoie et Pellerin (2011) qui plaide en faveur de l'hypothèse d'un contrôle climatique sur l'accumulation verticale de la tourbe dans les tourbières du mont Covey Hill et de la réserve écologique du Pin-Rigide dans l'extrême-sud du Québec. Ces tourbières, parmi les plus vieilles du Québec, présentent en effet une dynamique d'accumulation et de décomposition de la tourbe au fil du temps unique en son genre. Ces résultats apportent un éclairage nouveau sur les liens entre les conditions hydroclimatiques et la formation des tourbières et conduisent à l'hypothèse que les tourbières du Québec méridional situées en tête de bassin ou localisées dans de petits bassins versants pourraient être très sensibles aux changements climatiques, puisque fortement influencées par les conditions hydroclimatiques locales. Dans ce contexte, on pourrait envisager de les inclure dans les réserves écologiques afin de protéger ces écosystèmes qui représentent de véritables archives paléoclimatiques témoignant des conditions climatiques passées (Lavoie et Pellerin, 2011).

Les régions maritimes

Le Québec maritime comprend l'ensemble des régions exposées aux eaux salées et saumâtres et aux marées du territoire québécois, soit l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent ainsi que les eaux arctiques bordant le Nunavik. Dans le Saint-Laurent, ce territoire s'étend de la ville de Québec à Blanc-Sablon sur la Côte-Nord, incluant le fjord du Saguenay, et comprend le Bas-Saint-Laurent, la Gaspésie, l'Île d'Anticosti et les Îles-de-la-Madeleine, représentant 11 600 km de côtes (Magnan et Garneau, 2014). Ce territoire est habité par 1,53 million de personnes dont le tiers réside à moins de 1 km de la côte. Au Nunavik, la région maritime comprend les

côtes de la baie James, de la baie d'Hudson, du détroit d'Hudson et de la baie d'Ungava. Ce littoral nordique s'étend sur plus de 8 150 km et on y trouve de nombreuses communautés côtières totalisant 44 000 habitants environ, principalement des Cris et des Inuits.

L'estuaire et le golfe du Saint-Laurent

Les écosystèmes côtiers à pente douce tels que marais salés, plages, flèches littorales, cordons dunaires, lagunes et barachois devront s'ajuster à la hausse du niveau marin, soit en se déplaçant vers l'intérieur des terres, soit en se rehaussant au même rythme que le niveau de la mer. Plusieurs de ces écosystèmes sont aussi menacés par l'implantation humaine sur les côtes qui nécessite de faire appel à des mesures pour protéger les biens mobiliers de la submersion et de l'érosion marine. Or, il s'agit le plus souvent de structures dures comme des murs, des enrochements linéaires, des brise-lames ou des épis rocheux dont le résultat est de rigidifier le trait de côte et de couper les apports sédimentaires provenant de l'érosion, le tout se soldant par un déficit croissant d'espace et de matériel granulaire pour alimenter ces écosystèmes dynamiques. La rigidification du trait de côte est une tendance mondiale qui entraîne la dégradation et, à terme, la disparition des écosystèmes côtiers partout où elle se produit. Le Québec est aussi exposé à ce phénomène de resserrement côtier, ou « coastal squeeze » (Cairns et al., 2012), sur ses côtes habitées.

Jusqu'à présent, très peu d'efforts ont été faits pour freiner la dégradation des écosystèmes intertidaux et côtiers. Une étude en cours (Jean-Pierre Savard, comm. pers.) vise à fournir une estimation des pertes déjà mesurables de ces écosystèmes et une première projection des pertes anticipées pour les décennies à venir. Le trait de côte est le résultat d'une dynamique naturelle qui implique un équilibre fragile entre les processus d'érosion et de sédimentation. Ainsi, pour préserver les plages et les flèches sableuses à certains endroits, il sera nécessaire et incontournable d'accepter par ailleurs l'érosion des falaises et des talus côtiers qui représentent la principale source d'approvisionnement en sable pour ces écosystèmes littoraux. Dans certains cas en effet, il n'existe aucun autre moyen de conserver ces écosystèmes que de leur céder une partie des milieux côtiers qui sont généralement très appréciés et convoités par la population et les touristes. Le seul moyen de limiter la disparition des écosystèmes les plus vulnérables (p. ex. les marais salés) est de réserver des zones basses en bordure des côtes pour permettre leur migration progressive en direction de la côte. Leur protection est l'un des défis les plus difficiles et urgents qui attend les gouvernements et les municipalités côtières. En cas d'échec, les pertes d'habitats pour la faune et la flore marines, et des services écologiques qui y sont associés, seront très lourdes sur tous les plans – autant écologiques que socioéconomiques – et se répercuteront forcément sur l'ensemble de la société et en particulier sur les communautés côtières qui en dépendent très étroitement pour leur développement, voire leur survie.

L'écosystème marin de l'Arctique

Les nombreux travaux de recherche réalisés dans le cadre de l'Année polaire internationale (API 2007-2008) ont permis d'améliorer notre compréhension de la réponse de l'écosystème marin arctique au réchauffement climatique et comment celui-ci modifie la productivité, la structure et la composition du réseau trophique ainsi que les services écologiques fournis aux habitants du Nord (Doody, 2013; Pontee, 2013). Les principales constatations qui ressortent de ces travaux sont les suivantes : avec la remontée vers le nord d'espèces subarctiques, incluant des espèces envahissantes et nuisibles pour la faune et la flore indigènes, l'ensemble du réseau trophique de l'océan Arctique risque d'être perturbé. Toutefois, la production primaire du phytoplancton dans les eaux libres devrait s'accroître avec le recul général de la couverture de glace dans l'Arctique. Cela aura des répercussions directes sur les niveaux trophiques supérieurs qui pourraient voir leurs biomasses augmenter,

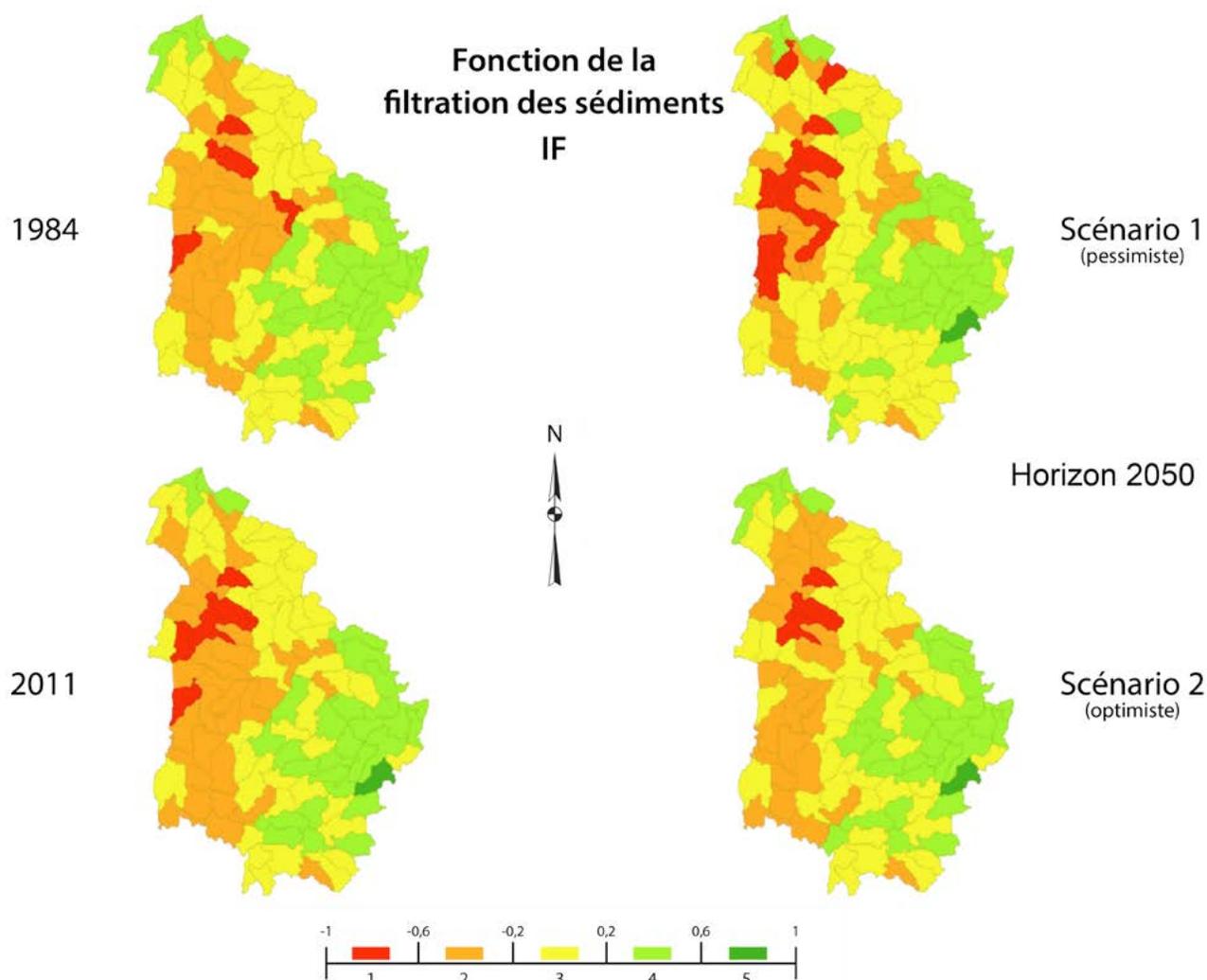


Figure 2-32 Cartographie de la fonction de filtration des sédiments par les milieux humides du bassin versant de la rivière Yamaska selon divers scénarios de changements climatiques et d'utilisation des terres.

Légende : Cartographie de l'indice de filtration (IF) pour les périodes passée (1984) et actuelle (2011) et pour deux scénarios futurs (horizon 2050) combinant changements climatiques et utilisation des terres : le scénario «optimiste» (augmentation de 15% de la superficie des milieux humides par rapport à 2011) et le scénario «pessimiste» (diminution de 15% des milieux humides au-delà de la tendance actuelle). Les couleurs montrent les valeurs économiques par hectare normalisées et segmentées en quantiles dans le bassin versant divisé en sous-bassins. La couleur rouge représente les milieux humides ayant la plus petite valeur à l'hectare et la verte ceux qui ont la valeur la plus élevée. On voit qu'entre 1984 et 2011, il y a eu une dégradation de cette fonction des milieux humides accompagnant leur déclin au cours de cette période. À l'horizon 2050, le scénario «pessimiste» montre de nombreux sous-bassins très dégradés par rapport à 2011, notamment au nord du territoire étudié, tandis que le scénario «optimiste» présente une amélioration globale de cette fonction des milieux humides.

Source : Fournier et al. (2013)

avec des conséquences positives, par exemple sur la chasse et la pêche de subsistance pratiquées localement par les populations autochtones. Les impacts des changements climatiques sur l'écosystème marin de l'Arctique doivent donc être pris en compte dans la gestion des ressources vivantes (pêche et chasse), mais aussi des autres activités humaines qui sont amenées à se développer dans cette région. Par exemple, le transport maritime et les installations portuaires, l'exploitation pétrolière, les activités minières ainsi que les risques de déversements accidentels et de contamination des sols et des cours d'eau sont tous susceptibles d'avoir des impacts significatifs sur l'écosystème marin de l'Arctique. Le défi consiste à faire une gestion intégrée de toutes les activités industrielles –en développement ou planifiées– en Arctique pour minimiser leurs effets cumulatifs afin de maintenir un écosystème résilient face aux changements environnementaux anticipés (CCAP, 2012 ; Siron *et al.*, 2008).

2.4.2.4 À l'échelle écosystémique

Arrêter la dégradation des habitats et des écosystèmes, et si possible restaurer les plus importants d'entre eux, devraient être la première étape d'une stratégie d'adaptation aux changements climatiques cohérente et qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. De plus, ces actions génèrent d'autres avantages, notamment le maintien des services écologiques fournis par la biodiversité. C'est le fondement même de l'adaptation basée sur les écosystèmes (ou adaptation écosystémique). Cette approche émergente consiste à conserver les écosystèmes en santé pour renforcer la résilience des populations humaines qui en dépendent directement, à diminuer leurs vulnérabilités et à assurer leur adaptation. Cela comprend aussi la gestion durable, la conservation et la restauration d'écosystèmes réalisées dans le cadre d'une stratégie globale d'adaptation prenant en compte les bénéfices sociaux, économiques et culturels des populations locales (Colls *et al.*, 2009; SCBD, 2009; TNC, 2009; World Bank, 2009). Toutefois, jusqu'à présent, très peu d'études ont évalué les bénéfices réels de ces approches sur le terrain, ce qui peut représenter une faiblesse si on veut comparer leur efficacité avec d'autres solutions ou types d'adaptation (voir la Partie 3).

Les écosystèmes naturels sont la matrice dans laquelle nous vivons et ils soutiennent un grand nombre d'activités et de secteurs économiques en fournissant des biens et services écologiques essentiels à notre bien-être et notre prospérité. Par conséquent, les stratégies de conservation et d'adaptation basées sur les écosystèmes, telles que les réseaux de corridors écologiques (Gonzalez *et al.*, 2013 ; Munroe *et al.*, 2012) et d'aires protégées (Bélanger *et al.*, 2013d), doivent être au coeur de la planification de l'aménagement du territoire (Siron, 2013). Il s'agit là d'un enjeu transversal qui est donc détaillé dans le chapitre 2.5, tout comme la gestion de l'eau par bassin versant qui est aussi une approche écosystémique puisqu'elle se définit à l'intérieur des limites géographiques naturelles des systèmes hydriques et non par des limites administratives.

L'adaptation basée sur les écosystèmes nécessite une bonne connaissance des impacts des changements climatiques sur les milieux naturels, de leurs vulnérabilités ainsi que des interactions entre les diverses dimensions environnementales, sociales et économiques. Cette approche requiert également une mobilisation de tous les acteurs et usagers concernés, ce qui, à l'échelle d'une région, d'un grand écosystème ou d'un bassin versant, peut représenter de gros efforts. À cet égard, il est bon de rappeler que l'intégration des changements climatiques dans la planification et la coordination régionale sont en quelque sorte les «conditions gagnantes» qui vont permettre la mise en oeuvre à grande échelle des autres stratégies d'adaptation pour la gestion de la biodiversité (tableau 2-6).

2.4.2.5 À l'échelle municipale

À l'échelle des municipalités et des municipalités régionales de comté, la biodiversité est le produit d'un assemblage complexe de paysages urbanisés (centre-ville, noyau villageois, zones résidentielle, institutionnelle et industrielle, routes, voies ferrées, stationnements, parcs, terrains vacants, etc.), de milieux naturels et de territoires agricoles (Bélanger *et al.*, 2013d). Elle est aussi marquée par l'omniprésence de l'homme et de son empreinte écologique (Boucher et Fontaine, 2010), l'homme qui est partie prenante de cette biodiversité, une des composantes et non son pourvoyeur.

Historiquement, l'urbanisation des municipalités s'est souvent faite aux dépens d'écosystèmes, par exemple par la réduction considérable de zones humides et de boisés, par leur destruction (Pariseau, 2013), mais également par l'homogénéisation d'espaces urbains et la plantation sélective souvent monotypique (Boucher et Fontaine, 2010; Desjardins, 2012; Ville de Montréal, 2013). La conservation de la biodiversité n'a pas toujours été une priorité dans le développement des villes. Par ailleurs, le développement des milieux urbanisés et les façons d'y aménager l'espace ont favorisé l'arrivée de nouvelles espèces, notamment par l'introduction d'espèces exotiques et d'essences d'arbres souvent plus résistantes aux conditions urbaines, p. ex. érable de Norvège, lilas du Japon, épinette du Colorado (McKinney, 2006).

Dans ce contexte, l'aménagement du territoire implique de considérer la relation homme/nature au quotidien et non pas uniquement dans un mode de conservation. La prise en compte de la biodiversité dans les stratégies et les politiques municipales, ainsi que dans l'occupation et l'utilisation de l'espace répond à plusieurs enjeux auxquels les gestionnaires de service et les élus sont confrontés quotidiennement (Boucher et Fontaine, 2010). Or, l'adaptation des villes aux changements climatiques peut également passer par des initiatives pour la protection de la biodiversité à l'échelle municipale, notamment celles qui ont pour but de :

- ▶ Bonifier les connaissances sur la biodiversité en milieu urbanisé en privilégiant la mixité des équipes de travail (environnement/aménagement du territoire/ingénierie/santé, etc.) pour appuyer une prise de décision éclairée (Boucher et Fontaine, 2010; Girard, 2014);
- ▶ Diminuer les oppositions entre les échelles décisionnelles, écologiques et administratives pour conserver des habitats de biodiversité moins morcelés (territoire écologique versus territoire politique; aires protégées, corridors et trames vertes et bleues versus développements résidentiel, commercial, industriel, institutionnel) (Arrondissement Saint-Laurent, 2009; Gouvernement du Québec, 2013b; Lelievre *et al.*, 2010; Pariseau, 2013);
- ▶ Minimiser les contraintes organisationnelles (ressources humaines et financières, processus décisionnels, etc.) afin que les changements de pratiques nécessaires à la prise en compte de la biodiversité, qui induisent parfois du travail ou des coûts supplémentaires, parfois aussi une période de mise en oeuvre plus longue, s'opèrent plus facilement (Boucher et Fontaine, 2010; Ville de Montréal, 2013). Comme exemples d'éléments facilitateurs, on peut mentionner les programmes de verdissement urbain (Gouvernement du Québec, 2013b) et l'adoption de pratiques de gestion optimales des eaux pluviales telles que l'implantation de systèmes végétalisés (Fontaine, 2009);
- ▶ Favoriser l'implication des citoyens et des intervenants privés garante de l'acceptabilité sociale des projets de protection et de valorisation de la biodiversité. Les informer des bienfaits de la biodiversité, des bonnes pratiques et de leurs responsabilités (Dagenais *et al.*, 2014).

Au Québec, dans les dernières années, il y a eu de nombreux exemples de politiques municipales et de plans directeurs visant la protection de l'environnement, la conservation de la biodiversité et l'adaptation aux changements climatiques (encadré 2-8). À cet égard, les autorités locales, en tant que niveau décisionnel le

plus proche des résidents, sont le maillon essentiel qui permet le développement de stratégies sur la biodiversité adaptées et intégrées localement (Pariseau, 2013). De plus, les villes et le palier municipal ont une mission fondamentale relativement à la protection et à la valorisation de la biodiversité, en raison de leurs rôles et obligations en matière de planification et d'aménagement du territoire, mais aussi parce qu'ils tirent avantage des services écologiques dont bénéficient tous leurs citoyens (ICLEI, 2010).

Parallèlement aux actions prises à l'échelle municipale, des initiatives plus locales, souvent initiées par des groupes de citoyens, participent également à la protection et à la valorisation de la biodiversité au sein des villes et dans les zones périurbaines. Ces initiatives sont nombreuses et dispersées dans tout le Québec (voir quelques exemples dans l'encadré 2-8). La plupart du temps, il s'agit d'initiatives pilotées par des organismes communautaires très actifs sur le terrain, autour d'enjeux locaux, qui donnent l'occasion aux citoyens de participer très concrètement à la conservation de la biodiversité.

Encadré 2-8. La protection de l'environnement dans les politiques municipales et les actions citoyennes

Exemples de stratégies, politiques et plans directeurs à l'échelle municipale :

- Le Plan métropolitain d'aménagement et de développement de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM, 2011);
- Le plan d'urbanisme de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2004a), *La Politique de protection et de mise en valeur des milieux naturels* de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2004b); la *Politique de l'arbre* (Ville de Montréal, 2005), le *Plan de développement durable de la collectivité montréalaise 2010 |2015* (Ville de Montréal, 2010);
- Le *Plan de foresterie urbaine de Saint-Laurent*, *L'arbre et la biodiversité au coeur de la communauté pour un avenir plus vert* (Arrondissement Saint-Laurent, 2009);
- La *Politique de protection et de mise en valeur des milieux naturels* (Ville de Longueuil, 2005), *Vision stratégique du plan d'urbanisme – Longueuil 2015* (Ville de Longueuil, 2012);
- La *Politique de l'urbanisme durable* de Laval (Ville de Laval, 2011), la *Politique de conservation et de mise en valeur des milieux naturels et d'intérêts* (Ville de Laval, 2009);
- Biodiversité – Révision du schéma d'aménagement et de développement de la ville de Gatineau (Ville de Gatineau, 2011);
- Le *Plan directeur des milieux naturels et de la forêt urbaine* (Ville de Québec, 2006, 2008);
- Le *plan d'adaptation aux changements climatiques* (SNC-Lavalin Environnement, 2013), la *Politique du développement durable paysager* (Ville de Trois-Rivières, 2009a), la *Politique du patrimoine forestier et paysager* (Ville de Trois-Rivières, 2009b) et le *Plan directeur du développement urbain et des milieux naturels*;
- Le *plan d'adaptation aux changements climatiques 2013-2023* (Enviro-accès, 2013), *Énoncé de vision stratégique du développement culturel, économique, environnemental et social du territoire* (Ville de Sherbrooke, 2011).

Exemples d'actions à l'échelle communautaire / citoyenne :

- La campagne *Révélez votre nature* du Conseil régional de l'environnement de Montréal;
- La réfection écologique et le verdissement des stationnements aux Habitations Jeanne-Mance par l'Éco-quartier Saint-Jacques (Montréal);

- Le *Programme d'intendance environnementale des amis de la Montagne* (Montréal);
- L'organisme Corridor Appalachien qui déploie des efforts importants pour protéger des habitats naturels et assurer la connectivité entre les noyaux de conservation et les grands massifs forestiers dans l'Extrême-Sud du Québec;
- L'inventaire de la biodiversité du ruisseau de la Brasserie (Gatineau);
- L'acquisition de terrains à caractère écologique exceptionnel (Terrebonne);
- Les *Jardins collectifs* (Boucherville);
- L'inventaire des milieux humides (ville de Québec);
- Le toit vert de la bibliothèque de Charlesbourg.

Conclusion

Aujourd'hui, nous connaissons mieux la réponse aux changements climatiques de nombreuses espèces, dont des espèces à statut précaire, des espèces exploitées, des espèces envahissantes et nuisibles. La vulnérabilité aux changements climatiques de certains habitats, écosystèmes et processus écologiques est aussi mieux documentée. Ces premiers résultats nous permettent de conclure que les changements climatiques affectent déjà la biodiversité du Québec et que ces impacts risquent de s'accroître sous les conditions climatiques futures, d'autant plus qu'ils viennent se superposer aux pressions des multiples activités humaines qui s'exercent déjà fortement sur les écosystèmes naturels dans certaines régions du Québec. Comme chaque espèce répond différemment aux changements climatiques, leurs effets vont se faire sentir en cascade et se répercuter sur la composition, la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Même si nous commençons à mieux comprendre comment les changements climatiques affectent la biodiversité, nous sommes encore loin de mesurer toute l'ampleur des bouleversements écologiques qu'ils vont causer à plus grande échelle et leurs conséquences à long terme. Il est sûr cependant que les écosystèmes de la fin du siècle seront bien différents de ceux d'aujourd'hui. Les conséquences anticipées ne sont pas seulement écologiques, mais aussi sociales et économiques. En effet, la biodiversité et les écosystèmes nous procurent des services écologiques qui sont essentiels à notre survie et à notre bien-être. Or, certains d'entre eux permettent également d'atténuer nos vulnérabilités face aux changements climatiques. Leur maintien à long terme doit donc être une préoccupation centrale dans toute stratégie d'adaptation et pour tous les secteurs d'activités qui bénéficient, directement ou indirectement, de ces services; on parle ici bien sûr de l'agriculture, de la foresterie et, plus généralement, de l'utilisation des ressources vivantes et hydriques, mais aussi des milieux urbains, de la santé publique et du tourisme pour ne citer que les secteurs abordés dans ce document. C'est un enjeu encore plus préoccupant pour les populations nordiques dont la sécurité alimentaire et la culture reposent entièrement sur le bon fonctionnement des écosystèmes nordiques qui subissent déjà les effets les plus marqués des changements climatiques.

Le défi est énorme, car nous devons trouver les moyens de maintenir le niveau des services écologiques fournis par les écosystèmes, et ce, dans un climat changeant qui va assurément les affecter. Les premières évaluations de la valeur économique des services écologiques nous donnent une indication de l'ampleur des montants en jeu. Ceux-ci sont significatifs, surtout lorsqu'on tient compte des services écologiques non marchands offerts par les forêts, les milieux humides ou les écosystèmes côtiers, par exemple la régulation du climat et du régime hydrique, le stockage du carbone ou la fourniture d'habitats naturels de qualité, des services qui jouent un rôle important dans la réduction de nos vulnérabilités et dans la lutte contre les changements climatiques. Leur perte ou même leur réduction pourraient s'avérer très coûteuses à l'échelle du Québec ou même d'une région, si nous ne pouvons pas maintenir ces services à un niveau fonctionnel sous les nouvelles conditions climatiques. L'évaluation économique des services écologiques doit donc se poursuivre et s'affiner afin de prendre des décisions éclairées en matière de planification et d'aménagement du territoire. Les services écologiques sont en effet aussi au coeur de «l'adaptation basée sur les écosystèmes», une approche de plus en plus reconnue et mise en oeuvre partout sur la planète.

Dans ce contexte, la conservation de la biodiversité et l'adaptation aux changements climatiques visent ultimement le même but, c'est-à-dire le maintien de la biodiversité à long terme sous un climat en évolution rapide pour le bénéfice de la société dans son ensemble. Du coup, elles partagent aussi de nombreuses stratégies communes. Plusieurs d'entre elles, parmi les plus reconnues, sont maintenant à l'étude au Québec et font, ou feront, l'objet de projets-pilotes et d'applications dans les prochaines années afin de tester leur faisabilité opérationnelle et leur robustesse dans le contexte environnemental, social et économique du Québec. Cela exige aussi de prendre en compte la dimension humaine pour s'assurer que les mesures d'adaptation proposées soient mises en oeuvre plus facilement et surtout rapidement. L'une de ces stratégies est d'ailleurs primordiale pour le succès et l'efficacité de toutes les autres : il faut améliorer la coordination des actions et leur intégration à toutes les échelles. Or, cela ne peut se faire qu'en mobilisant tous les acteurs concernés, des citoyens jusqu'aux plus hauts niveaux décisionnels, car la biodiversité est l'affaire de tous! C'est un élément incontournable dans l'adaptation de l'ensemble de la société. Concrètement, cela veut dire que les services écologiques et leur maintien en climat futur doivent devenir un enjeu transversal et multisectoriel dans toutes les décisions d'adaptation. Cela signifie aussi que, collectivement, nous nous donnons les moyens de conserver la biodiversité et les écosystèmes pour pouvoir bénéficier encore longtemps des multiples services écologiques qui nous aideront à nous adapter plus efficacement et à moindres coûts aux changements climatiques.



2.5 Enjeux transversaux

Chapitre coordonné par : Nathalie Bleau (Ouranos)

Section Gestion de l'eau

Auteurs principaux : Richard Turcotte (CEHQ), Jean-François Cyr (CEHQ) et Nicolas Audet (Ouranos)

Section Aménagement du territoire - milieu urbanisé

Auteure principale : Nathalie Bleau (Ouranos)

Collaborateur : François Morneau (MSP)

Réviseurs : Geneviève Cloutier (ESAD-Université Laval); Jean-Bernard Guidon (UQAM)

Section Aménagement du territoire - milieux naturels

Auteur principal : Robert Siron (Ouranos)

Collaboratrice : Nathalie Bleau (Ouranos)

Un paramètre essentiel à considérer lorsqu'on aborde la question de l'adaptation aux changements climatiques est l'incontournable interdépendance entre les divers systèmes, écologiques, humains, bâtis et socioéconomiques, qui sont impactés par le climat (Ouranos, 2010).

Les principaux changements climatiques attendus, qui affectent et affecteront les milieux, sont une modification du régime des précipitations (changements dans la durée, la fréquence ou l'intensité des événements) et une hausse des températures, avec pour exemples d'impacts : un risque accru d'inondation, de débordements de réseaux, de surverses; une augmentation des épisodes de sécheresse; possiblement une occurrence plus fréquente de pluies hivernales, des cycles gel-dégel et des redoux; et une intensification des îlots de chaleur urbains. Ces impacts ont, entre autres, pour conséquence des effets sur le milieu naturel (voir à ce sujet le chapitre 2.4) et l'environnement bâti (chapitre 2.3), des problèmes de santé et de sécurité des populations (chapitre 2.2) ainsi qu'une possible diminution de leur qualité de vie, des effets sur l'approvisionnement en eau de surface et le traitement des eaux usées, et une menace de défaillance d'infrastructures essentielles (chapitre 2.3).

Plusieurs de ces impacts représentent des enjeux transversaux pour l'ensemble des acteurs de l'adaptation (chercheurs, décideurs, gestionnaires, etc.). Dans le cas des ressources hydriques, un exemple d'effet complexe et transversal sera la baisse du niveau des cours d'eau qui a une incidence sur la quantité et la qualité de l'eau disponible pour l'approvisionnement en eau potable, mais aussi pour l'irrigation des parcs urbains et terrains sportifs de même que pour les activités en bordure d'eau (plages, activités nautiques et autres). Cette baisse des niveaux d'eau a également des effets sur de nombreuses espèces animales et végétales (voir la figure 11 pour l'exemple du fleuve Saint-Laurent) (Ouranos, 2010, p. 24). Elle pourrait même avoir des conséquences sur la sécurité des citoyens lors d'un incendie par exemple.

L'aménagement du territoire est un autre enjeu transversal puisque les modes de développement du territoire ont une durée de vie très longue (beaucoup plus longue que les infrastructures) et peuvent grandement augmenter l'ampleur ou la gravité des impacts des changements climatiques, voire en provoquer (par exemple, l'augmentation du ruissellement dans les zones peu végétalisées et les glissements de terrain). À l'inverse, les stratégies d'aménagement du territoire peuvent aussi grandement contribuer à l'adaptation aux changements climatiques. Aménager le territoire pour s'adapter aux changements climatiques est une approche à considérer, d'autant plus que l'adaptation doit se faire surtout à l'échelle locale et régionale, notamment par les municipalités et les collectivités.

Les sections suivantes traiteront plus en détail de ces deux enjeux transversaux impactés par les changements climatiques que sont les ressources hydriques et l'aménagement du territoire. Il y sera question de sous enjeux, tels les impacts bio-physiques sur les eaux de surface et souterraines, les ressources hydriques abordées par la loupe des usages de l'eau, la problématique des inondations et la gestion des plaines inondables ou encore celle de l'érosion du littoral.

2.5.1 Gestion de l'eau

Faits saillants

- ▶ Les changements climatiques auront des impacts sur le régime hydrique et risquent d'amplifier certaines vulnérabilités, tant sur le plan de la disponibilité et de la qualité de l'eau que sur la sécurité.
- ▶ Il est très probable que les débits d'étiage soient plus sévères et plus longs à l'horizon 2050.
- ▶ Des défis considérables demeurent pour la réalisation de projections permettant d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les crues les plus fortes avec un niveau de confiance élevé.
- ▶ La morphologie des cours d'eau dynamiques sur le plan sédimentaire risque d'être impactée par les changements de régime hydrique.
- ▶ La connaissance de l'impact des changements climatiques sur la recharge et l'évolution des nappes d'eau souterraine est à développer.
- ▶ Le changement dans la fréquence des événements de précipitations ou de crues intenses, l'augmentation de la sévérité des étiages et l'augmentation de la température de l'eau risquent d'avoir une incidence négative sur la qualité de l'eau.

Avec 3 % des eaux renouvelables de la planète, le Québec dispose de ressources en eau abondantes. Néanmoins, la disponibilité en eau pour différents usages peut devenir localement et épisodiquement un enjeu. À l'inverse, des périodes de crues surviennent aussi fréquemment et peuvent entraîner des problèmes d'inondation et d'érosion. Ces enjeux sur la quantité d'eau se conjuguent à diverses problématiques sur la qualité d'eau, deux aspects intimement liés qui peuvent toucher à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines, et affecter ainsi les usages et les écosystèmes qui en dépendent. Un portrait global de ces enjeux est disponible dans le *Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec* (Gouvernement du Québec, 2014b).

Les changements climatiques auront des impacts sur le régime hydrique et risquent d'amplifier certaines vulnérabilités, tant sur le plan de la disponibilité et de la qualité de l'eau que sur la sécurité. Bien que l'ensemble du territoire du Québec puisse être affecté à différents degrés, une attention particulière est portée aux secteurs

les plus habités du Québec méridional qui se caractérisent par une grande diversité d'usages de l'eau. La gestion actuelle des ressources en eau contribue à protéger ces usages d'une partie de la variabilité du climat et du régime hydrique, mais certaines vulnérabilités demeurent, en particulier lors des crues et des étiages les plus sévères.

2.5.1.1 Impacts biophysiques

Un portrait sommaire des impacts des changements climatiques sur l'hydrologie du Québec est disponible à la section 1.7. Une évaluation plus détaillée des liens entre le réchauffement climatique et les régimes de crues et d'étiages nécessite des analyses locales. Les paragraphes qui suivent permettent d'établir un portrait des impacts projetés pour le Saint-Laurent et certains de ces tributaires.

Fleuve Saint-Laurent

La plus récente quantification complète et systématique des impacts des changements climatiques sur les débits et niveaux de la partie fluviale du Saint-Laurent date de 2005 et s'appuie sur les études de Croley (2003), Fagherazzi *et al.* (2005) et Lefavre (2005). Ces études suggèrent une diminution des quantités d'eau transitant par le Saint-Laurent de 4 % à 24 % sur une base annuelle selon le scénario considéré. Une mise à jour de ces évaluations est en cours. Sans pouvoir inférer les résultats finaux, soulignons que ces évaluations tentent de préciser, entre autres, l'effet des changements climatiques sur l'évaporation des Grands Lacs. Certaines études tendent à montrer que les réductions de quantités d'eau pourraient être moins importantes qu'anticipées (Lofgren *et al.*, 2011), bien que certains mois de l'année montreraient tout de même des réductions importantes (Music *et al.*, 2015).

Compte tenu de l'aspect transversal et des nombreux enjeux qui sont reliés directement aux impacts des changements climatiques sur le système hydrique du Saint-Laurent, des informations sont aussi présentées dans d'autres chapitres et sections de ce document, notamment sur les conséquences économiques sur le secteur des pêches et de l'aquaculture (chapitre 2.1), sur la problématique des maladies hydriques et des conséquences sur la santé (chapitre 2.2), sur l'agriculture, notamment sur les enjeux liés au stress hydrique et aux conflits d'usage (chapitre 2.1), sur la problématique de l'érosion du littoral marin et ses conséquences sur les bâtiments et infrastructures côtières (chapitre 2.3) ainsi que sur les écosystèmes littoraux (chapitre 2.4).

Tributaires du Saint-Laurent

Plusieurs des impacts anticipés des changements climatiques sur les ressources en eau sont liés aux changements du régime hydrique des cours d'eau. Bien que l'on ne puisse associer toutes ces modifications à l'effet des changements climatiques, Lachance-Cloutier et Turcotte (2012) indiquent que les débits de vingt années récentes (1992-2011) par rapport à ceux des vingt années précédentes (1972-1991) de 56 cours d'eau du Québec présentent des étiages plus sévères (d'environ 10 %) et plus longs (d'environ 4 jours), des crues de printemps moins intenses (d'environ 6 %) et une plus grande variabilité des débits (variance augmentée d'environ 23 %).

L'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional* (CEHQ, 2013a) a permis de dresser un portrait des impacts anticipés sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulité à l'horizon 2050. Ils sont présentés qualitativement au tableau 2-8 alors qu'un exemple de distribution spatiale des impacts en étiage est donné à la figure 2-33.

En complément à l'*Atlas hydroclimatique*, plusieurs études se sont penchées sur des analyses spécifiques de bassins versants, par exemple, les études portant sur les bassins des rivières Nicolet (Roy *et al.*, 2013), Yamaska (Côté *et al.*, 2013a), du Lièvre (Leconte *et al.*, 2013), Péribonka (Arsenault *et al.*, 2013; Minville *et al.*, 2010) et au

Tableau 2-8 Impacts des changements climatiques sur le régime hydrique des cours d'eau selon l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional

Phénomène hydrologique	Conclusions à l'horizon 2050 pour le Québec méridional*
Crues printanières	Il est difficile de se prononcer sur le changement de la pointe de crue printanière.
	Les crues printanières seront vraisemblablement moins volumineuses au sud du territoire.
	Les crues printanières seront fort probablement plus hâtives.
Crues d'été et d'automne	La pointe des crues observées à l'été et à l'automne pourrait augmenter au nord du Québec méridional
Étiages d'été et d'automne	Les débits des étiages d'été d'automne sera fort probablement plus faible.
	Les étiages d'été et d'automne seront fort probablement plus longs.
Hydraulicité	L'hydraulicité annuelle sera vraisemblablement plus fort au nord du Québec méridional.
	L'hydraulicité de la période hiver-printemps sera fort probablement plus forte.
	L'hydraulicité de la période été-automne sera vraisemblablement plus faible au sud du territoire et vraisemblablement stable au nord du Québec méridional..
	L'hydraulicité sera fort probablement plus forte de décembre à mars, et vraisemblablement moins forte de mai à octobre.

Source: CEHQ (2013a)

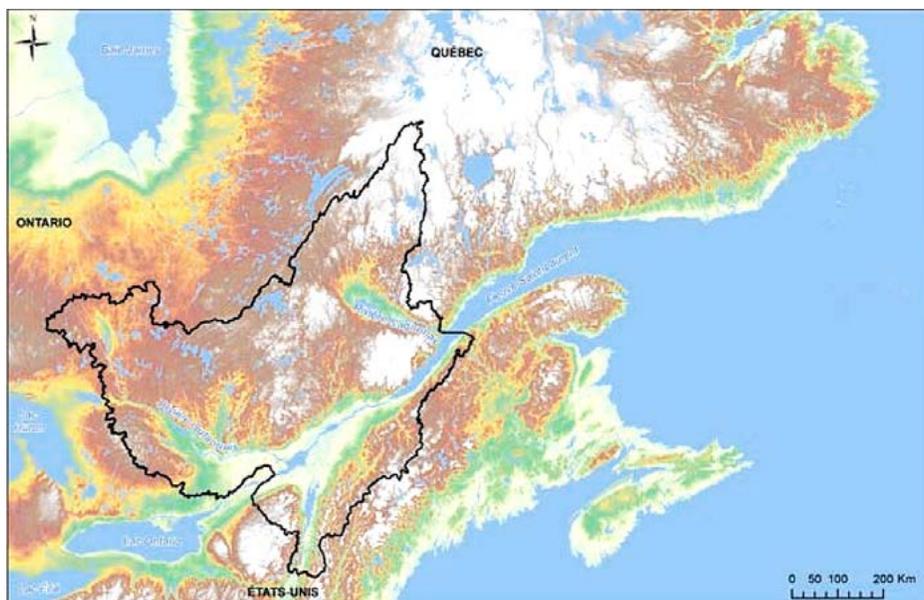


Figure 2-33 Territoire couvert par la plateforme de modélisation hydrologique de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional

Source : CEHQ (2013a)

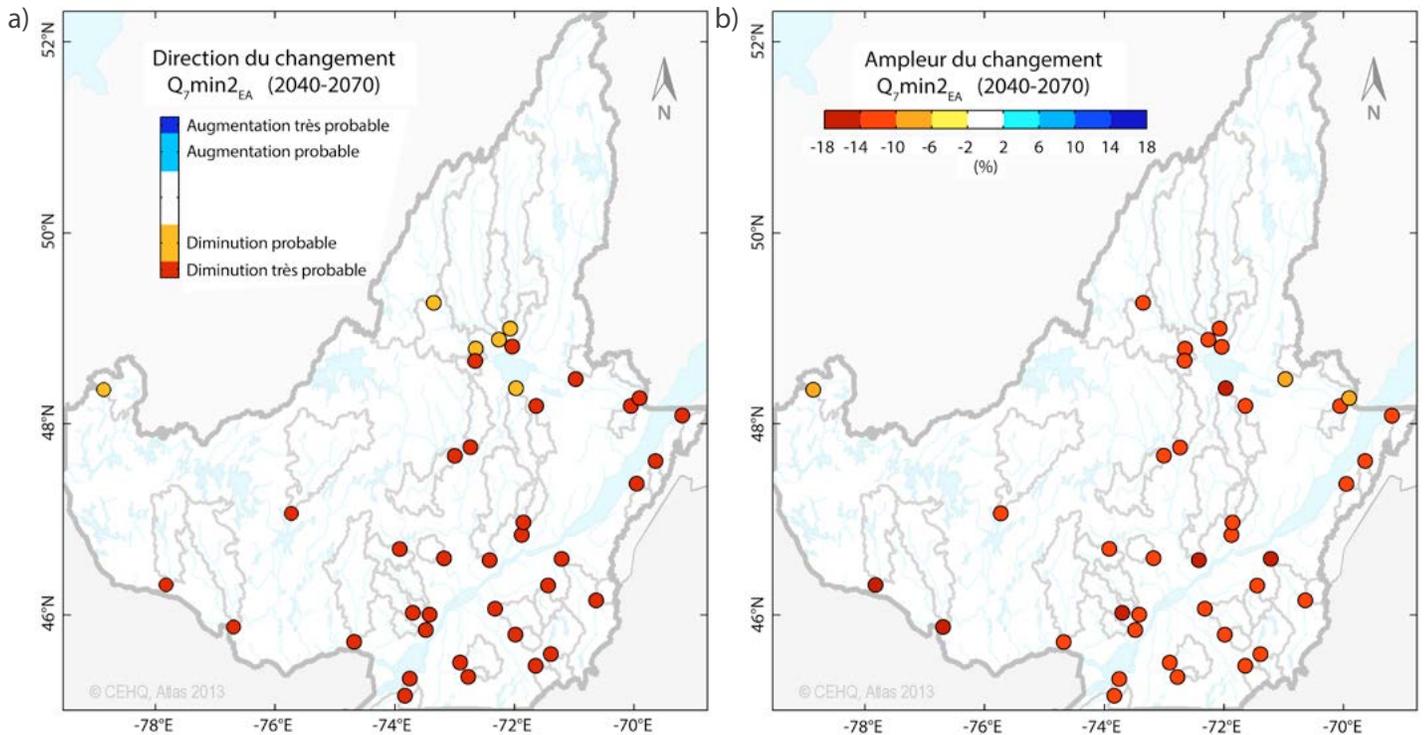


Figure 2-34 Exemples de cartographies A) de la direction et B) de l'ampleur des changements climatiques sur les étiages à l'horizon 2050 en utilisant l'indicateur statistique $Q_{7min2EA}$ (débit minimal sur sept jours de récurrence deux ans évalué sur la période été/automne)

Source : CEHQ (2013a)

Saumon (Muerth *et al.*, 2013; Seiller et Anctil, 2014; Velázquez *et al.*, 2013). Notons aussi les travaux de Fournier *et al.* (2013) sur la modélisation hydrologique des milieux humides riverains et isolés dans les bassins versants des rivières Yamaska et Bécancour.

Des études se sont aussi penchées sur les améliorations à apporter aux outils de modélisation pour tenir compte des besoins en information pour la gestion de l'eau aux échelles spatiales et temporelles d'intérêt. Ainsi, bien que les signaux associés à l'augmentation de la sévérité des étiages soient clairs et convergents d'un scénario à l'autre, des évaluations de plus en plus précises de l'ampleur de ces signaux restent à développer (Velázquez *et al.*, 2013). Elles passeront possiblement par une amélioration de la modélisation des processus associés à l'évapotranspiration (Seiller, 2013) et des liens entre les eaux souterraines et les eaux de surface pendant les périodes critiques d'étiage (Sulis *et al.*, 2010). À l'autre bout du spectre, des défis considérables demeurent dans la réalisation de projections qui évalueront l'impact des changements climatiques sur les crues les plus fortes avec un niveau de confiance élevé (Rousseau *et al.*, 2012; Saïd *et al.*, 2012). Bien qu'il soit clair que le volume des crues de printemps risque de diminuer avec la diminution du couvert de neige, les effets des changements climatiques sur les débits de pointe maximaux sont moins évidents. Au printemps, les débits de pointe sont liés à la combinaison de la fonte d'un couvert de neige potentiellement réduit avec des pluies qui pourraient être plus intenses. À l'été et à l'automne, les débits de pointe sont liés, d'une part, à l'augmentation des précipitations intenses, mais d'autre part, à une possible diminution des conditions d'humidité des sols, antécédente à la précipitation.



Figure 2-35 Étiages estivaux plus sévères

Crédit photo : CEHQ

Les crues provoquent parfois des inondations et soulèvent divers enjeux de gestion des plaines inondables. Ces questions sont abordées sommairement à la section 2.5.2.1 (sous-section inondations et gestion des plaines inondables).

Hydrogéomorphologie

Certains événements récents, comme les crues qui ont suivi le passage de l'ouragan Irène en août 2011, ont illustré les défis que posent le transport des sédiments et le déplacement des lits et des berges des cours d'eau pour les municipalités riveraines. L'impact des changements climatiques sur les mouvements de sédiments dépend des conditions physiographiques et hydrodynamiques propres à chaque cours d'eau et il est complexe de le décrire par des énoncés généraux. Des travaux effectués sur deux cours d'eau du sud du Québec, les rivières Nicolet et de la Fourche, fournissent des pistes d'identification des facteurs clés (présence de bancs d'accumulation, de sources sédimentaires, etc.) à considérer pour comprendre et anticiper la dynamique sédimentaire de divers types de segments de cours d'eau (Roy *et al.*, 2013). En effet, les cours d'eau dynamiques risquent d'être les plus impactés par les changements de régime hydrique, facteurs d'induction de mouvements de berges. Des changements, qui amèneraient une augmentation des crues très intenses, mais aussi une hydraulité et une variabilité accrue sur plusieurs années consécutives, seraient les plus critiques. À noter toutefois que la projection de ces deux paramètres reste difficile à évaluer avec précision. En complément, une étude sur la l'approche par espaces de liberté s'appuyant sur l'hydrogéomorphologie (Biron *et al.* 2013) est présentée à la section 2.5.2.1 (sous-section inondations et gestion des plaines inondables).

Qualité

La réduction anticipée des débits d'étiages qui limitera la capacité de dilution des cours d'eau, le changement dans la fréquence des événements de précipitations ou de crues intenses et l'augmentation de la température de l'eau risquent d'avoir une incidence négative sur la qualité de l'eau. Cela représente un risque accru d'autant plus quand les prises d'eau potable sont situées à l'aval des débordements (surverses). Un projet plus ciblé a



Figure 2-36 Dynamique sédimentaire accrue

Crédit photo : CEHQ

permis d'évaluer une technique de gestion des eaux pluviales (les jardins de pluie). La modélisation a permis de mettre en avant que les jardins de pluie peuvent réduire les volumes de ruissellement des eaux de pluie de même que les caractéristiques des surverses (volume, débit maximal et durée). Cependant, si on suit les recommandations du design actuel pour les jardins de pluie, plus les événements de pluie sont importants, moins les jardins de pluie sont efficaces. Une combinaison de pratiques de gestion optimale serait à tester de même que la mise en place d'un traitement des eaux avant le rejet dans le cours d'eau récepteur (Autixier *et al.*, 2014). Le suivi de la qualité des cours d'eau du Québec, réalisé par le MDDELCC pour les programmes Réseau-rivières, qui vise une acquisition globale de connaissances et Environnement-plage, qui est ciblé sur la santé des baigneurs, permet de dresser un portrait de l'évolution temporelle des paramètres descriptifs de la qualité de l'eau. De même, des études établissent des liens potentiels entre les changements climatiques et l'état des lacs, notamment en ce qui a trait à l'acidification (Kernan *et al.*, 2010), l'eutrophisation (Vincent, 2009) et la présence d'algues bleu vert (Ndong *et al.*, 2014; Zamyadi *et al.*, 2014; Zamyadi *et al.*, 2015;).

Eaux souterraines

Au Québec, l'eau souterraine sert de source d'approvisionnement en eau potable pour près de 90 % du territoire habité où elle alimente environ 20 % de la population (MDDELCC, 2013). À plusieurs endroits, l'eau souterraine est le seul choix logique d'un point de vue économique en raison de sa bonne qualité et de sa disponibilité près du lieu de consommation. Depuis 2008, le gouvernement du Québec a entrepris d'améliorer la connaissance sur la disponibilité de cette ressource par l'intermédiaire du *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec* (PACES). Entre 2009 et 2013, sept études hydrogéologiques régionales ont été réalisées dans le cadre du PACES. D'autres études régionales sont en cours. La connaissance de l'impact des changements climatiques sur la recharge et l'évolution des nappes d'eau souterraine demeurent toutefois très peu développées. Les analyses récentes au Québec ont montré la difficulté d'extraire des tendances généralisables des séries historiques (Rivard *et al.*, 2009) ou ont porté sur des problématiques locales et spécifiques qui ont mis en évidence les liens étroits entre la recharge et l'impact sur les eaux souterraines

(Bourgault *et al.*, 2014; Levison *et al.*, 2013). Enfin, les travaux de Cochand (2014) ont permis d'évaluer qu'à long terme la fluctuation interannuelle de recharge des nappes augmenterait pour le cas spécifique étudié du bassin versant de la rivière Saint-Charles. À l'échelle saisonnière et à l'horizon 2080, la recharge serait de 2 à 3 fois supérieure en hiver par rapport aux conditions actuelles, mais diminuerait à l'été de 4 à 8 %, selon cette même étude. Des analyses complémentaires demeurent toutefois nécessaires pour mieux cerner l'évolution globale à long terme de la recharge.

2.5.1.2 Vulnérabilité, impacts et adaptation en lien avec les usages de l'eau

Les usages de l'eau sont nombreux et essentiels pour la société québécoise. Certains usages nécessitent des prélèvements d'eau de surface ou souterraine, comme l'approvisionnement en eau potable ou l'approvisionnement pour l'agriculture et les industries. D'autres sont associés à une utilisation de l'eau sur place, comme la navigation, les activités récréatives, la pêche, la production hydroélectrique et la dilution des eaux usées. Enfin, l'usage des rives et du littoral influence aussi les autres usages de l'eau.

En réduisant la disponibilité des ressources en eau pour certaines périodes et en modifiant le régime des crues, les changements climatiques auront pour effet d'augmenter les contraintes sur une gestion de l'eau qui vise à maintenir les usages. L'adaptation aux impacts des changements climatiques dans le cas des ressources hydriques consistera donc en l'adaptation de la gestion de l'eau et des usages qui en sont faits.

Plusieurs leviers d'adaptation peuvent être mentionnés :

- ▶ L'amélioration des approches de gestion de l'eau (information et sensibilisation des acteurs, coordination entre experts, autorités publiques et communautés, gestion intégrée, recours aux données d'observations et aux outils d'aide à la décision);
- ▶ La mise à niveau et la construction d'infrastructures de gestion de l'eau (prises d'eau, stations de traitement, puits, barrages, digues, systèmes de drainage, ponts, voie maritime, ouvrages de protection);
- ▶ La planification de l'aménagement du territoire et les stratégies de verdissements (pour contrôler les volumes et la qualité des eaux de ruissellement);
- ▶ La mise à jour de cadres législatifs et réglementaires.

L'adaptation aux impacts des changements climatiques dans le domaine des ressources en eau nécessite de tenir compte des liens étroits entre les usages, voire des conflits d'usages. Une perspective de gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle du bassin versant, qui est l'unité territoriale reconnue au Québec et ailleurs sur la scène internationale comme la plus appropriée pour ce faire, est pertinente en adaptation face aux changements climatiques.

La *Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection* (chapitre C-6.2, ci-après *Loi sur l'eau*) a confirmé le rôle des organismes de gestion intégrée des bassins versants et du Saint-Laurent pour faciliter la mobilisation, la concertation et le passage à l'action des citoyens et des acteurs de l'eau. Des cas d'études sur trois bassins versants analysés par Charles *et al.* (2013) ont mis en évidence la présence de réseaux d'acteurs de l'eau structurés selon divers modèles, où l'espace occupé par les organismes de bassins versants (OBV) au sein de ces réseaux est très variable. Cela les amène à suggérer un modèle d'intégration de l'adaptation qui soit souple, adaptable régionalement, et bien intégré aux actions existantes. Selon ces auteurs,

les OBV doivent toutefois tendre à assurer une concertation des efforts d'adaptation en ajustant au besoin le travail d'élaboration ou de mise à jour de leur plan directeur de l'eau (PDE). Des actions récentes du regroupement des OBV du Québec (ROBVQ, 2012) visent à offrir à leurs membres des outils spécifiques pour progresser dans cette direction.

Besoins en eau

À une échelle globale, les travaux de Parent *et al.* (2012) ont permis de faire une première réflexion sur l'évolution des besoins et de la demande en eau. Ils indiquent que les municipalités, l'agriculture et les industries pourraient voir leurs besoins en volume d'eau augmenter sous l'effet des changements climatiques. Sur le plan territorial, la Montérégie, la Mauricie, Montréal, la Capitale-Nationale, le Centre-du-Québec et l'Estrie sont les plus susceptibles de voir leurs besoins augmenter. En se basant notamment sur des régions de l'Ontario et du nord-est des États-Unis qui vivent actuellement sous des climats analogues à ceux anticipés pour différentes régions du Québec à l'horizon 2050, les auteurs concluent toutefois qu'il n'est pas anticipé que cette demande atteigne globalement un niveau critique d'ici 2050. Ce contexte favoriserait une adaptation graduelle des pratiques.

Gestion des prélèvements en eau

La réduction fort probable des débits d'étiages sous l'effet des changements climatiques risque d'avoir un impact significatif sur les usages associés aux prélèvements en eau, qui se partageront une ressource se raréfiant dans les périodes où les besoins sont les plus élevés. Une gestion intégrée des prélèvements, tenant compte des impacts cumulatifs de ceux-ci de l'amont à l'aval des cours d'eau, est l'un des objectifs de la *Loi sur l'eau*. Une pareille gestion implique un cadre pratique qui tienne compte des quantités d'eau à laisser dans les cours d'eau pour s'assurer que les différents besoins des écosystèmes et des autres composantes à valoriser soient comblés. Cette gestion nécessite aussi une modulation temporelle des prélèvements, de leur partage entre les préleveurs, et ce, à l'échelle de tout le bassin.

Malgré une planification générale des prélèvements, des situations de crises peuvent survenir. Côté *et al.* (2013a) ont analysé des outils à mettre en place pour permettre une meilleure préparation aux situations de crise via, notamment, un système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs sur le bassin de la rivière Yamaska. Cette préparation aux périodes d'étiages appréhendées favorise une prise de décision permettant de réagir plus rapidement, de manière plus concertée et équitable.

Une étude préliminaire (Olar *et al.*, 2013) des coûts et des bénéfices économiques des mesures de restriction de la consommation lors des périodes de crise (par exemple, réduction des quantités d'eau utilisables par les industries) montre que certaines mesures ne seraient possiblement pas justifiables du point de vue d'une analyse économique classique. Un cadre d'analyse plus large, incluant notamment les effets des mesures de soutien de la quantité d'eau sur la qualité de l'eau et sur les biens et services écologiques, semble toutefois nécessaire pour tirer des conclusions plus définitives.

Gestion et sécurité des barrages

Par leur effet sur la modulation du régime hydrique, les barrages, principalement ceux visant à supporter une diversité d'usages, sont des outils cruciaux pour la gestion intégrée de l'eau. Les opérations, qui s'y effectuent au quotidien par exemple, sont des gestes concrets qui modifient la répartition spatiale et temporelle de l'eau du bassin versant. De façon générale, les modalités de gestion des barrages tendent à réduire la vulnérabilité des usages dans la mesure où ces modalités sont bien adaptées à la variabilité du régime hydrique.

Huaringa Alvarez *et al.* (2014) ont récemment réalisé une étude visant à s'assurer que les barrages du bassin versant de la rivière du Lièvre pourront continuer à jouer efficacement leur rôle malgré l'impact des changements climatiques. Ces barrages, qui appartiennent au grand système hydrique de la rivière des Outaouais, contribuent au contrôle local, mais aussi régional des crues et des étiages, jusqu'en aval, dans la région de l'archipel de Montréal où sont présents des enjeux de sécurité face aux crues et d'alimentation en eau potable. Pour ce système hydrique, l'utilisation d'outils d'optimisation et d'aide à la décision semble être un moyen d'adaptation qui permet aux gestionnaires de barrages de maintenir l'atteinte des objectifs de gestion actuels malgré l'impact des changements climatiques. Cela est possible à condition que ces outils d'optimisation intègrent l'ensemble des contraintes de gestion et n'incluent plus, au processus de prise de décisions, le concept de dates repères prédéterminées, ces dernières risquant de perdre leur pertinence sous l'effet des changements climatiques (Georgakakos *et al.*, 2012).

La capacité d'un barrage à contribuer à l'atteinte de différents objectifs de gestion peut être limitée et doit être évaluée en tenant compte aussi des contraintes associées à la sécurité de l'ouvrage. En effet, la *Loi sur la sécurité des barrages* impose, parmi d'autres exigences, que ceux-ci puissent résister structurellement à une crue très forte, appelée crue de sécurité, dont la valeur dépend des conséquences d'une rupture. L'évaluation précise de l'impact des changements climatiques sur les crues de sécurité reste à déterminer, mais des études ont montré qu'il est probable que les changements climatiques affectent ces crues (Rousseau *et al.*, 2012; Saïd *et al.*, 2012). Le caractère périodique de l'évaluation de la sécurité des barrages, imposé par la Loi, motive la réflexion sur l'adaptation dans ce domaine et encourage la poursuite de la recherche.

Prévision des étiages et des crues

Dans plusieurs états comparables au Québec, des systèmes opérationnels de prévisions des débits sont disponibles pour supporter les décisions, interventions et alertes lors d'événements hydrologiques critiques comme les crues. La prévision est un outil fondamental pour anticiper des actions à prendre afin de minimiser les impacts des crues sur la sécurité des populations et des biens, comme l'opération préventive des ouvrages de gestion de l'eau ou le déploiement de plans de mesures d'urgence.

Au Québec, la prévision a été traditionnellement associée à la gestion des barrages publics (CEHQ), parapublics (HQ) et privés (RTA). Dans la suite de la crue du Richelieu de 2011, le CEHQ, en collaboration avec le MSP, a démarré un programme de prévision dans une perspective de sécurité publique et diffuse dorénavant des prévisions des débits pour plusieurs cours d'eau du Québec (CEHQ, 2013b). Cependant, ces débits prévus ne tiennent pas en compte les phénomènes de glace des rivières en hiver (frasils, embâcles) qui viennent localement perturber, de manière importante, les débits et les niveaux. Aussi, des municipalités, comme la Ville de Québec, se sont dotées (Fortin et Roy, 2009) de prévisions des débits de crues et d'étiages pour la gestion de l'utilisation de l'eau du lac Saint-Charles à des fins d'alimentation en eau potable.

Pour les crues, l'utilisation des prévisions météorologiques à court terme produite par Environnement Canada permet d'établir les prévisions de débits. Pour la prévision des étiages, qui implique un horizon de prévision de plus longue portée, les approches de prévision actuelle font l'hypothèse d'un climat stationnaire. Les travaux de Brissette *et al.* (2012), à travers l'exemple de la rivière Yamaska Sud-Est, ont permis de proposer des méthodes d'ajustement de ces approches pour tenir compte de la non-stationnarité du climat.

2.5.1.3 Conclusion

Les changements climatiques auront des impacts sur le régime hydrique et risquent d'amplifier certaines vulnérabilités, tant sur le plan de la disponibilité et de la qualité de l'eau que sur la sécurité.

Au Québec, de façon générale, il est très probable que les débits hivernaux soient plus élevés, que les crues de printemps soient devancées et que les étiages soient plus sévères et plus longs à l'horizon 2050. Bien que des changements au régime de crues soient anticipés, des défis considérables demeurent pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les crues les plus fortes avec un niveau de confiance élevé. En effet, ces changements sont très variables selon les localisations géographiques et les tailles des bassins versants qui alimentent les cours d'eau. De même, la connaissance de l'impact des changements climatiques sur la recharge et l'évolution des nappes d'eau souterraine reste à développer. Plus qualitativement, on peut affirmer que les cours d'eau dynamiques sur le plan sédimentaire risquent de voir augmenter leur mobilité et leur taux d'érosion. Enfin, on peut aussi affirmer que le changement dans la fréquence des événements de précipitations ou de crues intenses, l'augmentation de la sévérité des étiages et l'augmentation de la température de l'eau risquent d'avoir une incidence générale négative sur la qualité de l'eau.

Les usages de l'eau sont nombreux et essentiels pour la société québécoise. En modifiant le comportement actuel du régime hydrique, les changements climatiques auront pour effet général d'augmenter les contraintes et de complexifier la gestion de l'eau pour ces usages. L'adaptation de la gestion de l'eau devra tenir compte des interactions entre les usages et les besoins des écosystèmes et s'effectuer dans une perspective de gestion intégrée des ressources en eau. La réduction de la disponibilité dans les périodes sèches impliquera une optimisation continue de la gestion des prélèvements et des barrages en s'appuyant sur des outils pratiques, dont certains sont déjà en développement et d'autres restent à développer. Pour faire face aux événements de crues fortes qui surviendront, des outils de prévision à court terme, une gestion éclairée des plaines inondables et une mise à jour régulière de la sécurité des barrages et de leur mode de gestion sont des moyens d'adaptation pour lesquels plusieurs réflexions et actions sont entamées. La compréhension des aspects socioéconomiques, qui est amorcée, mais qui demeure à bonifier dans les années à venir, pourrait permettre de mieux prioriser et de mettre en évidence les solutions d'adaptation les plus prometteuses.

Pour le système Grands Lacs/Saint-Laurent, des études récentes indiquent que les réductions de quantités d'eau à l'horizon 2050 pourraient être moins importantes que celles qui étaient anticipées lors des dernières quantifications complètes effectuées en 2005. Certains mois de l'année montreraient tout de même des réductions importantes des débits et des niveaux. Des activités de recherche portant sur le Saint-Laurent sont donc souhaitables, dans les années à venir, pour préciser les connaissances sur les impacts et poursuivre l'analyse des vulnérabilités et de l'adaptation de ce cours d'eau primordial pour le Québec.

2.5.2 Aménagement du territoire

L'aménagement du territoire concerne autant les milieux urbanisés¹⁰, ou plus de 80 % des Québécois vivent (Statistique Canada, 2011), que les milieux naturels. Parfois ces milieux sont distincts et sont planifiés, organisés et gérés comme des entités indépendantes, par exemple un noyau villageois et un parc national; parfois ils sont imbriqués et ils évoluent, se modifient, s'influencent mutuellement par exemple les milieux humides en bordure d'un territoire urbanisé ou encore un boisé au coeur d'une ville. Ces milieux sont impactés par les changements climatiques, qu'il s'agisse d'une modification des moyennes climatiques (température,

¹⁰ Dans la formulation de cette étude, le mot « réserves » est utilisée de manière générique pour désigner tout statut officiel visant la conservation de l'environnement naturel, ce qui inclut par exemple les aires protégées.

précipitations, etc.) et d'une modification de la fréquence, de l'intensité ou de la durée des événements extrêmes déjà constatées (IPCC, 2013; Richardson, 2010), les conséquences de ces changements mettent en évidence la vulnérabilité de ces milieux (Ouranos, 2010). Aménager le territoire en tenant compte des changements climatiques, c'est faire preuve d'éthique et d'un bon sens de responsabilités. L'aménagement devrait promouvoir une ville qui prépare les collectivités aux impacts des changements climatiques et qui tend vers un état « climatiquement neutre », c'est-à-dire qui tente de réduire au maximum ses émissions de GES et qui compense pour les émissions provenant de l'utilisation des énergies fossiles (ICU, 2011).

2.5.2.1 Aménagement du territoire – milieu urbanisé

Faits saillants

- ▶ En matière de sécurité civile au Québec et au Canada, les problématiques associées aux événements météorologiques et climatiques extrêmes sont en croissance.
- ▶ Si, par le passé, les inondations au Québec concernaient essentiellement les crues printanières, souvent associées à des débâcles de glace, avec les changements climatiques et les modifications des paramètres hydroclimatiques qui en résulte, les sinistres associés aux crues sont en augmentation et surviennent en toutes saisons.
- ▶ L'érosion du littoral en milieu marin est une problématique majeure pour les régions de la Côte-Nord, du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine. Au cours des dernières décennies, elle a suscité des déboursés considérables qui ont servi à des déplacements de routes et à la construction d'ouvrages de protection.
- ▶ Dans le Nord du Québec, la dégradation du pergélisol a pour conséquence, entre autres, des glissements de terrain qui sont un risque pour la population et causent des dommages aux infrastructures.
- ▶ Les avalanches représentent une problématique qui demeure encore à documenter. Des études récentes montrent cependant des liens entre les facteurs de déclenchement des avalanches et certaines variables climatiques affectées par les changements climatiques.

Outre les vulnérabilités et les impacts du territoire, associés aux eaux pluviales et aux eaux usées, à l'eau potable, aux bâtiments, aux infrastructures (incluant les réseaux techniques urbains (RTU)), aux chaussées et aux ICU traités dans les chapitres précédents, les vulnérabilités du territoire et les impacts associés aux risques naturels et aux phénomènes climatiques extrêmes sont tous aussi à considérer lorsqu'il est question de changements climatiques.

Au nombre des impacts projetés préoccupants pour les milieux urbanisés, mentionnons un changement dans les moyennes de température, une modification des paramètres hydroclimatiques ainsi qu'une variation de la fréquence, de l'intensité ou de la durée des événements extrêmes (GIEC, 2012; IPCC, 2014c) avec comme conséquences possibles différents types d'inondations (de plaines, des inondations éclairs, des inondations causées par des embâcles de glace ou de frasil), des glissements de terrain associés aux pluies torrentielles, aux crues importantes ou à la fonte du pergélisol (dans le Nord du Québec), l'érosion des berges et du littoral dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, des sécheresses et des étiages, des orages violents et des feux de forêt (GIEC, 2012).

Le niveau de vulnérabilité d'un milieu urbanisé face aux risques naturels et aux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes dépend en partie de la densité de sa population et des modes de vie, de ses infrastructures et activités socioéconomiques installées en zones dangereuses, et de l'aménagement du territoire qui y est effectif (MSP, 2014; ONERC, 2010; ONU-Habitat, 2011). Une spécificité de la vulnérabilité en milieu urbanisé est liée à l'interdépendance de ses composantes (ONERC, 2010). Ainsi, le milieu urbanisé se distingue par « une densification et une hausse de sa population, l'interdépendance complexe des infrastructures, un tissu social en évolution et une population de plus en plus désensibilisée aux conditions climatiques » (Lemmen *et al.*, 2008, p. 216). Il « rassemble beaucoup de facteurs pouvant générer des impacts nombreux, complexes, et parfois coûteux, surtout reliés à une augmentation de fréquence, d'intensité ou de durée des événements climatiques extrêmes » (Lemmen *et al.*, 2008, p. 216). Comme l'ont montré Thomas *et al.* (2012), analyser cette vulnérabilité permet de déceler les secteurs qui doivent être ciblés et analysés plus finement par les gestionnaires afin d'atténuer la sensibilité, lorsqu'il est possible de le faire, ou d'améliorer l'adaptation de la population et des infrastructures face à un risque climatique.

En matière de sécurité civile au Québec et au Canada, les problématiques associées aux événements météorologiques et climatiques extrêmes sont en croissance (BAC, 2013; Swiss Re, 2013) (figures 2-37 et 2-38), de même que les montants alloués par les programmes gouvernementaux d'assistance financière pour les sinistrés, principalement en milieu urbanisé, et pour la mise en oeuvre de mesures d'intervention et la réparation des dommages causés aux infrastructures (MSP, 2014).

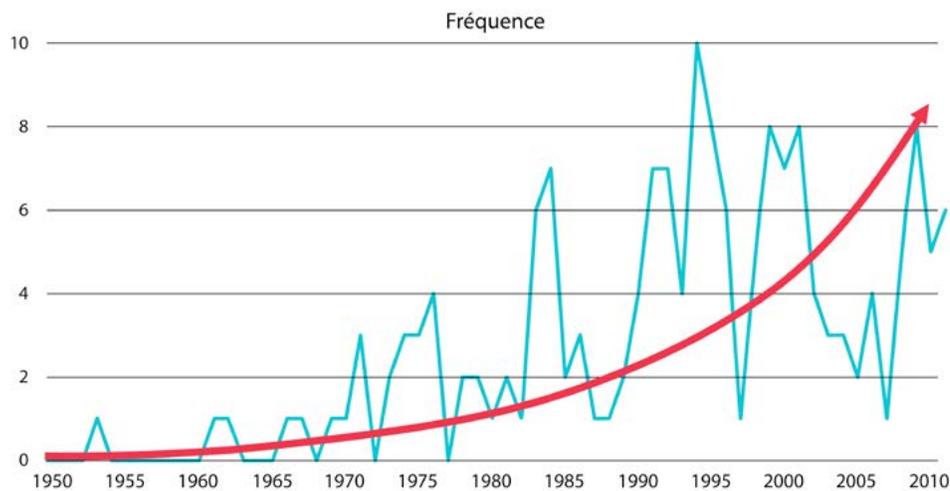


Figure 2-37 Fréquence des sinistres attribuables aux phénomènes météorologiques au Canada

Source : Intact Assurances (2013)

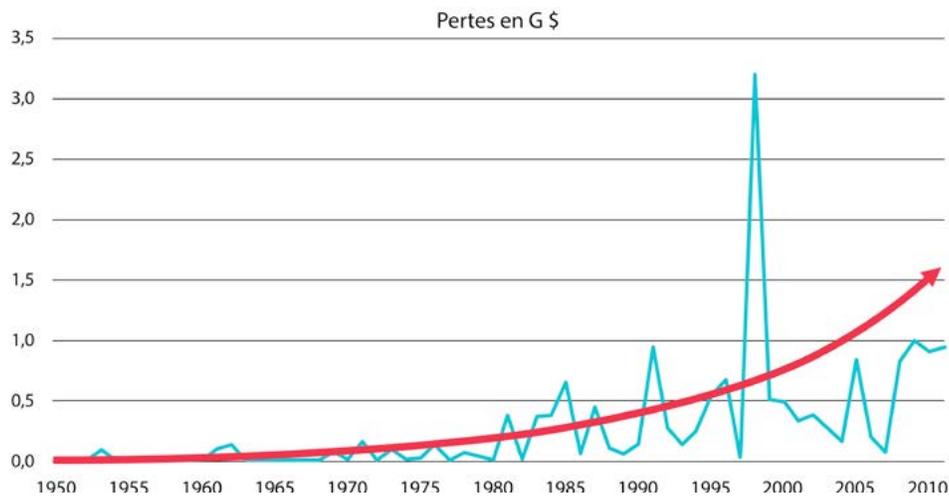


Figure 2-38 Pertes (en milliard de dollars) dues aux sinistres attribuables aux phénomènes météorologiques au Canada

Source : Intact Assurances (2013)

Inondations et gestion des plaines inondables

Une grande partie du Québec bâti est soumise aux inondations. Cet aléa constitue le principal risque naturel et engendre des déboursés importants en indemnités. Outre les décès, les blessures et le stress, les inondations entraînent la dégradation des infrastructures, des réseaux techniques urbains et des bâtiments (Dodman *et al.*, 2013). Elles ont aussi des conséquences sur les activités économiques, entre autres, sur l'industrie manufacturière et le tourisme de même que sur le secteur des assurances (ONU-Habitat, 2011). C'est le cas au Québec, mais également partout ailleurs dans le monde et, à cet égard, l'enjeu du financement et de la solidification des infrastructures se joue et devrait se traiter à une échelle globale (GIEC, 2012; ONU-Habitat, 2011).

Si par le passé, les inondations au Québec concernaient essentiellement les crues printanières, souvent associées à des débâcles de glace, avec les changements climatiques et les modifications du régime hydrique qui en résultent, les sinistres associés aux crues sont en augmentation et surviennent en toutes saisons (ICU, 2011; Richardson, 2010). Crues éclairs, crues en début d'hiver, débâcles hivernales associées aux redoux, embâcles de frasil sont autant des causes d'inondation qui affectent des zones bâties (Houston *et al.*, 2011) et qui pourraient s'aggraver avec les changements climatiques. Ainsi, la succession à des intervalles rapprochés de catastrophes liées aux inondations suscite des questionnements sur les causes de l'aggravation des dommages et les stratégies de prévention des risques à instaurer.

Les connaissances sur l'hydrologie en eau libre sont assez bien développées et de multiples modèles sont disponibles (HYDROTEL, CEQUEAU, HSAMI, etc.). Des études sont encore nécessaires pour prendre en compte la glace dans la modélisation hydraulique relativement aux changements climatiques (Allard *et al.*, 2011; Beltaos et Burrell, 2003; Beltaos et Tang, 2013; Simard, 2008). Les outils géomatiques permettent aussi de mieux cerner un ensemble de problématiques particulières pour un bassin versant donné (Burch, 2010; Wiederkehr, 2013).

Différents programmes de cartographie des zones inondables ont été mis en place au cours des 40 dernières années¹¹. L'intégration de ces cartes aux schémas d'aménagement s'est fait difficilement, repoussant parfois l'application des normes restreignant les constructions, les ouvrages et les travaux permis. Ces cartes concernent essentiellement les événements en eau libre¹². Les impacts des changements climatiques sur les inondations associées aux embâcles de glace, aux embâcles de frasil, aux crues éclairs associées à une météo extrême (pluies diluviennes) sont peu documentés (Beltaos et Tang, 2013) et les conséquences sur les territoires sont encore mal connues (Beaulieu, 2007; Gaborit *et al.*, 2010).

L'impact des changements climatiques sur les crues qui définissent les plaines inondables des cours d'eau du sud du Québec est actuellement difficilement quantifiable. En plus d'être très variable selon les différents scénarios de projections du climat, il est aussi très dépendant des caractéristiques des cours d'eau et de l'étendue de leur bassin versant. Du point de vue de l'adaptation, il reste pertinent de prévoir des modes de gestion des plaines inondables pour faire face à ces changements et ainsi augmenter la résilience des communautés malgré l'incertitude.

À ce sujet, l'approche basée sur le concept d'espace de liberté des cours d'eau consiste, d'une part, à identifier des espaces d'inondabilité et de mobilité du cours d'eau et, d'autre part, à appliquer un mode de gestion de cet espace permettant de le laisser évoluer sans le contraindre par des interventions et des aménagements anthropiques, favorisant ainsi le maintien des fonctions physiques du cours d'eau et le soutien des écosystèmes. Comme option d'adaptation, elle suppose cependant de nouvelles contraintes à l'aménagement du territoire dont l'acceptabilité sociale, et les conséquences doivent aussi être considérées.

Biron *et al.* (2014) ont développé une méthodologie fondée sur l'hydrogéomorphologie pour définir l'espace de liberté pour deux cours d'eau agricoles (rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est) et pour des rivières plus dynamiques d'un point de vue sédimentaire (rivière Matane) (voir aussi la section 2.5.1.1 Impacts biophysiques – Hydrogéomorphologie). L'espace de liberté des cours d'eau est un cadre de gestion intégrée considérant l'hydrogéomorphologie des rivières. Il vise à identifier des espaces d'inondabilité et de mobilité du cours d'eau où on accepte de le laisser évoluer plutôt que de le contraindre dans un tracé façonné par les interventions anthropiques (Biron *et al.*, 2014). Sous l'hypothèse d'appliquer l'approche en ne considérant aucune expropriation du bâti actuel, les résultats de l'analyse avantages-coûts réalisée suggèrent que l'aménagement d'espaces de liberté serait économiquement avantageux pour les cas étudiés. Les pertes associées au droit de construire et de cultiver dans l'espace de liberté seraient en effet compensées par les réductions des coûts de protection des berges, mais aussi par la valeur accordée au maintien des services écologiques rendus par les milieux humides et les bandes riveraines.

Au Québec, la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (PPRLPI) (Gouvernement du Québec, 2013e) propose un cadre normatif identifiant deux types de zones inondables et de contraintes correspondantes en matière d'aménagement. L'approche hydraulique, cartographiant les territoires inondés selon les niveaux atteints par les crues de récurrence 0-20 et 20100 ans, a été largement appliquée au Québec. Pour les cours d'eau à dynamique hydrosédimentaire élevée, l'emploi d'une approche alternative de type hydrogéomorphologique semble appuyer un aménagement plus optimal de leurs rives et est compatible avec le concept d'espace de liberté. Une étude du (CEHQ, 2014) utilise d'ailleurs cette approche, en complément de l'approche hydraulique, pour la détermination des zones inondables de la rivière de la Fourche.

11 Cf section sur la Gestion de l'eau dans ce chapitre ainsi que : <https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/realisations-Qc.htm>.

12 Inondations qui sont causées par une augmentation significative de la quantité d'eau dans une rivière et non pas par un refoulement dans un secteur donné ou par un embâcle.

Par ailleurs au cours des années, le développement du territoire réalisé bien souvent sans égard aux impacts sur l'hydrologie des rivières, et le remblayage graduel de portions de plaines inondables pour des fins d'immunisation ont eu pour effet d'augmenter certaines vulnérabilités et pourraient rendre pertinent la mise à jour de plusieurs éléments de cartographies de zones inondables produites il y a plusieurs années.

L'urbanisation de zones vulnérables et la pression foncière croissante qui s'y exerce sont à l'origine de risques de plus en plus graves (Dodman *et al.*, 2013; Richardson, 2010; Thomas *et al.*, 2012). La priorité doit viser désormais la préservation des plaines inondables, en tenant compte notamment de leur capacité d'expansion lors des crues (Biron *et al.*, 2013), la maîtrise de l'urbanisation, par exemple en faisant respecter l'interdiction de construire en zone inondable, et la prise en compte des risques dans les différents modes d'utilisation du sol dans une perspective d'adaptation aux changements climatiques et de développement durable (Blais *et al.*, 2012; Dodman *et al.*, 2013; Houston *et al.*, 2011; Richardson, 2010).

Dans ce contexte, il apparaît essentiel de développer une meilleure connaissance des aléas associés aux inondations, notamment en ce qui a trait aux phénomènes de crues éclair et d'embâcles. De nouvelles approches méthodologiques en matière d'évaluation des risques doivent être développées au regard notamment de considérations économiques. Une compréhension globale des aléas qui affectent un milieu bâti, une analyse minutieuse du niveau de vulnérabilité (Richardson, 2010; Thomas *et al.*, 2012) (figures 2-39), la recherche de solutions intégrées d'atténuation basées sur une analyse coûts-bénéfices (Houston *et al.*, 2011; ONERC, 2010; Richardson, 2010), une utilisation des services écologiques des milieux humides, et la protection des bandes riveraines par les différents paliers gouvernementaux sont des avenues prometteuses dans la perspective d'une stratégie préventive et d'atténuation des risques d'inondation.

Érosion du littoral

L'érosion du littoral en milieu marin est une problématique majeure pour les régions de la Côte-Nord, du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine. Au cours des dernières décennies, elle a suscité des déboursés considérables qui ont servi à des déplacements de routes et à la construction d'ouvrages de protection (Savard *et al.*, 2008 ; Bernatchez *et al.*, 2015).

Compte tenu des changements climatiques, le scénario le plus probable à l'horizon 2050 pour la majorité des secteurs côtiers comprend, relativement à la tendance historique, un accroissement de l'érosion côtière avec des reculs moyens qui varient selon les secteurs (Bernatchez *et al.*, 2008; Bernatchez *et al.*, 2014). Ce scénario prévoit, entre autres, une diminution importante de la couverture de glace. La hausse du niveau marin estimée avec un degré de confiance élevée par le GIEC, qui touche déjà certaines zones, se poursuivra (GIEC, 2012) et « aura pour effet d'accroître l'érosion et la submersion côtières particulièrement pour les régions des Îles-de-la-Madeleine et de Percé. De plus, le réchauffement des températures devrait augmenter les redoux hivernaux et les pluies hivernales, ce qui favorisera l'instabilité des falaises sensibles aux processus cryogéniques et hydrogéologiques » (Bernatchez *et al.*, 2008, p. VII).

Le problème de l'érosion des berges du fleuve Saint-Laurent est fort préoccupant, particulièrement lorsque l'on considère que la majorité de la population se concentre sur le littoral (Bernatchez *et al.*, 2008). Des évaluations préliminaires révèlent que le problème de l'érosion des littoraux du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine pourrait affecter quelques centaines de bâtiments de même que plus d'une centaine de kilomètres de tronçons routiers du ministère des Transports du Québec (MTQ) et du réseau municipal (MTQ, 2013b; Savard *et al.*, 2008).

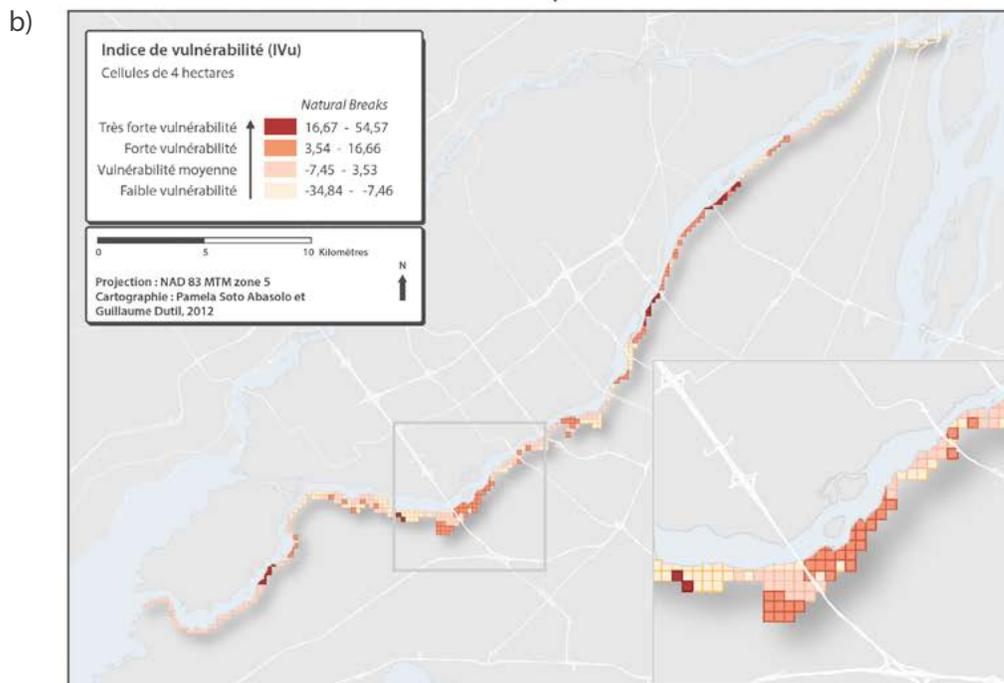
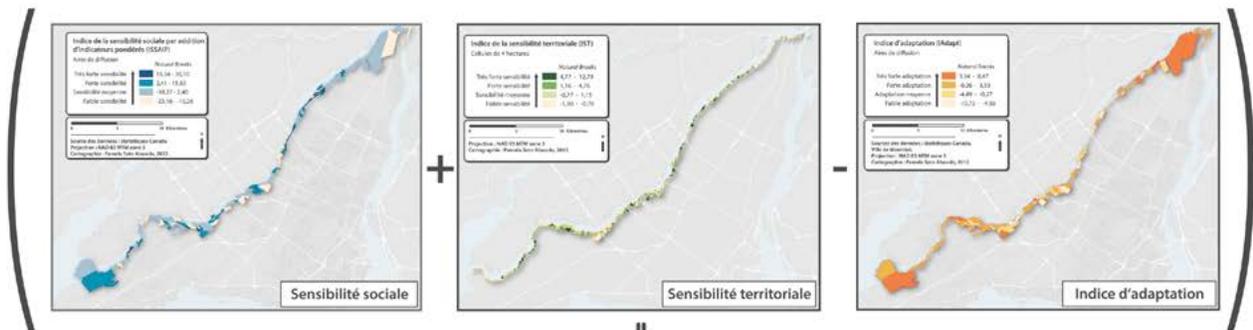
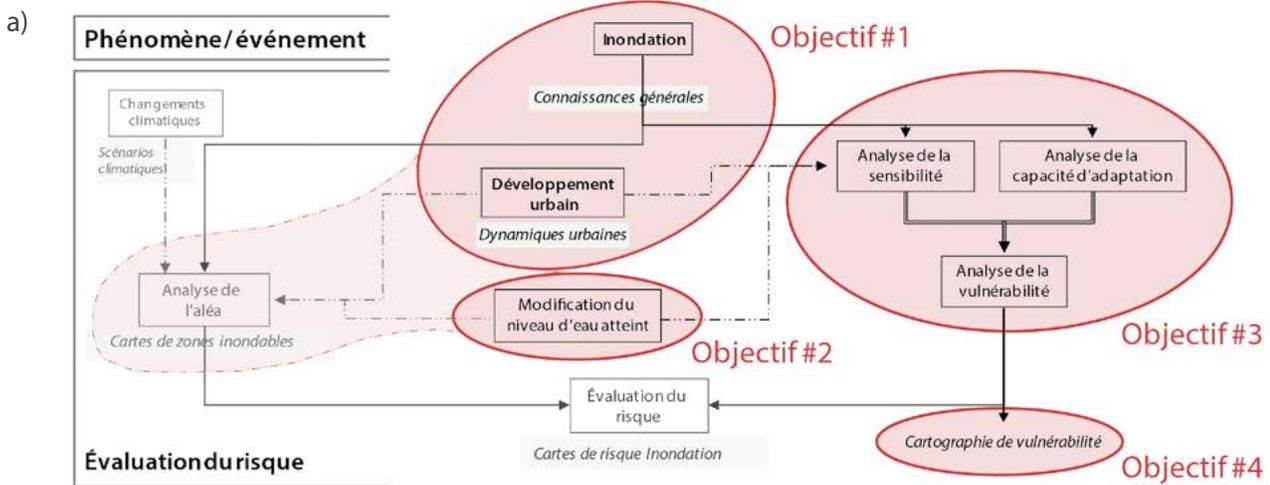


Figure 2-39 Schéma méthodologique (a) : La démarche d'évaluation du risque se divise en quatre étapes : la réalisation d'un état des lieux des zones inondées historiquement pour la Ville de Montréal; la modélisation de niveaux d'eau possiblement atteints lors de débordement de la rivière des Prairies; l'analyse de la vulnérabilité des secteurs en zones inondées maximales par des indices synthétiques; et la cartographie des différentes typologies de vulnérabilité en fonction des multiples niveaux d'eau possiblement atteints. (b) résultats d'une analyse de vulnérabilité : La mise en relation des résultats de l'indice de la **sensibilité sociale**, de l'indice de la **sensibilité territoriale** et de l'indice de la **capacité d'adaptation** permet, pour chaque unité géographique, de déterminer la vulnérabilité totale de la zone d'étude grâce à l'**indice de vulnérabilité**.

Source : Thomas et Bleau (2012)

Les interventions sur le système côtier doivent reposer sur une connaissance approfondie des phénomènes en cause et être planifiées à l'intérieur d'un cadre global (Bernatchez et al., 2008). Le travail d'acquisition des connaissances effectué pour les 2 000 km du littoral nord-côtier, l'analyse de risques sous-jacents, ainsi que les efforts de réglementation¹³ qui ont été faits ont révélé la nécessité, notamment pour le gouvernement, d'intervenir de manière plus concrète et mieux structurée. Les autorités gouvernementales ont d'ailleurs créé des attentes en ce sens au sein de la population et parmi les élus municipaux concernés (Plante et al., 2007). Le problème de l'érosion du littoral commande un cadre organisationnel d'intervention gouvernementale, intégré et concerté, couvrant l'ensemble des régions affectées (Magnan, 2013).

Bien que du travail reste à faire en matière d'acquisition de connaissances, quelques municipalités (locales et régionales) ont adopté une réglementation sévère pour gérer le développement dans les zones jugées à risque d'érosion. Afin d'atténuer certaines problématiques d'érosion, certaines municipalités (Sept-Îles, Pointe-aux-Outardes, Pointe-Lebel, Les Escoumins) se sont dotées d'un plan de gestion de la zone côtière et ont mis en place ou planifient des actions comme le déplacement de route et de maisons pour les éloigner des berges, envisagent la mise en place d'épis ou la recharge en sable de certaines plages, des solutions qui peuvent générer des impacts environnementaux, mais généralement moins importants que des murs ou de l'enrochement qui ont pour effet d'aggraver les problèmes d'érosion selon le type de côte.

Selon de nombreuses sources (Anthoff et al., 2010; Brown et al., 2011; Nicholls et al., 2007; Stern, 2006; Tol, 2009; Wong et al., 2014), il est nettement préférable tant sur le plan économique que social et environnemental, d'adapter nos pratiques et modalités d'aménagement des zones côtières à la nouvelle réalité que de laisser faire et subir les changements qui s'annoncent. Réagir à une tempête destructrice qui inonde de grands secteurs coûte plus cher et cause beaucoup plus de problèmes que de prévenir ce type d'événement en mettant en place diverses solutions d'adaptation (Bernatchez et al., 2015). Par exemple, après avoir localisé les zones à risque, il est préférable d'éviter de construire des bâtiments dans ces zones que de subir les impacts des changements climatiques après avoir construit (Mercier et Chadenas, 2012, p. 59). L'aménagement des villes et des villages doit être revu afin de mieux zoner les territoires côtiers.

Glissements de terrain et avalanches

Le Québec est exposé aux risques de glissement de terrain en raison de la présence de vastes dépôts de sols argileux dont les propriétés sont très particulières. Ces sols se rencontrent dans les parties les plus habitées du territoire, notamment dans la vallée du Saint-Laurent, la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et la vallée de l'Outaouais (Demers et al., 2008).

« L'augmentation des températures en hiver et au printemps change la forme des précipitations, la hauteur de la couverture de neige et les températures du sol. À long terme, les changements climatiques influent sur la stabilité de grands volumes de matériaux dans les zones de glissement. Tandis que des petites zones de glissement et d'ovailles peuvent devenir instables à court terme sous l'action d'événements extrêmes tels que des précipitations intenses ou des orages » (Raetzo et Lateltin, 2003, p. 81).

¹³ La Municipalité régionale de comté des Sept-Rivières a adopté au printemps 2005 un règlement de contrôle intérimaire sur la base de 300 feuillets de cartes à haute résolution illustrant le zonage du risque. Des cartes de zones de contraintes relatives aux glissements de terrain et à l'érosion côtière ont été produites par le gouvernement du Québec pour les territoires des Municipalités régionales du comté de la Haute-Côte-Nord, de Manicouagan et de Minganie.

Compte tenu des effets attendus des changements climatiques, les risques de pertes de vies humaines et les dommages aux biens et aux équipements et infrastructures consécutifs à des glissements de terrain sont susceptibles de s'accroître en raison du développement urbain au cours des dernières décennies dans les zones sensibles aux glissements de terrain (GIEC, 2012; IPCC, 2014c).

Dans le Nord du Québec, des études ont montré que plusieurs conséquences de l'augmentation des températures et les changements du régime des précipitations sont déjà observables. Notamment, la dégradation du pergélisol (Allard *et al.*, 2007; Calmels *et al.*, 2008; L'Hérault *et al.*, 2013). Cette dégradation a, entre autres, pour conséquence des glissements de terrain qui sont un risque pour la population et causent des dommages aux infrastructures (Barrett et Gagnon, 2013, voir aussi le chapitre 2.3). C'est une problématique préoccupante si on considère que les projections de certains modèles climatiques indiquent que cette tendance se poursuivra (GIEC, 2007; Sushama *et al.*, 2007). Les impacts des changements climatiques surviennent alors que les populations sont en hausse et que les changements culturels, économiques et sociaux transforment les modes de vie traditionnels (L'Hérault *et al.*, 2013). Pour réduire les risques encourus par les bâtiments, une cartographie des conditions du pergélisol constitue un outil essentiel de planification urbaine pour une adaptation à long terme (L'Hérault *et al.*, 2013). Pour quatre villages nordiques, des cartes de potentiel d'aménagement ont été produites en combinant différentes informations, dont les contraintes sévères¹⁴ observées sur le territoire, les conditions du pergélisol et la topographie (L'Hérault *et al.*, 2013). Un addenda au Guide administratif – Villages nordiques a été produit dans le cadre du projet de Barrett et Gagnon (2013) afin d'aider les gestionnaires à tenir compte des changements climatiques dans des services municipaux spécifiques. Des cartes montrant les zones sensibles et les zones stables pour y déposer la neige lors du déblaiement des rues ont été produites pour chaque village nordique pour contribuer à réduire les risques (figure 2-40).

En ce qui concerne les avalanches, il est important de sensibiliser différents acteurs (sécurité, tourisme, citoyen, autorités municipales, régionales et provinciales, etc.) sur une problématique qui demeure encore à documenter. Il semble que l'établissement du rôle des changements climatiques sur l'activité avalancheuse soit difficile à faire étant donné la pluralité des types d'avalanches ainsi que la rareté des données disponibles (Auclair, 2012). Des études récentes (Fortin *et al.*, 2011 ; Fortin et Héту, 2014) montrent cependant des liens entre les facteurs de déclenchement des avalanches et certaines variables climatiques.

« L'analyse discriminante des journées avalancheuses et non avalancheuses a permis de démontrer que l'occurrence des avalanches était fortement corrélée à la quantité de neige tombée au cours des 24, 48 ou 72 dernières heures. L'analyse des températures, et tout particulièrement de la fréquence des cycles de gel-dégel, permet d'ajouter une seconde dimension dans la compréhension du phénomène. La hausse des températures au-dessus du point de congélation conduit au déclenchement d'avalanches de neige mouillée (par humification et surcharge du couvert neigeux). Ce scénario avalancheux arrive au second rang des facteurs explicatifs, juste derrière les chutes de neige abondante » (Fortin et Héту, 2014, p.22).

¹⁴ Les contraintes sévères, identifiées par photo-interprétation, analyse de données LIDAR et observations sur le terrain, regroupent les secteurs à risque de glissements de terrain, les pentes susceptibles au fluage du pergélisol, les zones mal drainées sujettes aux suintements provoquant la formation de glaçages et de buttes saisonnières à noyau de glace et les secteurs à risque de thermoérosion.



Figure 2-40 Exemple de carte localisant les sites d'empilement de la neige

Source : Barrett et Gagnon (2013)

2.5.2.2 Aménagement du territoire – milieux naturels

Faits saillants

- ▶ Les écosystèmes et les habitats naturels, la matrice du territoire dans lequel nous vivons, sont des éléments incontournables dans la planification de l'aménagement du territoire et de l'adaptation aux changements climatiques;
- ▶ À l'échelle d'une région ou d'un bassin versant, les services rendus par les écosystèmes sont énormes, autant en termes environnementaux qu'économiques;
- ▶ Plusieurs stratégies d'adaptation aux changements climatiques pour la gestion de la biodiversité ne peuvent être planifiées et mises en oeuvre qu'à l'échelle régionale, dans le cadre d'un aménagement territorial concerté impliquant tous les acteurs concernés;
- ▶ Augmenter la connectivité des paysages, accroître la taille et le nombre des zones dédiées à la conservation, les intégrer dans un réseau d'aires protégées et réduire les menaces pesant sur les écosystèmes et la biodiversité sont parmi les stratégies les plus reconnues et sont à l'étude au Québec;
- ▶ L'agroforesterie n'en est qu'à ses balbutiements au Québec, mais elle pourrait devenir dans certaines régions une mesure d'adaptation sectorielle, tout en contribuant à l'amélioration des paysages agricoles.

L'aménagement du territoire doit être mis en oeuvre en tenant compte des changements climatiques et de leurs effets sur les éléments naturels qui le caractérise : les paysages, les écosystèmes terrestres et aquatiques, et l'ensemble du monde vivant qui l'occupe. D'ailleurs, l'intégration des changements climatiques dans la planification ainsi que la coordination des acteurs à l'échelle régionale sont parmi les stratégies les plus recommandées par les experts pour la gestion de la biodiversité dans un contexte de changements climatiques (Heller et Zavaleta, 2009). Le gouvernement du Québec s'est résolument engagé dans cette voie avec la *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques* lancée en 2012, dans laquelle l'aménagement du territoire est un domaine d'intervention clé (Gouvernement du Québec, 2012c). Quant au *Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020* qui l'accompagne, un de ses objectifs est de « soutenir les municipalités et les collectivités dans leurs initiatives de réduction des GES, d'adaptation aux changements climatiques et d'aménagement durable du territoire ».

Dans cette perspective, les écosystèmes et les habitats naturels, qui sont la matrice du territoire dans lequel nous vivons, deviennent des éléments incontournables de l'équation dans la planification de l'aménagement du territoire et de l'adaptation aux changements climatiques (Siron, 2013). L'adaptation du territoire et des régions ne pourra en effet se réaliser pleinement qu'en assurant la connectivité des paysages, la résilience des écosystèmes, la conservation de la biodiversité, le maintien des services écologiques et l'utilisation durable des ressources naturelles. À cet égard, la biodiversité est la clé de la résilience des milieux de vie (Perreault, 2013).

Plusieurs stratégies d'adaptation aux changements climatiques pour la gestion de la biodiversité ne peuvent être planifiées et mises en oeuvre qu'à l'échelle régionale, dans le cadre d'un aménagement territorial concerté impliquant tous les acteurs-clés : gouvernements, municipalités, organismes environnementaux de même que représentants locaux et communautaires. Accroître la taille et le nombre des aires de conservation de biodiversité et les relier par des réseaux de corridors écologiques permettant d'augmenter la connectivité des paysages sont parmi les stratégies de conservation les plus recommandées pour l'adaptation aux changements climatiques (Heller et Zavaleta, 2009; Hodgson *et al.*, 2009; Mawdsley *et al.*, 2009). La figure 2-41 illustre les concepts et les principes à la base de ces stratégies qui ont pour buts de préserver les zones du territoire les plus riches en biodiversité et de renforcer la résilience des grands massifs forestiers naturels face aux changements climatiques. Ce sont là les conditions nécessaires au maintien à long terme des services écologiques que nous procurent les écosystèmes et la biodiversité et qui assurent notre bien-être. Cela pourrait passer par toute une variété d'approches et d'outils de conservation déjà disponibles; par exemple, des initiatives gouvernementales (p. ex. aires protégées) par le biais des schémas d'aménagement des Municipalités Régionales des comté et des plans d'urbanisme des municipalités (voir l'encadré dans le chapitre 2.4), d'initiatives locales pilotées par des ONGE ou des regroupements citoyens ou encore par des actions individuelles de propriétaires de terrains privés.

Certaines de ces stratégies ont été étudiées récemment pour en évaluer la pertinence et la faisabilité dans le contexte environnemental et climatique du Québec. Dans les basses terres du Saint-Laurent, des réseaux de corridors écologiques s'appuyant sur les « hot spots » de biodiversité que sont les massifs forestiers des collines Montérégiennes ont été modélisés dans le but de faciliter le déplacement vers le nord des espèces migrant sous l'influence du réchauffement climatique anticipé (voir le chapitre 2.4). Cette modélisation de réseaux écologiques, basée sur des scénarios futurs d'utilisation des terres et de changements climatiques (Gonzalez *et al.*, 2013), aidera les décideurs régionaux à faire des choix éclairés dans la planification du territoire et l'utilisation future des terres dans un contexte de changements climatiques (figure 2-42).

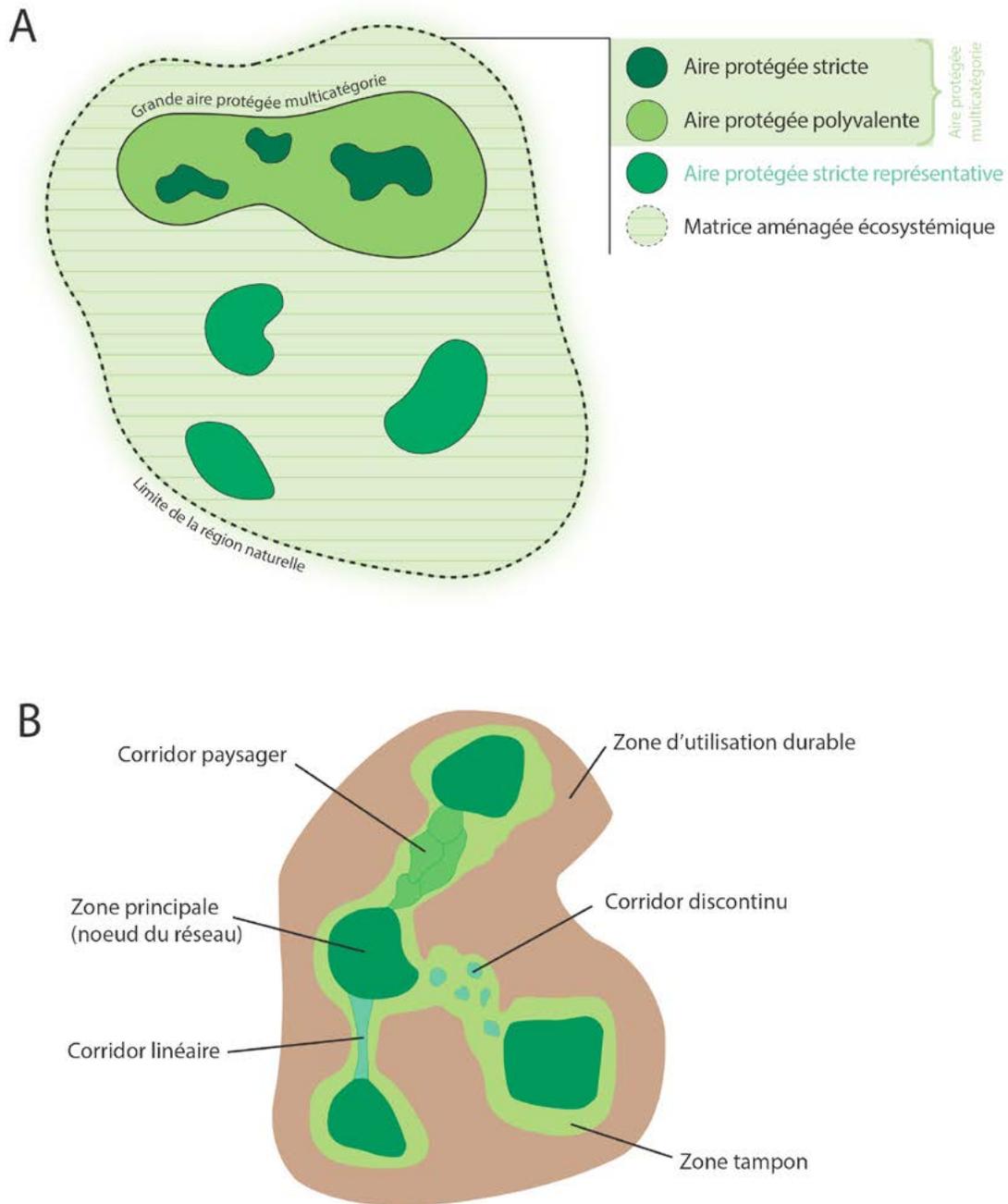


Figure 2-41 Illustration simplifiée des concepts qui sous-tendent les stratégies de conservation de la biodiversité à l'échelle régionale dans le contexte des changements climatiques.

Légende: (A) Approche régionale pour la conception d'un réseau d'aires protégées multi-catégories; (B) Aménagement de corridors écologiques pour le maintien de la connectivité des paysages et de la biodiversité. Ces stratégies complémentaires s'inscrivent dans un aménagement territorial planifié.

Sources : Bélanger et al. (2013d) pour (A) ; Gonzalez et al., (2013) pour (B).

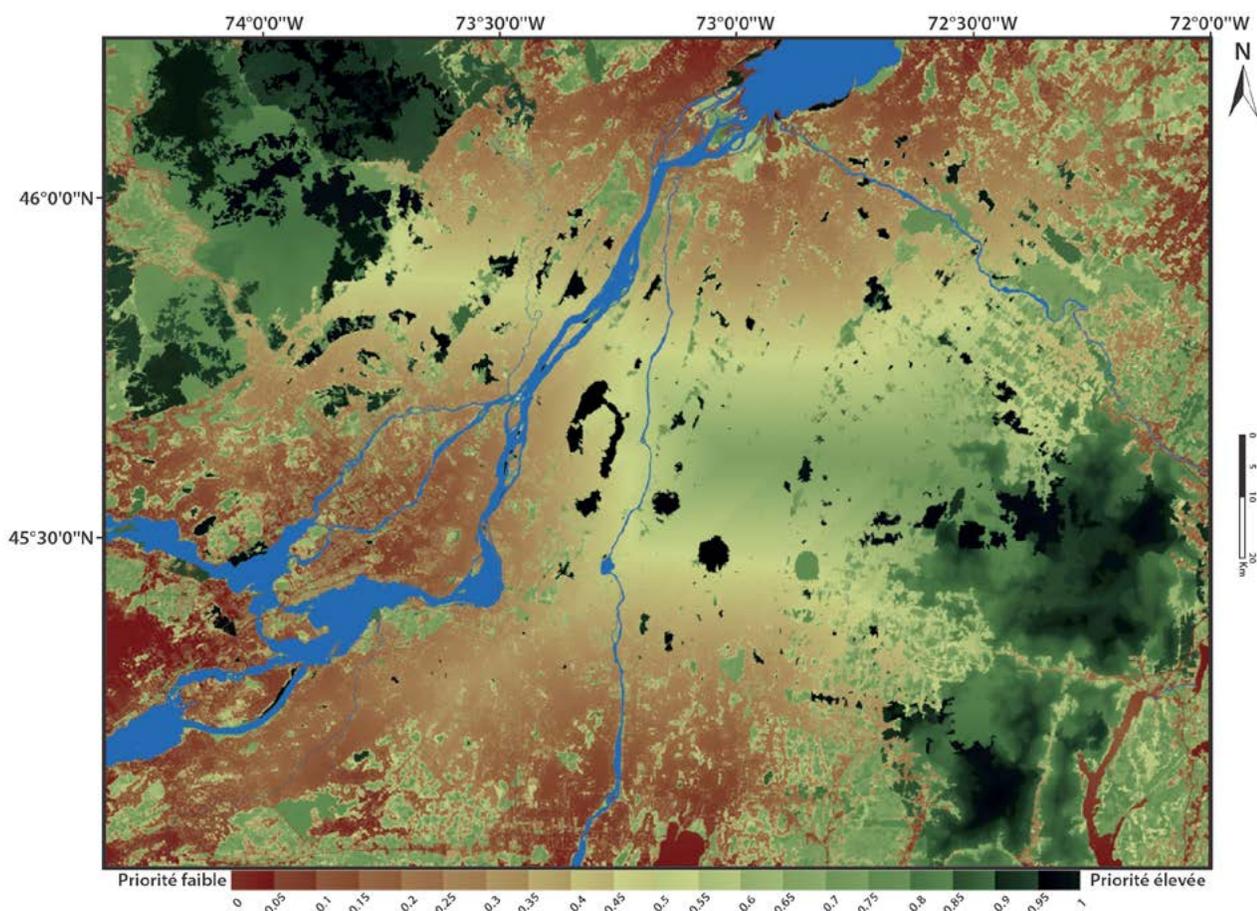


Figure 2-42 Exemple de carte modélisée permettant la priorisation de corridors écologiques robustes aux changements climatiques.

Légende : Priorisation du paysage en fonction des conditions de la couverture terrestre projetée en 2050, basée sur un scénario d'utilisation des terres de type « statu quo » et un scénario de changements climatiques. Les couleurs vont du marron foncé (zone de faible priorité) au vert foncé (haute priorité). On note en particulier l'importance des collines montérégiennes (au centre de la carte) qui permettent d'assurer un lien écologique à travers la matrice agricole très fragmentée de la Montérégie, entre les grands massifs forestiers des Montagnes Appalachiennes (au sud-est) et des Montagnes Laurentiennes (au nord-ouest).

Source : Gonzalez et al. (2013)

Ce concept de connectivité écologique est de plus en plus considéré par les groupes environnementaux qui visent la conservation de la biodiversité, mais également par les paliers décisionnels, gouvernement et municipalités, qui ont à gérer les activités humaines sur leur territoire, tout en respectant les lois et règlements sur la protection de l'environnement. Un bel exemple de collaboration entre ces différents acteurs est illustré par l'initiative de l'organisme Corridor appalachien qui travaille de concert avec divers intervenants dont le ministère des Transports du Québec, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, l'Université de Sherbrooke ainsi que les Municipalités Régionales du comté et les municipalités du territoire concerné pour identifier des corridors et des passages fauniques sur l'autoroute 10 qui traverse un segment de la chaîne des Appalaches en Estrie (Marie-Josée Auclair, comm. pers.).

À une échelle plus locale, mais tout aussi importante, l'agroforesterie pourrait également contribuer à restaurer une certaine diversité des paysages dans les régions agricoles où les habitats ont été très fragmentés, voire complètement déboisés. L'agroforesterie n'en est qu'à ses balbutiements au Québec, mais pourrait devenir dans certaines régions du sud du Québec une mesure sectorielle d'adaptation en contribuant notamment à minimiser les impacts biophysiques et économiques des changements climatiques sur l'agriculture traditionnelle, tout en diversifiant les sources de revenus des producteurs et en augmentant la valeur totale des biens et services rendus à la société, incluant des services écologiques non marchands particulièrement importants pour l'atténuation et l'adaptation (Dupras *et al.*, 2013b; Olivier, 2013; voir aussi l'encadré sur les services écologiques dans le chapitre 2.4).

Une façon efficace de réduire les perturbations sur les écosystèmes à grande échelle est de créer des zones protégées où la conservation de la biodiversité, tant au niveau des espèces que des écosystèmes et des paysages, est le but principal. Le gouvernement du Québec poursuit son objectif de porter le réseau d'aires protégées à 12 % de la superficie totale du territoire québécois (Gouvernement du Québec, 2011). Toutefois, avec les profonds bouleversements que les changements climatiques actuels et projetés vont avoir sur les écosystèmes, on peut se questionner sur le rôle même des aires protégées actuelles et leur représentativité dans le futur (Berteaux *et al.*, 2014). C'est dans ce contexte que (Bélanger *et al.*, 2013d) proposent de revoir la conception du réseau d'aires protégées au Québec en visant la conservation de plus grands écosystèmes plus résilients face aux changements climatiques. Cette nouvelle approche se base sur des aires protégées « multicatégoriques » combinant des aires protégées strictes –les noyaux durs de conservation– entourées par des aires protégées « polyvalentes » (figure 2-41A). Ces dernières agiraient comme zones tampons dans lesquelles certaines activités de gestion forestière seraient permises, pourvu qu'elles rencontrent les principes de la gestion écosystémique. À cet égard, il est possible d'innover. Ainsi, une première « servitude de conservation forestière » a été acquise en 2012 par Conservation de la Nature Canada (CNC) sur le mont Chagnon en Estrie. De telles servitudes ont pour but de concilier conservation des écosystèmes et exploitation forestière; la ressource forestière est maintenue en terres privées et son exploitation à perpétuité est réalisée suivant un aménagement durable de la forêt qui conserve des corridors boisés afin d'assurer la protection d'espèces et d'habitats fragiles. Ce cadre de gestion plus flexible du territoire pourrait permettre d'assurer la protection de grandes zones forestières dans des régions où les conditions socioéconomiques peuvent éventuellement limiter l'établissement d'aires de conservation strictes (Bélanger *et al.*, 2013d). On notera la complémentarité des deux concepts illustrés dans la figure 2-41, les aires protégées (A) pouvant être reliées par des corridors forestiers (B) pour créer un véritable réseau écologique offrant une diversité d'habitats et permettant le déplacement des espèces fauniques d'une portion du territoire à l'autre.

Les milieux humides sont d'autres écosystèmes que les aménagistes du territoire devraient considérer avec grand intérêt, à cause notamment de leur importance écologique, fournissant en particulier des habitats de qualité à une multitude d'espèces floristiques et fauniques (voir le chapitre 2.4). Les milieux humides nous procurent des services écologiques qui atténuent les impacts négatifs des changements climatiques sur les bassins versants, notamment sur le régime hydrologique, en régulant les crues et les inondations, et la rétention d'eau lors des périodes d'étiages. Ces services écologiques sont au coeur de l'approche de gestion des cours d'eau, qui prend en compte l'espace de liberté des rivières et qui contribue également, à la connectivité écologique et à l'intégrité du territoire (Biron, 2013). À l'échelle territoriale, ces services écologiques contribuent à renforcer la résilience des écosystèmes et des populations aux changements climatiques (Dupras *et al.*, 2013a). Or, les milieux humides sont en constante disparition, notamment dans le sud du Québec, au détriment des secteurs agricole et sylvicole surtout, mais aussi perturbés par les activités industrielles, commerciales et

résidentielles (Pellerin et Poulin, 2013). Dans une région très urbanisée comme la grande région de Montréal, où les milieux humides subissent de fortes pressions anthropiques, ils représentent, avec les écosystèmes forestiers, les milieux naturels ayant la plus forte valeur économique non marchande (Dupras et al., 2013a; Dupras et Alam, 2014). L'outil géomatique, développé par Fournier *et al.* (2013) pour permettre l'évaluation des milieux humides, fournit, pour la première fois au Québec, un cadre comptable sur lequel la prise de décision et la planification du territoire pourront s'appuyer, en tenant compte des fonctions écologiques et de la valeur économique de ces milieux, mais aussi de leur évolution avec les changements climatiques (voir aussi le chapitre 2.4).

Finalement, toutes ces stratégies contribuent à l'adaptation basée sur les écosystèmes, une approche qui consiste à conserver les écosystèmes en santé pour renforcer la résilience des populations humaines, diminuer leurs vulnérabilités et assurer leur adaptation aux changements climatiques (Colls *et al.*, 2009; TNC, 2009; The World Bank, 2009) (voir aussi la section 3.2.1 dans la partie 3). Cette approche émergente devrait toujours être au coeur de l'aménagement du territoire, car c'est une condition essentielle pour que celui-ci se réalise de manière durable. Elle permet en effet de conserver les caractéristiques et les éléments biophysiques les plus importants du paysage régional pour le maintien de la structure et du fonctionnement des écosystèmes. Certaines régions du Québec, notamment dans le sud de la province, posent un grand défi sur le plan de l'aménagement durable, car le territoire est déjà très fragmenté et dégradé par une multitude d'activités anthropiques qui ont eu lieu au cours du temps et dont les impacts se sont cumulés. C'est le cas des basses-terres du Saint-Laurent et de certains bassins versants du sud du Québec qui ont fait l'objet de nombreuses études et recherches en vulnérabilités, impacts et adaptation aux changements climatiques ces dernières années. À cet égard, la Montérégie – ou certains de ses bassins versants – pourrait être une bonne région-pilote pour la mise en place d'un plan d'aménagement territorial visant l'adaptation aux changements climatiques à l'échelle régionale (Siron, 2013).

2.5.3 Conclusion

Les principaux changements climatiques attendus, qui affectent et affecteront les milieux, sont une modification du régime des précipitations et une hausse des températures. Ces changements ont, entre autres, pour conséquence des effets directs et indirects sur le milieu naturel et l'environnement bâti, la santé et la sécurité des populations, l'économie, l'approvisionnement en eau et son traitement, etc. Plusieurs de ces conséquences représentent des enjeux transversaux pour l'ensemble des acteurs de l'adaptation (chercheurs, décideurs, gestionnaires, etc.). La gestion de l'eau et l'aménagement du territoire, abordés dans ce chapitre, représentent deux des secteurs où les enjeux sont transversaux et sur lesquels les actions d'adaptation passées, actuelles et à venir sont essentielles.

Concernant la gestion de l'eau, comme les changements climatiques auront des impacts sur le régime hydrique, la disponibilité et la qualité de l'eau représentent des enjeux majeurs. *L'Atlas hydroclimatique du Québec méridional* a permis de dresser un portrait des impacts anticipés à l'horizon 2050 sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité. Bien que l'on ne puisse associer directement les modifications du régime hydrique à l'effet des changements climatiques, il apparaît que plusieurs cours d'eau du Québec, depuis les vingt dernières années, présentent des étiages plus sévères et plus longs, des crues de printemps moins intenses et une plus grande variabilité des débits. D'autres travaux ont permis de valider que la réduction anticipée des débits d'étiages sous l'effet des changements climatiques et, avec elle, la réduction de la capacité de dilution des

cours d'eau risque d'avoir une incidence négative sur la qualité de l'eau. Des études se sont aussi penchées sur les améliorations à apporter aux outils de modélisation pour tenir compte des besoins en information pour la gestion de l'eau à différentes échelles spatiales et temporelles. Relativement aux eaux souterraines, bien que la connaissance de l'impact des changements climatiques sur la recharge et l'évolution des nappes se soit améliorée, elle est encore peu développée. Les défis demeurent donc considérables dans la réalisation de projections qui évalueront l'impact des changements climatiques sur les crues les plus fortes avec un niveau de confiance élevé.

Concernant l'aménagement du territoire, puisque plus de 80 % des Québécois vivent en milieux urbanisés, que les moyennes climatiques changent et qu'une modification de la fréquence, de l'intensité ou de la durée des événements extrêmes est constatée, l'adaptation et la résilience de ces milieux représentent des défis majeurs. La variété et la complexité du territoire; la densité de la population; l'interdépendance, la nature et le vieillissement des infrastructures; le contexte législatif et fiscal relatif à la gestion du territoire; sont autant d'éléments à considérer lorsqu'il est question d'adaptation aux changements climatiques. Des avancées ont été faites dans plusieurs domaines : on connaît maintenant mieux les impacts des pluies intenses en milieux urbains; les connaissances sur l'hydrologie en eau libre sont aussi bien développées; le problème de l'érosion côtière est beaucoup mieux documenté, tant en ce qui concerne les causes, les impacts que les processus d'intervention qui requièrent une planification à l'intérieur du cadre organisationnel gouvernemental, intégré et concerté, couvrant l'ensemble des régions affectées; la dégradation du pergélisol et ses conséquences sont également mieux comprises et la cartographie des conditions du pergélisol constitue un outil essentiel de planification urbaine pour une adaptation à long terme; et certaines stratégies pour la conservation de la biodiversité (corridors écologiques, aires protégées, protection des milieux humides) ont été étudiées pour la première fois dans le contexte des changements climatiques au Québec et fournissent des informations fort utiles pour planifier la mise en oeuvre de l'adaptation basée sur les écosystèmes à l'échelle régionale. Des méthodes et des outils ont été développés pour analyser la vulnérabilité des populations, des infrastructures, des territoires et des écosystèmes. Bien qu'essentiels, ces travaux ont créé des attentes au sein de la population et parmi les élus municipaux, et la mise en place ainsi que le suivi d'actions concrètes d'adaptation planifiée sont maintenant attendus dans ces milieux.

Par ailleurs, du travail reste à faire concernant l'amélioration des connaissances relatives aux impacts des changements climatiques sur les inondations associées aux embâcles de glace, aux embâcles de frasil et aux crues éclairs, lesquelles sont peu documentées. Il en va de même avec le phénomène des avalanches qui représente une problématique qui demeure encore à documenter. Les enjeux liés à l'environnement bâti et au milieu naturel dans un contexte de changements climatiques, telles la diversité des acteurs et des organisations qui interviennent, l'inégalité de leurs ressources ainsi que les différentes échelles d'actions, entraînent des situations complexes. Réfléchir à ces enjeux oblige à s'attarder sur la capacité collective à les traiter.

RÉFÉRENCES

ACIA. (2004). Impact of a warming climate. Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. 139 p.

Adam-Poupart, A., Labrèche, F., Smargiassi, A., Duguay, P., Busque, M.-A., Gagné, C. et Zayed, J. (2012). Impacts des changements climatiques sur la santé et la sécurité des travailleurs (Rapport R-733). Montréal, Québec : Études et recherches IRSST. 45 p.

Adam-Poupart, A., Labrèche, F., Smargiassi, A., Duguay, P., Busque, M.-A., Gagné, C., Rintamäki, H., Kjellstrom, T. et Zayed, J. (2013). Climate Change and Occupational Health and Safety in a Temperate Climate : Potential Impacts and Research Priorities in Quebec, Canada. *Industrial Health*, 51(1), 68–78.

Adam-Poupart, A., Smargiassi, A., Busque, M.A., Duguay, P., Fournier, M., Zayed, J. et Labrèche, F. (2014). Summer outdoor temperature and occupational heat-related illnesses in Québec (Canada). *Environmental Research*, 134, 339–344.

Aecom. (2012). Toronto Hydro-Electric System Public Infrastructure Engineering Vulnerability Assessment Pilot Case Study. Toronto, Ontario. 61 p. Repéré à http://www.pievca.ca/e/casedocs/TorontoHydro/Toronto_Hydro_PIEVC_Pilot_Case_Study_Final_Report.pdf

Aguilera, A., Alpert, P., Dukes, J. et Harrington, R. (2010). Impacts of the invasive plant *Fallopia japonica* (Houtt.) on plant communities and ecosystem processes. *Biological Invasions*, 12(5), 1243–1252.

Ainsworth, E.A et Long, S.P. (2005). 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. *The New phytologist*, 165(2), 351–71.

Aitken, S.N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T. et Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), 95–111.

Al Amari, C., Ben Hassine, S., Bruxelles, C. et Modigliani, S. (2013). Guide d'élaboration d'un plan d'intervention pour le renouvellement des conduites d'eau potable, d'égouts et des chaussées. Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU), Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT). 75 p. Repéré à http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/infrastructures/documentation/guide_plan_intervention.pdf

Alber, K., Allamandola, M., Balbi, S., Bausch, T., Benati, A., Bonzanigo, L., Cetara, L., Chaix, C., Clivaz, C., Colson, A., Cremer, I., Disegna, M., Doctor, M., Dutto, E., Elmi, M., Fosson, J.-P., Frigo, B., Furlani, R., Gallée, H., Garbellini, L., Gessner, S., Giupponi, C., Herntrei, M., Kolbeck, F., Luthe, T., Macchiavelli, A., Matasci, C., Mignone, N., Moretto, D., Muti, S., Pasquetazz, C., Pasutto, I., Peters, M., Peyrache-Gadeau, V., Pipan, P., Pozzi, A., Rosset, T., Rutter S., Scheibel C., Schuckert, M., Siegrist, D., Strobl, A., Urbanc, M., Venuta, M.L. et Wyss, R. (2011). Le changement climatique et son impact sur le tourisme dans l'Espace Alpin. 125 p.

Alberini, A., Gans, W. et Alhassan, M. (2011). Individual and Public-Program Adaptation: Coping with Heat Waves in Five Cities in Canada. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(12), 4679–4701.

Ali, A.A., Blarquez, O., Girardin, M.P., Hély, C., Tinquaut, F., El Guellab, A., Valsecchi, V., Terrier, A., Bremond, L., Genries, A., Gauthier, S. et Bergeron, Y. (2012). Control of the multimillennial wildfire size in boreal North America by spring climatic conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(51), 20966–20970.

Allard, G., Buffin-Bélanger, T. et Bergeron, N. (2011). Analysis of frazil ice as a geomorphic agent in a frazil pool. *River Research and Applications*, 27(9), 1136–1148.

Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.-P. et Tarussov, A. (2007). L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractérisation du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes (Rapport scientifique final pour Ouranos). Québec. 184 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/13_Rapport_Allard2_nord_2007.pdf

Allard, M., L'Hérault, E., Doyon, J. et Sarrazin, D. (2010). Analyse microclimatique adaptée à l'aménagement du village de Salluit (Rapport au Ministère des Affaires municipales, des régions et de l'occupation du territoire du Québec). Québec : Centre d'études nordiques, Université Laval. 42 p.

Allard, M. et Lemay, M. (dir.). (2013). Le Nunavik et le Nunatsiavut: de la Science aux Politiques Publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. Québec : ArcticNet Inc. 315 p.

Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E. et Sarrazin, D. (2013). Le pergélisol et les changements climatiques au Nunavik et au Nunatsiavut : importance en matière d'infrastructures municipales et de transports. Dans M. Allard et M. Lemay (dir.), *Le Nunavik et les Nunatsiavut: de la Science aux Politiques Publiques: Une étude Intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation* (p. 175– 199). Québec : ArcticNet Inc.

Allard, M., Lemay, M., Barrett, M., Sheldon, T. et Brown, R. (2012). De la science aux politiques publiques au Nunavik et au Nuvatsiavut : Synthèse et recommandations. Dans M. Allard et M. Lemay (dir.), *Le Nunavik et les Nunatsiavut: de la Science aux Politiques Publiques: Une étude Intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation*. Québec : ArcticNet Inc. 72 p.

Allard, M. et Pollard, W. (2011). Permafrost and Climate Change in Northern Coastal Canada (Rapport scientifique final pour ArcticNet et Ouranos). Montréal, Québec. 19 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/58_RapportAllard-2011.pdf

Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, Y., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A. et Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684.

Almaraz, J.J., Mabood, F., Zhou, X., Gregorich, E.G. et Smith, D.L. (2008). Climate change, weather variability and corn yield at a higher latitude locale: Southwestern Quebec. *Climatic Change*, 88(2), 187–197.

Al-rousan, T.M., Rubenstein, L.M. et Wallace, R.B. (2014). Preparedness for Natural Disasters Among Older US Adults: A Nationwide Survey. *American Journal of Public Health*, 104(3), 506–511.

Alsos, I.G., Ehrich, D., Thuiller, W., Eidesen, P.B., Tribsch, A., Schonswetter, P., Lagaye, C., Taberlet, P. et Brochmann, C. (2012). Genetic consequences of climate change for northern plants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(January), 2042–2051.

Anctil, A., Franke, A. et Bêty, J. (2014). Heavy rainfall increases nestling mortality of an arctic top predator: experimental evidence and long-term trend in peregrine falcons. *Oecologia*, 174(3), 1033–1043.

Andrey, J., Kertland, P. et Warren, F. (2014). Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport. Dans F. J. Warren et D. S. Lemmen (dir.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatifs aux impacts et à l'adaptation* (p. 233–252). Ottawa, Ontario: Gouvernement du Canada.

Anielski, M. et Wilson, S. (2009). *Counting Canada's Natural Capital : Assessing the Real Value of Canada's Boreal Ecosystems*. Ottawa, Ontario: The Canadian Boreal Initiative, The Pembina Institute. 76 p.

Anquez, P. et Herlem, A. (2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes , impacts et solutions*. Montréal, Québec : Chaire de responsabilité sociale et de développement durable-UQAM. 19 p. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ARROND_RPP_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PDF-ILOTS.PDF

Anthoff, D., Nicholls, R.J. et Tol, R.S.J. (2010). The economic impact of substantial sea-level rise. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(4), 321–335.

ARCC Network. (2014). Behavioural change - its role in affecting change in the built environment and infrastructure sectors. Repéré le 18 novembre 2014, à <http://www.arcc-network.org.uk/arcc-assembly/behavioural-change/>

Arrondissement Saint-Laurent. (2009). *Plan de foresterie urbaine de Saint-Laurent. L'arbre et la biodiversité au coeur de la communauté pour un avenir plus vert*. Montréal, Québec. 40 p. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/arrond_sla_fr/media/documents/plan_foresterie_urb2009.pdf

Arsenault, R., Brissette, F., Malo, J.-S., Minville, M. et Leconte, R. (2013). Structural and Non-Structural Climate Change Adaptation Strategies for the Péribonka Water Resource System. *Water Resources Management*, 27(7), 2075–2087.

ASPC. (2008). *Feuille de renseignements sur la rage*. Agence de la santé publique du Canada (ASPC). Repéré le 25 avril 2014, à <http://www.phac-aspc.gc.ca/im/rabies-faq-fra.php>

ASPC. (2013). *Virus du Nil occidental MONITEUR*. Agence de la santé publique du Canada (ASPC). Repéré le 25 avril 2014, à http://www.phac-aspc.gc.ca/wnv-vwn/mon-hmnsurv-archive-fra.php#a2008_12

ASSS de la Capitale-Nationale. (2012). *Écllosion de légionellose dans la ville de Québec*, Québec, Canada, été 2012. Québec : Agence de la santé et des services sociaux de la Capitale-Nationale, Direction régionale de santé publique. 145 p.

ASSS de la Montérégie. (2011). *Projet herbe à poux 2007-2010 : Réduire le pollen de l'herbe à poux : mission réaliste*. 16 p.

ASSS de la Montérégie. (2013). *Herbe à poux : c'est le temps de passer à l'action!* Repéré le 9 janvier 2014, à http://www.santemonteregie.qc.ca/agence/presse/communiques/detail/assscom_130716.fr.html

ASSS de Lanaudière. (2013). Froid Intense. Repéré le 25 avril 2014, à http://www.agencelanaudiere.qc.ca/ASSS/SantePublique/Pages/FroidIntense.aspx?santepubliqueselect=menu_0i66

ASSS de Montréal. (2012). Audit de potentiel piétonnier actif et sécuritaire (PPAS). Repéré le 13 janvier 2014, à http://www.dsp.santemontreal.qc.ca/dossiers_thematiques/environnement_urbain/thematiques/audit_de_potentiel_pietonnier_actif_securitaire/problematique.html

ASSS de Montréal. (2013). Vague prolongée de froid intense annoncée pour cette semaine : Des mesures d'urgence pour les personnes en situation d'itinérance sont en place à Montréal. Repéré le 25 avril 2014 à <http://agence.santemontreal.qc.ca/detail/article/vague-prolongee-de-froid-intense-annoncee-pour-cette-semaine/>

ASSS de Montréal. (2014). Froid intense. Portail Santé Montréal. Repéré le 25 avril 2014, à <http://www.santemontreal.qc.ca/vivre-en-sante/environnement-sain/froid-intense/>

Atlas Agroclimatique du Québec. (2012). Unités thermiques mais : climat actuel et climat futur. Indices thermiques. Repéré le 14 mai 2014, à <http://www.agrometeo.org/atlas/category/utm/therm/false>

Auclair M.-J. (2012). Avalanches et changements climatiques : Liens possibles ? Magazine découverte – Pour vivre le plain air autrement. Repéré le 23 septembre 2014, à

<http://www.decouvertesmag.com/articlesregions.php?titreID=457&titre=AVALANCHES%20ET%20CHANGEMENTS%20CLIMATIQUES:%20LIENS%20POSSIBLES?>

Audet, R., Côté, H., Bachand, D. et Mailhot, A. (2012). Atlas agroclimatique du Québec : Évaluation des opportunités et des risques agroclimatiques dans un climat en évolution (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 103 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/155_RapportAudetetal2012.pdf

Ausenco Sandwell. (2011). Climate Change Adaption Guidelines for Sea Dikes and Coastal Flood Hazard Land Use - Guidelines for Management of Coastal Flood Hazard Land Use. BC Ministry of Environment. 45 p.

Autixier, L., Mailhot A., Bolduc, S., Madoux-Humery, A.-S., Galarneau, M., Prévost, M., et Dorner, S. (2014). Evaluating rain gardens as a method to reduce the impact of sewer overflows in sources of drinking water. *Science of the Total Environment*, 499: 238-247.

Auzel, P., Gaonac'h, H., Poisson, F., Siron, R., Calmé, S., Belanger, M., Bourassa, M.M., Kestrup, A., Cuerrier, A., Downing, A., Lavallée, C., Pelletier, F., Chambers, J., Gagnon, A.E., Bedard, M.C., Gendreau, Y., Gonzales, A., Mitchell, M., Whiteley, J., et Larocque, A. (2012). Impacts des changements climatiques sur la biodiversité du Québec : Résumé de la revue de littérature. Montréal, Québec. 29 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/231_Revuedelitterature-ResumeWeb.pdf

BAC. (2013). Assurances de dommages au Canada 2013. Bureau d'assurance du Canada/ Insurance Bureau of Canada. Toronto, Ontario. 66 p. Repéré à http://www.ibr.ca/fr/Need_More_Info/documents/IBC_FactBook_FR-vONLINE.pdf

Bachand, D., Lauzon, L. et Bourgeois, G. (2012). Sensibilisation et diffusion d'informations sur les opportunités et les risques associés aux changements climatiques pour l'agriculture au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 47 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/223_RapportBachandetal2012.pdf

Bakkes, J., Bolt, K., Braeuer, I., ten Brink, B., Chiabai, A., Ding, H., Gerdes, M., Jeuken, M., Kettunen, M., Kirchholtes, U., Klok, C., Markandya, A., Nunes, P., van oorschot, M., Peralta-Bezerra, N., Rayment, M., Traversi, C. et Walpole, M. (2008). The Cost of Policy Inaction. The case of not meeting the 2010 biodiversity target. Environment (L. Braat et P. ten Brink dir.). Wageningen, Pays-Bas : Alterra, Wageningen University, Institute for European Environmental Policy. 22 p. Repéré à <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20616833>

Bale, J.S., Masters, G.J., Hodkinson, I.D., Awmack, C., Bezemer, T.M., Brown, V.K., Butterfield, A., Buse, J., Coulson, C. Good, H.E.G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T.H., Lindroth, R.L., Press, M.C., Symrnioudis, I., Watt, A. et Whittaker, J.B. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8(1), 1–16.

Barnett, A.G., Hajat, S., Gasparrini, A. et Rocklöv, J. (2012). Cold and heat waves in the United States. *Environmental research*, 112, 218–24.

Barrett, M. et Gagnon, M. (2013). Renforcement des capacités et sensibilisation face aux changements climatiques pour la gestion publique locale et la planification territoriale au Nunavik (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 77 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/283_RapportBarrettetGagnon2013.pdf

Baudouin, Y., Leprince, J. et Perez, C. (2007). Représentations cartographiques de la Communauté urbaine de Montréal. Conseil régional de l'environnement de Laval. 200 p.

Bayentin, L., El Adlouni, S., Ouarda, T. B. M. J., Gosselin, P., Doyon, B. et Chebana, F. (2010). Spatial variability of climate effects on ischemic heart disease hospitalization rates for the period 1989-2006 in Quebec, Canada. *International journal of health geographics*, 9, 5.

Beaudoin, I. et Blais, É. (2010). Constats d'infraction, accidents de la route et certitude relative de la peine : une évaluation quasi-expérimentale des effets contextuels et structurels de la dissuasion policière, *Canadian Journal of Criminology and Criminal Justice/La Revue canadienne de criminologie et de justice pénale*, 52(5), 471–496.

Beaulieu, B. (2007). Échelonnage de la crue journalière moyenne pour des bassins versants de superficie entre 10 et 360 km² au Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(5), 631 -636.

Beauregard, D., Enders, E. et Boisclair, D. (2013). Consequences of circadian fluctuations in water temperature on the standard metabolic rate of Atlantic salmon parr (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 70(7), 1072–1081.

Becken, S. et Hay, J. (2012). *Tourism and Climate Change Mitigation and Adaptation : From Policy to Practice*. New York: Routledge. 279 p.

Bélanger, C., Huard, D., Gratton, Y., Jeong, D. I., St-Hilaire, A., Auclair, J. C. et Laurion, I. (2013a). Impacts des changements climatiques sur l'habitat des salmonidés dans les lacs nordiques du Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 65 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/206_RapportBelangeretal2013.pdf

Bélanger, D., Gosselin, P., Valois, P. et Abdous, B. (2006a). Vagues de chaleur au Québec méridional : adaptations actuelles et suggestions d'adaptation futures. Québec, Canada : Institut national de santé publique du Québec. 248 p.

- Bélanger, D., Gosselin, P., Valois, P. et Abdous, B. (2006b). Vagues de froid au Québec méridional: adaptations actuelles et suggestions d'adaptations futures. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 210 p.
- Bélanger, D., Gosselin, P., Valois, P. et Abdous, B. (2014). Perceived adverse health effects of heat and their determinants in deprived neighbourhoods: a cross-sectional survey of nine cities in Canada. *International journal of environmental research and public health*, 11(11), 11028–53.
- Bélanger, D., Gosselin, P., Valois, P. et Abdous, B. (2015). Neighbourhood and dwelling characteristics associated with the self-reported adverse health effects of heat in most deprived urban areas: A cross-sectional study in 9 cities. *Health & Place*, 32(0), 8–18. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.healthplace.2014.12.014>
- Bélanger, D., Gosselin, P., Valois, P., Abdous, B. et Morin, P. (2013b). Étude des vulnérabilités à la chaleur accablante : Description des répondants vivant en HLM et hors HLM dans les aires de diffusion les plus défavorisées des neuf villes québécoises les plus peuplées (Rapport R1451). Québec : INRS-Eau, Terre et Environnement. 290 p.
- Bélanger, D., Gosselin, P., Valois, P., Abdous, B. et Morin, P. (2013c). Étude des vulnérabilités à la chaleur accablante : Synthèse de la description des répondants vivant en HLM et hors HLM dans les aires de diffusion les plus défavorisées des neuf villes québécoises les plus peuplées (Rapport R1449). Québec : INRS-Eau, Terre et Environnement. 66 p.
- Bélanger, G., Rochette, P., Castonguay, Y., Bootsma, A., Mongrain, D. et Ryan, D.A.J. (2002). Climate Change and Winter Survival of Perennial Forage Crops in Eastern Canada. *Agronomy Journal*, 94, 1120–1130.
- Bélanger, L., Berteaux, D., Bouthillier, L., Brassard, F., Casajus, N., Cumming, S., David, V., Denoncourt, A., Deshaies, M.-È., Desmarais, M.-È., Domaine, É., Jutras, S., Lamarre, J.F., Marchal, J., McIntire, E., Ricard, M., St-Laurent, M.-H. et Tremblay, J.-P. (2013d). Adaptation aux changements climatiques de la conservation de la nature et du système d'aires protégées du Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 83 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/198_RapportBelangeretBrassard2013.pdf
- Belien, E., Rossi, S., Morin, H. et Deslauriers, A. (2012). Xylogenesis in black spruce subjected to rain exclusion in the field. *Canadian Journal of Forest Research*, 42, 1306–1315.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. et Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377.
- Beltaos, S. et Burrell, B. C. (2003). Climatic change and river ice breakup. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(1), 145–155.
- Beltaos, S. et Tang, P. (2013). Applying HEC-RAS to simulate river ice jams: snags and practical hints. Dans 17th Workshop on River Ice. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment. Edmonton, Alberta. 16 p. Repéré à http://cripe.civil.ualberta.ca/Downloads/17th_Workshop/Beltaos-Tang-2013.pdf
- Benmarhnia, T., Mathlouthi, F. et Smargiassi, A. (2013). Les impacts sanitaires des particules liées aux incendies de forêt. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 20 p.
- Benmarhnia, T., Sottile, M.-F., Plante, C., Brand, A., Casati, B., Fournier, M. et Smargiassi, A. (2014). Variability in Temperature-Related Mortality Projections under Climate Change. *Environmental Health Perspectives*.
- Bennett, A.F. (2003). Linkages in the landscape: The role of corridors et connectivity in wildlife conservation. Gland, Switzerland et Cambridge, UK: IUCN - The World Conservation Union. 254 p.

Benoît, H.P., Gagné, J.A., Savenkoff, C., Ouellet, P. and Bourassa, M.-N. (dir.). (2012). State-of-the-Ocean Report for the Gulf of St. Lawrence Integrated Management (GOSLIM) Area (Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2986). Mont-Joli, Québec: Pêches et Océans Canada, Institut Maurice-Lamontagne. 84 p.

Bentz, B. J., Régnière, J., Fettig, C.J., Hansen, E.M., Hayes, J.L., Hicke, J.A., Kelsey, R.G., Negrón, J.F. et Seybold, S. J. (2010). Climate Change and Bark Beetles of the Western United States and Canada: Direct and Indirect Effects. *BioScience*, 60(8), 602–613.

Bergeron, Y., Flannigan, M.D., Gauthier, S., Leduc, A. et Lefort, P. (2004). Past, current and future fire frequency in the Canadian boreal forest: implications for sustainable forest management. *Ambio*, 33, 356–360.

Bergeron, Y., Raulier, F., Berninger, F., Girardin, M.-P. et Bernier, P. (2011). Influence des changements climatiques sur le rendement de la forêt boréale mixte (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 18 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/225_RapportBergeron-2011.pdf

Bergeron, Y., Tremblay, F., DesRochers, A.A. et Lorenzetti, F. (2013). Incidences du climat et des perturbations sur la structure et la dynamique de recrutement des peuplements de peuplier faux-tremble au Canada (Rapport scientifique final pour Ouranos et NSERC, extrait). Montréal, Québec. 14 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/311_RapportBergeron2014.pdf

Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Corriveau, M. et Jolivet, Y. (2014). Impacts des changements climatiques sur l'érosion des falaises de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent (Rapport scientifique final pour Ouranos et le ministère de la Sécurité Publique). Rimouski, Québec : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 166 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/331_RapportBernatchez2014.pdf

Bernatchez, P., Dugas, S., Fraser, C. et Da Silva, L. (2015). Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Rimouski, Québec : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 45 p. et annexes. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/381_Bernatchez_etal_2015_FINAL.pdf

Bernatchez, P. et Fraser, C. (2012). Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Québec, Canada. *Journal of Coastal Research*, 285, 1550–1566.

Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et Morissette, A. (2008). Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Rimouski, Québec. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/145_Bernatchezetal2008.pdf

Bernstein, A.S. et Rice, M.B. (2013). Lungs in a Warming World: Climate Change and Respiratory Health. *Chest*, 143(5), 1455–1459.

Berrang-Ford, L., Ford, J.D. et Paterson, J. (2011). Are we adapting to climate change? *Global Environmental Change*, 21(1), 25–33.

Berteaux, D., Blois, S. De, Angers, J.-F., Bonin, J., Casajus, N., Darveau, M., Fournier, F., Humphries, M.M., McGill, B., Larivée, J., Logan, T., Nantel, P., Périé, C., Poisson, F., Rodrigue, D., Rouleau, S., Siron, R., Thuiller, W., et Vescovi, L. (2010). The CC-Bio Project: Studying the Effects of Climate Change on Quebec Biodiversity. *Diversity*, 2, 1181–1204.

- Berteaux, D., Casajus, N. et de Blois, S. (2014). Changements climatiques et biodiversité du Québec : vers un nouveau patrimoine naturel. Québec: Presses de l'Université du Québec. 240 p.
- Bertrand, A., Prévost, D., Bigras, F. J. et Castonguay, Y. (2007). Elevated atmospheric CO₂ and strain of rhizobium alter freezing tolerance and cold-induced molecular changes in alfalfa (*Medicago sativa*). *Annals of Botany*, 99, 275–284.
- Bertrand, A., Tremblay, G.F., Pelletier, S., Castonguay, Y. et Bélanger, G. (2008). Yield and nutritive value of timothy as affected by temperature, photoperiod and time of harvest. *Grass and Forage Science*, 63(4), 421–432.
- Bhiry, N., Cloutier, D., Couillard, L., Gervais, A., Lamarre, P., Normeteau, M. et Ousmane Dia, A. (2013). Évolution des hauts marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent et stratégies de protection des espèces en situation précaire dans une perspective de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos) Montréal, Québec. 121 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/242_RapportBhiry2013.pdf
- Bird, D., Pannard, A., Paririe, Y. et Chavalier, P. (2009). Changements climatiques au Québec méridional : Conséquences des changements climatiques sur le comportement et la prolifération des cyanobactéries au Québec - Résumé. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 12 p.
- Biron, P. (2013). Espace de liberté des rivières et connectivité. *In Vivo*, 33(22), 6–7.
- Biron, P., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Choné, G., Cloutier, C.-A., Ouellet, M.-A., Demers, S., Olsen, T., Desjarlais, C et Eyquem, J. (2014). Freedom Space for Rivers: A Sustainable Management Approach to Enhance River Resilience. *Environmental Management*, 1–18.
- Biron, P., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Ouellet, M.-A., Choné, G., Cloutier, C.-A. et Needelman, M. (2013). Espace de liberté: un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 125 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/299_RapportBironetal2013.pdf
- BISE. (2010). Bronzage artificiel : un enjeu en prévention des cancers de la peau. Bulletin d'information en santé environnementale (BISE). Repéré le 25 avril 2014, à <http://www.inspq.qc.ca/bise/post/2010/12/02/PUBLICATIONS-e28093-Bronzage-artificiel-un-enjeu-en-prevention-des-cancers-de-la-peau.aspx>
- BIT. (2010). « Changement climatique et travail : l'objectif d'une « transition juste ». *Journal international de recherche syndicale*, 2(2), 230 p.
- Bizikova, L. et Crawford Boettcher, E. (2011). Examen des principales politiques et mesures incitatives nationales et régionales à l'appui de l'adaptation et de la capacité d'adaptation du secteur agricole (Rapport de recherche). Ottawa, Ontario : Gouvernement du Canada. 62 p.
- Bizikova, L., Crawford, E., Nijnik, M. et Swart, R. (2014). Climate change adaptation planning in agriculture: processes, experiences and lessons learned from early adapters. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(4), 411–430.
- Blackford, J.C. (2010). Predicting the impacts of ocean acidification: Challenges from an ecosystem perspective. *Journal of Marine Systems*, 81(1-2), 12–18.
- Blachère, J.-C. et Perreault, S. (2010). Médicaments du système nerveux central et canicules : Rapport et recommandations. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 157 p.

Blachère, J.-C. et Perreault, S. (2012a). Médicaments des systèmes cardiovasculaire et rénal et canicules : rapport et recommandations. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 235 p.

Blachère, J.-C. et Perreault, S. (2012b). Médicaments du système hormonal et canicules : rapport et recommandations. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 150 p.

Blachère, J.-C. et Perreault, S. (2013). Médicaments des systèmes gastro-intestinal, urinaire, musculo-squelettique, immunitaire, autres médicaments, et canicules : Rapport et recommandations. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 200 p.

Blais, P., Boucher, I. et Caron, A. (2012). L'urbanisme durable : enjeux, pratiques et outils d'intervention. Québec. 93 p. Repéré à http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/grands_dossiers/developpement_durable/guide_urbanisme_durable.pdf

Blangy, S., Germain, K. et Archambault, M. (2011). Stratégies d'adaptation aux changements climatiques pour l'industrie touristique québécoise - synthèse des cinq ateliers sectoriels et régionaux. Montréal: Chaire de tourisme Transat ESG UQAM. 76 p. Repéré à https://chairedetourisme.uqam.ca/upload/files/ateliers_rapport_dec2011.pdf

Bleau, S., Blangy, S. et Archambault, M. (2014). Adapting Nature Based Seasonal Activities in Québec (Canada) to Climate Change, Handbook of Climate Change Adaptation. Handbook of Climate Change Adaptation.

Bleau, S., Germain, K., Archambault, M. et Matte, D. (2012). Analyse socioéconomique des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques de l'industrie touristique au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 197 p.

BNQ. (2013). Norme BNQ 2019-190/2013 : Lutte aux îlots de chaleur urbains – Aménagement des aires de stationnement – Guide à l'intention des concepteurs. Québec, Canada : Bureau de normalisation du Québec (BNQ). 104 p.

Boisvenue, C. et Running, S.W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12, 862–882.

Boisvert-Marsh, L., Périé, C. et de Blois, S. (2014). Shifting with climate? Evidence for recent changes in tree species distribution at high latitudes. *Ecosphere*, 5(7), art83.

Boivin, F., Simard, A. et Peres-Neto, P. (2014). Can wide consultation help with setting priorities for large-scale biodiversity monitoring programs? *PLoS ONE*, 9(12), e113905.

Bootsma, A., Gameda, D. et Anderson, S. (2004). Impacts potentiels du changement climatique sur les indices agroclimatiques dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec (Bulletin technique Contribution du CRECO n° 03-284). Ottawa : Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux, Direction de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire. 14 p.

Bootsma, A., Gameda, S. et Mckenney, D.W. (2005a). Impacts of potential climate change on selected agroclimatic indices in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(2), 329–343.

Bootsma, A., Gameda, S. et Mckenney, D.W. (2005b). Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(2), 345–357.

Bouchard-Bastien, E. et Brisson, G. (2014). Changements climatiques et santé en Eeyou Istchee dans le contexte des évaluations environnementales. Québec : Direction de la santé environnementale et de la toxicologie,

Institut national de santé publique du Québec. 101 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/322_RapportBrisson2014.pdf

Boucher, I. et Fontaine, N. (2010). La biodiversité et l'urbanisation : Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable. Québec : Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAPAQ). 178 p.

Boucher, I. et Fontaine, N. (2011). L'aménagement et l'écomobilité, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable. Québec, Canada : Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAPAQ). 232 p. Repéré à http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/grands_dossiers/developpement_durable/amenagement_ecomobilite.pdf

Boucher, J.-F., Tremblay, P., Gaboury, S. et Villeneuve, C. (2012). Can boreal afforestation help offset incompressible GHG emissions from Canadian industries? *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6), 459–466.

Boulfroy, E., Khaldoune, J., Grenon, F., Fournier, R. et Talbot, B. (2013). Conservation des îlots de fraîcheur urbains - Description de la méthode suivie pour identifier et localiser les îlots de fraîcheur et de chaleur (méthode en 9 niveaux) (Rapport 2012-11c). Québec: CERFO, Université de Sherbrooke. 40 p.

Boulanger, Y., Gauthier, S et Burton, P.J.(2014). A refinement of models projecting future Canadian fire regimes using homogeneous fire regime zones. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(4), 365-376

Boutin, R. et Robitaille, G. (1995). Increased soil nitrate losses under mature sugar maple trees affected by experimentally induced deep frost. *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 588–602.

Bourgault, M.A., Larocque, M. et Roy, M. (2014). Simulation of aquifer-peatland-river interactions under climate change. *Hydrology Research*, 45(3), 425–440.

Bourque, D. et Morneau, G. (2013). Tendances des niveaux de pollution atmosphérique du corridor Windsor-Québec (Rapport préparé en réponse au BAPE dans le cadre de l'évaluation environnementale d'une usine de fabrication d'engrais à Bécancour). Service météorologique du Canada. 13 p. Repéré à http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/engrais_becancour/documents/DQ17.1.pdf

Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I. et Roy, A. G. (2010). Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology*, 384(1-2), 65–83.

Boyer, R. et Villa, J. (2011). Répertoire d'instruments pour la surveillance des impacts psychosociaux des aléas climatiques. Québec, Canada : Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique du Québec. 113 p.

Brander, K. (2005). Cod recruitment is strongly affected by climate when stock biomass is low. *ICES Journal of Marine Science*, 62(3), 339–343.

Brassard, F., Bouchard, A. R., Boisjoly, D., Poisson, F., Bazoge, A., Bouchard, M.-A., Lavoie, G., Tardif, B., Bergeron, M., Perron J., Balej, R. et Blais, D. (2010). Portrait du réseau d'aires protégées au Québec : période 2002-2009. Québec: Gouvernement du Québec. 229 p. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/portrait02-09/fr/intro.pdf

Breau, C., Cunjak, R.A. et Peake, S.J. (2011). Behaviour during elevated water temperatures: Can physiology explain movement of juvenile Atlantic salmon to cool water? *Journal of Animal Ecology*, 80, 844–853.

Brissette, F., Chen, J., Gatien, P., Arsenault, R. et Li, Z. (2012). Système de prévision des étiages comme moyen d'adaptation aux impacts des changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 81 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/178_RapportBrissette2013.pdf

Brodeur, J., Boivin, G., Cloutier, C., Doyon, J., Grenier, P. et Gagnon, A.-È. (2013). Impact des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels : conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 120 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/302_RapportBrodeur2013.pdf

Brodeur, P., Mingelbier, M. et Morin, J. (2004). Impacts des variations hydrologiques sur les poissons des marais aménagés le long du Saint-Laurent fluvial. Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune. 60 p.

Brook, R.D., Rajagopalan, S., Arden Pope III, C., Brook, J.R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A.V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R.V., Mittleman, M.A., Peters, A., Siscovick, D., Smith Jr., S.C., Whitsel, L., et Kaufman, J.D. (2010). Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease An Update to the Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*, 121, 2331–2378.

Brown, S., Nicholls, R., Vafeidis, A., Hinkel, J. et Watkiss, P. (2011). Sea-level Rise: The Impacts and Economic Costs of Sea-Level Rise on Coastal Zones in the EU and the Costs and Benefits of Adaptation. Summary of Results from the EC RTD ClimateCost Project. Dans P. Watkiss (dir.), *The ClimateCost Project. Final Report. Volume 1: Europe*. Sweden: Stockholm Environment Institute. 43 p.

Bryant, C., Carvajal Sanchez, N., Delusca, K., Daouda, O. et Sarr, A. (2013). Metropolitan Vulnerability and Strategic Roles for Periurban Agricultural Territories in the Context of Climate Change and Variability. *Cuadernos de Geografía : Revista Colombiana de Geografía*. Repéré à http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/37016/html_3

Bryant, C., Chahine, G., Delusca, K., Daouda, O., Doyon, M., Singh, B., Brklacich, M. et Thomassin, P. (2010). Adapting to Environmental and Urbanisation Stressors : Farmer and Local Actor Innovation in Urban and Periurban Areas in Canada. Dans *Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food*. June 28-30, 2010 (p. 1–10). Montpellier, France.

Bryant, C., Singh, B., Thomassin, P. et Baker, L. (2007). 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 (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 49 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/149_Bryant1.pdf

Brzeski, V. (2011). Comment adapter l'industrie des pêches de la région du Canada atlantique aux changements climatiques ? Ecology Action Centre. Repéré à <https://www.ecologyaction.ca/files/images-documents/file/Coastal/CCCheticamp/Peche et changement climatique brochure.pdf>

Burkett, V. et Davidson, M. A. (dir.). (2012). *Coastal Impacts, Adaptation, and Vulnerabilities: A Technical Input to the 2013 National Climate Assessment*. Washington, DC : Island Press. 150 p. Repéré à http://www.ssec.wisc.edu/~kossin/articles/NCA_Coasts.pdf

Burch, S. (2010). Transforming barriers into enablers of action on climate change: Insights from three municipal case studies in British Columbia, Canada. *Global Environmental Change*, 20(2), 287–297.

Busque, D., Paradis, J. et Proulx, M. (2010). Fine Particles and Ozone in Québec relative to the Canada-wide Standards (2009 Report). Québec, Canada : MDDEP, Direction des politiques de la qualité de l'atmosphère. 29 p.

Bustinza, R., Lebel, G., Gosselin, P., Bélanger, D. et Chebana, F. (2013). Health impacts of the July 2010 heat wave in Québec, Canada. *BMC Public Health*, 13(56), 7.

Bustinza, R., Tairou, F.O., Gosselin, P. et Bélanger, D. (2010). Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés à la foudre et aux incendies de forêt. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 74 p.

Burch, S. (2010). Transforming barriers into enablers of action on climate change: Insights from three municipal case studies in British Columbia, Canada. *Global Environmental Change*, 20(2), 287–297.

Buteau, S. (2011, décembre). Évaluation de l'adéquation entre le Programme de surveillance de la qualité de l'air au Québec et les besoins de la santé publique : Présentation des résultats de la consultation des intervenants de la santé publique. Dans Journées annuelles de santé publique (JASP). Montréal. Repéré à http://jasp.inspq.qc.ca/Data/Sites/1/SharedFiles/presentations/2011/JASP2011_1dec_AIR_15_30_SButeau.pdf

CAC. (2013). L'eau et l'agriculture au Canada : vers une gestion durable des ressources en eau. Ottawa, Ontario : Le comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada, Conseil des académies canadiennes (CAC). 297 p.

Cairns, D.K., Dutil, J.-D., Proulx, S., Mailhiot, J.D., Bédard, M.-C., Kervella, A., Godfrey, L.G., O'Brien, E.M., Daley, S.C., Fournier, E., Tomie, J.P.N. et Courtenay, S.C. (2012). An atlas et classification of aquatic habitat on the east coast of Canada, with an evaluation of usage by the American eel (Canadian Technical report of Fisheries et Aquatic Science 2986) Moncton, New Brunswick: Fisheries et Oceans Canada. 103 p.

Calmels, F., Allard, M. et Delisle, G. (2008). Development and decay of a lithalsa in Northern Québec: A geomorphological history. *Geomorphology*, 97(3-4), 287–299.

Campbell, I.D., Durant, D.G., Hunter, K.L. et Hyatt, K.D. (2014). La Production Alimentaire. Dans F. J. Warren et D. S. Lemmen (dir.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatifs aux impacts et à l'adaptation* (p. 99–134). Ottawa, Ontario : Gouvernement du Canada. Repéré à http://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2014/pdf/Chapitre4-Production-alimentaire_Fra.pdf

Cancer Society of New Zealand. (2000). *Under cover: Guidelines for shade planning and design*. Sydney: NSW Cancer Council and NZW Health Department. 192 p.

Canuel, M. et Bélanger, D. (2010). Évolution de la prévalence des allergies non alimentaires et de leur traitement par médication : données québécoises issues d'enquêtes populationnelles (1994-2005). Québec, Canada : Institut national de santé publique du Québec. 20 p.

Canuel, M. et Lebel, G. (2012). Prévalence des symptômes et du diagnostic de la rhinite allergique chez les 15 ans et plus au Québec, 2008. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 61 p.

Canuel, M. et Lebel, G. (2013). Article en surveillance : Bilan des éclosions de maladies d'origine hydrique au Québec de 2010 à 2011. BISE : Bulletin d'information en santé environnementale. Repéré le 17 janvier 2014, à <http://www.inspq.qc.ca/bise/post/2013/02/06/ARTICLE-EN-SURVEILLANCE-Bilan-des-eclosions-de-maladies-de28099origine-hydrique-au-Quebec-de-2010-a-2011.aspx>

Cardinale, B. J., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G.M., Tilman, D., Wardle, D.A., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A., Srivastava, D.S. et Naeem, S. (2012). Biodiversity loss et its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59–67.

Casati, B. et de Elía, R. (2014). Temperature Extremes from Canadian Regional Climate Model (CRCM) Climate Change Projections. *Atmosphere-Ocean*, 52(3), 191–210.

Casati, B., Yagouti, A. et Chaumont, D. (2013). Analysis of extreme temperature indices in 9 Canadian communities using the Canadian Regional Model projections for public health planning. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, (52), 2669–2697.

CCAP (2012). Rapport scientifique sur l'année polaire internationale : faits saillants Canadiens. Ottawa, Ontario: Commission canadienne des affaires polaires (CCAP). 44 p. Repéré à http://www.polarcom.gc.ca/uploads/IPY_Synthesis/ccap-api-rapport-scientifique-faits-saillants-web.pdf

CCME. (2009). Stratégie pancanadienne pour la gestion des effluents d'eaux usées municipales. Whitehorse, Yukon : Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME). 18 p. Repéré à http://www.ccme.ca/assets/pdf/cda_wide_strategy_mwwe_final_f.pdf

CDB (2010). Convention sur la diversité biologique. X/33. Diversité biologique et changements climatiques. Décision adoptée par la Conférence des Parties à la Convention sur la diversité biologique à sa dixième réunion. Nagoya, Japon, 18-29 octobre, 2010. 11 p.

CDC. (2012). Extreme Cold : A Prevention Guide to Promote Your Personal Health and Safety. Prevention. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention (CDC), U.S .Department of Health And Human Services. 13 p. Repéré le 23 septembre 2014, à <http://www.bt.cdc.gov/disasters/winter/guide.asp>

CDC. (2014). Environmental Health Tracking Program. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Repéré le 24 avril 2014 à <http://ephtracking.cdc.gov/showAbout.action>

CEHQ. (2013a). Atlas hydroclimatique du Québec méridional : Impacts des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec : Centre d'expertise hydrique du Québec (CEH). 51 p.

CEHQ. (2013b). Plan d'action du Centre d'expertise hydrique du Québec 2013-2014. Québec : Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 16 p. Repéré à <http://www.cehq.gouv.qc.ca/documents/plan-action/2013-2014.pdf>

CEHQ. (2014). Détermination des zones inondables par une approche combinée pour la rivière de la Fourche : Municipalités d'Armagh et de Notre-Dame-Auxiliatrice-de-Buckland (CEHQ 4132-0231-05-1401). Québec : Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 56 p.

Chabot, D. et Claireaux, G. (2008). Environmental hypoxia as a metabolic constraint on fish: the case of Atlantic cod, *Gadus morhua*. *Marine pollution bulletin*, 57(6-12), 287–94.

Chakraborty, S. (2013). Migrate or evolve: options for plant pathogens under climate change. *Global Change Biology*, 19, 1985–2000.

Cheung, W.W., Watson, R. et Pauly, D. (2013). Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, 497(7449), 365–368. doi:10.1038/nature12156

Chambers, D., Périé, C., Casajus, N. et de Blois, S. (2013). Challenges in modelling the abundance of 105 tree species in eastern North America using climate, edaphic, et topographic variables. *Forest Ecology et Management*, 291, 20–29.

Charbonneau, É., Moreno Prado, J.M., Pellerin, D., Bélanger, G., Côté, H., Bélanger, V., Parent, D., Allard, G., Audet, R. et Chaumont, D. (2013). Première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité technico-économique et agroenvironnementale des fermes laitières au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 62 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/296_RapportCharbonneau2013.pdf

Charles, M., Milot, N. et Lepage, L. (2013). Adaptation aux changements climatiques : un outil informatif à l'intention des intervenants membres des Organismes de bassin versant du Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 48 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/309_OutildeformationLepageMilot2013.pdf

Chebana, F. (2011). Projets en cours. Repéré le 25 avril 2014 à <http://www.inrs.ca/fateh-chebana?f=projets-en-cours>

Chebana, F., Martel, B., Gosselin, P., Giroux, J.-X. et Ouarda, T. B. M. J. (2013). A general and flexible methodology to define thresholds for heat health watch and warning systems, applied to the province of Québec (Canada). *International Journal of Biometeorology*, 57 (June 2010), 631–644.

Chen, I.-C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B. et Thomas, C. D. (2011). Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science*, 333 (6045), 1024–1026.

Chevassus-au-Louis, B., Salles, J.-M., Bielsa, S., Richard, D., Martin, G. et Pujol, J.-L. (2009). Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique. Centre d'analyse stratégique. 376 p.

CIRC. (2012). Communiqué de presse N° 213 : Les gaz d'échappement des moteurs diesel cancérigènes. Communiqués de presse. Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC). Repéré janvier 9, 2014, à http://www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2012/pdfs/pr213_F.pdf

Clavet-Gaumont, J. et Thiémonge, N. (2014). Impact de la méthode de post-traitement sur la période de référence et sur le signal de changement hydrologique (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 29 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/318_RapportClavet-Gaumont2014.pdf

Clavet-Gaumont, J., Thiémonge, N. et Roy, R. (2013). Climate change impact on spring flood volume in northeastern Canada watersheds using a climate ensemble. Affiche présenté à la conférence EGU, Vienne, Autriche.

Clerc, C., Poulin, J., Gauthier, Y., Bernier, M., Bleau, S., Gignac, C., Bédard, J.-S. et Duhamel-Beaudry, É. (2012a). Descripteurs et indicateurs de la couverture glacielle au Nunavik : Quaqtq, Umiujaq et Kuujjuaq (Rapport final remis au ministère des Transports du Québec, Consortium Ouranos et au Ministère des Affaires Autochtones et Développement du Canada). Québec: Institut national de recherche scientifique. 143 p.

Clerc, C., Poulin, J., Gauthier, Y., Bernier, M., Bleau, S., Gignac, C., Bédard, J.-S. et Duhamel-Beaudry, É. (2012b). Étude du comportement des glaces de mer et d'eau douce du Nunavik au voisinage des infrastructures maritimes - Apport des connaissances locales et de la télédétection (Rapport scientifique final pour Ouranos, le Ministère des transports du Québec et le Ministère des Affaires Autochtones et Développement du Nord du Canada). Montréal, Québec. 188 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/265_RapportBernierelal2012B.pdf

CMI. (2014). Plan 2014 : Régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. Protection contre les niveaux extrêmes, restauration des milieux humides et préparation aux changements climatiques. Ottawa, Ontario : Commission mixte internationale (CMI). 99 p.

CMM (2011). Un grand Montréal attractif, compétitif et durable: Plan métropolitain d'aménagement et de développement. Communauté métropolitaine de Montréal (CMM), Montréal, Québec. 142 p. Repéré à http://pmad.ca/fileadmin/user_upload/pmad2011/documentation/20111208_pmad.pdf

CMM. (2013). La trame verte et bleue du grand Montréal. Montréal, Québec : Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). 28 p. Repéré à http://pmad.ca/fileadmin/user_upload/pmad2012/documentation/20130228_fascicule_trameVerteBleue.pdf

CMQ. (2013). Pour la mise en place des trames verte et bleue métropolitaines sur le territoire de la communauté métropolitaine de Québec : Proposition de partenariat avec le gouvernement du Québec. Québec : Communauté métropolitaine de Québec (CMQ). 38 p. Repéré à http://www.cmquebec.qc.ca/%5C/Bleuvert/DocTrameVerte/Trames_verte_bleue_Final.pdf

Cochand, F. (2014). Impact des changements climatiques et du développement urbain sur les ressources en eaux du bassin versant de la rivière Saint-Charles. (Thèse de doctorat). Université Laval. Québec.

Collie, J.S., Wood, A.D. et Jeffries, H.P. (2008). Long-term shifts in the species composition of a coastal fish community. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65(7), 1352–1365.

Colls, A., Ash, N. et Ikkala, N. (2009). Ecosystem-based Adaptation : A natural response to climate change. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature (IUCN). 16 p. Repéré à http://cmsdata.iucn.org/downloads/iucn_eba_brochure.pdf

Comité chaleur accablante de la TNCSE. (2006). Guide d'intervention : Chaleur Accablante Volet Santé Publique. 168 p. Repéré le 25 avril 2014, à <http://www.msss.gouv.qc.ca/sujets/santepub/pdf/Guide-intervention.pdf>

Conlon, K.C., Rajkovich, N.B., White-Newsome, J.L., Larsen, L. et O'Neill, M.S. (2011). Preventing cold-related morbidity and mortality in a changing climate. *Maturitas*, 69(3), 197–202.

Conseil du Trésor. (2014). Plan québécois des infrastructures 2014-2024. Québec, Canada: Gouvernement du Québec. 50 p. Repéré à http://www.tresor.gouv.qc.ca/fileadmin/PDF/budget_depenses/14-15/PQI2014_2024.pdf

Conza, L., Casati, S., Limoni, C. et Gaia, V. (2013). Meteorological factors and risk of community-acquired Legionnaires' disease in Switzerland: an epidemiological study. *BMJ open*, 3(3), 1–7.

COSEPAC (2011). Comité sur la situation des espèces en péril au Canada : Ours blanc. Mammifères terrestres. Repéré à http://www.cosewic.gc.ca/fra/sct1/searchdetail_f.cfm?id=167

Costanza, R., Arge, R., Groot, R. De, Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. et van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(May), 253–260. doi:10.1038/387253a0

- Costanza, R., Groot, R. De, Sutton, P., Ploeg, S. Van Der, Etersson, S. J., Kubiszewski, I., Faber, S. et Turner, R.K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158.
- Cooper, J.A.G. et Pile, J. (2014). The adaptation-resistance spectrum: A classification of contemporary adaptation approaches to climate-related coastal change. *Ocean & Coastal Management*, 94, 90–98.
- Côté, B., Leconte, R. et Trudel, M. (2013a). Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 111 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/274_RapportCote2013.pdf
- Côté, S.D., Festa-Bianchet, M., Dussault, C., Tremblay, J.-P., Brodeur, V., Simard, M., Taillon, J., Hins, C., Le Corre, M. et Sharma, S. (2013b). La dynamique des troupeaux de caribou : impacts des changements climatiques sur la récolte sportive et traditionnelle. Dans *Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques – Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation* (p. 259–281). Québec : ArcticNet Inc.
- Courtois, R. et Ouellet, J.-P. (2007). Modeling the impact of moose and wolf management on persistence of woodland caribou. *Alces*, 43, 13–27. doi:papers://A270C103-A120-4E61-B0FE-19A2B90778C5/Paper/p3233
- CQPF. (2012). Secteur québécois des plantes fourragères — Planification stratégique 2012-2017. Alma, Québec : Conseil québécois de plantes fourragères (CQPF). Repéré à <http://www.cqpf.ca/actualites/nouvelles/152-planification-strategique-du-secteur-des-plantes-fourrageres-bilan-des-actions-2012-2013>
- CQRHT. (2010). Diagnostic sectoriel de la main-d'oeuvre en tourisme. Longueuil, Québec : Conseil québécois des ressources humaines en tourisme (CQRHT). 130 p. Repéré à <http://m3.ithq.qc.ca/collection/00000020.pdf>
- Crawford, E. et Beveridge, R. (2013). Strengthening BC's Agriculture Sector in the Face of Climate Change. Victoria, Colombie-Britannique : The Pacific Institute for Climate Solutions. 20 p.
- Crawford, E. et MacNair, E. (2012). BC Agriculture Climate Change Adaptation Risk + Opportunity Assessment: Provincial report (Executive Summary). 20 p. Repéré à www.BCAGClimateAction.ca
- Croley, T.E. (2003). Great Lakes Climate Change Hydrologic Assessment, I.J.C. Lake Ontario — St-Lawrence River Regulation Study (Technical Memorandum GLERL-126). National Oceanic and Atmospheric Administration.
- CSA. (2010). PLUS 4011 - Technical guide: Infrastructure in permafrost: A guideline for climate change adaptation (1^e éd, p. 112). Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association (CSA). 112 p.
- CSBQ-Ouranos. (2013). Impacts et adaptation aux changements climatiques des écosystèmes et de la biodiversité. Dans *Atelier Ouranos - CSBQ : Bilan et perspectives du programme ÉcoBioCC d'Ouranos*. (p. 78). Montréal. Repéré à http://www.ouranos.ca/fr/programmation-scientifique/impacts-et-adaptation/documents/Workshop_booklet_FINAL.pdf
- Curran, K. et Azetsu-Scott, K. (2012). Ocean Acidification. Dartmouth, Nouvelle-Écosse : Fisheries and Oceans Canada, Bedford Institute of Oceanography. 28 p.
- D'Orangeville, L., Côté, B., Houle, D. et Morin, H. (2013a). The effects of throughfall exclusion on xylogenesis of balsam fir. *Tree Physiology*, 33(5), 516–526.

D'Orangeville, L., Houle, D., Côté, B., Duchesne, L. et Morin, H. (2013b). Increased soil temperature and atmospheric N deposition have no effect on the N status and growth of a mature balsam fir forest. *Biogeosciences*, 10(7), 4627–4639.

Da Silva, L. (2009). L'impact économique des changements climatiques sur l'agriculture canadienne (Mémoire de maîtrise). HEC Montréal. Montréal, Québec. Repéré à http://www.irec.net/upload/File/memoires_et_theses/95_MÃ©moireFinal_LaurentDaSilva.pdf.

Dagenais, D., Paquette, S., Fuamba, M. et Thomas-Maret, I. (2011, septembre). Keys to successful large-scale implementation of vegetated best management practices in the urban environment. Dans 12th International Conference on Urban Drainage, International Water Association. Porto Allegre, Brésil.

Dagenais, D., Paquette, S., Thomas-Maret, I. et Fuamba, M. (2014). Implantation en milieu urbain de systèmes végétalisés de contrôle à la source des eaux pluviales dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 149 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/171_RapportDagenais2013.pdf

Danner, F. (2013). Coup d'oeil sur l'actualité : Au coeur de l'innovation santé et changement climatique. BISE : Bulletin d'information en santé environnementale. Repéré le 17 février 2014, à <http://www.inspq.qc.ca/bise/post/2013/11/20/COUP-De28099c592IL-SUR-Le28099ACTUALITE-Au-cc593ur-de-linnovation-sante-et-changement-climatique.aspx>

Davis, M.B. (1981). Quaternary history and stability of forest communities. Dans D. C. West, H. H. Shugart et D. F. Botkin (dir.), *Forest Succession: Concepts and Application* (p. 132–153). New York: Springer-Verlag.

Dawson, T.P., Jackson, S.T., House, J.I., Prentice, I.C. et Mace, G.M. (2011). Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. *Science*, 332(6025), 53–58.

De Blois, S., Boisvert-Marsh, L., Schmucki, R., Lovat, C.-A., Byun, C., Gomez-Garcia, P., Otfinowski, R., Groeneveld, E. et Lavoie, C. (2013). Outils pour évaluer les risques d'invasion biologique dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 80 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/239_RapportdeBlois2013.pdf

De Frenne, P., Rodríguez-Sánchez, F., Coomes, D.A., Baeten, L., Verstraeten, G., Vellend, M., Bernhardt-Römermann, M., Brown, C.D., Brunet, J., Cornelis, J., Decocq, G.M., Dierschke, H., Eriksson, O., Gilliam, F.S., Hédli, R., Heinken, T., Hermy, M., Hommel, P., Jenkins, M.A., Kelly, D. L., Kirby, K.J., Mitchell, F. J. G., Naaf, T., Newman, M., Peterken, G., Petřík, P., Schultz, J., Sonnier, G., Van Calster, H., Waller, D. M., Walther, G.-R., White, P. S., Woods, K.D., Wulf, M., Graae, B.J. et Verheyen, K. (2013). Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 110(64), 18561-18565

De Grandpré, I., Fortier, D. et Stefani, E. (2010). Impact of groundwater flow on permafrost degradation: implication for transportation infrastructures. Dans *Proceedings 6th Canadian Permafrost Conference and 63rd Canadian Geotechnical Conference* (p. 534–540). Calgary, Alberta. Repéré à <http://pubs.aina.ucalgary.ca/cpc/CPC6-534.pdf>

De Groot, W.J., Flannigan, M.D. et Cantin, A. S. (2013). Climate change impacts on future boreal fire regimes. *Forest Ecology and Management*, 294, 35–44.

De Léry, R. (2012). Rapport global : Vision des décideurs municipaux et du transport sur la gestion de l'herbe à poux (p. 13). Longueuil, Québec : Agence de la santé et des services sociaux de la Montérégie. 13 p.

- De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poeuf, P. et Marchadier, C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, 33, 210–227.
- De Paula Correa, M., Godin-Beekmann, S., Haeffelin, M., Bekki, S., Saiag, P., Badosa, J., J.gou, F., Pazmiño, A. et Mahe, E. (2013). Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for Europe over the period 2006 to 2100. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 12(6), 1053–1064.
- Debailleul, G., Tamini, L.D., Doyon, M., Clerson-Guicherd, F., Jacques, L.-S., Hernandez, M., Olar, M. et Louvel, J. (2013). Analyse prospective de la position concurrentielle du Québec en matière de production agricole dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 193 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/233_RapportDebailleul2013.pdf
- Dell, J., Tierney, S., Franco, G., Newell, R.G., Richels, R., Weyant, J. et Wilbanks, T.J. (2014). Energy Supply and Use. Dans J.M. Melillo, T.T.C. Richmond et G.W. Yohe (dir.), *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment* (p. 113–129). U.S. Global Change Research Program.
- Delpla, I., Jung, A.-V., Baures, E., Clement, M. et Thomas, O. (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment international*, 35(8), 1225–1233.
- Délusca, K. (2010). Évaluation de la vulnérabilité des fermes productrices de maïs-grain du Québec aux variabilités et changements climatiques : Les cas de Montérégie-Ouest et du Lac-Saint-Jean-Est (Thèse de doctorat). Université de Montréal. Montréal, Québec. 220 p. Repéré à <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/4230>
- DeLucia, E.H., Hamilton, J.G., Naidu, S.L., Thomas, R.B., Andrews, J.A., Finzi, A., Lavine, M., Matamala, J.E, Mohan, G.R., Hendrey, G.R. et Schlesinger, W.H. (1999). Net Primary Production of a Forest Ecosystem with Experimental CO₂ Enrichment. *Science*, 284(5417), 1177–1179.
- Demers, I. (2013a). État des connaissances sur le pollen et les allergies : les assises pour une gestion efficace. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 91 p.
- Demers, I. (2013b). Les pollens allergènes au Québec : proposition pour une prise en charge efficace de la problématique. BISE : Bulletin d'information en santé environnementale. Repéré le 10 février 2014, à <http://www.inspq.qc.ca/bise/post/2013/11/20/ARTICLE-PRINCIPAL-Les-pollens-allergenes-au-Quebec.aspx>
- Demers, D., Robitaille, D., Potvin, J., Bilodeau, C. et Dupuis, C. (2008). La gestion des risques de glissement de terrain dans les sols argileux au Québec. Dans J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers and S. Leroueil (dir.), *Comptes rendus de la 4^e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion*. Québec : Presse de l'Université Laval, Québec. 594 p.
- Deschênes, O. et Greenstone, M. (2011). Climate change, mortality, and adaptation: Evidence from annual fluctuations in weather in the US. *American Economic Journal: Applied Economics*, 3, 152-185.
- Desjarlais, C., Blondlot, A., Allard, M., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Roy, R., Savard, J.-P., Turcotte, R. et Villeneuve, C. (2010). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Montréal, Québec : Ouranos. 128 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/349_sccc_francais_br-V22Dec2011_000.pdf

Derocher, A.E., Aars, J., Amstrup, S.C., Cutting, A., Lunn, N.J., Molnár, P.K., Obbard, M.E., Stirling, I., Thiemann, G.W., Vongraven, D., Wiig, O. et York, G. (2013). Rapid ecosystem change and polar bear conservation. *Conservation Letters*, 6(5), 368–375.

DesGranges, J.-L. et LeBlanc, M.-L. (2012). The Influence of Summer Climate on Avian Community Composition in the Eastern Boreal Forest of Canada. *Avian Conservation and Ecology*, 7(1).

DesGranges, J.-L. et Morneau, F. (2010). Sensibilité potentielle des oiseaux nicheurs du Québec aux changements climatiques. *Avian Conservation and Ecology*, 5(2), 5. Repéré à <http://www.ace-eco.org/vol5/iss2/art5/ACE-ECO-2010-410.pdf>

Desjardins, G. (2012). Inventaire de la biodiversité et des écosystèmes du quartier de Deschênes, secteur Aylmer de la ville de Gatineau 2012. Octobre 2012. Gatineau, Québec: Club des ornithologues de l'Outaouais. 89 p.

Diskin, E., Proctor, H., Jebb, M., Sparks, T. et Donnelly, A. (2012). The phenology of *Rubus fruticosus* in Ireland: herbarium specimens provide evidence for the response of phenophases to temperature, with implications for climate warming. *International Journal of Biometeorology*, 56(6), 1103–1111.

Dobbinson, S., Wakefield, M., Hill, D., Girgis, A., Aitken, J. F., Beckmann, K., Reeder, A.I., Herd, N., Fairthorne, A., et Bowles, K.-A. (2008). Prevalence and determinants of Australian adolescents' and adults' weekend sun protection and sunburn, summer 2003-2004. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 59(4), 602–614.

Dodman, D., McGranahan, G. et Dalal-Clayto, B. (2013). Integrating the Environment in Urban Planning and Management. Key principles and approaches for cities in the 21st century. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. 84 p.

Doigde D.W. et Power M. (2013) Measuring the effects of temperature variation on Arctic charr growth : implications for the management of the species in northern Québec. (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 6 p.

Donovan, G.H., Butry, D.T., Michael, Y.L., Prestemon, J.P., Liebhold, A.M., Gatzliolis, D. et Mao, M.Y. (2013). The Relationship Between Trees and Human Health. *American Journal of Preventive Medicine*, 44(2), 139–145.

Doody, J.P. (2013). Coastal squeeze and managed realignment in southeast England, does it tell us anything about the future? *Ocean and Coastal Management*, 79, 34–41.

Doré, G., Bilodeau, J.-P., Thiam, P.M. et Drolet Perron, F. (2014). Impact des changements climatiques sur les chaussées des réseaux routiers québécois (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 63 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/204_Dore_Bilodeau2012_web_Fr.pdf

Dorner, S. (2013). Impacts et adaptation aux changements climatiques des infrastructures municipales en eau de la rivière des Prairies (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 145 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/217_RapportDorner2014.pdf

Doyon, B., Bélanger, D. et Gosselin, P. (2008). The potential impact of climate change on annual and seasonal mortality for three cities in Québec, Canada. *International Journal of Health Geographics*, 7(23). Repéré à <http://www.ij-healthgeographics.com/content/7/1/23>

Downing, A. et Cuerrier, A. (2011). A synthesis of the impacts of climate change on the First Nations et Inuit of Canada. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 10(January), 57–70.

- Drake, B.G., González-Meler, M.A. et Long, S.P. (1997). More Efficient Plants: A Consequence of Rising Atmospheric CO₂? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 48(1), 609–639.
- Drobyshev, I., Gewehr, S., Berninger, F. et Bergeron, Y. (2013). Species specific growth responses of black spruce and trembling aspen may enhance resilience of boreal forest to climate change. *Journal of Ecology*, 101(1), 231–242.
- DSP de la Montérégie. (2013). Évaluation de l'efficacité de la mobilisation pour la lutte contre l'herbe à poux sur la qualité de vie des personnes allergiques : volet santé. Longueuil: Agence de la santé et des services sociaux de la Montérégie. 47 p.
- Duchesne, L. et Houle, D. (2011). Modelling day-to-day stem diameter variation and annual growth of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) from daily climate. *Forest Ecology and Management*, 262(5), 863–872.
- Duchesne, L. et Houle, D. (2014). Interannual and spatial variability of maple syrup yield as related to climatic factors. *PeerJ*, 2(e428), 17.
- Duchesne, L. et Ouimet, R. (2008). Population dynamics of tree species in southern Quebec, Canada: 1970–2005. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 3001–3012.
- Dudley, N., Stolton, S., Belokurov, A., Krueger, L., Lopoukhine, N., MacKinnon, K., Sandwith, T. et Sekhran, N. (2010). *Natural Solutions: Protected areas helping people cope with climate change. Evaluation*. Gland, Switzerland, Washington, DC : The World Bank and WWF. 126 p.
- Dufour-Tremblay, G. et Boudreau, S. (2011). Black spruce regeneration at the treeline ecotone: synergistic impacts of climate change and caribou activity. *Canadian Journal of Forest Research*, 41, 460–468.
- Dufour-Tremblay, G., De Vriendt, L., Lévesque, E. et Boudreau, S. (2012). The importance of ecological constraints on the control of multi-species treeline dynamics in eastern Nunavik, Québec. *American Journal of Botany*, 99(10), 1638–1646.
- Dugdale, S.J., Bergeron, N.E. et St-Hilaire, A. (2013). Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. *Remote Sensing of Environment*, 136, 358–373.
- Dumais, S. et Doré, G. (2013). Utilisation de surfaces à albédo élevé afin de contrer la dégradation du pergélisol sous les infrastructures de transport. *Via Bitume*, 8(3), 26–27. Repéré à <http://www.viabitume.com/include/pdf/via-octobre-2013.pdf>
- Dumont, P., D'Amours, J., Thibodeau, S., Dubuc, N., Verdon, R., Garceau, S., Bilodeau, P., Mailhot, Y. et Fortin, R. (2011). Effects of the development of a newly created spawning ground in the Des Prairies River (Quebec, Canada) on the reproductive success of lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*). *Journal of Applied Ichthyology*, 27(2), 394–404.
- Dupont, S., Hall, É., Calosi, P. et Lundve, B. (2014). First evidence of altered sensory quality in a shellfish exposed to decreased pH relevant to ocean acidification. *Journal of Shellfish Research*, 33(3): 857-861.
- Dupont-Prinet, A., Pillet, M., Chabot, D., Hansen, T., Tremblay, R. et Audet, C. (2013). Northern shrimp (*Pandalus borealis*) oxygen consumption and metabolic enzyme activities are severely constrained by hypoxia in the Estuary and Gulf of St. Lawrence. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 448, 298–307.

Dupras, J. et Alam, M. (2014). Urban Sprawl and Ecosystem Services: A Half Century Perspective in the Montreal Area (Quebec, Canada). *Journal of Environmental Policy & Planning*, 1–21.

Dupras, J., Alam, M. et Revéret, J.-P. (2014). Economic value of Greater Montreal's non-market ecosystem services in a land use management and planning perspective. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 59, 93-106

Dupras, J., Michaud, C., Charron, I., Mayrand, K. et Revéret, J.-P. (2013a). Le capital écologique du Grand Montréal : Une évaluation économique de la biodiversité et des écosystèmes de la Ceinture verte. Montréal, Québec : Fondation David Suzuki, Nature-Action Québec. 60 p.

Dupras, J., Revéret, J.-P. et He, J. (2013b). L'évaluation économique des biens et services écosystémiques dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 218 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/273_RapportReveret2013.pdf

EEA. (2013). *Adaptation in Europe - Addressing risks and opportunities from climate change in the context of socio-economic developments*. Copenhagen, Denmark: European Environmental Agency. 132 p.

Efstathiou, C., Isukapalli, S. et Georgopoulos, P. (2011). A mechanistic modeling system for estimating large scale emissions and transport of pollen and co-allergens. *Atmospheric Environment*, 45(13), 2260–2276.

Ehlers, A. et Worm, B. (2008). Importance of genetic diversity in eelgrass *Zostera marina* for its resilience to global warming. *Marine Ecology Progress Series*, 355, 1–7.

Engineers Canada. (2008). *Adapting to Climate Change: Canada's First national Engineering Vulnerability Assessment of Public Infrastructure*. 76 p. Repéré à http://www.pievc.ca/e/Adapting_to_climate_Change_Report_Final.pdf

Engineers Canada. (2011). *PIEVC Engineering Protocol for Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate, Version 10*. 166 p. Repéré à http://www.pievc.ca/e/Part_I_-_PIEVC_Engineering_Protocol_-_Revision_10_-_BETA_-_October_2011.pdf

Engineers Canada. (2012). *Canadian Case Studies: Listing of Case Studies*. Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee (PIEVC): Case Studies. Repéré mai 07, 2014, à http://www.pievc.ca/e/doc_list.cfm?dsid=3

Enviro-accès. (2013). *Plan d'adaptation aux changements climatiques 2013-2023*, Ville de Sherbrooke. Sherbrooke, Québec : 160 p. Repéré à http://www.ville.sherbrooke.qc.ca/fileadmin/fichiers/environnementsherbrooke.ca/Neutralisation/Plan_d_adaptation_aux_changements_climatiques_2013-2023.pdf

Envionics Research Group. (2012). *Étude sur l'amélioration des services liés à la CAS 2011-2012*, ROP N° 120-10. Ottawa, Ontario. 153 p.

Environnement Canada. (2004). *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada*. Institut national de recherche scientifique. Québec. 153 p. Repéré à http://www.ec.gc.ca/inre-nwri/0CD66675-AD25-4B23-892C-5396F7876F65/ThreatsFR_03web.pdf

Environnement Canada. (2013a). *Accord sur la qualité de l'air Canada - États Unis : Rapport d'étape 2012*. Gatineau, Québec. 93 p. Repéré à <https://www.ec.gc.ca/air/default.asp?lang=Fr&n=8ABC14B4-1&xml=8ABC14B4-ED53-4737-AD51-528F8DBA2B4C&offset=5&toc=show>

- Environnement Canada. (2013b). La Cote air santé. Qualité de l'air. Repéré le 9 janvier 2014, à <http://www.ec.gc.ca/cas-aqhi/default.asp?Lang=Fr>
- Environnement Canada. (2014a). Conditions hivernales. Repéré le 20 december 2013 à, <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=D2F64537-1>
- Environnement Canada. (2014b). Étude de performance de projets de lutte aux îlots de chaleur urbains dans la région de Montréal. Québec : Service météorologique du Canada-Région du Québec (SMC-QC). 142 p.
- Environnement Canada. (2014c). L'indice de refroidissement éolien au Canada. Repéré le 25 avril 2014 à, <https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=5FBF816A-1#table1>
- ESMAP. (2012). Annual Report 2011. Washington, DC : Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), The World Bank. 82p. Repéré à http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/FINAL_ESMAP-AR2011-1_FINAL.pdf
- Erickson, J. (2005). Part 3: Bleak forecast for ski industry. Rocky Mountain News. Repéré le 23 avril 2014, à <http://m.rockymountainnews.com/news/2005/mar/19/part-3-bleak-forecast-for-ski-industry/>
- FAO. (2011). Changement climatique, pêches et aquaculture. Rome: Bureau du Sous-Directeur général, Département de la gestion des ressources naturelles et de l'environnement, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 3 p.
- Fagherazzi, L., Guay, R. et Sassi, T. (2005). Climate Change Analysis of the Ottawa River System, Rapport remis à la Commission mixte internationale - Lake Ontario-St. Lawrence River study on discharge regulation. 72 p.
- Farstad, G., Elford, S., Chantler, A., Crawford, E., Guerin, G. et Jardine, D. (2013). Sea level rise adaptation primer: a toolkit to build adaptive capacity on Canada's south coasts. The Arlington Group Planning + Architecture Inc. EBA DE Jardine Consulting Sustainability Solutions Group. 191 p. Repéré à <http://www.env.gov.bc.ca/cas/adaptation/pdf/SLR-Primer.pdf>
- Febriani, Y., Levallois, P., Gingras, S., Gosselin, P., Majowicz, S. et Fleury, M. (2010). The association between farming activities, precipitation, and the risk of acute gastrointestinal illness in rural municipalities of Quebec, Canada: a cross-sectional study. *BMC Public Health*, 10(1), 48.
- Félio, G. (2012a). Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes. Volumen 1: 2012. Routes et systèmes d'eau potable, d'eaux usées et d'eaux pluviales municipaux. Association canadienne de la construction (ACC), Association canadienne des travaux publics (ACTP), Société canadienne de génie civil (SCGC), Fédération canadienne des municipalités (FCM). 75 p. Repéré à http://www.canadainfrastructure.ca/downloads/Canadian_Infrastructure_Report_Card_FR.pdf
- Félio, G. (2012b). PIEVC Case Studies: Codes, Standards and Related Instruments (CSRI) Review for Water Infrastructure and Climate Change (Rapport final). 23 p. Repéré à http://www.pievc.ca/e/2012_PIEVC_CSRI_Water_report_Final.pdf
- Ferguson, S.H., Asselin, N.C., Lloseto, L.L. et Higdon, J.W. (2012). Marine mammals. Dans D.G. Barbe, T. Tjaden, D. Lietch, L. Barber et W. Chan (dir.), *On the edge : from knowledge to action during the Fourth International Polar Year circumpolar flaw lead system study (2007-2008)* (p. 95–108). Winnipeg, Manitoba : University of Manitoba.

Ferrouillet, C., Lambert, L. et Milord, F. (2012). Consultation sur l'état actuel de la surveillance des zoonoses au Québec et son adéquation avec les changements climatiques et écologiques. Québec : Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique du Québec. 169 p.

Field, C.B., Mortsch, L.D., Brklacich, M., Forbes, D.L., Kovacs, P., Patz, J.A., Running, S.W. et Scott, M.J. (2007). North America. Dans M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (dir.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 617–652). Cambridge: Cambridge University Press.

Fisman, D.N., Lim, S., Wellenius, G.A, Johnson, C., Britz, P., Gaskins, M., Maher, J., Mittleman, M.A, Spain, C.V., Haas, C.N. et Newbern, C. (2005). It's not the heat, it's the humidity: wet weather increases legionellosis risk in the greater Philadelphia metropolitan area. *The Journal of infectious diseases*, 192(12), 2066–2073.

Flannigan, M.D., Logan, K.A., Amiro, B.D., Skinner, W.R. et Stocks, B.J. (2005). Future Area Burned in Canada. *Climatic Change*, 72(1-2), 1–16.

Fondation des maladies de coeur et de l'AVC. (2013). Les personnes cardiaques devraient-elles pelleter? Repéré le 18 février 2014 à, http://www.fmcoeur.qc.ca/site/c.kplQKVoxFoG/b.3670525/k.DC2C/Les_personnes_cardiaques_devraientelles_pelleter.htm

Fontaine, N. (2009). Une nouvelle préoccupation pour la biodiversité urbaine. Repéré à http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/veille/nouvelle_preoccupation_biodiversite.pdf

Ford, J.D. (2012). Indigenous Health and Climate Change. *American Journal of Public Health*, 102(7), 1260–1266.

Ford, J.D. et Beaumier, M. (2011). Feeding the family during times of stress: experience and determinants of food insecurity in an Inuit community. *The Geographical Journal*, 177(1), 44–61.

Ford, J.D., Berrang-Ford, L., King, M. and Furgal, C. (2010). Vulnerability of Aboriginal health systems in Canada to climate change. *Global Environmental Change*, 20(4), 668–680.

Foro, A., Béziers, L., Robinson, E. et Torrie, J. E. (2013). Perceptions des leaders et des professionnels d'Eeyou Istchee quant aux changements climatiques et à leurs effets sur la santé humaine : rapport des consultations. Chisasibi, Québec : Conseil cri de la santé et des services sociaux de la Baie James. 47 p.

Fortier, R., LeBlanc, A.-M. et Yu, W. (2011). Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 720–740.

Fortin, G. et Héту, B. (2014). Estimating winter trends in climatic variables in the Chic-Chocs Mountains, Canada (1970-2009). *International Journal of Climatology*, 34: 3078-3088.

Fortin, G., Héту, B. et Germain, D. (2011). Climat hivernal et régime avalancheux dans les corridors routiers de la Gaspésie septentrionale (Québec, Canada). *Climatologie*, 8: 9-26.

Fortin, L.G. et Roy, M. (2009). Optimiser la gestion de l'approvisionnement en eau potable et concilier les usages sur le bassin versant en amont de la rivière Saint-Charles : une collaboration entre la Ville de Québec et le CEHQ. Repéré le 21 mars 2014, à http://www.cwra.org/images/DocumentsLibraryAndConferenceProceedings/acrh-cwra-conference2009-abstracts_only.pdf

Fortin, A., Vibien, A., Therrien, C., Bolduc, D., Milord, F., Lebel, G., Troesch, M. et Samuel, O. (2013). Le risque relié au virus du Nil occidental au Québec et les interventions à privilégier en 2013. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 101 p.

- Foubert, A., Mingelbier, M., Lecomte, F. et Cusson, M. (2014). Spatial Organization of Fish Communities Along a Large River Systems: The St. Lawrence River (Canada). Dans 144th Annual Meeting of the American Fisheries Society. Québec, Canada.
- Fournier, R., Poulin, M., Revéret, J., Rousseau, A. et Théau, J. (2013). Outils d'analyses hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses terres du Saint-Laurent : adaptations aux changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 114 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/221_RapportFournier2013.pdf
- Friesinger, S. et Bernatchez, P. (2010). Perceptions of Gulf of St. Lawrence coastal communities confronting environmental change : Hazards and adaptation, Québec, Canada. *Ocean and Coastal Management*, 53(11), 669–678.
- Furgal, C., Gosselin, P. et Vézeau, N. (2008). Climate, Health and the Changing Canadian North. Dans V. Grovers (dir.), *Global Warming and Climate Change* (p. 807–846). Enfield, NH: Science Publishers.
- Furgal, C. et Seguin, J. (2006). Climate change, health, and vulnerability in Canadian northern Aboriginal communities. *Environmental health perspectives*, 1964-1970.
- Gaboury, S., Boucher, J.F., Villeneuve, C., Lord, D. et Gagnon, R. (2009). Estimating the net carbon balance of boreal open woodland afforestation: A case-study in Quebec's closed-crown boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 257, 483–494.
- Gaborit, E., Pelletier, G., Vanrolleghem, P.A. et Anctil, F. (2010). Simulation du débit de la rivière Saint-Charles, première source d'eau potable de la ville de Québec. *Revue canadienne de génie civil*, 37: 311-321.
- Gagné, R. et Haarman, A. (2011). Les infrastructures publiques au Québec: Évolution des investissements et impact sur la croissance de la productivité. Montréal, Québec: Centre sur la productivité et la prospérité, HEC Montréal. 34 p. Repéré à http://cpp.hec.ca/cms/assets/documents/recherches_publicees/PP-2010-03_Infrastructures.pdf
- Gagnon, A.-È., Arsenault-Labrecque, G., Bourgeois, G., Bourdages, L., Grenier, P. et Roy, M. (2013). Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 156 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/166_RapportRoyM2013.pdf
- Gagnon, A.-È., Roy, M. et Roy, A. (2011). Document synthèse : Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures. Montréal, Québec. 80 p.
- Gamache, I. et Payette, S. (2005). Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada. *Journal of Biogeography*, 32, 849–862.
- Gameda, S., Bootsma, A. et McKenney, D. (2007). Potential impacts of climate change on agriculture in Eastern Canada. Dans E. Wall, B. Smit et J. Wandel (dir.), *Farming in a changing climate: Agricultural Adaptation in Canada* (p. 53–66). Toronto : UBC Press.
- Garcia, R.A., Cabeza, M., Rahbek, C. et Araújo, M.B. (2014). Multiple Dimensions of Climate Change and Their Implications for Biodiversity. *Science*, 344(6183).

- Gardner, M., MacAskill, G. et DeBow, C. (2009). Economic impact of the Nova Scotia ocean sector Economic 2002-2006. Halifax, Nova Scotia. 43 p.
- Gasparrini, A., Armstrong, B., Kovats, S. et Wilkinson, P. (2012). The effect of high temperatures on cause-specific mortality in England and Wales. *Occupational and Environmental Medicine*, 69, 56–61.
- Gendreau, Y., Gagnon, C.A., Berteaux, D. et Pelletier, F. (2012). Cogestion adaptative des parcs du Nunavik dans un contexte de changements climatiques. *Téoros : Revue de recherche en Tourisme*, 31(1), 61–71.
- Genivar. (2013). *Projet Dumont-Étude d'impact sur l'environnement et le milieu social. Réponses aux questions et commentaires du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec* recus le 11 mars 2013. Volumen 1 (Rapport de GENIVAR inc. à Royal Nickel Corporation). 192 p.
- Gennaretti, F., Arseneault, D., Nicault, A., Perreault, L. et Bégin, Y. (2014). Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from northeastern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (28), 10077–10082.
- Georgakakos, A.P., Yao, H., Kistenmacher, M., Georgakakos, K.P., Graham, N.E., Cheng, F.-Y., Spencer, C. et Shamir, E. (2012). Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management. *Journal of Hydrology*, 412-413(4 January 2012), 34–46.
- Gervais, M.-C. et Rhainds, M. (2013). *Portrait et analyse des interventions visant à prévenir les cancers de la peau chez les jeunes de 0 à 18 ans*. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 279 p.
- Gewehr, S., Drobyshev, I., Berninger, F. et Bergeron, Y. (2014). Soil characteristics mediate the distribution and response of boreal trees to climatic variability. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(5), 487–498.
- GIEC. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)* (R. K. Pachauri et A. Reisinger, dir). Genève, Suisse. 103 p.
- GIEC. (2012). *Résumé à l'intention des décideurs*. Dans C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker et Q. Dahe (dir.), *Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique*. (p. 1–20). Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY : Cambridge University Press.
- Gielen, B. et Ceulemans, R. (2001). The likely impact of rising atmospheric CO₂ on natural and managed Populus: a literature review. *Environmental Pollution*, 115(3), 335–358.
- Giguère, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Québec, Canada : Institut national de santé publique du Québec. 95 p.
- Gillett, N.P., Weaver, A.J., Zwiers, F.W. and Flannigan, M.D. (2004). Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophysical Research Letters*, 31(18), L18211.
- Girard, F., Payette, S. et Gagnon, R. (2008). 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*, 35, 529–537.
- Girard, J.-F. (2014). *Les outils juridiques pour la protection et la mise en valeur de territoire sur l'île de Montréal – Les exemples concluants de protection de territoires biologiquement significatifs en milieu urbain* (Rapport de

recherche juridique). 186 p. Repéré à <http://rapport.credemontreal.qc.ca/doc/cre-de-montreal/rapportrecherche/2014022502/#1>

Girardin, M.P., Guo, X.J., De Jong, R., Kinnard, C., Bernier, P. et Raulier, F. (2014). Unusual forest growth decline in boreal North America covaries with the retreat of Arctic sea ice. *Global Change Biology*, 20(3), 851-866

Girardin, M.P., Ali, A. a., Carcaillet, C., Gauthier, S., Hély, C., Le Goff, H., Terrier, A. et Bergeron, Y. (2013). Fire in managed forests of eastern Canada: Risks and options. *Forest Ecology and Management*, 294, 238–249.

Girardin, M.P., Bernier, P.Y., Raulier, F., Tardif, J.C., Conciatori, F. et Guo, X. J. (2011). Testing for a CO₂ fertilization effect on growth of Canadian boreal forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G1), G01012.

GIRBa et École d'architecture de l'Université Laval. (2013). Catalogue : Mesures d'adaptation aux changements climatiques. 23 p.

Glick, P., Stein, B. A. et Edelson, N. A. (dir.). (2011). *Scanning the Conservation Horizon: A Guide to Climate Change Vulnerability Assessment*. National Wildlife. Washington, DC: National Wildlife Federation. 168 p. Repéré à www.nwf.org/vulnerabilityguide.

Godbout, S., Brassard, P., Pelletier, F., Grenier, M., Grenier, P., Belzile, L., Landry, C., Bolduc, F., Benslimane, O. et Bilodeau, D. (2013). Étude des volumes de précipitation et d'évaporation pour le calcul des structures d'entreposage de fumier dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 160 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/301_RapportGodbout2013.pdf

Gonzalez, A., Albert, C., Bronwyn, R., Dumitru, M., Dabrowski, A., Bennett, E. M., Cardille, J. et Lechowicz, M. J. (2013). Corridors, biodiversité, et services écologiques : un réseau écologique pour le maintien de la connectivité et une gestion résiliente aux changements climatiques dans l'Ouest des Basses-Terres du Saint-Laurent (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 68 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/212_RapportGonzalez2014.pdf

Gonzalez, A., Bennett, E., Lechowicz, M. et Cardille, J. (2012). Corridors, biodiversité et services écologiques : un réseau écologique pour le maintien de la connectivité et une gestion résiliente aux changements climatiques dans l'Ouest des basses-terres du Saint-Laurent. Dans *Colloque ÉcoBioCC d'Ouranos, 80ème Congrès de l'Association francophone pour le savoir (ACFAS)*, 9 mai 2012. Montréal, Québec. Repéré à http://www.connexionmonteregie.com/uploads/6/3/9/8/6398839/acfas_website.pdf

Goldberg, M.S., Gasparrini, A., Armstrong, B. et Valois, M.F. (2011). The short-term influence of temperature on daily mortality in the temperate climate of Montreal, Canada. *Environmental Research*, 111(6), 853–860.

Gouvernement de l'Ontario. (2013). Changement climatique. Repéré à http://www.mnr.gov.on.ca/fr/Business/ClimateChange/STEL01_132762.html

Gouvernement du Canada. (2012). Évaluation scientifique canadienne du smog - Faits saillants et messages clés. Ottawa, Ontario. 72 p. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/Publications/AD024B6B-A18B-408D-ACA2-59B1B4E04863%5CEvaluationScientifiqueCanadienneDuSmogFaitsSaillantsEtMessagesCles.pdf>

Gouvernement du Québec. (2008a). Plan d'action 2006-2012 : Le Québec et les changements climatiques, Un défi pour l'avenir. Québec : ministère du Développement durable, de l'Environnement et de Parcs (MDDEP). 54 p.

Gouvernement du Québec. (2008b). Risque d'exposition aux tiques en Montérégie. Québec : Agence de la santé et des services sociaux de la Montérégie. Repéré le 23 septembre 2014, à <http://www.santemonteregie.qc.ca/agence/santepublique/directiondesantepublique/lyme/cartographie.fr.html>

Gouvernement du Québec. (2011). Le Québec voit grand. Orientations stratégiques du Québec en matière d'aires protégées : période 2011-2015. Québec. 7 p. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/orientations-strateg2011-15.pdf

Gouvernement du Québec. (2012a). Le Québec en Action Vert 2020 : Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques. Repéré le 25 avril 2014, à http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf

Gouvernement du Québec. (2012b). Plan de développement de l'industrie touristique 2012-2020 : un itinéraire vers la croissance. Québec. 110 p. Repéré à <http://www.tourisme.gouv.qc.ca/publications/media/document/publications-administratives/plan-dev-tour-2012-2020.pdf>

Gouvernement du Québec. (2012c). Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020. Québec. 41 p. Repéré à http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/strategie-adaptation2013-2020.pdf

Gouvernement du Québec. (2013a). Îlots de chaleur/fraîcheur urbains et température de surface. Repéré le 9 décembre 2013, à <http://www.donnees.gouv.qc.ca/?node=/donnees-details&id=2f4294b5-8489-4630-96a1-84da590f02ee>

Gouvernement du Québec. (2013b). Orientations gouvernementales en matière de diversité biologique. 23 p.

Gouvernement du Québec. (2013c). Pêches et aquaculture commerciales au Québec en un coup d'oeil : Portrait statistique édition 2013. Québec: Direction des analyses et des politiques des pêches et de l'aquaculture. 28 p.

Gouvernement du Québec. (2013d). Plan d'action 2013-2018 développer notre industrie des pêches et de l'aquaculture commerciales. 20 p.

Gouvernement du Québec. (2013e). Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Guide d'interprétation. Version révisée 2013. Repéré le 21 mars 2014, à <http://www.mddep.gouv.qc.ca/Eau/rives/guide-interpretationPPRLPI.pdf>

Gouvernement du Québec. (2013f). Prévenir les effets de la chaleur accablante et extrême. Portail santé mieux-être : conseils et prévention. Repéré le 22 novembre 2013, à <http://sante.gouv.qc.ca/conseils-et-prevention/prevenir-les-effets-de-la-chaleur-accablante-et-extreme/>

Gouvernement du Québec. (2013g). Rapport d'évènement : Inondations printanières Montérégie 2011. Québec : Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie, ministère de la Sécurité Publique (MSP). 19 p.

Gouvernement du Québec. (2013h). Règlement modifiant le Code de sécurité intégrant des dispositions relatives à l'entretien des tours de refroidissement à l'eau. Québec. Repéré le 25 avril 2014 à <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=1&file=59197.PDF>

Gouvernement du Québec. (2013i). Retombées économiques des activités de chasse, de pêche et de piégeage au Québec en 2012. Québec. 16 p.

Gouvernement du Québec. (2013j). Stratégie d'électrification des transports 2013-2017. Repéré le 9 janvier 2014 à <http://www.mce.gouv.qc.ca/publications/electrification-transports/index.asp>

- Gouvernement du Québec. (2014a). La rage. Repéré le 20 février 2014, à <http://www.rage.gouv.qc.ca/index.php?quebec>
- Gouvernement du Québec. (2014b). Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/index.htm>
- Grabow, M.L., Spak, S.N., Holloway, T., Stone, B.J., Mednick, A.C. et Patz, J.A. (2012). Air Quality and Exercise-Related Health Benefits from Reduced Car Travel in the Midwestern United States. *Environmental Health Perspectives*, 120(1), 68–76.
- Greenwood, J.S., Soulos, G.P. et Thomas, N.D. (1998). *Under cover: Guidelines for shade planning and design*. Sydney : NSW Cancer Council and NZW Health Department. 190 p.
- Groeneveld, E., Belzile, F. et Lavoie, C. (2014). Sexual reproduction of Japanese knotweed (*Fallopia japonica* s.l.) at its northern distribution limit: New evidence of the effect of climate warming on an invasive species. *American Journal of Botany*, 101 (3), 459–466.
- Groffman, P.M., Kareiva, P., Carter, S., Grimm, N.B., Lawler, J., Mack, M., Matzek, V. et Tallis, H. (2014). Ecosystems, Biodiversity, and Ecosystem Services. Dans J.M. Melillo, T.T.C. Richmond et G.W. Yohe (dir.), *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment* (p. 195 – 219). U.S. Global Change Research Program.
- Groupe Phragmites. (2012). Le roseau envahisseur : la dynamique, l'impact et le contrôle d'une invasion d'envergure. *Le Naturaliste canadien*, 136(3), 33–39.
- Guay, C., Minville, M. et Braun, M. (2015). A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec. *Canadian Water Resources Journal*, 40(3), 285-302.
- Hagerman, S.M. et Satterfield, T. (2014). Agreed but not preferred: expert views on taboo options for biodiversity conservation, given climate change. *Ecological Applications*, 24(3), 548–559.
- Hakizimana, G., Gagné, C. et Courchesne- O'Neil, S. (2012). Les déterminants de l'intention des propriétaires résidentiels de la région de Lanaudière à éliminer l'herbe à poux sur leurs terrains. Joliette, Québec : Agence de la santé et des services sociaux de Lanaudière, Direction de santé publique, Service de prévention et contrôle des risques d'origine biologique et environnementale et Service de surveillance. 66 p.
- Hambly, D., Andrey, J., Mills, B. et Fletcher, C. (2013). Projected implications of climate change for road safety in Greater Vancouver, Canada. *Climatic Change*, 116(3-4), 613–629.
- Hannah, L. (2010). A Global Conservation System for Climate Change Adaptation. *Conservation Biology*, 24(1), 70–77.
- Hansen, A.J., Neilson, R.P., Dale, V.H., Flather, C.H., Iverson, L.R., Currie, D.J., Shafer, S., Cook, R. et Bartlein, P.J. (2001). Global Change in Forest: Responses of Species, Communities, and Biomes. *BioScience*, 51(9), 765–779.
- Harper, S., Edge, V., Schuster-Wallace, C., Berke, O. et McEwen, S. (2011). Weather, Water Quality and Infectious Gastrointestinal Illness in Two Inuit Communities in Nunatsiavut, Canada: Potential Implications for Climate Change. *EcoHealth*, 8(1), 93–108.

- Hatfield, J.L., Boote, K.J., Kimball, B.A., Ziska, L.H., Izaurralde, R.C., Ort, D., Thomson, A.M. et Wolfe, D. (2011). Climate Impacts on Agriculture : Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351–370.
- Hawes, H., Chisholm, W., Wareing, B., Behncke, R., Drier, S., Mirium, V., Lavoie, M., Eliasson, A.J., Teramoto, M., Fikke, S., Menezes, R.C., Meireless do Nascimento, C., Risse, B., Ferreira Da Silva, J. et Wojciechowski, P. (2014). Guidelines for the Management of risk associated with Severe Climatic Events and Climate Change on Overhead Lines (Working Group SCB2.54). CIGRE.
- Hébert, M., Gonzales, N. et Bénézet, P. (2013). Évaluation des impacts des changements climatiques sur la santé humaine en territoire cri : Revue de littérature. Québec. 49 p.
- Heller, N.E. et Zavaleta, E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 142(1), 14–32.
- Hodgson, J.A., Thomas, C.D., Wintle, B.A. et Moilanen, A. (2009). Climate change, connectivity and conservation decision making: back to basics. *Journal of Applied Ecology*, 46(5), 964–969.
- Hoffman, P., Bryan, W., Farber-DeAnda, M., Cleaver, M., Lewandowski, C. et Young, K. (2010). Hardening and Resiliency U.S. Energy Industry Response to Recent Hurricane Seasons. Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, U.S. Department of Energy. 74 p. Repéré à <http://www.oe.netl.doe.gov/docs/HR-Report-final-081710.pdf>
- Holmyard, N. (2014). Climate change: implications for fisheries & aquaculture – Key findings from the IPCC Fifth Assessment Report. European Climate Foundation (ECF), the Sustainable Fisheries Partnership (SFP), the University of Cambridge's Judge Business School (CJBS) et the Institute for Sustainability Leadership (CISL). 16 p.
- Houle, D., Bouffard, A., Duchesne, L., Logan, T. et Harvey, R. (2012). Projections of Future Soil Temperature and Water Content for Three Southern Quebec Forested Sites. *Journal of Climate*, 25(21), 7690–7701.
- Houle, D., Harvey, R., Logan, T. et Duchesne, L. (2014). Développement d'indicateurs hydro-climatiques : projection des changements de température et d'humidité des sols forestiers et de leurs impacts potentiels sur la fertilité des sols (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 105 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/314_RapportHoule2014.pdf
- Houle, D., Moore, J.-D. et Provencher, J. (2007). Ice Bridges on the St. Lawrence River as an Index of Winter Severity from 1620 to 1910. *Journal of Climate*, 20(4), 757–764.
- Houle, D., Paquette, A., Côté, B., Logan, T., Power, H., Charron, I. et Duchesne, L. (en élaboration). Impacts of climate change on maple syrup production volume and timing of season. *Journal of climate*.
- Houle, G. (2007). Spring-flowering herbaceous plant species of the deciduous forests of eastern Canada and 20th century climate warming. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(2), 505–512.
- Houston, D., Werrity, A., Bassett, D., Geddes, A., Hoolachan, A. et McMillan, M. (2011). Pluvial (rain-related) flooding in urban areas: the invisible hazard. Joseph Rowntree Foundation. 96 p. Repéré à <http://www.jrf.org.uk/sites/files/jrf/urban-flood-risk-ebook.pdf>
- Howden, S.M., Soussana, J.-F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M. et Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(50), 19691–19696.

- Huaringa Alvarez, U.F., Trudel, M. et Leconte, R. (2014). Impacts and Adaptation to Climate Change Using a Reservoir Management Tool to a Northern Watershed: Application to Lièvre River Watershed, Quebec, Canada. *Water Resources Management*, 28(11), 3667–3680.
- Hudon, C., Armellin, A., Gagnon, P. et Patoine, A. (2010). Variations in water temperatures and levels in the St. Lawrence River (Québec, Canada) and potential implications for three common fish species. *Hydrobiologia*, 647(1), 145–161.
- Hughes, A. R., Inouye, B. D., Johnson, M. T. J., Underwood, N. et Vellend, M. (2008). Ecological consequences of genetic diversity. *Ecology Letters*, 11, 609–623. doi:10.1111/j.1461-0248.2008.01179.x
- Huntley, B. et Birks, H.J.B. (1983). *An Atlas of Past and Present Pollen Maps for Europe: 0-13 000 years ago*. *Biologia Plantarum* (vol. 28, p. 667). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Hutchings, J.A., Côté, I.M., Dodson, J.J., Fleming, I.A., Jennings, S., Mantua, N.J., Peterman, R.M., Riddell, B.E., Weaver, A.J et VanderZwaag, D.L. (2012). *Sustaining Canada's Marine Biodiversity: Responding to the Challenges Posed by Climate Change, Fisheries, and Aquaculture*. Ottawa, Ontario. 315 p.
- ICLEI (2010). *Série d'études de cas sur les villes et la biodiversité. Les meilleures pratiques canadiennes de gestion locale de la biodiversité*. Toronto, Ontario: ICLEI-Gouvernements locaux pour le développement durable. 38 p. Repéré à http://www.icleicanada.org/images/icleicanada/pdfs/Cities_et_Biodiversity_Case_Study_Series_french.pdf
- ICU. (2011). *Norme de pratique modèle de l'ICU pour le changement climatique*. Institut Canadien des Urbanistes (ICU). 60 p. Repéré à [http://www.planningforclimatechange.ca/wwwroot/Docs/Library/CIPReports/CIP_STANDARD_OF_PRACTICE\(FRENCH\).PDF](http://www.planningforclimatechange.ca/wwwroot/Docs/Library/CIPReports/CIP_STANDARD_OF_PRACTICE(FRENCH).PDF)
- Ignaciuk, A. (2014). *Modelling adaptation to Climate Change in Agriculture*. Paris : OECD. 55 p.
- INSPQ. (2006). *Portrait de santé du Québec et de ses régions 2006 : les analyses - Deuxième rapport national sur l'état de santé de la population du Québec*. Québec : Institut national de santé publique du Québec (INSPQ). 131 p.
- INPES. (2012). *Dossier de presse : Mieux prévenir et détecter tôt les cancers de la peau*. Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (INPES). 38 p.
- INSPQ. (2010). *Froid intense*. Repéré le 25 avril 2014, à <http://www.monclimatmasante.qc.ca/public/froid-intense.aspx>
- INSPQ. (2013a). *La rage*. Repéré le 30 december 2013 à <http://www.inspq.qc.ca/zoonoses/rage>
- INSPQ. (2013b). *Le virus du Nil occidental (VNO)*. Repéré le 30 december 2013, à <http://www.inspq.qc.ca/vno>
- Intact Assurances. (2013). *Le Catastrophes naturelles au Canada. L'assurance évolue*. Repéré le 9 avril 2014, à <http://www.assuranceevolue.com/fr/intensification-des-catastrophes-d-origine-meteorologique-ontario.html>
- Iñiguez, C., Ballester, F., Ferrandiz, J., Pérez-Hoyos, S., Sáez, M., López, A. et TEMPRO-EMECAS. (2010). Relation between temperature and mortality in thirteen Spanish cities. *International journal of environmental research and public health*, 7, 3196–3210.

IOM. (2011). *Climate Change, the Indoor Environment, and Health*. Washington, DC: National Academies Press. 286 p.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley, dir.). Cambridge, United Kingdom et New York, NY: Cambridge University Press. 1535 p.

IPCC. (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.)]. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA: Cambridge University Press. 1132 pp.

IPCC. (2014b). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 688 p.

IPCC (2014c). Summary for Policymakers. Dans C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B. Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. et L. L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (p. 1–32). Cambridge, United Kingdom, et New York, NY, USA: Cambridge University Press.

ISQ. (2013a). *Le bilan démographique du Québec, Édition 2013 (Édition 20)*. Québec : Institut de la statistique du Québec (ISQ). 172 p. Repéré à <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/bilan-demographique.html>

ISQ. (2013b). *Le Québec chiffres en main, Édition 2013*. Québec : Institut de la statistique du Québec (ISQ). 72 p. Repéré à http://www.stat.gouv.qc.ca/quebec-chiffre-main/qcm2013_fr.pdf

ISQ. (2014a). *Le Québec chiffres en main, Édition 2014*. Québec : Institut de la statistique du Québec (ISQ). 73 p. Repéré à http://www.stat.gouv.qc.ca/quebec-chiffre-main/pdf/qcm2014_fr.pdf (2.1.3)

ISQ. (2014b). *Produit intérieur brut par industrie au Québec, Décembre 2013. ÉCONOMIE*. Québec : Institut de la statistique du Québec (ISQ). 151 p. Repéré à http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/economie/comptes-economiques/comptes-production/tabsom2014_05inter.htm

Jansen, T. et Gislason, H. (2011). Temperature affects the timing of spawning and migration of North Sea mackerel. *Continental Shelf Research*, 31(1), 64–72.

Jenni, L. et Kéry, M. (2003). Timing of autumn bird migration under climate change: advances in long-distance migrants, delays in short-distance migrants. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*, 270(May), 1467–1471. doi:10.1098/rspb.2003.2394

Jing, Q., Bélanger, G., Qian, B. et Baron, V. (2013). Timothy yield and nutritive value under climate change in Canada. *Agronomy Journal*, 105(6), 1683–1694.

- Jing, Q., Belanger, G., Qian, B. et Baron, V. (2014). Timothy yield and nutritive value with a three-harvest system under the projected future climate in Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 94, 213–222.
- Jinna, S. et Adams, B. (2013). Ultraviolet Radiation and the Athlete: Risk, Sun Safety, and Barriers to Implementation of Protective Strategies. *Sports Medicine*, 43(7), 531–537.
- Joyce, L., Cross, M. et Girvetz, E. (2011). Addressing uncertainty in vulnerability assessments. Dans P. Glick, B., Stein, B.A. et N. A. Edelson (dir.), *Scanning the conservation horizon: A guide to climate change vulnerability assessment* (p. 68–73). Washington, DC: National Wildlife Federation.
- Julien, Y. et Sobrino, J.A. (2009). Global land surface phenology trends from GIMMS database. *International Journal of Remote Sensing*, 30(13), 3495–3513.
- Kaminski, J., Kan, I. et Fleischer, A. (2012). A Structural Land-Use Analysis of Agricultural Adaptation to Climate Change: A Proactive Approach. *American Journal of Agricultural Economics*, 95(1), 70–93.
- Karagiannis, I., Brandsema, P. et Van der Sande, M. (2009). Warm, wet weather associated with increased Legionnaires' disease incidence in The Netherlands. *Epidemiology and Infection*, 137(2), 181–187.
- Kelly, J., Makar, P.A. et Plummer, D.A. (2012). Projections of mid-century summer air-quality for North America: effects of changes in climate and precursor emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(12), 5367–5390.
- Kenward, A. et Raja, U. (2014). *Blackout: Extreme Weather , Climate Change and Power Outages*. Princeton: Climate Central. 23 p. Repéré à <http://assets.climatecentral.org/pdfs/PowerOutages.pdf>
- Keppel, G., Van Niel, K.P., Wardell-Johnson, G.W., Yates, C.J., Byrne, M., Mucina, L., Schut, G.T., Hopper, S.D. et Franklin, S.E. (2012). Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 21(4), 393–404.
- Kernan, M., Battarbee, R.W. et Moss, B.R. (dir.). (2010). *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell. 328 p.
- Kestens, Y., Brand, A., Fournier, M., Goudreau, S., Kosatsky, T., Maloley, M. et Smargiassi, A. (2011). Modelling the variation of land surface temperature as determinant of risk of heat-related health events. *International journal of health geographics*, 10(1), 7.
- Kharouba, H.M., Paquette, S.R., Kerr, J.T. et Vellend, M. (2014). Predicting the sensitivity of butterfly phenology to temperature over the past century. *Global Change Biology*, 20(2), 504–514.
- Kilpatrick, A.M. et Randolph, S.E. (2012). Drivers, dynamics, and control of emerging vector-borne zoonotic diseases. *Lancet*, 380, 1946–1955.
- Kirschbaum, M.U.F. (2000). Forest growth and species distribution in a changing climate. *Tree physiology*, 20, 309–322.
- Kishchuk, N. (2013). Plan d'action 2006 - 2012 sur les changements climatiques - volet santé : Évaluation de la mise en oeuvre (Rapport final). 55 p.
- Kolbe, A. et Gilchrist, K.L. (2009). An extreme bushfire smoke pollution event: health impacts and public health challenges. *NSW Public Health Bulletin*, 20(1-2), 19–23.

Köning, U. et Abbeg, B. (1997). Impacts of climate change on tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism*, 5(1), 46–58.

Krueger, H., Williams, D., Chomiak, M. et Trenaman, L. (2010). The economic burden of skin cancer in Canada: Current and Projected. Canadian Partnership Against Cancer. 184 p. Repéré à <http://www.partnershipagainstcancer.ca/wp-content/uploads/Economic-Burden-of-Skin-Cancer-in-Canada-Report-Final1.pdf>

Krupnik, I. et Jolly D. (2002). *The Earth is Faster Now: Indigenous Observations of Arctic Environmental Change*. Fairbanks, Alaska: Arctic Research Consortium of the United States. 384 pp.

Kulshreshtha, S. et Wheaton, E. (2013). Climate Change and Canadian Agriculture: Some Knowledge Gaps. *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses*, 4(2), 127–148.

Kurylyk, B.L., Bourque, C.P.-A. et MacQuarrie, K.T.B. (2013). Potential surface temperature and shallow groundwater temperature response to climate change: an example from a small forested catchment in east-central New Brunswick (Canada). *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2701–2716.

L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M.-P., Ducharme, M.-A., Larrivée, K., Grandmont, K. et Lemieux, C. (2013). Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik (Rapport scientifique final pour Ouranos). Québec. 90 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/172_RapportLHAraultetal2013.pdf

Laaidi, K., Economopoulou, A., Wagner, V., Pascal, M., Empereur-Bissonnet, P., Verrier, A. et Beaudreau, P. (2013). Cold spells and health: prevention and warning. *Public health*, 127(5), 492–499.

Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E. et Beaudreau, P. (2012). The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environmental Health Perspectives*, 120(2), 254–259.

Labrèche, F., Duguay, P., Ostiguy, C., Boucher, A., Roberge, B., Peters, C.E. et Demers, P.A. (2013). Estimating occupational exposure to carcinogens in Quebec. *American Journal of Industrial Medicine*, 56(9), 1040–1050.

Labrèche, F., Duguay, P., Ostiguy, C., Goyer, N., Boucher, A., Roberge, B. et Baril, M. (2012). Substances cancérigènes : Portrait de l'exposition des travailleurs québécois (Rapport R-732). Montréal, Québec : Études et recherches IRSST. 89 p.

Lachance-Cloutier, S. et Turcotte, R. (2012). Mise à jour sur les changements récents des indicateurs hydrologiques aux stations hydrométriques du Québec (Rapport interne). Québec. 7 p.

Lafrance, G. et Desjarlais, C. (2006). Impact socio-économique du changement climatique : La demande d'énergie (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 73 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/9_Rapport_Lafrance_energie_2006.pdf

Lamothe, S., Bellerose, S., Chouinard, G., Roy, M. et Bourgeois, G. (2007). Effet des changements climatiques sur la pomiculture au Québec : Étude de la phénologie du pommier (Rapport final). Québec : Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Agriculture et agroalimentaire Canada. 33 p.

Lankester, M.W. (2010). Understanding the Impact of Meningeal Worm, *Parelaphostrongylus tenuis*, on Moose Populations. *Alces*, 46, 53–70.

Lapointe, M., Boisclair, D., Bergeron, N.E., Curry, R. A., MacQuarrie, K.K., St-Hilaire, A.A., McKenzie, J.J.M.M et Cunjak, R.R.A. (2013). Critical thermal refugia for Atlantic salmon and brook trout populations of eastern Canadian rivers (Rapport scientifique final pour Ouranos et CRSNG, extrait). Montréal, Québec. 13 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/285_RapportLapointe2014.pdf

Larocque, M., Parrott, L., Green, D., Lavoie, M., Pellerin, S., Levison, J., Girard, P. et Ouellet, M.-A. (2013). Modélisation hydrogéologique et modélisation des populations de salamandres sur le mont Covey-Hill : Perspectives pour la conservation des habitats en présence de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 87 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/173_RapportLarocquesetal2013.pdf

Larrivée, C., Debrabandère, A. et Desjarlais, C. (2013). S'adapter aux impacts inévitables des changements climatiques. Dans Institut du Nouveau Monde (dir.), L'État du Québec 2013-2014 (p. 232–240). Montréal, Québec : Les éditions du Boréal.

Larrivée, C., Sinclair-Desgagné, N., Da Silva, L., Revéret, J.P., et Desjarlais, C. (2015). Évaluation des impacts des changements climatiques et de leurs coûts pour le Québec et l'État québécois. Montréal, Québec : Ouranos. 58 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/373_RapportLarrivAe2015.pdf

Lavoie, I., Laurion, I., Warren, A. et Vincent, W. (2007). Les fleurs d'eau de cyanobactéries (INRS rapport n°916). Québec. 124 p.

Lavoie, M. et Pellerin, S. (2011). Étude paléoécologique de la tourbière de la réserve écologique du Pin-Rigide (Rapport remis au MDDEP, Direction du patrimoine écologique et des parcs).

Le Corre, M., Hins, C., Dussault, C. et Côté, S.D. (2013). Influence des changements climatiques sur l'utilisation de l'espace du caribou migrateur du Québec-Labrador (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 27 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/161_RapportDussault2013.pdf

Leakey, A.D.B., Ainsworth, E.A, Bernacchi, C.J., Rogers, A., Long, S.P. et Ort, D.R. (2009). Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of experimental botany*, 60(10), 2859–76.

Lease, N., Pichette, A. et Chaumont, D. (2009). Projet d'étude sur l'adaptation aux changements climatiques du secteur de la pomme au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 52 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/154_adaptationauxCCpomiculture_154_NancyLease_18nov2009.pdf

Lebel, G., Busque, D., Therrien, M., Walsh, P., Paradis, J., Brault, M.-P. et Canuel, M. (2012). Bilan de la qualité de l'air au Québec en lien avec la santé, 1975-2009. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 43 p.

Lebel, G. et Bustinza, R. (2011). Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec : Bilan de la saison estivale 2010. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 43 p.

Lebel, G. et Bustinza, R. (2012). Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec : Bilan de la saison estivale 2011. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 32 p.

Lebel, G. et Bustinza, R. (2013). Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec : Bilan de la saison estivale 2012. Québec : Institut national de santé publique du Québec. 69 p.

- Leclerc, L. (2012). Rapport de synthèse sur la mesure du progrès en adaptation : Document de support à l'Atelier national sur la mesure du progrès en adaptation au Canada (7 et 8 mars 2012 à Montréal). Montréal, Québec : OKAPI. 34 p.
- Leconte, R., Trudel, M., Krau, S., Huaranga Alvarez, U.H. et Côté, P. (2013). Analyse et adaptation au contexte des changements climatiques des outils d'aide à la gestion du système hydrique du bassin versant de la rivière des Outaouais : mise en oeuvre sur le sous-bassin de la rivière du Lièvre (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 73 p.
- Leduc, A., Bernier, P.Y., Mansuy, N., Raulier, F., Gauthier, S. et Bergeron, Y. (2015). Using salvage logging and tolerance to risk to reduce the impact of forest fires on timber supply calculations. *Canadian Journal of Forest Research*.
- Lefavre, D. (2005). 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. 34 p
- Le Goff, H., Leduc, A., Bergeron, Y. et Flannigan, M. (2005). The adaptive capacity of forest management to changing fire regimes in the boreal forest of Quebec. *The Forestry Chronicle*, 81(4), 582–592.
- Leighton, P.A., Koffi, J.K., Pelcat, Y., Lindsay, L.R. et Ogden, N.H. (2012). Predicting the speed of tick invasion: An empirical model of range expansion for the Lyme disease vector *Ixodes scapularis* in Canada. *Journal of Applied Ecology*, 49, 457–464.
- Lelievre, M., Lanoe, L. et Les Eco Maires. (2010). Guide de la biodiversité à l'usage des maires. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie du Développement durable et de la Mer, en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le Climat. 15 p. Repéré à http://www.ecomaires.com/wp-content/uploads/2013/03/Guide_de_la_biodiversité_à_lusage_des_Maires.pdf
- Lemieux, C., Allard, M., Fortier, D., Grandmont, K., Larrivée, K., L'Hérault, E. et Carbonneau, A.-S. (2013). Une évaluation de l'état du parc immobilier du ministère de la santé et des services sociaux du Québec en fonction de la sensibilité du pergélisol au Nunavik (Rapport interne) 96 p.
- Lemieux, C.J., Beechey, T.J. et Gray, P.A. (2011). Prospects for Canada's protected areas in an era of rapid climate change. *Land Use Policy*, 28(4), 928–941.
- Lemieux, C.J., Beechey, T.J., Scott, D.J. et Gray, P.A. (2010). Protected Areas and Climate Change in Canada: Challenges and Opportunities for Adaptation (Occasional Paper No. 19). Ottawa, Ontario: Canadian Council on Ecological Areas (CCEA) Secretariat. 170 p. Repéré à http://www.ccea.org/Downloads/en_papers_occasional19.pdf
- Lemieux, C. et Doré, G. (2013). Préservation des infrastructures de transport dans le Nord canadien: Programme Arquluk. *AQTr Route & Transport*, 42(4), 15–18.
- Lemmen, D.S. et Warren, F.J. (2004). Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne. Ottawa, Ontario : Gouvernement du Canada. 448 p.
- Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J. et Bush, E. (dir.). (2008). Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007. Ottawa, Ontario. 448 p. Repéré à https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2007/pdf/full-complet_f.pdf

Lepage, M. et Bourgeois, G. (2012). Modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures. Québec : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 15 p.

Lepage, M., Bourgeois, G. et Bélanger, G. (2012). Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision. Québec : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 11 p.

Lépy, É., Heikkinen, H.I., Karjalainen, T.P., Tervo-Kankare, K., Kauppila, P., Suopajarvi, T., Ponnikas, J., Siikamäki, P. et Rautio, A. (2014). Multidisciplinary and Participatory Approach for Assessing Local Vulnerability of Tourism Industry to Climate Change. *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 14(1), 41–59.

Le Québec économique. (2014). Activité économique - commerce extérieur. Le portail d'information sur l'économie du Québec aujourd'hui. Repéré à http://qe.cirano.qc.ca/theme/activite_economique/commerce_exterieur

Lesnikowski, A.C., Ford, J.D., Paterson, J.A., Barrera, M. et Heymann, S.J. (2011). Adapting to health impacts of climate change : a study of UNFCCC Annex I. *Environmental Research Letters*, 6(4).

Lévesque, E., Hermanutz, L., Gérin-Lajoie, J., Bell, T., Boudreau, S., Currier, A., Jacobs, J., Lorque, C., Lavallée, C., Siegwart, C. et Tremblay, B. (2013). Évolution dynamique de la végétation et ses répercussions sur la productivité des petits fruits. Dans M. Lemay et M. Allard (dir.), *Le Nunavik et le Nunatsiavut: de la Science aux Politiques Publiques: Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation* (p. 231–257). Québec : ArcticNet Inc.

Lévesque, B., Gervais, M.-C., Chevalier, P., Gauvin, D., Anassour-Laouan-Sidi, E., Gingras, S., Fortin, N., Brisson, G., Greer, C. et Bird, D. (2014). Prospective study of acute health effects in relation to exposure to cyanobacteria. *The Science of the total environment*, 466-467, 397–403.

Levison, J., Larocque, M., Fournier, V., Gagné, S., Pellerin, S. et Ouellet, M.A. (2013). Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change. *Hydrological Processes*.

LGA. (2014). *Climate Adaptation Planning Guidelines*. Local Government Association of South Australia (LGA). 75 p. Repéré à <http://www.lga.sa.gov.au/publicArea1/climatechange>

Ligue contre le Cancer. (2009). *Les cancers de la peau, Recherche, information - prévention - dépistage : Actions pour les malades et leurs proches*. 20 p.

Lin, S., Hsu, W.-H., Van Zutphen, A. R., Saha, S., Luber, G. et Hwang, S.-A. (2012). Excessive Heat and Respiratory Hospitalizations in New York State: Estimating Current and Future Public Health Burden Related to Climate Change. *Environmental Health Perspectives*, 120(11), 1571–1577.

Linham, M.M. et Nicholls, R.J. (2010). *Technologies for Climate Change Adaptation: Coastal Erosion and Flooding* (X. Zhu dir.). UNEP Risø Centre on Energy, Climate and Sustainable Development. 150 p. Repéré à http://www.unep.org/pdf/TNAhandbook_CoastalErosionFlooding.pdf

Lofgren, B.M., Hunter, T.S. et Wilbarger, J. (2011). Effects of using air temperature as a proxy for potential evapotranspiration in climate change scenarios of Great Lakes basin hydrology. *Journal of Great Lakes Research*, 37(4), 744–752.

Logan, T., Charron, I., Chaumont, D. et Houle, D. (2011). Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Montréal, Québec. 55 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011-Sans-Annexes.pdf

Lovat, C.-A. (2013). Clinal variation and phenology in two conspecifics of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud in Northeastern North America : implications for current management and future climate change (Mémoire de maîtrise). Université McGill. Montréal, Québec. 89 p.

Lundgren, K., Kuklane, K., Gao, C. et Holmer, I. (2013). Effects of heat stress on working populations when facing climate change. *Industrial Health*, 51, 3–15.

Lundgren, L. et Jonsson, A. (2012). Assessment of social vulnerability: a literature review of vulnerability related to climate change and natural hazards (CSPR Briefing No 9). Norrköping, Sweden: Centre for Climate Science and Policy Research. 20 p.

Luo, Y., Su, B., Currie, W.S., Dukes, J.S., Finzi, A., Hartwig, U., Hungate, B. McMurtrie, R.E., Oren, R., Parton, W.J., Pataki, D.E., Shw, M.R., Zar, D.R. et Field, C.B. (2004). Progressive Nitrogen Limitation of Ecosystem Responses to Rising Atmospheric Carbon Dioxide. *BioScience*, 54(8), 731–739.

Lupi, C., Morin, H., Deslauriers, A., Rossi, S. et Houle, D. (2012). Increasing nitrogen availability and soil temperature: effects on xylem phenology and anatomy of mature black spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(7), 1277–1288.

Mabille, G., Descamps, S. et Berteaux, D. (2010). Predation as a probable mechanism relating winter weather to population dynamics in a North American porcupine population. *Population Ecology*, 52, 537–546.

Maclean, I.M.D. et Wilson, R.J. (2011). Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

MacDonald, F. (2010). Invasive Species and Climate Change. Ontario Federation of Anglers and Hunters. Repéré à http://www.helpourfisheries.com/Annual_Workshop/2010/OFAH_Francine_MacDonald.pdf

Macintosh, A. (2013). Coastal climate hazards and urban planning: how planning responses can lead to maladaptation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(7), 1035–1055.

Mackey, C.W., Lee, X. et Smith, R.B. (2012). Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, 49, 348–358.

Magnan, A. (2013). Éviter la maladaptation au changement climatique. *Policy Brief*, (8), 1–4. Repéré à http://www.iddri.org/Publications/Collections/Syntheses/PB0813_AM_maladaptation.pdf

Magnan, G. et Garneau, M. (2014). Evaluating long-term regional climate variability in the maritime region of the St. Lawrence North Shore (eastern Canada) using a multi-site comparison of peat-based paleohydrological records. *Journal of Quaternary Science*, 29(3), 209–220.

Mailhot, A. (sous presse). Impacts and adaptation of an existing urban stormwater system to climate change. *Journal of Hydrology*.

Mailhot, A., Beauregard, I., Talbot, G., Caya, D. et Biner, S. (2012). Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1151–1163.

- Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G. et Khedhaouiria, D. (2014). Gestion des eaux pluviales et changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/159_RapportMailhot2014.pdf
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D. et Talbot, G. (2007). Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, 347(1-2), 197–210.
- Mailhot, Y., Dumont, P. et Vachon, N. (2011). Management of the Lake Sturgeon *Acipenser fulvescens* population in the lower St Lawrence River (Québec, Canada) from the 1910s to the present. *Journal of Applied Ichthyology*, 27(2), 405–410.
- Malcolm, S., Marshall, E., Aillery, M., Heisey, P., Livingston, M. et Day-Rubenstein, K. (2013). Agricultural adaptation to a changing climate : economic and environmental implications. Dans R. Oberdeck et G. Parham (dir.), *Agricultural adaptation to climate change* (p. 1–96). Nova Science Publishers, Inc.
- Malcolm, J.R., Markham, A., Neilson, R.P. et Garaci, M. (2002). Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography*, 29(7), 835–849.
- Maller, C.J. et Strengers, Y. (2011). Housing, heat stress and health in a changing climate: Promoting the adaptive capacity of vulnerable households, a suggested way forward. *Health Promotion International*, 26(4), 492–498.
- Mameamskum, J. (2013). Assessment of Climate Change Impacts on the Caribou, the Land, and the Naskapi Nation, and Identification of Priority Adaptation Strategies (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 38 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/323_RapportMameamskum2014.pdf
- Mansur, E., Mendelsohn, R. et Morrison, W. (2008). Climate change adaptation: A study of fuel choice and consumption in the US energy sector. *Journal of Environmental Economics and Management*, 55, 175–193.
- MAPAQ. (2005). Distribution géographique de l’herbe à poux au Québec. Repéré le 15 septembre 2014, à <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/dgpar/arico/herbierv/compherbier-ambel.htm>
- MAPAQ. (2013). Politique de Souveraineté Alimentaire. Québec : ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec (MAPAQ). 48 p.
- Marchand, M., Fenton, N., Bergeron, Y. et Tremblay, F. (2013). Biodiversité de la flore vasculaire et invasculaire de la Baie James et évaluation de leurs vulnérabilités face aux changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 40 p.
- Martel, B., Giroux, J.-X., Gosselin, P., Chebana, F., Ouarda, T.B.M.J. et Charron, C. (2010). Indicateurs et seuils météorologiques pour les systèmes de veille-avertissement lors de vagues de chaleur au Québec. Québec, Canada : Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique du Québec, Institut national de la recherche scientifique - Eau, Terre et Environnement. 99 p.
- Mathias, J., Ayles, B., Blakney, S., Charles, T., Fast, H. et Irniq, P. (2008). Arctic change and coastal communities: Overview of the coastal zone Canada conference, Tuktoyaktuk, August 2006. *Arctic*, 61(Suppl. 1), iii–xi.
- Martin, S.L., Cakmak, S., Hebborn, C.A., Avramescu, M.-L. et Tremblay, N. (2012). Climate change and future temperature-related mortality in 15 Canadian cities. *International Journal of Biometeorology*, 56, 605–619.

Martineau, G. (2011). Analyse du cycle de vie des impacts environnementaux découlant de l'implantation de mesures d'atténuation d'îlots de chaleur urbains. Montréal, Québec : Institut national de santé publique du Québec, Ouranos, CIRAIG. 54 p.

Mawdsley, J.R., O'Malley, R. et Ojima, D.S. (2009). A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation biology : the journal of the Society for Conservation Biology*, 23(5), 1080–1089.

McCormick, L.C., Pevear, J. III. et Xie, R. (2013). Measuring Levels of Citizen Public Health Emergency Preparedness, Jefferson County, Alabama. *Journal of Public Health Management and Practice*, 19(3), 266–273.

MacDonald, F. (2010). Invasive Species and Climate Change. Ontario Federation of Anglers and Hunters. Repéré à http://www.helpourfisheries.com/Annual_Workshop/2010/OFAH_Francine_MacDonald.pdf

McKenney, D.W., Pedlar, J.H., Lawrence, K., Campbell, K. et Hutchinson, M.F. (2007). Potential Impacts of Climate Change on the Distribution of North American Trees. *BioScience*, 57(11), 939–948.

McKenney, D.W., Pedlar, J.H., Rood, R.B. et Price, D. (2011). Revisiting projected shifts in the climate envelopes of North American trees using updated general circulation models. *Global Change Biology*, 17(8), 2720–2730.

McKenzie, R.L., Aucamp, P.J., Bais, A.F., Bjorn, L.O., Ilyas, M. et Madronich, S. (2011). Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 10(2), 182–198.

McKinney, M.L. (2006). Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 127(3), 247–260.

McManus, K.M., Morton, D.C., Masek, J.G., Wang, D., Sexton, J.O., Nagol, J.R., Ropars, P. et Boudreau, S. (2012). Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Quebec from 1986 to 2010. *Global Change Biology*, 18(7), 2313–2323.

McMeekin, K. et Juteau, D. (2013). Réfection écologique et verdissement des stationnements dans un complexe de logement social en centre-ville de Montréal. Dans *Novatech 2013*. Lyon, France. 5 p. Repéré à <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/51244/2A52-370JUT.pdf?sequence=1>

MDDELCC. (2002a). Indice de la qualité de l'air. Ministère du Développement durable, de l'environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Repéré le 17 septembre 2014, à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/AIR/iqa/index.htm>

MDDELCC. (2002b). Info-Smog. Ministère du Développement durable, de l'environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Repéré le 17 septembre 2014, à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/info-smog/index.htm>

MDDELCC. (2011). Communiqué de presse : Pierre Arcand annonce des mesures pour protéger la qualité de l'air, 13 juin 2011. Ministère du Développement durable, de l'environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Repéré le 17 septembre 2014, à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/infuseur/communiqu.asp?no=1871>

MDDELCC. (2012). Communiqué de presse : Québec annonce l'élaboration d'une politique sur la qualité de l'air, 31 juillet 2012. Ministère du Développement durable, de l'environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Repéré le 17 septembre 2014, à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/infuseur/communiqu.asp?no=2199>

MDDELCC. (2013). Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Repéré le 21 mars 2014 à <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>.

MEA. (2005). Ecosystems and Human Well-Being. Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment (MEA), Washington, DC: Island Press. 155 p. Repéré à <http://www.millenniumassessment.org/en/Synthesis.html>

Mehdi, B., Gombault, C., Lehner, B., Michaud, A., Beaubin, I., Sottile, M.-F., Blondlot, A., Bernier, D., Bérubé, J., Lauzier, R. et Mimeault, M. (2014). Augmenter la résilience des bassins agricoles aux changements climatiques et aux changements d'occupation du territoire agricole à venir : Étude de cas de la Baie Missisquoi (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 225 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/307_RapportLehner2014.pdf

Mehdi, B., Lehner, B. et Ludwing, R. (soumis). Drivers of agricultural land use change in developed regions for future scenario development. *Land Use Policy*.

Melvin, G.D., Stephenson, R.L. et Power, M.J. (2009). Oscillating reproductive strategies of herring in the western Atlantic in response to changing environmental conditions. *ICES Journal of Marine Science*, 66(8), 1784–1792.

Mendelsohn, R. et Dinar, A. (2009). Climate change and agriculture : an economic analysis of global impacts, adaptation and distributional effects (p. 246). Cheltenham, Northampton: Edward Elgar Publishing Limited.

Mercier, D. et Chadenas, C. (2012). La tempête Xynthia et la cartographie des « zones noires » sur le littoral français : analyse critique à partir de l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée). *Norois*, 1(222), 45–60. Repéré à http://www.cairn.info/resume.php?ID_ARTICLE=NOR_222_0045

MFFP. (2003). Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec, édition 2003. Québec: Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Repéré à <http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/zone-vegetation-2003.pdf>

MFQ. (2005). Impacts des changements démographiques sur l'économie, le marché du travail et les finances du Québec. Québec : ministère de finances du Québec (MFQ). 33 p. Repéré à http://www.finances.gouv.qc.ca/documents/Autres/fr/Impacts_demographiques2005.pdf

Michaud, A., Drouin, A., Mailhot, A., Talbot, G., Huard, D., Biner, S., Lagacé, R., Rocha, N.-R. et Gagné, G. (2013). Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Québec. 192 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/192_RapportMichaud2013.pdf

Michaud, A., Gombault, C., Cyr, J.-F. et Côté, H. (2012). Implications des scénarios climatiques futurs sur la gestion des sols et de l'eau à la ferme. Québec : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 20 p.

Millien, V. (2013). Effets combinés de la fragmentation de l'habitat et des changements climatiques sur les espèces invasives : micromammifères hôtes et tique vectrice de la bactérie responsable de l'expansion de la maladie de Lyme au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 26 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/202_RapportMillien2014.pdf

Mimee, B., Brodeur, J., Bourgeois, G., Moiroux, J., Gendron St-Marseille, A.-F. et Gagnon, A.-È. (2014). Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec? (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 51 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/332_RapportBrodeur2014.pdf

Mingelbier, M., Lecomte, F. et Dodson, J.J. (2001a). Climate change and abundance cycles of two sympatric populations of smelt (*Osmerus mordax*) in the middle estuary of the St. Lawrence River, Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(10), 2048–2058.

Mingelbier, M., Trencia, G., Dumas, R., Dumas, B., Mailhot, Y., Bouchard, C., Manolesco, D.C., Brodeur, P., Hudon, C. et Ouellette, G. (2001b). Avis scientifique concernant la mortalité massive des carpes dans le Saint-Laurent durant l'été 2001. Québec : Société de la faune et des parcs du Québec, Ministère de l'environnement, Biodôme de Montréal, Environnement Canada. 25 p.

Minville, M., Krau, S., Brissette, F. et Leconte, R. (2010). Behaviour and Performance of a Water Resource System in Québec (Canada) Under Adapted Operating Policies in a Climate Change Context. *Water Resources Management*, 24(7), 1333–1352.

Molnár, P.K., Derocher, A.E., Thiemann, G.W. et Lewis, M.A. (2010). Predicting survival, reproduction and abundance of polar bears under climate change. *Biological Conservation*, 143(7), 1612–1622.

Monette, S., Dallaire, A.D., Mingelbier, M., Groman, D., Uhland, C., Richard, J.-P., Paillard, G., Johannson, L.M., Chivers, D.P., Ferguson, H.W., Leighton, F.A. et Simko, E. (2006). Massive mortality of common carp (*Cyprinus carpio carpio*) in the St. Lawrence River in 2001: diagnostic investigation and experimental induction of lymphocytic encephalitis. *Veterinary pathology*, 43(3), 302–10.

Morabito, L. et Benoît, R. (2009). Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles : Guide méthodologique. Paris, France : Éditions T. 80 p.

Morin, H., Houle, D., Krause, C., Savard, M. et Rossi, S. (2012a). Impact combiné des changements climatiques, des apports azotés atmosphériques et d'une augmentation de la température du sol sur la productivité de la forêt boréale (Rapport scientifique final pour Ouranos et RNCAN, extrait). Montréal, Québec. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/251_RapportMorin-2012.pdf

Morin, H., Krause, C.C.K., Deslauriers, A.A. et Houle, D.D. (2012b). Effets de la température et d'un stress hydrique sur la xylogénèse, la dynamique d'utilisation des glucides et la qualité du bois de l'épinette noire (Rapport scientifique final pour Ouranos et RNCAN, extrait). Montréal, Québec. 18 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/267_RapportMorinB2013.pdf

Morin, X., Lechowicz, M.J., Augspurger, C., O'Keefe, J., Viner, D. et Chuine, I. (2009). Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century. *Global Change Biology*, 15(4), 961–975.

MPO. (2013). Évaluation fondée sur les risques des impacts et des menaces que les changements climatiques présentent pour l'infrastructure et les systèmes biologiques qui relèvent du mandat de pêches et océans Canada - Grand bassin aquatique d'eau douce (Réponse des Sciences 2013/011). Ottawa, Ontario : Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS) de Pêches et Océans Canada (MPO). 50 p.

MRN. (2013). Ressources et industries forestières : portrait statistique - édition 2013. Québec : Direction du développement de l'industrie des produits du bois, ministère des Ressources naturelles (MRN). 90 p. Repéré à <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/portrait-statistique-2013.pdf>

MSP. (2009). Conseils de sécurité à suivre durant la vague de froid. Ministère de la sécurité publique (MSP). Repéré le 21 février 2014 à [http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/ministere/salle-presse/communiqués/126/90.html?tx_ttnews\[backPid\]=1129&tx_ttnews\[tt_news\]=1891](http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/ministere/salle-presse/communiqués/126/90.html?tx_ttnews[backPid]=1129&tx_ttnews[tt_news]=1891)

MSP. (2011). Panne de courant. Ministère de la sécurité publique (MSP). Repéré le 21 février 2014, à <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/se-preparer-aux-sinistres/sinistres/panne-courant.html>

MSP. (2012). Inondations : Soyez attentifs aux indices d'inondation! Ministère de la sécurité publique (MSP). Repéré le 25 avril 2014, à <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/surveillance-territoriale/inondations-info-citoyens.html>

MSP. (2014). Politique québécoise de sécurité civile 2014-2024. Ministère de la sécurité publique du Québec (MSP). Repéré le 30 juillet 2015, à http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/publications/politique_2014-2024/politique_securite_civile_2014-2024.pdf

MSSS. (2011). La rhinite allergique au Québec. Québec, Canada : Direction des communications, ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). 14 p.

MSSS. (2013a). Plan d'intervention gouvernemental 2013-2015 pour la protection de la population contre le virus du Nil occidental. Québec : Direction des communications, ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). 29 p.

MSSS. (2013b). Soleil et rayons UV. Ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). Repéré le 12 décembre 2013, à <http://www.msss.gouv.qc.ca/sujets/santepub/environnement/index.php?soleil-et-rayons-uv>

MSSS. (2014a). Chaleur accablante et extrême. Ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). Repéré le 22 novembre 2013, à <http://www.msss.gouv.qc.ca/sujets/santepub/environnement/index.php>

MSSS. (2014b). Virus du Nil occidental (VNO). Ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS). Repéré le 22 novembre 2013, à http://www.msss.gouv.qc.ca/sujets/santepub/environnement/index.php?virus_du_nil

MTQ. (2013a). Consultation publique sur la Politique québécoise de mobilité durable. Ministère des Transports du Québec (MTQ). Repéré le 9 janvier 2014, à http://www.mobilitedurable.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grand_public/transport_collectif/consultation_publique_politique_quebecoise_mobilite_durable

MTQ. (2013b). Érosion côtière. Ministère des Transports du Québec (MTQ). Repéré le 16 avril 2014, à http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/environnement/changements_climatiques/adapter_transports_impacts_changements_climatiques/erosion_cotiere

Modarres, R., Ouarda, T.B.M.J., Vanasse, A., Orzanco, M.G. et Gosselin, P. (2012). Modeling seasonal variation of hip fracture in Montreal, Canada. *Bone*, 50(4), 909–916.

Moffatt, H. et Struck, S. (2011). Water-borne Disease Outbreaks in Canadian Small Drinking Water Systems. Centres de collaboration nationale en santé publique. 17 p. Repéré à http://www.nccph.ca/docs/SDWS_Water-borne_EN.pdf

Muerth, M. J., Gauvin St-Denis, B., Ricard, S., Velázquez, J.A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R. et Turcotte, R. (2013). On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1189–1204.

Munroe, R., Roe, D., Doswald, N., Spencer, T., Möller, I., Vira, B., Reid, H., Kontoleon, A., Giuliani, A., Castelli, I. et Stephens, J. (2012). Review of the evidence base for ecosystem-based approaches for adaptation to climate change. *Environmental Evidence*, 1(1), 13.

Music, B., Frigon, A., Lofgren, B., Turcotte, R. et Cyr, J.-F. (2015). Present and future Laurentian Great Lakes hydroclimatic conditions and associated water supplies as simulated by regional climate models. *Climatic Change*, 130(4) : 603-618.

Myers, P., Lundrigan, B.L., Hoffman, S.M.G., Haraminac, A.P. et Seto, S.H. (2009). Climate-induced changes in the small mammal communities of the Northern Great Lakes Region. *Global Change Biology*, 15(6), 1434–1454. doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01846.x

Myers, S.S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A.D.B., Bloom, A.J., Carlisle, E., Dietterich, L.H., Fitzgerald, G., Hasegawa, T., Holbrook, N.M., Nelson, R., Ottman, M.J., Raboy, V., Sakai, H., Sartor, K.A., Schwartz, J., Seneweera, S., Tausz, M. et Usui, Y. (2014). Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139–142.

Nantel, P., Pellatt, M. G., Keenleyside, K. et Gray, Paul, A. (2014). Biodiversité et aires protégées. Dans F. J. Warren et D. S. Lemmen (dir.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation* (p. 159–190). Ottawa (Ontario): Gouvernement du Canada.

National Grid. (2010). *Climate Change Adaptation Report National Grid Electricity Transmission plc September 2010*. Change. London, United Kingdom. 72 p. Repéré à <http://archive.defra.gov.uk/environment/climate/documents/adapt-reports/01benchmark/bench-national-grid-cca-report.pdf>

NASA. (2013). *Forest Fires Near James Bay, Quebec*. Repéré le 26 septembre 2014, à <http://www.nasa.gov/content/forest-fires-near-james-bay-quebec/#.VCV3xBZ1i70>

Nature Québec. (2013). *Nature et fraîcheur pour des villes en santé, fiches 1-3*. Repéré le 20 novembre 2013, à www.naturequebec.org/ilotsdefraicheur

Ndong, M., Bird, D., Nguyen-Quang, T., de Boutray, M.-L., Zamyadi, A., Vincon-Leite, B., Lemaire, B. J., Prevost, M. et Dorner, S. (2014). Estimating the risk of cyanobacterial occurrence using an index integrating meteorological factors: Application to drinking water production. *Water Research*, 56, p. 98-108.

Neilson, R.F., Pitelka, L.F., Solomon, A.M., Nathan, R.A.N., Midgley, G.U.Y.F., Fragoso, J.M.V., Lischke, H. et Thompson, K.E. (2005). Forecasting Regional to Global Plant Migration in Response to Climate Change. *BioScience*, 55(September), 749–759.

Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R.B. et Running, S. W. (2003). Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, 300 (5625), 1560–1563.

Néron, J.-F. (2013, 29 July). Le «projet K» : la Ville de Québec s'outille pour affronter des catastrophes. *Le Soleil*. Québec. Repéré à <http://www.lapresse.ca/le-soleil/actualites/la-capitale/201307/28/01-4674904-le-projet-k-la-ville-de-quebec-soutille-pour-affronter-des-catastrophes.php>

Neumeier, U., Ruest, B., Lambert, A., Bismuth, E., Dumont, D., Jacob, D., Savard, J.P. et Joly, S. (2013). *Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques (Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec)*. Rimouski, Québec. 244 p.

Neuner, S., Albrecht, A., Cullmann, D., Engels, F., Griess, V.C., Hahn, W.A., Hanewinkel, M., Härtl, F., Kölling, C., Staupendahl, K et Knoke, T. (2015). Survival of Norway spruce remains higher in mixed stands under a dryer and warmer climate. *Global Change Biology*, 21(2), 935-946.

Ngom, R. (2013). Granby (carte). Avec permission. INRS-ETE.

Ngom, R. et Gosselin, P. (2014). Development of a remote sensing-based method to map likelihood of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) presence in urban areas. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1), 126–139.

Nickels, S., Furgal, C., Buell, M. et Moquin, H. (2005). Unikkaaqatigiit – Putting the Human Face on Climate Change: Perspectives from Inuit in Canada. Ottawa: Joint publication of Inuit Tapiriit Kanatimi, Nasivvik Centre for Inuit Health and Changing Environments at Université Laval and the Ajunnginiq Centre at the National Aboriginal Health Organization.

Nicholls, R. J. (2011). Planning for the impacts of sea level rise. *Oceanography*, 24(2), 144–157.

Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V., Codignotto, J., Hay, J., McLean, R., Ragoonaden, S. et Woodroffe, C.D. (2007). Coastal systems and low-lying areas. Dans M.L. Parry, O.F. Canziani, P.J. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (dir.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 315–356). Cambridge: Cambridge University Press.

Nilo, P., Dumont, P. et Fortin, R. (1997). Climatic and hydrological determinants of year-class strength of St. Lawrence River lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54, 774–780.

Niven, R. J. et Bardsley, D.K. (2012). Planned retreat as a management response to coastal risk: a case study from the Fleurieu Peninsula, South Australia. *Regional Environmental Change*, 13(1), 193–209.

Noisel, N., Groulx, J., Krzykowski, P. et Masson, E. (2013). Projet herbe à poux 2007-2010 : Évaluation de l'efficacité d'un projet de mobilisation pour la lutte contre l'herbe à poux sur la qualité de vie des personnes allergiques. *Bulletin d'information en santé environnementale*, (Novembre 2013), 11 p.

Norby, R.J., DeLucia, E.H., Gielen, B., Calfapietra, C., Giardina, C.P., King, J.S., Ledford, J., McCarthy, H.R., Moore, D.J.P., Ceulemans, R., De Angelis, P, Finzi, A.C., Karnosky, D.F., Kubiske, M.E., Lukac, M., Pregitzer, K.S., Scarascia-Mugnozza, G.E., Schlesinger, W.H et Oren, R. (2005). 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*, 102(50), 18052–18056.

Norval, M., Lucas, R.M., Cullen, A.P, de Gruijl, F.R., Longstreth, J., Takizawaf, Y. et van der Leung, J. C. (2011). The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change. *Photochemical & photobiological sciences*, (10), 199–225.

Nowak, D.J., Hoehn, R.E.I., Bodine, A.R., Greenfield, E.J., Ellis, A., Endreny, T.A., Yang, Y., Zhou, T. et Henry, R. (2013). *Assessing Urban Forest Effects et Values : Toronto's Urban Forest (Resource Bulletin NRS-79)*. Newton Square, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. Repéré à <http://www1.toronto.ca/CityOfToronto/ParksForestry&Recreation/UrbanForestry/Files/pdf/R/Reports/effects-et-values.pdf>

- Ntelekos, A., Oppenheimer, M., Smith, J. et Miller, A. (2010). Urbanization, climate change and flood policy in the United States. *Climatic Change*, 103(3-4), 597–616.
- Olar, M., Lessard, C., Sauvé, C., Pichette, É. et Faucher, C. (2013). Analyse économique des impacts des changements climatiques sur les étiages et leurs conséquences sur divers usages de l'eau dans le bassin versant de la rivière Yamaska (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 110 p.
- Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J. et Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), 96–112.
- Olivier, A. (2013). Contribution de systèmes agroforestiers multifonctionnels à la capacité d'adaptation aux changements climatiques des agro-écosystèmes (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 38 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/194_RapportOlivier2013.pdf
- OMS. (2013a). Protection individuelle contre les UV. Rayonnement ultraviolet et le Programme INTERSUN. Organisation mondiale de la Santé (OMS). Repéré le 12 december 2013, à <http://www.who.int/uv/faq/protect/fr/index2.html>
- OMS. (2013b). Rage. Aide-mémoire N 99. Organisation mondiale de la Santé (OMS). Repéré le 14 janvier 2014, à <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs099/fr/>
- ONERC. (2010). Villes et adaptation au changement climatique (Rapport au Premier ministre et au Parlement) (P. F. Chevet, dir). Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC). 158 p. Repéré à http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_ville_et_adaptation.pdf
- ONU-Habitat. (2011). Les villes et le changement climatique : orientations générales. Rapport mondial 2011 sur les établissements humains. London, United Kingdom : Earthscan. 60 p. Repéré à <http://mirror.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=3099>
- Oswalt, M.L. et Marshall, G.D.J. (2008). Ragweed as an Example of Worldwide Allergen Expansion. *Allergy, Asthma, and Clinical Immunology*, 4(3), 130–135.
- Ouellet, V., Mingelbier, M., Saint-Hilaire, A. et Morin, J. (2010). Frequency Analysis as a Tool for Assessing Adverse Conditions During a Massive Fish Kill in the St. Lawrence River, Canada. *Water Quality Research Journal of Canada*, 45(1), 47–57.
- Ouellet, V., Pierron, F., Mingelbier, M., Fournier, M., Fournier, M. et Couture, P. (2013). Thermal Stress Effects on Gene Expression and Phagocytosis in the Common Carp (*Cyprinus Carpio*): a Better Understanding of the Summer 2001 St. Lawrence River Fish Kill. *The Open Fish Science Journal*, 6, 99–106.
- Ouellet, V., Secretan, Y. et Morin, J. (2014). Daily averaged 2D water temperature model for the St. Lawrence River, 744(May 2013), 733–744.
- Ouranos. (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques : Guide destiné au milieu municipal québécois. Montréal, Québec. 48 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/111_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf
- Panchen, Z.A., Primack, R.B., Anisko, T. et Lyons, R.E. (2012). Herbarium specimens, photographs, et field observations show Philadelphia area plants are responding to climate change. *American Journal of Botany*, 99(4), 751–756. doi:10.3732/ajb.1100198

Paradis, M. (2012). L'architecture au Nunavik. De retour au journalisme. Repéré le 18 août 2014, à <http://marieveparadis.com/2012/06/12/larchitecture-au-nunavik/>

Parent, A.-C., Anctil, F., Grenier, P. et Chaumont, D. (2012). Pour des mesures de conservation et d'utilisation efficace de l'eau adaptables aux changements climatiques pour le bassin du fleuve Saint-Laurent (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 191 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/180_RapportAnctil2012.pdf

Pariseau, É. (2013). Rendez-vous : Biodiversité urbaine, une valeur à apprécier. Compendium. Montréal, Québec: Ville de Montréal. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/GRANDS_PARCS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/COMPENDIUM%202013_FINALFR20140129_WEBS%20C9CUR.PDF

Partners in Protection Association. (2014). FireSmart Canada. Repéré le 13 mai 2014, à <https://www.firesmartcanada.ca/>

Patz, J.A., Frumkin, H., Holloway, T., Vimont, D.J. et Haines, A. (2014). Climate Change Challenges and Opportunities for Global Health. *JAMA*, 312(15): 1565-1580.

Payne, M.R. (2013). Climate change at the dinner table. *Nature*, 497, 320–321.

Pearson, R.G., Stanton, J.C., Shoemaker, K.T., Aiello-Lammens, M.E., Ersts, P.J., Horning, N., Fordham, D.A., Raxworthy, C.J., Ryu, H.Y., McNeese, J. et Akcakaya, H.R. (2014). Life history and spatial traits predict extinction risk due to climate change. *Nature Climate Change*, 4(3), 217–221.

Pellerin, S. et Poulin, M. (2013). Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation et de gestion durable (Rapport final pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs). Québec : Centre de la biodiversité du Québec. 104 p. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/rives/Analyse-situation-milieux-humides-recommandations.pdf>

Peng, C., Ma, Z., Lei, X., Zhu, Q., Chen, H., Wang, W., Liu, S. Li, W., Fang, X et Zhou, X. (2011). A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nature Climate Change*, 1(9), 467–471.

Peres-Neto, P., Boivin, F., Lee, W.-S., Petit, S., Samson, J. et Simard, A. (2013). Développement d'un cadre méthodologique et d'échantillonnage pour le suivi de la biodiversité en fonction des changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 320 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/196_RapportPeresNeto2013.pdf

Périé, C., de Blois, S., Lambert, M.C. et Casajus, N. (2014). Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec. Mémoire de recherche forestière no 173. Québec: Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. 46 p.

Perreault, J. (2013). La biodiversité : clé de la résilience des milieux de vie. *Paysages*. La revue annuelle de l'AAPQ. Édition no 8, (8), 38–39.

Petit, F. (2009). Concept d'analyse de la vulnérabilité des infrastructures essentielles : Prise en compte de la cybernétique (Thèse de doctorat). École polytechnique de Montréal. 290 p. Repéré à <http://www.polymtl.ca/crp/doc/These-Frederic-PETIT-VersionFinale.pdf>

Petts, G.E. et Calow, P. (1996). The Nature of Rivers. Dans P. Calow et G. E. Petts (dir.), *River Restoration* (p. 1–6). Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications.

- Pimm, S.L., Jenkins, C.N., Abell, R., Brooks, T.M., Gittleman, J.L., Joppa, L.N., Joppa, L.N., Raven, P.H., Roberts, C.M. et Sexton, J.O. (2014). The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, 344(6187), 1246752–1246752.
- Piva, A., Bertrand, A., Bélanger, G., Castonguay, Y. et Seguin, P. (2013). Growth and Physiological Response of Timothy to Elevated Carbon Dioxide and Temperature under Contrasted Nitrogen Fertilization. *Crop Science*, 53(2), 704–715.
- Plante, S., Chouinard, O. et Bernatchez, P. (2007). Politiques, gouvernance et renforcement des capacités communautaires d'adaptation aux changements climatiques des zones côtières, insulaires et continentales (Rapport de recherche présenté à Ressources naturelles Canada-Fonds d'action sur les changements . Rimouski, Québec : Centre de recherche sur le développement territorial (CRDT), Université du Québec à Rimouski. 191 p. Repéré à <https://depot.erudit.org/bitstream/003281dd/1/Rapport-Gouvernance-communautes-cotiere-PLANTE-et-al-A-2007.pdf>
- Plouffe, D. et Bourgeois, G. (2012). Modèles bioclimatiques pour la prévision des risques associés aux ennemis des cultures dans un contexte de climat variable et en évolution. Québec : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 13 p.
- Podur, J., Martell, D.L. et Knight, K. (2002). Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(2), 195–205.
- Poisson, F., Samson, J., Couillard, L., Dubruc, J.-P., Dia, A.O., Rapaic, M., de Élia, R., Tremblay, B. et Siron, R. (2012). Biodiversity Atlas Project for Northern Quebec. Affiche présenté dans la Conférence de l'Année polaire internationale (API-2012), Montréal, Québec.
- Pontee, N. (2013). Defining coastal squeeze: A discussion. *Ocean and Coastal Management*, 84, 1–4. doi:10.1016/j.ocecoaman.2013.07.010
- Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Cochrane, K., Howden, S.M., Iqbal, M.M., Lobell, D.B. et Travasso, M.I. (2014). Food security and food production systems. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 485-533). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O. et Kunin, W.E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in ecology & evolution*, 25(6), 345–53.
- Potier, A., Khvorostyanov, D., Menut, L., Sofiev, M., Viovy, N., Vautard, R., THibaudon, M. et Tao, P. (2013). Modeling birch pollen emission and transport with the chemistry-transport model CHIMERE. *Geophysical Research Abstracts*, 15(EGU2013-10777-1). Repéré à <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-10777-1.pdf>
- Power, M., Dempson, B. J., Doidge, B., Michaud, W., Chavarie, L., Reist, J.D., Martin, F. Et Lewis, A.E. (2013). L'omble chevalier dans un climat en changement : prédire les répercussions possibles des changements climatiques sur une espèce nordique de valeur. Dans M. Allard et M. Lemay (dir.), *Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques – Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation* (p. 205–229). Québec : ArticNet Inc.

- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E. et Rötzer, T. (2014). Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat Commun*, 5. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms5967>
- Price, D.T. et Scott, D. (2006). Large scale modelling of Canada's forest ecosystem responses to climate change, Final report to Government of Canada: Climate Change Impacts and Adaptations Program. 53 p.
- Price, K., Benmarhnia, T., Perron, S., Smargiassi, A. et Kishchuk, N. (2014). Projet d'évaluation du plan Chaleur. Présentation donnée dans le cadre du comité de coordination de la DSP, 26 mai 2014.
- Programme de mise en valeur du lac Champlain (2013). Résilience aux inondations dans le bassin du lac Champlain et la rivière Richelieu. 109 p. Repéré à <http://www.monroban.org/public/documents/outils/uploaded/gqundkx5.pdf>
- Proulx, D., Parent, D., Côté, H. et Charboneau, É. (2013). Capacité d'adaptation des producteurs laitiers québécois aux changements climatiques (Revue de littérature). Montréal, Québec. 51 p.
- Qian, B., de Jong, R., Gameda, S., Huffman, T., Neilsen, D., Desjardins, R., Wang, H. et Mcconkey, B. (2013). Impact of climate change scenarios on Canadian agroclimatic indices. *Canadian Journal of Soil Science*, 93, 243–259.
- Qian, B., Gameda, S., Zhang, X. et Jong, R. (2012). Changing growing season observed in Canada. *Climatic Change*, 112(2), 339–353.
- Qian, B., Zhang, X., Chen, K., Feng, Y. et O'Brien, T. (2010). Observed Long-Term Trends for Agroclimatic Conditions in Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(4), 604–618.
- Raffa, K.F., Aukema, B.H., Bentz, B.J., Carroll, A.L., Hicke, J.A., Turner, M.G. et Romme, W.H. (2008). Cross-scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification: The Dynamics of Bark Beetle Eruptions. *BioScience*, 58(6), 501–517. doi:10.1641/B580607
- Radio-Canada. (2013). Feux de forêt : fin de l'exil pour les évacués d'Eastmain, 8 juillet 2013. Repéré le 15 septembre 2014, à <http://ici.radio-canada.ca/regions/abitiibi/2013/07/08/001-retour-evacues-eastmain-feux-foret.shtml>
- Radio Canada. (2014a). Gel et dégel : les pompiers de Québec sont débordés. Repéré le 25 avril 2014, à <http://ici.radio-canada.ca/regions/quebec/2014/01/05/001-gel-degel-pompiers-debordés.shtml>
- Radio Canada. (2014b). Nombreux carambolages et des dizaines d'accidents. Repéré le 25 avril 2014, à <http://ici.radio-canada.ca/regions/quebec/2014/01/27/004-neige-deplacements-quebec-lundi.shtml>
- Raetz, H. et Lateltin, O. (2003). Les mouvements de masse : glissement de terrain et éboulements. In *Événements extrêmes et changements climatiques* (p. 79–82). Berne, Suisse : Organe consultatif sur les changements climatiques (OCC). Repéré à <http://proclimweb.scnat.ch/portal/ressources/859.pdf>
- Rapaic, M., de Elía, R., Chaumont, D., Frigon, A., Poisson, F., Samson, J. et Siron, R. (2012a). Climate analysis over Northern Quebec and Labrador. Affiche présenté dans la Conférence de l'Année polaire internationale (API-2012), Montréal, Québec.
- Rapaic, M., de Elía, R., Chaumont, D., Frigon, A., Samson, J. et Siron, R. (2012b). Atlas de la Biodiversité du Québec nordique. Analyses et scénarios climatiques (Rapport scientifique final pour le MDDEFP). Montréal, Québec. 229 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/271_RapportRapaic2013red.pdf

RCIP Project. (2003). *Painting the Landscape of Rural Nova Scotia*. Halifax, Nouvelle-Écosse : Atlantic Health Promotion Research Center, Coastal Communities Network. 105 p.

REDD. (2011). *Gestion des risques commerciaux et des occasions d'affaires présentés par le changement climatique*. Réseaux entreprises et développement durable (REDD). 8 p.

Reichwaldt, E.S. et Ghadouani, A. (2012). Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: between simplistic scenarios and complex dynamics. *Water research*, 46(5), 1372–93.

Reinsborough, M.J. (2003). A Ricardian Model of Climate Change in Canada. *Canadian Journal of Economics*, 1, 21–40.

Régnière, J., St-Amant, R. et Duval, P. (2012). Predicting insect distributions under climate change from physiological responses: spruce budworm as an example. *Biological Invasions*, 14(8), 1571–1586. doi:10.1007/s10530-010-9918-1

Rempel, R.S. (2011). Effects of climate change on moose populations: Exploring the response horizon through biometric and systems models. *Ecological Modelling*, 222(18), 3355–3365.

Ressources naturelles Canada. (2009). *Cotes de gravité des feux de forêt, 2090-2099*. Dans *L'Atlas du Canada* (6^e édition). Repéré à http://atlas.nrcan.gc.ca/data/francais/maps/forestry/cotes_gravite_feux_foret_2090_2099_carte.pdf

Ressources naturelles Canada. (2012). *Emprisonnons la chaleur*. Ottawa, Ontario : Office de l'efficacité énergétique, Ressources naturelles Canada. 150 p.

Ressources naturelles Canada. (2014). *Système canadien d'information sur les feux de végétation*. Repéré le 23 septembre 2014, à <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/accueil>

Reynolds, C.C.O., Winters, M., Ries, F.J. et Gouge, B. (2010). *Active Transportation in Urban Areas: Exploring Health Benefits and Risks*. Vancouver : Centre de collaboration nationale en santé environnementale. 15 p.

Ricard, M. (2014). *Vulnérabilité de la biodiversité des aires protégées du Québec aux changements climatiques (Mémoire de maîtrise)*. Université du Québec à Rimouski. Rimouski, Québec. 63 p.

Ricciardi, A. (2001). Facilitative interactions among aquatic invaders: is an "invasional meltdown" occurring in the Great Lakes? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(12), 2513–2525.

Richardson, G.R.A. (2010). *S'adapter aux changements climatiques : une introduction à l'intention des municipalités canadiennes*. Ottawa, Ontario: Ressources naturelles Canada. 48 p. Repéré à http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/mun/pdf/mun_f.pdf

Richardson, G.R.A. et Otero, J. (2012). *Outils d'aménagement locaux pour l'adaptation aux changements climatiques*. Ottawa, Ontario. 48 p.

Rickards, L. et Howden, S.M. (2012). Transformational adaptation : agriculture and climate change. *Crop & Pasture Science*, 63(March), 240–250.

Rivard, C., Vigneault, H., Piggott, A. R., Larocque, M. et Anctil, F. (2009). Groundwater recharge trends in Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, 46(11), 841–854.

Robert, B., Morabito, L. et Cloutier, I. (2012). Modeling and Coordinating Interdependent Critical Infrastructure in Montreal. The CIP Report, Center for Infrastructure Protection and Homeland Security, 10(11), 3–14.

ROBVQ. (2012). Boîte à outils sur l'intégration de la variabilité climatique dans les PDE. Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ). Repéré le 17 mars 2014, à <https://www.robvq.qc.ca/guideChangementsClimatiques>

Rochette, P., Bélanger, G., Castonguay, Y., Bootsma, A. et Mongrain, D. (2004). Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 84, 1113–1125.

Romero-Lankao, P., Smith, J.B., Davidson, D.J., Diffenbaugh, N.S., Kinney, P.L., Kirshen, P., Kovacs, P. et Villers-Ruiz, L. (2014). North America. Dans V.R. Barros, C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 1439–1498). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Ropars, P. et Boudreau, S. (2012). Shrub expansion at the forest–tundra ecotone: spatial heterogeneity linked to local topography. *Environmental Research Letters*, 7, 015501.

Rossi, S., Girard, M.-J. et Morin, H. (2014). Lengthening of the duration of xylogenesis engenders disproportionate increases in xylem production. *Global Change Biology*, 20(7), 2261–2271.

Rossi, S., Morin, H. et Deslauriers, A. (2011). Multi-scale Influence of Snowmelt on Xylogenesis of Black Spruce. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 43(3), 457–464.

Rouquette, A., Mandereau-Bruno, L., Baffert, E., Laaidi, K., Josseran, L. et Isnard, H. (2011). Surveillance hivernale des effets du froid sur la santé des populations sans-domicile en région Île-de-France : utilisation des données du réseau d'Organisation de la surveillance coordonnée des urgences (Oscour®). *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 59(6), 359–368.

Rousseau, A. (2012). Plan stratégique 2009-2013, Efficacité énergétique, énergies renouvelables et innovation technologique, Hydro-Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos).

Rousseau, A., Gagnon, P., Savary, S., Freudiger, D. et Klein, I. (2012). Intégration de l'impact des changements climatiques (CC) dans la détermination des crues maximales probables (CMP) afin d'appuyer les usagers dans l'évaluation de la sécurité des barrages (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 255 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/170_RapportRousseau2012.pdf

Rousseau, A., Quilbé, R., Savary, S., Ricard, S., Moquet, J.-S., Garbouj, M.S. et Duchemin, M. (2007). Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques : étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant, à l'aide d'un système de modélisation intégrée (Rapport scientifique final pour Ouranos). Québec. 372 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/1_Rapport_Rousseau_agriculture_2007.pdf

Roy, A.G., Cardille, J., Boyer, C., St-Hilaire, A., Ou, C., Roussel, D. et Sottile, M.-F. (2013). Intégration des données spatiales et temporelles pour une gestion optimale des berges dans un contexte de changements environnementaux (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec.

Roy-Dufresne, E., Logan, T., Simon, J.A., Chmura, G.L. et Millien, V. (2013). Poleward expansion of the white-footed mouse (*Peromyscus leucopus*) under climate change: Implications for the spread of lyme disease. *PLOS one*, 8(11), 1–8.

Roy, R., Chartier, I., Desrochers, G., Guay, F., Minville, M., Pacher, G., Roy, L. et Tapsoba, D. (2008, octobre). Impacts des changements climatiques sur le régime hydrologiques du nord du Québec et mesures d'adaptation envisageables. Présentation aux 21^e entretiens du Centre Jacques-Cartier. Montréal, Québec.

Roy, M.L., Roy, A.G., Grant, J.W.A. et Bergeron, N.E. (2013). Individual variability of wild juvenile Atlantic salmon activity patterns: effect of flow stage, temperature, and habitat use. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 70(7), 1082–1091.

Rustad, L., Campbell, J., Marion, G., Norby, R., Mitchell, M., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C., Gurevitch, J. et GCTE-NEWS. (2001). A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 126(4), 543–562.

SAA. (2013). Statistiques des populations autochtones du Québec 2012. Profil de nations. Repéré à <http://www.autochtones.gouv.qc.ca/nations/population.htm>

Sacks, J.D., Stanek, L.W., Luben, T.J., Johns, D.O., Buckley, B.J., Brown, J.S. et Ross, M. (2011). Review Particulate Matter – Induced Health Effects: Who Is Susceptible? *Environmental Health Perspectives*, 119(4), 446–454. doi:10.1289/ehp.1002255

Said, M., Favre, A.-C., Slivitzky, M., Dion, K. et Pugin, S. (2012). L'adaptation de la sécurité des ouvrages aux impacts des changements climatiques en utilisant des crues de faible récurrence et en informant les gestionnaires sur les incertitudes dans ce contexte (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 14 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/182_RapportFavre2013.pdf

Salamanca, F. et Martilli, A. (2011). A Study of the Urban Boundary Layer Using Different Urban Parameterizations and High-Resolution Urban Canopy Parameters with WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, (50), 1107–1128.

Samson, J. (2012). Atlas de la biodiversité du Québec nordique - Effets des changements climatiques sur la biodiversité (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 51 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/270_RapportSamson2012.pdf

Santé Canada. (2011a). Adaptation aux périodes de chaleur accablante: Lignes directrices pour évaluer la vulnérabilité en matière de santé. Ottawa, Ontario: Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs. 55 p.

Santé Canada. (2011b). Communiquer les risques des périodes de chaleur accablante pour la santé : Trousse à l'intention des responsables de la santé publique et de la gestion des urgences. Ottawa, Ontario: Publications Santé Canada. 60 p.

Santé Canada. (2012a). La vitamine D et le calcium : Révision des Apports nutritionnels de référence. Aliments et nutrition. Repéré le 21 février 2014 à <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/nutrition/vitamin/vita-d-fra.php>

Santé Canada. (2012b). Le bronzage et ses effets sur votre santé. Repéré à http://www.hc-sc.gc.ca/hl-vs/alt_formats/pdf/iyh-vsv/life-vie/tanning-bronzage-fra.pdf

- Santé Canada. (2013). *Votre santé et Vous : Froid extrême*. Ottawa, Ontario: Santé Canada. 5 p.
- Savard, J.-P. (2010). Les Îles-de-la-Madeleine et les changements climatiques. *Urbanité*, 35–37.
- Savard, J.-P., Bernatchez, P., Morneau, F., Saucier, F., Gachon, P., Senneville, S., Fraser, C. et Jolivet, Y. (2008). Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques: Synthèse des résultats (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 48 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/20_Rapport_Savard_maritime_2008.pdf
- Savard, J.-P., Gachon, P., Rosu, C., Martin, P., Aider, R. et Saad, C. (2014). Impact des changements climatiques sur le régime des tempêtes, les niveaux d'eau et les vagues dans le Nunavik (Rapport scientifique final d'Ouranos pour le Ministère des Transports du Québec). Montréal, Québec. 110 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/357_RapportSavard2014.pdf
- SCBD (2009). *Connecting Biodiversity et Climate Change Mitigation et Adaptation* (Report of the Second Ad Hoc Technical expert Group on Biodiversity and Climate Change). CBD Technical Series No. 41. Diversity. Montréal, Québec: Secretariat of the Convention on Biological Diversity (SCBD). 126 p.
- SCDB (2010). *Perspectives mondiales de la diversité biologique* (3^e édition). Montréal, Québec: Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (SCDB). 94 p.
- SCDB (2014). *Perspectives mondiales de la diversité biologique* (4^e édition). Montréal, Québec: Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (SCDB). 155 p.
- Schneider, R. (2014). *Conserving Alberta's Biodiversity Under a Changing Climate: A Review and Analysis of Adaptation Measures*. Edmonton, Alberta: Alberta Biodiversity Monitoring Institute.
- Schwartz, M. (1993). Modelling effects of habitat fragmentation on the ability of trees to respond to climatic warming. *Biodiversity & Conservation*, 2(1), 51–61.
- Scott, D., Hall, M.C. et Gössling, S. (2012). *Tourism and climate change : impacts, adaptation and mitigation*. London, New York: Routledge. 440 p.
- Scott, D., Lemieux, C., Kirchhoff, D. et Melnik, M. (2011). *Analysis of socio-economic impacts and adaptation to climate change by Quebec's tourism industry*. Interdisciplinary Centre on Climate Change, University of Waterloo.
- Seiller, G. (2013). *Évaluation de la sensibilité des outils hydrométéorologiques globaux conceptuels aux changements climatiques* (Thèse de doctorat). Université Laval. Québec, Canada. 364 p.
- Seiller, G. et Anctil, F. (2014). Climate change impacts on the hydrologic regime of a Canadian river: comparing uncertainties arising from climate natural variability and lumped hydrological model structures. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(6), 2033–2047.
- Senneville, S., St-Onge Drouin, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, M.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc S. et Villeneuve, R. (2014). *Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques* (Rapport final pour le Ministère des Transports du Québec). 384 p. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1147874.pdf>
- Shackwell, N. et Loder, J. (2012). *Climate change and its effects on Ecosystems, habitats and biota: State of the Scotian Shelf Report*. Dartmouth, Nouvelle-Écosse : Fisheries and Oceans Canada, Bedford Institute of Oceanography. 29 p.

Sheffield, P.E., Knowlton, K., Carr, J. L. et Kinney, P.L. (2011). Modeling of Regional Climate Change Effects on Ground-Level Ozone and Childhood Asthma. *American Journal of Preventive Medicine*, 41(3), 251–257.

Shindell, D., Kyulenstierna, J.C.I., Vignati, E., Dingenen, R. Van, Amann, M., Klimont, Z., Anenger, S.C., Muller, N., Janssens-Maenhout, G., Raes, F., Schwartz, J., Faluvegi, G., Pozzoli, L., Kupiainen, K., Höglund-Isaksson, L., Emberson, L., Streets, D., Ramanathan, V., Hicks, K., Oanh, N.T.K., Milly, G., Williams, M., Demkinem V. et Fowler, D (2012). Simultaneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improving Human Health and Food Security. *Science*, 335(6065), 183–189.

SHQ. (en élaboration). Guide des bonnes pratiques. Québec, Québec: Société d'habitation du Québec (SHQ). Repéré août 12, 2014, à http://www.habitation.gouv.qc.ca/nord/laboratoire_dhabitation_nordique/guide_de_bonnes_pratiques_pour_la_construction_dhabitations_au_nunavik.html

Silva, R., West, J.J., Lamarque, J., Shindell, D., Collins, W., Dalsoren, S.B., Faluvegi, G.S., Folberth, G., Horowitz, L.W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S., Skeie, R., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann, D.J., Cameron-Smith, P.J., Cionni, I., Doherty, R.M., Eyring, V., Josse, B., MacKenzie, I.A., Plummer, D., Righi, M., Stevenson, D.S., Strode, S.A., Szopa, S. et Zeng, G. (2013). The effect of future outdoor air pollution on human health and the contribution of climate change. Dans *American Geophysical Union, Fall Meeting 2013*, abstract no A41H-0179.

Simard, M.C. (2008). Caractérisation des impacts des changements climatiques sur les plaines inondables du BV de la rivière Châteauguay. (Mémoire de maîtrise). École de technologie supérieur – Université du Québec. Montréal, Québec. 110 p.

Simard, M.A., Coulson, T., Gingras, A. et Côté, S.D. (2010). Influence of Density and Climate on Population Dynamics of a Large Herbivore Under Harsh Environmental Conditions. *Journal of Wildlife Management*, 74(8), 1671–1685.

Sin, C., Beauchet, A., Marchal, A., Sigal, M.-L. et Mahé, E. (2013). Compréhension et utilisation de l'indice universel de rayonnement solaire (« indice ultraviolet ») par les dermatologues français métropolitains. *Annales de dermatologie et de vénéréologie*, 140(1), 15–20.

Siron, R. (2013). Aménager le territoire pour s'adapter aux changements climatiques. La biodiversité fait partie de l'équation. *Vecteur Environnement*, 46(4), 34–37.

Siron, R. (2014). Biodiversité, services écologiques et changements climatiques, Réduire nos vulnérabilités. *Vecteur Environnement*, 47(5), 30–32.

Siron, R. et Bourduas-Crouhen, V. (2015). Impacts des changements climatiques sur les services écologiques soutenant le secteur des pêches et de l'aquaculture au Québec. 83^{ème} Congrès de l'ACFAS, Rimouski, Québec, 27 mai 2015.

Siron, R., Sherman, K., Skjoldal, H.R. et Hiltz, E. (2008). Ecosystem-based Management in the Arctic ocean: A Multi-Level Spatial Approach. *Arctic*, 61(suppl. 1), 86–102.

Smargiassi, A., Goldberg, M.S., Plante, C., Fournier, M., Baudouin, Y. et Kosatsky, T. (2009). Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *Journal of epidemiology and community health*, 63, 659–664.

Smith, A.L., Hewitt, N., Klenk, N., Bazely, D.R., Yan, N., Wood, S., Henriques, I., MacLellan, J.I. et Lipsig-Mummé, C. (2012). Effects of climate change on the distribution of invasive alien species in Canada : a knowledge synthesis of range change projections in a warming world. *Environmental Reviews*, 20(1), 1–16.

Smith, P. (2012). Agricultural greenhouse gas mitigation potential globally, in Europe and in the UK: what have we learnt in the last 20 years? *Global Change Biology*, 18(1), 35–43.

Smith, P. et Olesen, J. E. (2010). Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 148(05), 543–552.

Smith, W.N., Grant, B.B., Desjardins, R.L., Kroebel, R., Li, C., Qian, B., Worth, D.E., McConkey B.G. et Drury, C.F. (2013). Assessing the effects of climate change on crop production and GHG emissions in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 179, 139–150.

SNC-Lavalin Environnement. (2013). Ville de Trois-Rivières: Plan d'adaptation aux changements climatiques (Rapport final – Révision 2). Trois-Rivières, Québec. 107 p. Repéré à http://citoyen.v3r.net/docs_upload/documents/langue1/Environnement/Plan_d_adaptation.pdf

Société canadienne du cancer. (2014). Statistiques canadiennes sur le cancer 2014. Toronto, Ontario : Société canadienne du cancer. 139 p. Repéré à <http://www.cancer.ca/~~/media/cancer.ca/CW/>

SOPFEU. (2012). Rapport annuel 2012. Québec : Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU). Repéré à <http://www.sopfeu.qc.ca/fr/sopfeu/publications/rapports-annuels>

SOPFEU. (2014). Cartes. Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU). Repéré le 13 janvier 2014, à <http://www.sopfeu.qc.ca/fr/etat-de-la-situation/cartes>

SPC. (2009). Stratégie nationale sur les infrastructures essentielles . Ottawa, Ontario : Gouvernement du Canada. 12 p. Repéré à <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/srtg-crtcl-nfrstrctr/srtg-crtcl-nfrstrctr-fra.pdf>

SPC. (2014a). Base de données canadienne sur les catastrophes. Sécurité publique Canada (SPC). Repéré le 25 avril 2014, à <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/cndn-dsstr-dtbs/index-fra.aspx>

SPC. (2014b). Plan d'action sur les infrastructures essentielles 2014-2017 . Ottawa, Ontario: Gouvernement du Canada. 18 p. Repéré à <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/pln-crtcl-nfrstrctr-2014-17/index-fra.aspx>

Spittlehouse, D.L. et Stewart, R.B. (2004). Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal of Ecosystems and Management*, 4, 7–17. Siron, R., Sherman, K., Skjoldal, H.R. et Hiltz, E. (2008). Ecosystem-based Management in the Arctic ocean: A Multi-Level Spatial Approach. *Arctic*, 61(suppl. 1), 86–102.

Smargiassi, A., Goldberg, M.S., Plante, C., Fournier, M., Baudouin, Y. et Kosatsky, T. (2009). Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *Journal of epidemiology and community health*, 63, 659–664.

Smith, A.L., Hewitt, N., Klenk, N., Bazely, D.R., Yan, N., Wood, S., Henriques, I., MacLellan, J.I. et Lipsig-Mummé, C. (2012). Effects of climate change on the distribution of invasive alien species in Canada : a knowledge synthesis of range change projections in a warming world. *Environmental Reviews*, 20(1), 1–16.

Smith, P. (2012). Agricultural greenhouse gas mitigation potential globally, in Europe and in the UK: what have we learnt in the last 20 years? *Global Change Biology*, 18(1), 35–43.

Smith, P. et Olesen, J. E. (2010). Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 148(05), 543–552.

Smith, W.N., Grant, B.B., Desjardins, R.L., Kroebel, R., Li, C., Qian, B., Worth, D.E., McConkey B.G. et Drury, C.F. (2013). Assessing the effects of climate change on crop production and GHG emissions in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 179, 139–150.

SNC-Lavalin Environnement. (2013). Ville de Trois-Rivières: Plan d'adaptation aux changements climatiques (Rapport final – Révision 2). Trois-Rivières, Québec. 107 p. Repéré à http://citoyen.v3r.net/docs_upload/documents/langue1/Environnement/Plan_d_adaptation.pdf

Société canadienne du cancer. (2014). Statistiques canadiennes sur le cancer 2014. Toronto, Ontario : Société canadienne du cancer. 139 p. Repéré à <http://www.cancer.ca/~media/cancer.ca/CW/>

SOPFEU. (2012). Rapport annuel 2012. Québec : Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU). Repéré à <http://www.sopfeu.qc.ca/fr/sopfeu/publications/rapports-annuels>

SOPFEU. (2014). Cartes. Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU). Repéré le 13 janvier 2014, à <http://www.sopfeu.qc.ca/fr/etat-de-la-situation/cartes>

SPC. (2009). Stratégie nationale sur les infrastructures essentielles . Ottawa, Ontario : Gouvernement du Canada. 12 p. Repéré à <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/srtg-crtcl-nfrstrctr/srtg-crtcl-nfrstrctr-fra.pdf>

SPC. (2014a). Base de données canadienne sur les catastrophes. Sécurité publique Canada (SPC). Repéré le 25 avril 2014, à <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/cndn-dsstr-dtbs/index-fra.aspx>

SPC. (2014b). Plan d'action sur les infrastructures essentielles 2014-2017 . Ottawa, Ontario: Gouvernement du Canada. 18 p. Repéré à <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/pln-crtcl-nfrstrctr-2014-17/index-fra.aspx>

Spittlehouse, D.L. et Stewart, R.B. (2004). Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal of Ecosystems and Management*, 4, 7–17.

Stalnaker, C.B. (1979). The Use of Habitat Structure Preferenda for Establishing Flow Regimes Necessary for Maintenance of Fish Habitat. Dans J. Ward et J. Stanford (dir.), *The Ecology of Regulated Streams SE - 19* (p. 321–337). Springer US. doi:10.1007/978-1-4684-8613-1_19

Statistique Canada. (2011). Population urbaine et rurale, par province et territoire. Tableaux sommaires. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/demo62f-fra.htm>

Statistique Canada. (2012). Faits saillants et analyses : Québec. Données sur les exploitants agricoles de 2011. Repéré le 26 mai 2014, à <http://www.statcan.gc.ca/pub/95-640-x/2012002/prov/24-fra.htm>

Statistique Canada. (2013). Coup d'oeil sur la santé : Niveaux de vitamine D dans le sang des Canadiens. Publication n°82-624-X. Repéré le 21 février 2014, à <http://www.statcan.gc.ca/pub/82-624-x/2013001/article/11727-fra.htm>

Statistique Canada. (2014). Tableau 379-0028 — Produit intérieur brut (PIB) aux prix de base, selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN), provinces et territoires, annuel (part en pourcentage). CANSIM (base de données). Repéré le 9 octobre 2014, à <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?lang=fra&retrLang=fra&id=3790028&pattern=produit+intE0rieur+brut&tabMode=dataTable&srchLan=-1&p1=1&p2=-1>

Steenhof, P. et Sparling, E. (2011). The Role of Codes, Standards, and Related Instruments in Facilitating Adaptation to Climate Change. Dans J.D. Ford et L. Berrang-Ford (dir.), *Climate Change in Developed Nations* (vol. 42, p. 243–254). Dordrecht: Springer Netherlands.

Stephens, S.L., Agee, J.K., Fulé, P.Z., North, M.P., Romme, W.H., Swetnam, T.W. et Turner, M.G. (2013). Managing Forests and Fire in Changing Climates. *Science*, 342, 41–42.

Stern, N. (2006). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge, New York: Cambridge University Press. 489 p.

Stirling, I. et Derocher, A. E. (2012). Effects of climate warming on polar bears: a review of the evidence. *Global Change Biology*, 18(9), 2694–2706.

Sukhdev, P., Wittmer, H., Schroter-Schlaack, C., Nesshover, C., Bishop, J., ten Brink, P., Gundimeda, H., Kumar, P. et Simmons, B. (2010). Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions et recommendations of TEEB. Repéré à <http://www.teebweb.org/InformationMaterial/TEEBReports/tabid/1278/Default.aspx>

Sulis, M., Meyerhoff, S.B., Paniconi, C., Maxwell, R.M., Putti, M. et Kollet, S.J. (2010). A comparison of two physics-based numerical models for simulating surface water–groundwater interactions. *Advances in Water Resources*, 33(4), 456–467.

Sushama, L., Laprise, R., Caya, D., Verseghy, D. et Allard, M. (2007). An RCM projection of soil thermal and moisture regimes for North American permafrost zones. *Geophysical Research Letters*, 34(20), L20711.

Svenning, J.-C. et Sandel, B. (2013). Disequilibrium vegetation dynamics under future climate change. *American journal of botany*, 100(7), 1266–86.

Swiss Re. (2013). Catastrophes cost global insurance industry more than USD 20 billion. Sigma - preliminary estimates for H1 2013. Repéré le 7 avril 2014, à http://www.swissre.com/media/news_releases/nr_20130821_sigma_natcat_estimates_H1_2013.html

Tardif, B., Lavoie, G. et Lachance, Y. (2005). Atlas de la biodiversité du Québec. Les espèces menacées ou vulnérables. Les espèces menacées ou vulnérables. Québec : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du développement durable, du patrimoine écologique et des parcs. Repéré à <http://www.cdpnq.gouv.qc.ca/pdf/Atlas-biodiversite.pdf>

Tagaris, E., Liao, K., Delucia, A.J. et Deck, L. (2009). Potential Impact of Climate Change on Air Pollution-Related Human Health Effects. *Environmental Science & Technology*, 43(13), 4979–4988.

Tairou, F.O., Bustinza, R., Bélanger, D. et Gosselin, P. (2010a). Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés aux précipitations hivernales et aux avalanches. Québec : Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique du Québec. 97 p.

Tairou, F.O., Bustinza, R., Bélanger, D. et Gosselin, P. (2010b). Proposition d'indicateurs aux fins de vigie et de surveillance des troubles de la santé liés aux précipitations non hivernales, aux inondations, aux glissements de terrain et à la sécheresse. Québec : Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique du Québec. 103 p.

- Tairou, F.O., Gauvin, D., Laliberté, C., Gingras, S. et Levallois, P. (2011). Étude de l'observance des avis d'ébullition dans la population québécoise. Québec : Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique du Québec. 59 p.
- Talbot, A. (dir.). (2006). Enjeux de la disponibilité de l'eau pour le fleuve Saint-Laurent. Synthèse environnementale. Montréal, Québec : Environnement Canada. 215 p.
- Tardiff, I. (2008). Portrait des coûts de santé associés à l'allergie au pollen de l'herbe à poux année 2005 (Rapport d'enquête produit par la Direction de santé publique de la Montérégie pour la Table québécoise). Longueuil, Québec : Agence de la santé et des services sociaux de la Montérégie. 92 p.
- Tecslut Inc. (2008). Analyse coûts-avantages de solutions d'adaptation à l'érosion côtière pour la Ville de Sept-Îles. Montréal, Québec. 146 p.
- Terrebonne. (2009). Politique de l'arbre. 11 p. Repéré le 9 janvier 2014 à http://www.ville.terrebonne.qc.ca/documents/publications/politique_arbre_2009.pdf
- Terrier, A., Girardin, M.P., Périe, C., Legendre, P. et Bergeron, Y. (2013). Potential changes in forest composition could reduce impacts of climate change on boreal wildfires. *Ecological Applications*, 23(1), 21–35.
- Thiam, P.M. (2014). Effets des futurs changements climatiques sur la performance à long terme des chaussures souples au Québec (Mémoire de maîtrise). Université Laval. 260 p. Repéré à <http://theses.ulaval.ca/archimede/meta/30293>
- Thiémonge, N. et Clavet-Gaumont, J. (2014). Impact des changements climatiques sur les volumes de crues fréquentielles : bassins versants de la Côte-Nord du Québec (Rapport de recherche pour Hydro-Québec, équipement). Montréal, Québec. 101 p.
- Thomas, I., Bleau, N., Soto Abasolo, P., Desjardins-Dutil, G., Fuamba, M. et Kadi, S. (2012). Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques , en prenant comme cas d'étude la ville de Montréal (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 137 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/184_RapportThomasBleau2012.pdf
- Thomas, P., Swaminathan, A. et Lucas, R.M. (2012). Climate change and health with an emphasis on interactions with ultraviolet radiation: a review. *Global Change Biology*, 18(8), 2392–2405.
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M. et Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global change biology*, 1–16.
- Thornton, P.K., van de Steeg, J., Notenbaert, A. et Herrero, M. (2009). The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems*, 101(3), 113–127.
- Thuiller, W. (2004). Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology*, 10(12), 2020–2027.
- Thurston, G.D. et Bell, M. (2014). The Human Health Co-benefits of Air Quality Improvements Associated with Climate Change Mitigation. Dans K. E. Pinkerton et W. N. Rom (dir.), *Global Climate Change and Public Health* (p. 137–154). New York, NY: Springer New York.
- TNC. (2009). *Adapting to climate change : Ecosystem-based approaches for people et nature*. Arlington, VA : The Nature Conservancy (TNC).

Tol, R.S.J. (2009). Economics of Sea Level Rise. In J. H. Steele, K. K. Turekian and S. A. Thrope (dir.), *Encyclopedia of Ocean Sciences* (2^e éd., p. 197–200). Oxford, United Kingdom : Academic Press.

Toloo, G.S., Fitzgerald, G., Aitken, P., Verrall, K. et Tong, S. (2013). Are heat warning systems effective? *Environmental health: a global access science source*, 12, 27.

Toronto cancer prevention coalition. (2010). *Shade Guidelines*. Repéré le 8 janvier 2014, à http://www1.toronto.ca/city_of_toronto/toronto_public_health/healthy_public_policy/tcpc/files/pdf/guidelines_supplement.pdf

Tougas-Tellier, M.-A., Morin, J., Hatin, D. et Lavoie, C. (2013). Impacts des changements climatiques sur l'expansion du roseau envahisseur dans les frayères du fleuve Saint-Laurent (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 56 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/168_RapportTTellieretal2013.pdf

Tourisme Québec. (2013). *Politique économique. Priorité Emploi - Tourisme: profiter de la croissance mondiale*. Québec : ministère du Tourisme du Québec. 12p. Repéré à <http://www.tourisme.gouv.qc.ca/publications/media/document/brochures/fascicule-priorite-emploi.pdf>

Toutant, S., Gosselin, P., Bélanger, D., Bustinza, R. et Rivest, S. (2011). An open source web application for the surveillance and prevention of the impacts on public health of extreme meteorological events: the SUPREME system. *International Journal of Health Geographics*, 10(1), 39.

TRNEE. (2010). *Degrés de réchauffement : les enjeux de la hausse du climat pour le Canada*. Ottawa, Ontario: Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE). 156 p.

TRNEE. (2011a). *Le prix à payer : répercussions économiques du changement climatique pour le Canada*. Ottawa, Ontario : Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE). 175 p.

TRNEE. (2011b). *Technical Report on the Assessment of Canada-Climate Change : Results from the PAGE09 integrated assessment model*. Ottawa, Ontario: Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE), Gouvernement du Canada.

TRNEE. (2012). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique (études de cas)*. Ottawa, Ontario : Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE). 107 p.

Truchon, G., Zayed, J., Bourbonnais, R., Lévesque, M., Deland, M., Busque, M.-A. et Duguay, P. (2013). *Contraintes thermiques et substances chimiques : Bilan des connaissances et emplois les plus à risque au Québec (Rapport R-799)*. Montréal, Québec : Études et recherches IRSST. 62 p.

UKCIP. (2010). *A changing climate for business*. Oxford, United Kingdom: UK Climate Impacts Program (UKCIP). 20 p. Repéré à http://www.ukcip.org.uk/wp-content/PDFs/UKCIP_Business.pdf

UK Department of Health. (2012). *Keep Warm Keep Well*. 23 p.

Urgence Québec. (2013). *Inondation*. Repéré le 27 december 2013, à <http://www.urgencequebec.gouv.qc.ca/Fr/situation-urgence/Pages/Inondation.aspx>

U.S. Department of Energy (DOE). (2013). *U.S. Energy Sector Vulnerabilities to Climate Change and Extreme Weather*. U.S. Department of Energy's Office of Policy and International Affairs (DEO-PI), National Renewable Energy Laboratory (NREL). 84 p. Repéré à http://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/07/f2/20130716-Energy_Sector_Vulnerabilities_Report.pdf

- Valois, P., Renaud, J.-S., Bélanger, D., Gosselin, P. et Ouellet, C. (2014a). Impacts sanitaires des changements climatiques : améliorer la littératie écomédicale des omnipraticiens grâce à un nouveau référentiel de compétences lié au CanMEDS-MF. Affiche présenté à AIME Medical Education Day 2014. Ottawa, Ontario.
- Valois, P., Renaud, J.-S., Bélanger, D., Gosselin, P. et Ouellet, C. (2014b). Health Impacts of Climate Change and Implications for Continuing Medical Education: Using the Theory of Planned Behaviour to Guide a Learning Needs Assessment among Physicians. Affiche présenté au 28th International Congress of Applied Psychology. Paris, France.
- Vanasse, A., Orzanco, M.G., Dagenais, P., Ouarda, T., Courteau, J., Asghari, S., Chebana, F., Martel, B. et Gosselin, P. (2011). Secular trends of hip fractures in Québec, Canada. *Osteoporosis International*, 23(6), 1665–1672.
- Vasseur, L. et Catto, N.R. (2008). Atlantic Canada. Dans D.S. Lemmen, F. J. Warren et E. Bush (dir.), *From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate 2007* (p. 119–170). Ottawa, Ontario: Gouvernement of Canada.
- Velázquez, J.A., Schmid, J., Ricard, S., Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Minville, M., Chaumont, D., Caya, D., Ludwig, R et Turcotte, R. (2013). An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 565–578.
- Vélo Québec. (2013). *Le vélo quatre saisons à Montréal : Catalogue d'idées et de bonnes pratiques pour faciliter l'usage du vélo quatre saisons*. Montréal, Québec. 64 p.
- Verburg, P.S.J. (2005). Soil solution and extractable soil nitrogen response to climate change in two boreal forest ecosystems. *Biology and Fertility of Soils*, 41(4), 257–261.
- Verreault, G. et Trecia, G. (2011). Atlantic Sturgeon (*Acipenser oxyrinchus oxyrinchus*) Fishery Management in the St. Lawrence Estuary, Québec, Canada. Dans P. Williot, E. Rochard, N. Desse-Berset, F. Kirschbaum et J. Gessner (dir.), *Biology and Conservation of the European Sturgeon Acipenser sturio L. 1758* (p. 527–538). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Vida, S., Durocher, M., Ouarda, T.B.M.J. et Gosselin, P. (2012). Relationship Between Ambient Temperature and Humidity and Visits to Mental Health Emergency Departments in Québec. *Psychiatric Services*, 63(11), 1150.
- Villa, J. et Bélanger, D. (2012). Perception du risque d'inondation dans un contexte de changements climatiques : recension systématique des articles scientifiques sur sa mesure (1990-2011). Québec : Institut national de santé publique du Québec. 189 p.
- Ville de Gatineau. (2011). Biodiversité – Révision du schéma d'aménagement et de développement. Gatineau, Québec: Service de l'urbanisme et du développement durable, Ville de Gatineau. 24 p. Repéré à http://www.gatineau.ca/docs/guichet_municipal/urbanisme_habitation/revision_schema_aménagement_developpement/documents_references/biodiversite.pdf
- Ville de Laval. (2009). Politique de protection et de mise en valeur des milieux naturels. Laval, Québec. Repéré à <http://www.laval.ca/Documents/Pages/Fr/Administration/politiques-municipales/politique-conservation-mise-valeur-milieux-naturels.pdf>

Ville de Laval. (2011). La Politique de l'urbanisme durable de Laval. Laval, Québec. 34 p. Repéré à <http://www.laval.ca/Documents/Pages/Fr/Administration/politiques-municipales/politique-urbanisme-durable-evolucite.pdf>

Ville de Longueuil. (2005). Politique de protection et de mise en valeur des milieux naturels. Longueuil, Québec. 24 p. Repéré à http://www.longueuil.ca/files/longueuil/attachements/messages-msg_fichier-10054-5.pdf

Ville de Longueuil. (2012). Vision stratégique du plan d'urbanisme. Longueuil, Québec. 35 p. Repéré à http://www.longueuil.ca/files/longueuil/images/PDF/Vision_strategique_plan_urbanisme_17_octobre_2012.pdf

Ville de Montréal. (2004a). Plan d'urbanisme. (Règlement 04-047). Montréal, Québec. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=2761,3096665&_dad=portal&_schema=PORTAL

Ville de Montréal. (2004b). Politique de protection et de mise en valeur des milieux naturels. Montréal, Québec. 43 p. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grets_parcs_fr/media/documents/politique_protection_mise_en_valeur_milieux_naturels.pdf

Ville de Montréal. (2005). Politique de l'arbre de Montréal. Montréal, Québec. 43 p. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/portail_fr/media/documents/politique_arbre.pdf

Ville de Montréal. (2010). Le plan de développement durable de la collectivité montréalaise (2010-2015). Montréal, Québec. 117 p. Repéré le 25 avril 2014, à http://servicesenligne.ville.montreal.qc.ca/sel/publications/PorteAccesTelechargement?lng=Fr&systemName=72135795&client=Serv_corp

Ville de Montréal. (2013). Rapport sur la Biodiversité. Montréal, Québec. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/grands_parcs_fr/media/documents/rapportbiodiversite2013lecturecran.pdf

Ville de Montréal. (2014). Agrile du frêne. Repéré le 25 avril 2014, à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7377,91133623&_dad=portal&_schema=PORTAL

Ville de Sainte-Julie. (2013). Politique de l'arbre de la Ville de Sainte-Julie. Ville de Sainte-Julie. Repéré le 9 janvier 2014, à http://www.ville.sainte-julie.qc.ca/web/doc/environnement/2013/VSteJ_politique_arbre_2013_FINAL_201349105054.pdf

Ville de Saint-Jean-sur-Richelieu. (2013). Politique de l'arbre. Population (French Edition). Repéré le 9 janvier 2014, à <http://www.ville.saint-jean-sur-richelieu.qc.ca/environnement/politiques-plans-action/Documents/politique-de-l-arbre.pdf>

Ville de Québec. (2006). Plan directeur des milieux naturels et de la forêt urbaine. Tome 1 : Les milieux naturels. Québec : Service de l'environnement, Ville de Québec. 113 p. Repéré à http://www.ville.quebec.qc.ca/gretsprojetsverts/milieuxnaturels/docs/plan_directeur_milieux_naturels_foret_urbaine.pdf

Ville de Québec. (2008). Plan directeur des milieux naturels et de la forêt urbaine. Tome 2 L La forêt urbaine. Québec : Service de l'environnement, Ville de Québec. 89 p. Repéré à http://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/proprie/arbres/docs/plan_directeur_foret_urbaine.pdf

Ville de Québec. (2013). Projet K : Pour une ville et une collectivité plus résilientes : Une initiative visant à développer la résilience de la Ville de Québec face aux situations d'exception. Québec. 13 p. (2.2)

Ville de Trois-Rivières. (2009a). Politique du développement durable. Trois-Rivières, Québec: Direction de l'Aménagement, gestion et développement durable du territoire, Ville de Trois-Rivières. 150 p. Repéré à http://laville.v3r.net/docs_upload/documents/langue1/pol_mun_dev_dur/Developpement_durable_-_Complet.pdf

Ville de Trois-Rivières. (2009b). Politique du patrimoine forestier et paysager. Trois-Rivières, Québec. 20 p. Repéré à http://laville.v3r.net/docs_upload/documents/langue1/pol_mun_dev_dur/Politique_du_patrimoine_forestier_et_paysager.pdf

Vincent, W. (2009). Effects of climate change on lakes. Dans G. E. Likens (dir.), *Encyclopedia of Inland Waters*, Volumen 3 (p. 55–60). Elsevier, Oxford, United Kingdom.

Vos, C.C., Berry, P., Opdam, P., Baveco, H., Nijof, B., O'Hanley, J., Bell, Claire et Kuipers, H. (2008). Adapting landscapes to climate change: examples of climate-proof ecosystem networks and priority adaptation zones. *Journal of Applied Ecology*, 45, 1722–1731. doi:10.1111/j.1365-2664.2008.01569.x

Walthall, C. L., Hatfield, J., Backlund, P., Lengnick, L., Marshall, E., Walsh, M., Adkins, S., Aillery, M., Ainsworth, E.A., Ammann, C., Anderson, C.J., Bartomeus, I., Baumgard, L.H., Booker, F., Bradley, B., Blumenthal, D.M., Bunce, J., Burkey, K., Dabney, S.M., Delgado, J.A., Dukes, J., Funk, A., Garrett, K., Glenn, M., Grantz, D.A., Goodrich, D., Hu, S., Izaurralde, R.C., Jones, R.A.C., Kim, S-H., Leaky, A.D.B., Lewers, K., Mader, T.L., McClung, A., Morgan, J., Muth, D.J., Nearing, M., Oosterhuis, D.M., Ort, D., Parmesan, C., Pettigrew, W.T., Polley, W., Rader, R., Rice, C., Rivington, M., Rosskopf, E., Salas, W.A., Sollenberger, L.E., Srygley, R., Stöckle, C., Takle, E.S., Timlin, D., White, J.W., Winfree, R., Wright-Morton, L. et Ziska, L.H. (2012). *Climate Change and Agriculture in the United States: Effects and Adaptation*. USDA Technical Bulletin 1935 (p. 186). Washington, D.C: United States Department of Agriculture

Weber, M. et Hauer, G.A. (2003). Regional Analysis of Climate Change Impacts on Canadian Agriculture. *Canadian Public Policy*, 29(2), 163–180.

Western Power Distribution. (2011). *Western Power Distribution Adaption to Climate Change Report*. Bristol. 22 p. Repéré à <http://archive.defra.gov.uk/environment/climate/documents/adapt-reports/04distribute-trans/western-power.pdf>

WHO. (2011). *Guidance on Water Supply and Sanitation In Extreme Weather Events* (L. Sinisi et R. Aertgeerts, dir.). Copenhagen, Denmark: World Health Organisation (WHO), Regional office for Europe. 132 p.

WHO. (2013). *Floods in the WHO European Region: health effects and their prevention* (Menne et V. Murray, dir.). Copenhagen, Denmark: World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe. 146 p.

WHO/WMO. (2012). *Atlas of health and climate*. Geneva, Switzerland: World Health Organization Press. 68 p. Repéré à <http://www.who.int/globalchange/publications/atlas/report/en/>

Wiederkehr, E. (2013). *Apports de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques - Élaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône*. (Thèse de doctorat). Université de Lyon. 287 p. Repéré à http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/78/21/00/PDF/WIEDERKEHR_Elise_2012_These_VD.pdf

Williamson, T., Colombo, S., Duinker, P., Gray, P., Hennessey, R., Houle, D., Johnston, M., Ogden, A. et Spittlehouse, D. (2009). *Les changements climatiques et les forêts du Canada : Des impacts à l'adaptation*. Edmonton, Alberta: Réseau de gestion durable des forêts et Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord. 112 p.

Williamson, C.E., Zepp, R.G., Lucas, R.M., Madronich, S., Austin, A.T., Ballaré, C.L., Norval, M., Sulzberger, B., Bais, A.F., McKenzie, R.L., Robinson, S.A., Hader, D.-P., Paul, N.D. et Bornman, J.F. (2014). Solar ultraviolet radiation in a changing climate. *Nature Climate Change*, (4), 434–441.

Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y. et Sallenger, A. (2014). Coastal systems and low-lying areas. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 361–409). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.

World Bank. (2009). *Convenient Solutions to an Inconvenient Truth : Approaches to Climate Change* June 2009. World . Washington, DC: Environment Department, The World Bank. 91 p.

Wotton, B.M. (2012). A lightning fire prediction system. *Frontline Express, Bulletin* 60. Repéré le 13 janvier 2014, à <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/34088.pdf>

Wotton, B.M. et Flannigan, M.D. (1993). Length of the fire season in a changing climate. *The Forestry Chronicle*, 69(2), 187–192.

Wotton, B.M., Nock, C.A. et Flannigan, M.D. (2010). Forest fire occurrence and climate change in Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 253–271.

Yagouti, A., Boulet, G., Vincent, L., Vescovi, L. et Mekis, É. (2008). Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Québec, 1960–2005. *Atmosphere-Ocean*, 46(2), 243–256.

Yamasaki, S.H., Delagrange, S., Doyon, F., Lorenzetti, F., Forget, É. et Logan, T. (2008a). *Climate Change Adaptation Strategies for the Tolerant Hardwood Forests of Eastern Canada (Rapport scientifique final pour Ouranos)*. Montréal, Québec. 78 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/30_Rapport_Yamasaki_foresterie_2008.pdf

Yamasaki, S.H., Duchesneau, R., Doyon, F., Russell, J.S. and Gooding, T. (2008b). Making the case for cumulative impacts assessment: Modelling the potential impacts of climate change, harvesting, oil and gas, and fire. *The Forestry Chronicle*, 84(3), 349–368.

Yannic, G., Pellissier, L., Ortego, J., Lecomte, N., Couturier, S., Cuyler, C., Dussault, C., Hundertmark, K.J., Irvine, R.J., Jenkins, D.A., Kolpashikov, L., Mager, K., Musiani, M., Parker, K.L., Røed, K.H. Sipko, T., Porisson, S.G., Weckworth, B.V., Guisan, A., Bernatchez, L. et Côté, S. D. (2014). Genetic diversity in caribou linked to past and future climate change. *Nature Climate Change*, 4(12), 132–7.

Zamyadi, A., Dorner, S., Ndong, M., Ellis, D., Bolduc, A., Bastien, C. et Prevost, M. (2014). Application of in vivo measurements for the management of cyanobacteria breakthrough into drinking water treatment plants. *Environmental Science-Processes & Impacts*, 16(2), p. 313-323.

Zamyadi, A., Coral, L. A., Barbeau, B., Dorner, S., Lapolli, F.R. et Prevost, M. (2015). Fate of toxic cyanobacterial genera from natural bloom events during ozonation. *Water Research*, 73, p. 204-215.

Zanobetti, A., O'Neill, M. S., Gronlund, C. J. et Schwartz, J. D. (2012). Summer temperature variability and long-term survival among elderly people with chronic disease. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(17), 6608–6613.

Zhang, X., Brown, R., Vincent, L., Skinner, W., Feng, Y. et Mekis, E. (2011). Tendances climatiques au Canada, de 1950 à 2007. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010 (Rapport technique thématique n° 5). Ottawa, Ontario : Conseils canadiens des ministres des ressources. 22 p.

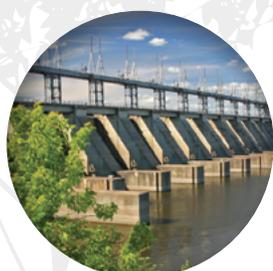
Zhang, M., Duan, H., Shi, X., Yu, Y. et Kong, F. (2012). Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: implications for future climate change. *Water research*, 46(2), 442–52.

Ziska, L., Knowlton, K., Rogers, C., Dalan, D., Tierney, N., Elder, M. A., filley, W., Shropshire, J., Ford, L.B., Hedberg, C., Fleetwood, P., Hovanky, K.T., Kavanaugh, T., Fulford, G., Vrtis, R.F., Patz, J.A., Portnoy, J., Coastes, F., Bielory, L. et Frenz, D. (2011). Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 4248–4251.

VERS L'ADAPTATION

Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec

Édition 2015



PARTIE 3 VERS LA MISE EN ŒUVRE DE L'ADAPTATION



TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures II

Liste des tableaux II

Liste des encadrés II

3.1 Introduction 2

3.2 Méthodologie 4

3.3 Les options d'adaptation 5

3.3.1 L'adaptation physique et structurelle 5

3.3.1.1 Options d'ingénierie 5

3.3.1.2 Options technologiques 6

3.3.1.3 Options basées sur les écosystèmes 7

3.3.2 Les leviers institutionnels 11

3.3.2.1 Politiques et programmes gouvernementaux 11

3.3.2.2 Lois, règlements et normes 12

3.3.2.3 Outils économiques et financiers 13

3.3.3 Le savoir et l'information 14

3.3.3.1 Outils d'information spécialisés en appui à l'adaptation 14

3.3.3.2 Connaissances hybrides 15

3.3.3.3 Éducation et sensibilisation 16

3.4 Pour une mise en œuvre réussie de l'adaptation 19

3.4.1 Les obstacles et les limites 19

3.4.2 L'adaptation transformationnelle 19

3.4.3 La maladaptation 20

3.4.4 La gestion adaptative 22

3.4.5 La mesure du progrès et l'apprentissage continu 23

3.4.6 Les possibilités créées par les changements climatiques 25

3.5 Conclusion 27

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 3-1</i>	Le processus d'adaptation	3
-------------------	---------------------------	----------

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 3-1</i>	Exemples d'options d'ingénierie	6
<i>Tableau 3-2</i>	Exemples d'options technologiques	8
<i>Tableau 3-3</i>	Exemples d'options basées sur les écosystèmes pertinentes pour le Québec	9
<i>Tableau 3-4</i>	Éléments pour un référentiel d'évaluation du programme ICAR-Québec	25

LISTE DES ENCADRÉS

<i>Encadré 3-1</i>	Exemple d'adaptation basée sur les écosystèmes : le cas des toits verts dans les centres urbains	10
<i>Encadré 3-2</i>	Importance d'une coordination institutionnelle entre les acteurs de l'adaptation	15



Vers la mise en œuvre de l'adaptation

Faits saillants

- ▶ La planification et la mise en œuvre de l'adaptation comprennent un processus de prise de décision itératif qui est fondé sur les concepts de la gestion adaptative et de l'apprentissage continu.
- ▶ Au Québec, il y a eu beaucoup d'évaluations portant sur la vulnérabilité, les impacts et l'adaptation aux changements climatiques, mais, à ce jour, celles-ci n'ont pas toutes conduit à la mise en œuvre d'adaptations et la façon dont elles ont été appliquées par les usagers reste encore peu documentée.
- ▶ Les options d'adaptation physiques et technologiques sont nombreuses, mais il existe aussi de nouvelles pistes de recherche prometteuses, notamment le développement de solutions d'adaptation plus flexibles pour répondre simultanément à plusieurs types de risques, comme les options basées sur la biodiversité et les services écologiques.
- ▶ Le Québec possède une forte capacité d'adaptation grâce aux divers leviers institutionnels mis en place sous la forme de stratégies, politiques, programmes, lois, règlements, normes et incitatifs économiques. Il compte aussi sur une expertise diversifiée et sur des technologies et des outils d'information spécialisés pour s'adapter au climat actuel et à celui anticipé pour les prochaines décennies.
- ▶ En revanche, ni les défis que pose l'adaptation à très long terme, ni les options d'adaptation transformationnelle ne sont abordés dans les études sur l'adaptation aux changements climatiques au Québec. Compte tenu de la trajectoire climatique actuelle et de celle qui est projetée, il sera nécessaire d'aborder ces aspects dans les futures recherches en adaptation au Québec.
- ▶ Pour assurer l'efficacité et la pertinence des plans et des mesures d'adaptation, la coordination entre les différents paliers de gouvernements, le secteur privé, les divers secteurs d'activités et les citoyens est essentielle.
- ▶ Les savoirs locaux et traditionnels peuvent apporter des éclaircissements sur les variables climatiques et compléter les données scientifiques, en appui à la mise en œuvre des systèmes de surveillance et de prédiction environnementaux ainsi que pour élaborer des mesures d'adaptation appropriées, surtout lorsque le manque de données constitue une barrière à l'adaptation. La participation active des communautés et des citoyens permet aussi une meilleure appropriation du processus d'adaptation.
- ▶ La sensibilisation aux changements climatiques des professionnels, des entreprises et des communautés est diversifiée et inégale au Québec; les efforts doivent être mis de manière continue, à tous les niveaux et à toutes les étapes de la démarche d'adaptation afin d'améliorer le niveau d'éducation et la sensibilisation des secteurs publics et privés et augmenter la capacité d'adaptation du Québec.

- ▶ L'étude de cette capacité d'adaptation se développe au Québec et elle permet de mieux comprendre comment renforcer les caractéristiques des individus, des organisations et de la société pour faire face aux impacts des changements climatiques.
- ▶ Les chercheurs travaillent actuellement à comprendre les barrières à l'adaptation et le passage de la science à l'action. Dans ce contexte, les organisations « frontières » comme Ouranos jouent un rôle important et sont de plus en plus valorisées internationalement.
- ▶ Il y a aussi le risque que certaines options d'adaptation proposées conduisent à la maladaptation. Plusieurs outils, comme les analyses d'impacts socio-environnementales, les analyses de cycle de vie et les analyses coûts-avantages, peuvent être utiles pour appuyer la prise de décision et éviter la maladaptation.
- ▶ Les changements climatiques pourront aussi créer des opportunités pour le Québec, dans certains secteurs, mais les moyens et les stratégies pour en tirer profit doivent être déterminés et mis en place rapidement afin d'en bénéficier et, par ailleurs, de réduire les impacts et les vulnérabilités qui pourraient mettre en péril ces bénéfices

3.1 Introduction

L'adaptation est communément définie comme un changement dans les comportements et les caractéristiques d'un système de manière à pouvoir composer avec une situation dans un endroit spécifique. L'adaptation aux changements climatiques fait référence ici à ces ajustements qui sont faits spécialement pour composer avec un climat en évolution rapide. Une grande partie de notre environnement, qu'il soit naturel, bâti ou social, a été conçu ou a évolué pour convenir à des paramètres climatiques considérés relativement stables dans le temps. Cette hypothèse sous-jacente d'un climat stationnaire ne tient plus et nécessite donc des ajustements dans notre façon de planifier et de gérer notre environnement. L'adaptation aux changements climatiques est un domaine de recherche qui étudie et cherche à comprendre comment les systèmes existants, naturels et humains, feront face aux changements climatiques et comment prendre en considération les changements climatiques dans le développement durable de la société.

La partie 3 de la présente synthèse complète l'information présentée dans la partie 2 et en fait l'analyse dans une perspective transversale, en s'attardant sur ce que nous avons appris, sur la façon dont nous pouvons nous adapter aux changements climatiques et sur les outils et les connaissances nécessaires pour y arriver. Après une brève description de la méthodologie utilisée pour compiler les informations qui sont présentées dans cette partie, nous décrivons les différents types de stratégies d'adaptation, qui ont été identifiés à travers une revue des études réalisées au Québec. Finalement, dans la dernière section, nous présentons une série de concepts clés pour une mise en œuvre réussie de l'adaptation. Ces concepts sont importants, car la planification et la mise en œuvre de l'adaptation font appel à un processus de prise de décision itératif, exigeant et relativement peu utilisé à ce jour. Ce processus est fondé sur les concepts de gestion adaptative et d'apprentissage continu (figure 3-1).

Les exemples fournis dans les prochaines sections sont donnés à titre indicatif, pour présenter le processus, comprendre les concepts sous-jacents et illustrer comment mettre en œuvre l'adaptation.

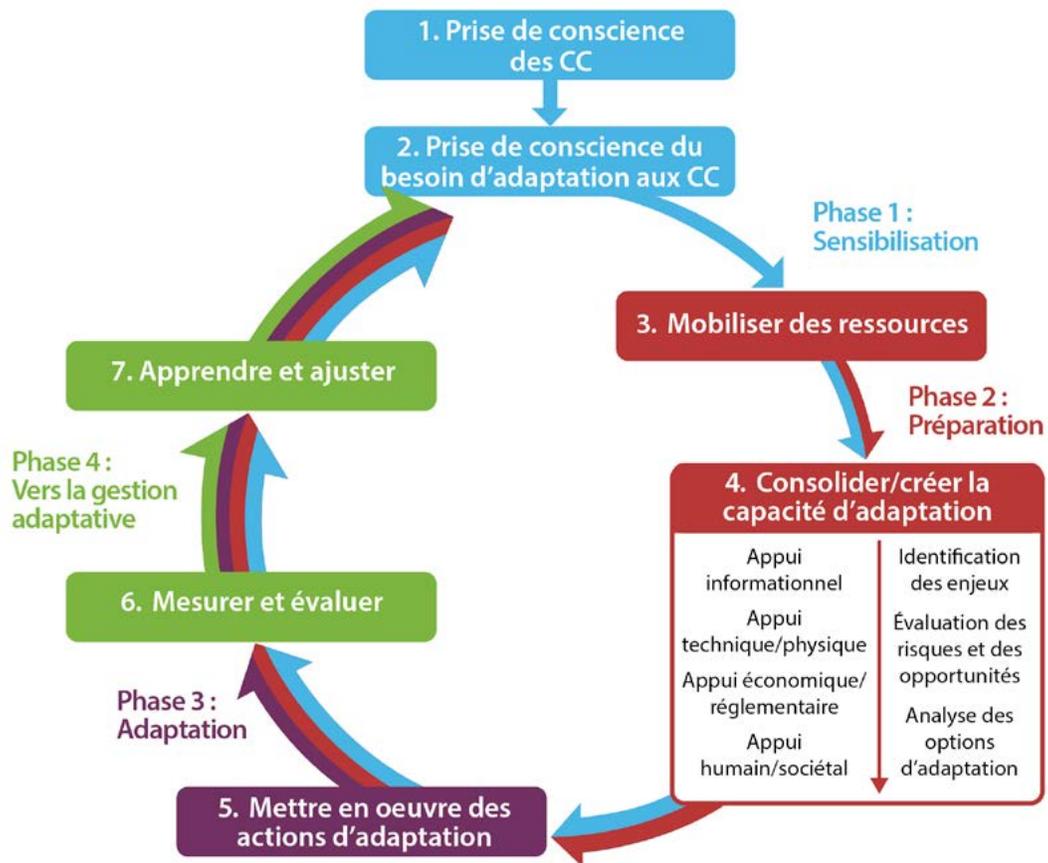


Figure 3-1 Le processus d'adaptation

Source : Eyzaguirre et Warren (2014)



3.2 Méthodologie

Les outils de planification et de mise en œuvre de l'adaptation se développent rapidement au Québec. Néanmoins, encore aujourd'hui, la majorité des travaux de recherche sur l'adaptation ne se trouve pas dans la documentation scientifique, mais plutôt dans la littérature « grise », c'est-à-dire publiée en dehors des revues formelles examinées par les pairs (Burkett *et al.*, 2014). Par conséquent, cette partie a été préparée à partir d'une compilation des informations provenant de recherches pertinentes pour le Québec, et complétée par une revue de la documentation internationale sur le sujet.

La collecte de données a été réalisée par le biais d'une enquête structurée auprès des coordonnateurs de programmes thématiques d'Ouranos, ainsi que dans son réseau élargi de partenaires. L'enquête a permis d'identifier 107 références fournies par 14 répondants. L'information recueillie a été classée dans 11 domaines thématiques. Étant donné le nombre limité de répondants, la représentativité des résultats peut en être affectée. Le biais pourrait être associé au fait qu'il y avait un plus grand nombre de répondants issus du domaine de la conservation de la biodiversité (54 % des répondants). Des recherches additionnelles ont donc été menées afin de corriger ce biais. Comme beaucoup de projets de recherche en impacts et adaptation ont été réalisés au Québec dans les dernières années, de nombreux rapports de recherche ont été consultés, incluant les recherches qui n'avaient pas été mentionnées dans l'enquête préalable. L'information recueillie a été complétée par un examen d'autres documents sur l'adaptation, lesquels ne portaient pas nécessairement sur le Québec, mais s'avéraient pertinents en termes de processus et de contexte. Sans prétendre être exhaustif, ce travail d'analyse réalisé dans le cadre de cette synthèse des connaissances offre des perspectives complémentaires et transversales aux évaluations sectorielles présentées dans la deuxième partie de ce document.

La revue de la documentation pertinente pour le Québec révèle un nombre croissant de recherches portant sur divers aspects du processus d'adaptation : p. ex. des outils et des méthodes de planification, les concepts et typologies de l'adaptation, le passage de la planification à la mise en œuvre, le suivi et l'évaluation des mesures d'adaptation, etc. Ce constat va dans le même sens que ce qui est observé à l'échelle internationale. Dans son cinquième rapport d'évaluation publié en 2014, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) note que la documentation sur les études de vulnérabilité, d'impacts et d'adaptation a doublé depuis le rapport précédent, en 2007. La majorité de cette nouvelle documentation est le résultat d'une hausse des publications sur l'adaptation (Burkett *et al.*, 2014, figure 1.1, p. 173). Il y a eu aussi une augmentation des publications provenant du Canada (Eyzaguirre et Warren, 2014). Pour le Québec, une recherche par mots-clés réalisée au début de 2014 indiquait que le nombre de publications est passé de 202 en 2007 à 326 en 2013, toutes langues confondues¹.

Toutefois, la documentation sur l'adaptation nous renseigne très peu sur sa mise en œuvre effective. Bien qu'il y ait eu beaucoup de plans, de politiques et de stratégies développés dans le monde entier, ils n'ont pas encore été beaucoup appliqués, ou leur mise en œuvre en est encore à ses débuts. D'un autre côté, de nombreuses mesures d'adaptation sont déjà intégrées dans le développement de la société en général. Bien que cela soit positif, il devient du coup très difficile, voire impossible, d'isoler les mesures qui visent spécifiquement à s'adapter aux changements climatiques. Les chercheurs s'efforcent de comprendre où résident les obstacles à l'application effective des plans d'adaptation ou à la mise œuvre d'actions pour réduire nos vulnérabilités (Field *et al.*, 2014; Jones *et al.*, 2014). Cela a conduit à l'émergence d'une expertise dans le processus de prise de décision et en sciences socio-économiques. En tant qu'organisation travaillant à la frontière entre la science et la prise de décision, le consortium Ouranos joue un rôle important dans ce processus. Cette section s'appuie donc largement sur les travaux auxquels a participé le consortium et met en évidence les besoins futurs en recherche dans ce domaine.

¹ Recherche par mots clés : « adaptation » et « changements climatiques » et Québec.



3.3 Les options d'adaptation

Le GIEC propose deux grandes catégories pour les options d'adaptation : celles qui sont de nature incrémentale et celles de nature transformationnelle. Les premières sont des mesures qui visent à maintenir « l'essence et l'intégrité d'un système ou d'un processus à une échelle déterminée » (GIEC, 2014). Elles sont présentées à la section suivante. Mais parfois, ce type d'adaptation atteint des limites qui rendent nécessaire le recours à un type d'adaptation faisant appel à une transformation plus fondamentale (Klein *et al.*, 2014) : ce sont les adaptations de nature transformationnelle. Ces dernières seront discutées à la section 3.4.2.

La plupart des adaptations suggérées pour le Québec sont de nature incrémentale; celles-ci peuvent être classées dans trois grandes catégories : 1) adaptation physique et structurelle, 2) leviers institutionnels et 3) information et savoir. En général, ces mesures d'adaptation ne sont pas conçues de façon isolée, mais plutôt en combinaison, car cela permet de mieux aborder les diverses vulnérabilités, ainsi que les enjeux physiques, sociaux et institutionnels qui y sont associés. Leur mise en œuvre nécessite donc une coordination multi-institutionnelle (voir l'encadre 3-2). Cette section dresse une liste non exhaustive des stratégies d'adaptation identifiées dans différents secteurs au Québec et précise, pour chacun d'eux, les défis et les besoins de recherche.

3.3.1 L'adaptation physique et structurelle

Les mesures d'adaptation physique et structurelle entraînent des modifications tangibles dans les propriétés physiques d'un système, ce qui permet d'augmenter sa capacité de faire face à la variabilité climatique. Elles peuvent prendre la forme de modifications d'ingénierie ou du cadre bâti, de solutions technologiques² ou de mesures basées sur le fonctionnement des écosystèmes (adaptation basée sur les écosystèmes, aussi appelée «adaptation écosystémique»).

3.3.1.1 Options d'ingénierie

Ces options d'adaptation ont été identifiées dans divers secteurs d'activité économique au Québec et ailleurs (voir tableau 3.1), mais leur degré de mise en œuvre est variable, car certains impacts et vulnérabilités aux changements climatiques doivent encore être mieux compris.

Les impacts environnementaux, sociaux et économiques sont aussi des aspects à considérer dans la mise en œuvre de ces options d'adaptation. Aux Îles-de-la-Madeleine par exemple, les options d'ingénierie plus douces comme la recharge en sable des plages et la gestion des sédiments sont actuellement privilégiées par rapport à la construction de digues ou de brise-lames (Bourgeois, 2014). En effet, les ouvrages rigides peuvent occasionner des effets négatifs sur l'environnement, amplifier le phénomène d'érosion, en plus d'être très coûteux (voir section 2.3.2.2). Cependant, les mesures plus légères ne sont pas sans risque non plus et requièrent également un suivi et une évaluation pour mesurer leurs performances technique, économique et environnementale et pouvoir déterminer leur acceptabilité sociale.

D'autres dimensions à considérer pour choisir les options d'ingénierie sont les caractéristiques géographiques du site, les valeurs et les attentes des groupes d'intérêt locaux. Enfin, l'interdépendance entre différentes infrastructures est un autre aspect à ne pas négliger, car un événement climatique extrême pourrait occasionner des défaillances en cascade, provoquant des conséquences négatives dans plusieurs secteurs d'activité (Engineering the Future, 2011).

² Faire la distinction entre les options d'adaptation d'ingénierie et les options d'adaptation technologique n'est pas toujours évident, car parfois une option d'adaptation peut tomber dans les deux catégories. Néanmoins, nous avons choisi de faire la différence afin de s'aligner sur la nomenclature proposée dans le dernier rapport du GIEC (Noble *et al.*, 2014)

Tableau 3-1 Exemples d'options d'ingénierie

Secteurs ⁽¹⁾	Mesures d'adaptation	Références
Foresterie (2.1.1.3)	Modification des infrastructures forestières (p.ex. augmenter la taille des ponceaux pour s'adapter à l'augmentation des précipitations)	Le Goff et Bergeron (2014)
Agriculture (2.1.2.3)	Conception d'ouvrages hydroagricoles et de structures d'entreposage du fumier et des lisiers selon des critères qui tiennent compte des changements climatiques	Godbout et al. (2013); Michaud et al. (2013)
Énergie (2.1.4.2)	Modification de la dimension des canaux d'aménée d'eau ou des conduites	Roy et al. (2008)
	Augmentation de la capacité des évacuateurs de crue	Roy et al. (2008)
Bâtiments et infrastructures (2.3)	Modification de la géométrie et de la conception des chaussées pour faire face à l'augmentation des précipitations	Doré et al. (2014)
	Construction d'ouvrages de protection rigides (p.ex. murs, enrochements, déflecteurs de vagues) pour contrer la hausse du niveau de la mer et l'érosion côtière	Cooper et Pile (2014); Friesinger et Bernatchez (2010); Linham et Nicholls (2010)
	Recharge des plages en sable pour contrer l'érosion côtière	Tecsult Inc. (2008)
	Implantation de systèmes de gestion des eaux pluviales	BNQ (2013); Boucher (2010); Giguère (2009); Dagenais (2014)
	Utilisation de matériaux réfléchissants (à fort albédo) sur les infrastructures urbaines (toits, parois murales, pavés)	Anquez et Herlem (2011); Aubé et al. (2011); Giguère (2009)
	Favoriser l'architecture bioclimatique (construction d'infrastructures dites intelligentes)	Aubé et al. (2011); Engineering the Future (2011); Giguère (2009)
	Utilisation de thermosiphons pour maintenir le pergélisol gelé dans les régions nordiques	Pearce et al. (2011); Warren et Lemmen (2014)
Ressources en eau (2.5.1.2)	Mise à niveau des infrastructures de gestion de l'eau (p.ex. redimensionnement des ouvrages, relocalisation des prises d'eau, mécanisation des vannes) pour intégrer divers scénarios de changements climatiques	Milot et al. (2013)

3.3.1.2 Options technologiques

Avoir accès à un portfolio d'options d'adaptation est un élément clé dans la création de conditions favorables à l'adaptation (Yohe et Tol, 2002). C'est ainsi que les options d'ingénierie sont souvent combinées à des options technologiques pour favoriser l'adaptation (Noble et al., 2014). La gamme d'options technologiques est très vaste et concerne tous les domaines d'activités et secteurs économiques (tableau 3-2). Bien que les savoirs et connaissances autochtones peuvent entrer dans cette catégorie (Glatzel et al., 2012), nous les abordons dans la section 3.3.3.2 sur les connaissances hybrides.

La mise en place des options technologiques est influencée par divers facteurs. D'abord, le rapport entre les coûts de mise en œuvre et leur utilité est un aspect important de l'équation. Dans l'industrie forestière, par exemple, l'utilisation de pneus à portance élevée dans les débardeurs facilite le travail sur des sols dégelés. Toutefois, leur emploi sporadique rend difficile la justification de leurs coûts d'entretien et la mise en place de cette mesure (Johnston et Hesseln, 2012). De plus, lorsque de nouvelles machineries sont introduites, il faut aussi prévoir les compétences techniques qui vont avec, de même que la logistique pour en assurer l'entretien et les réparations.

Le financement est peut-être l'aspect le plus important dans la mise en place des options technologiques, surtout au début de leur développement. Le succès dans l'adoption des options technologiques dépend aussi de leur acceptabilité sociale. L'introduction de nouvelles variétés de cultures génétiquement modifiées pour résister à des conditions climatiques plus sévères ou à l'apparition de nouveaux insectes ravageurs ou de nouvelles maladies risque d'être rejetée par les consommateurs et la population en général, qui préfèrent de plus en plus les produits biologiques (Glatzel *et al.*, 2012). Enfin, l'intégration des options technologiques aux pratiques traditionnelles pour accroître la capacité d'adaptation des communautés autochtones (p.ex. l'utilisation des téléphones satellitaires pour faciliter la communication entre les chasseurs et la radio locale) peut avoir des effets sociaux indésirables comme le déclin des connaissances traditionnelles et la perte de l'identité culturelle. L'introduction de nouvelles technologies peut aussi conduire à une augmentation des comportements à risque puisque la perception du risque tend à diminuer dans ce contexte (Ford *et al.*, 2007).

3.3.1.3 Options basées sur les écosystèmes

Il y a une prise de conscience et un intérêt grandissants pour des options d'adaptation basées sur les écosystèmes (ABE) (Mimura *et al.*, 2014). L'ABE a « recourt à la biodiversité et aux services écosystémiques dans le cadre d'une stratégie d'adaptation globale, pour aider les populations à s'adapter aux effets négatifs des changements climatiques » (Andrade *et al.*, 2010; IUCN, 2009; Munang *et al.*, 2013; Munroe *et al.*, 2012; Naumann *et al.*, 2010; Roberts *et al.*, 2012; SCBD, 2009; Vignola *et al.*, 2009). Les avantages de l'ABE sont liés à son potentiel d'offrir plusieurs bénéfices à la fois (co-bénéfices) à divers usagers (tableau 3-3). Par conséquent cette approche se justifie encore plus facilement dans le contexte de l'incertitude associée aux projections climatiques futures. L'exemple des toits verts dans les zones urbaines (encadré 3-1) illustre bien ce point puisqu'ils peuvent offrir de multiples bénéfices à la société.

L'ABE est conçue pour d'autres objectifs que la stricte conservation de la biodiversité, p. ex. pour la santé publique ou la gestion des eaux pluviales. Il est important ici de faire la distinction entre cette approche et les mesures d'adaptation qui visent en premier lieu la conservation de la biodiversité (voir la section 2.4.2). En pratique, les deux types d'approches sont complémentaires et même quelquefois difficiles à différencier. En effet, le rôle important de certains services écologiques dans la réduction des vulnérabilités environnementales et socio-économiques de nombreux secteurs de la société vient renforcer l'importance de protéger le capital naturel afin de pouvoir maintenir ces services écologiques sous les conditions climatiques futures (Siron, 2013; 2014) (voir aussi le chapitre 2.4).

La mise en œuvre des mesures d'ABE peut se faire soit de façon indépendante, soit en les intégrant dans les plans ou les cadres environnementaux, climatiques ou de développement durable, ou encore dans des plans sectoriels (ASTHO 2012; Colls *et al.*, 2009; Culver *et al.* 2012; Horton *et al.* 2012; Lackstrom *et al.* 2012). Plusieurs villes dans le monde favorisent déjà la construction d'infrastructures vertes en les intégrant dans leurs stratégies d'adaptation aux changements climatiques, comme en Allemagne (Mathey *et al.*, 2011) et dans les villes américaines de Grand Rapids, au Michigan, de New York, et de Keene au New Hampshire (City of Grand Rapids, 2011; City of Keene, 2010; City of New York, 2012). En particulier, à la suite de l'ouragan Sandy, la ville de New York a mis en place des infrastructures vertes pour réduire sa vulnérabilité à de tels événements (Bierbaum *et al.* 2012).

Tableau 3-2 Exemples d'options technologiques

Secteurs ⁽¹⁾	Mesures d'adaptation	Références
Foresterie (2.1.1.3)	Modification de la machinerie forestière (p.ex. en équipant la machinerie avec des pneus à portance élevée quand le sol n'est pas suffisamment gelé)	Johnston et Hessein (2012); Le Goff et Bergeron (2014); Le Goff et Jayen (2011)
Agriculture (2.1.2.3)	Installation de systèmes de ventilation dans les bâtiments d'élevage ou autres technologies (brumisation) pour faire face aux périodes de chaleur intense	Kurukulasuriya et Rosenthal (2013); Proulx et al. (2013); IISD (2013)
	Micro-irrigation (système d'irrigation de précision, systèmes d'irrigation goutte à goutte)	Agrawala et al. (2011); Glatzel et al. (2012); Kurukulasuriya et Rosental (2003); Milot et al. (2013)
	Développement de variétés végétales/cultivars/hybrides adaptées aux nouvelles conditions climatiques	Agrawala et al. (2011); Kurukulasuriya et Rosental (2003);
	Suivi en temps réel et d'autres technologies qui contribuent à accroître le rendement de l'agriculture irriguée	Warren et Lemmen (2014)
Pêches et aquaculture (2.1.3.4)	Élevage de nouvelles espèces adaptées aux nouvelles conditions climatiques	Brzeski (2011)
Énergie (2.1.4.2)	Modification des caractéristiques des composantes électriques (générateurs, transformateurs, lignes de transport, etc)	Roy et al. (2008)
Tourisme (2.1.5.4)	Utilisation de systèmes de distribution hydrique efficaces (brumisation automatique sur les terrains de golf)	Bleau et al. (2012)
	Production de neige artificielle	Bark et al. (2010); Blangy et al. (2011); Bleau et al. (2012); Demers (2006); Scott et al. (2007); Singh et Bryant (2006); UNWTO (2008); Doré et al. (2014)
Bâtiments et infrastructures (2.3.2.3)	Application de traitements (chaux, ciment, émulsions) sur les sols et les matériaux des chaussées pour les rendre moins sensibles à l'eau	Doré et al. (2014)
Biodiversité et services écologiques (2.4.2.2)	Introduction de technologies de communication (GPS, téléphones satellites) et de nouveaux moyens de transport dans les activités de chasse et de pêche assurant la subsistance des communautés autochtones	Allard et Lemay (2013); Ford et al. (2007); Mameamskum (2013)
	Utilisation d'outils géomatiques pour cartographier les milieux humides en appui à la prise de décision, à l'évaluation diagnostique et à l'intervention locale	Fournier et al. (2013)
Aménagement du territoire (2.5.2.1)	Utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) pour mieux cerner les vulnérabilités climatiques (p.ex. : élaboration de cartes de risque)	Agrawala et al. (2011); Thomas et al. (2012); Burch et al. (2010); Wiederkehr (2013)
Tous les secteurs	Utilisation des technologies de l'information pour développer des systèmes d'alerte précoce et de prévisions météorologiques spécifiques, p. ex. en santé (vagues de chaleur), dans la gestion des ressources en eau (crues, étiages) ou en agriculture (sécheresses)	Agrawala et al. (2011); Thomas et al. (2012); Burch et al. (2010); Wiederkehr (2013)

(1) Les numéros entre parenthèses renvoient aux chapitres et sections de ce document d'où sont tirés les exemples.

Tableau 3-3 Exemples d'options basées sur les écosystèmes pertinentes pour le Québec.

Secteurs ⁽¹⁾	Mesures d'adaptation	Co-bénéfices	Références
Foresterie (2.1.1.3) Aménagement du territoire en milieu naturel (2.5.2.2)	Aménagement forestier écosystémique (AFÉ) Mise en place d'aires protégées multi-catégories combinant des aires de conservation stricte et des aires polyvalentes pour une exploitation durable des ressources naturelles	Gestion durable des ressources forestières; Conservation de grands écosystèmes; Maintien de la connectivité des paysages; Maintien des services écologiques	Bélanger et al. (2013); Cadieux et al. (2011); Edwards et Hirsh (2012); Johnston et Edwards (2013); Le Goff et Jayen (2011); Le Goff et al. (2012); Reyes et al. (2011)
Agriculture (2.1.2.3)	Établissement ou préservation de bandes riveraines le long des cours d'eau en zones agricoles	Protection des habitats; Maintien de la qualité de l'eau; Création de refuges thermiques pour les poissons en rivières	Lapointe et al. (2013); Mehdi et al. (2014) Milot et al. (2013)
Santé (2.2.2.1)	Plantation d'arbres à grand déploiement	Protection de la population contre les rayons UV; Création d'ombrage; Lutte contre les îlots de chaleurs urbains	BNQ (2013); Giguère (2009)
Santé (2.2.2.1) Aménagement du territoire en milieu urbain (2.5.2.1)	Aménagement d'infrastructures vertes dans les villes (parcs, ruelles vertes, toits verts, murs végétaux, systèmes végétalisés)	Santé et bien-être de la population; Lutte contre les îlots de chaleur urbains; Gestion des eaux pluviales	Anquez et Herlem (2011); Bierbaum et al. (2012); BNQ (2013); Dagenais et al. (2014); FIHOQ (2014); Fuamba et al. (2010); Giguère (2009); Mailhot et al. (2013); Mathey et al. (2011); Boucher et Fontaine (2010)
Gestion de l'eau (2.5.1.1) Biodiversité et services écologiques (2.4.2)	Régulation du débit des cours d'eau en fonction des espaces de liberté Évaluations écologique et économique des milieux humides	Protection des habitats riverains; Conservation des milieux humides; Maintien d'habitats de qualité pour la flore et la faune; Maintien de la qualité et de la quantité d'eau	Auzel et al. (2012); Biron et al. (2014); Biron (2013); Biron et al. (2014); Charles et al. (2013); Fournier et al. (2013); Siron (2014)
Aménagement du territoire en milieu naturels (2.5.2.2)	Implantation de systèmes agroforestiers; Réseaux de corridors écologiques; Réseau d'aires protégées	Disponibilité et qualité des habitats, qualité de l'eau, renforcement de la connectivité écologique et conservation des paysages	Auzel et al. (2012); Bélangier et al. (2013); Coagliastro et al. (2013); Gonzalez et al. (2013); Olivier (2013); Schoeneberger et al. (2012); CBD (2009); Siron (2013); Tartera et al. (2012); Verchet et al. (2007)

⁽¹⁾ Les numéros entre parenthèses renvoient aux chapitres et sections de ce document d'où sont tirés les exemples.

Encadré 3-1. Exemple d'adaptation basée sur les écosystèmes : le cas des toits verts dans les centres urbains

Avec les changements climatiques, la fréquence des événements de pluie intense augmentera dans le sud du Québec et des impacts sur les systèmes de gestion des eaux pluviales sont attendus. Les toits verts font partie des pratiques de gestion optimales (PGO) structurelles pour faire face à ces impacts. Leur potentiel pour réduire les volumes d'eaux pluviales et les débits de pointe des eaux de ruissèlement a été étudié au Québec (Dagenais et al., 2011; 2014) et ailleurs dans le monde (Carter et Butler, 2008; Chen, 2013; Simmons et al., 2008).

Il y a deux types de toits verts selon qu'ils sont extensifs ou intensifs. En général, la différence entre ces deux types réside surtout dans l'épaisseur de la couche de sol. Dans le premier cas, elle est moins épaisse, ce qui diminue son entretien et le demande en eau (Berardi et al., 2014). Leur efficacité pour réduire les eaux de ruissèlement dépend de divers aspects techniques et de construction (Berardi et al., 2014), ainsi que du climat et des caractéristiques des bâtiments sur lesquels ils sont installés. En évaluant l'efficacité de divers systèmes de toits verts, Simmons et al. (2008) ont trouvé que les taux de rétention maximaux de ruissèlement variaient entre 44% et 88% pour des précipitations considérées comme grandes et moyennes respectivement. Sur la base de ces résultats, on pourrait conclure que les toits verts sont plus efficaces dans des conditions de pluie faible, mais en réalité les pourcentages de réduction varient d'un système à l'autre et une évaluation au cas par cas est nécessaire pour évaluer leur performance à un site donné (Berardi et al., 2014).

En outre, les toits verts peuvent améliorer la qualité des eaux de ruissèlement, mais il est possible aussi qu'elles contiennent de fortes concentrations en phosphates et en nitrates (Berardi et al., 2014). À Taiwan, Chen (2013) a trouvé des concentrations de sédiments et de nutriments dix fois plus élevées dans des eaux de ruissèlement des toits verts que dans des eaux de toits conventionnels; un aspect qu'il convient donc de surveiller lors de l'implantation de toits verts.

Les toits verts ont aussi la capacité de réduire les fluctuations de températures et le flux de chaleur dans les bâtiments, diminuant ainsi la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation (Castleton et al., 2010; Chen, 2013). L'atténuation de l'effet d'îlot thermique urbain est un autre avantage des toits verts (Berardi et al., 2014). En comparaison avec les toitures en asphalte-gravier (albédo autour de 0,1 - 0,2), les toits verts possèdent des albédos plus élevés, de l'ordre de 0,7 à 0,85 (Berardi et al., 2014). Leur mise en place à large échelle pourrait ainsi réduire la température environnante de 0,3 °C à 3 °C (Santamouris, 2014).

En plus des avantages déjà mentionnés, les toits verts contribuent également à l'amélioration de la qualité de l'air et au contrôle de la pollution (Berardi et al., 2014), à la séquestration du carbone (Berardi et al., 2014; Chen, 2013), à l'amélioration de l'insonorisation (Berardi et al., 2014) et à maintenir la biodiversité urbaine (Berardi et al., 2014; Grant et Lane, 2006; Köhler, 2005). Les toits verts sont en fin de compte des options d'adaptation basées sur la biodiversité et les services écologiques (Köhler, 2005; Kowalczyk, 2011) dont la mise en application pourrait être favorisée davantage au Québec grâce à l'adoption de politiques comme celles qui ont été déjà adoptées en Allemagne, au Danemark, aux États-Unis et dans les villes canadiennes de Toronto et de Vancouver (Berardi et al., 2014).

Malgré les nombreux avantages de l'ABE, il y a encore des connaissances à acquérir sur le fonctionnement des écosystèmes pour en favoriser l'utilisation. L'efficacité de l'ABE, mise en place seule ou en combinaison avec d'autres types d'adaptation, reste à évaluer (Côté et Darling, 2010; Munroe *et al.* 2012), de même que ses performances dans des environnements particuliers et sous le climat futur. Peu d'analyses ont été faites pour évaluer les avantages économiques et sociaux (Berardi *et al.* 2014; Colls *et al.*, 2009), ainsi que les coûts engendrés tout au long du cycle de vie (Berardi *et al.* 2014). Des études sur la valeur économique des services écologiques provenant de la mise en œuvre de l'ABE sont aussi nécessaires pour appuyer la prise de décision en adaptation (Dupras *et al.* 2013). À cet égard, les travaux d'Olivier (2013) sur les systèmes agroforestiers, de Gonzalez *et al.* (2013) sur les corridors écologiques et de Fournier *et al.* (2013) sur les milieux humides ont tracé la voie à de futurs développements dans ce domaine de recherche encore émergent qui combine analyses écologiques et économiques (voir l'encadré 2-7; section 2.4.1). Comme toutes les autres catégories d'adaptation, la mise en œuvre de l'ABE est limitée par le financement disponible, les conflits d'usage dans l'utilisation des terres, ainsi que les valeurs et perceptions sociétales. Le développement d'outils est nécessaire pour appuyer la prise de décision à propos de l'ABE, de même que le développement d'incitatifs financiers et de cadres institutionnels pour guider leur mise en place (HM Government, 2013).

3.3.2 Les leviers institutionnels

Les institutions publiques et privées créent un environnement favorable à l'adaptation grâce au développement de divers leviers institutionnels et elles jouent un rôle clé dans la promotion de la transition qui mène de la planification à la mise en œuvre de l'adaptation. Selon le GIEC, il y a trois sortes de leviers institutionnels : les politiques et les programmes gouvernementaux; les lois, les règlements et les normes; et les outils économiques et financiers (Noble *et al.*, 2014). Cette section passe en revue ces catégories en donnant quelques exemples pour chacune d'elles.

3.3.2.1 Politiques et programmes gouvernementaux

La planification de l'adaptation au Québec et au Canada se fait à plusieurs niveaux de gouvernance et sous différentes juridictions. Au niveau fédéral, le *Cadre stratégique fédéral sur l'adaptation* vise à intégrer les risques climatiques affectant le bien-être des Canadiens dans les décisions prises au niveau Canadien. Pour sa part, le gouvernement du Québec a développé un *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques* (faisant suite au *Plan d'action 2006-2012*), accompagnant la *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020* (Gouvernement du Québec, 2012). Ces cadres gouvernementaux visent à minimiser les impacts des changements climatiques ainsi que leurs conséquences pour la sécurité et la santé de la population et des communautés de même que sur les activités économiques, l'environnement bâti et l'environnement naturel. La stratégie d'adaptation a pour but également de renforcer la prise de conscience à l'égard de cet enjeu au Québec, ainsi que la prise en charge et l'appropriation locale et régionale des solutions d'adaptation aux changements climatiques. Au cœur des intentions présentées dans la stratégie on trouve des enjeux transversaux : l'intégration de mesures d'adaptation dans l'administration publique, le développement des connaissances et du savoir-faire en matière d'adaptation, la sensibilisation et la formation ainsi que l'aménagement du territoire.

Sur les plans local et régional, plusieurs municipalités ont développé, ou sont en train de développer, des stratégies d'adaptation municipales; c'est le cas notamment des villes de Sherbrooke, Sept-Îles et Trois-Rivières (voir l'encadré 12 dans la section 2.4.2.5 et la section 2.5.2.1). De plus, plusieurs outils ont été développés au cours des dernières années pour appuyer cette planification, comme le guide destiné au milieu municipal québécois pour élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques (Ouranos, 2010). Plusieurs autres outils existent pour accompagner les municipalités du Canada dans leur démarche vers l'adaptation, dont certains couvrent à la fois la mitigation des GES et l'adaptation (voir entre autres : Bizikova *et al.*, 2008; Bowron et Davidson, 2011; Fisher, 2011; Jackson *et al.*, 2011; Richardson et Otero, 2012).

En plus des stratégies visant l'adaptation, on cherche à intégrer l'adaptation dans les plans et stratégies visant d'autres enjeux, comme par exemple les schémas d'aménagement du territoire (Gouvernement du Québec, 2012), la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (Gouvernement du Québec, 2013b), la *Stratégie québécoise pour la réduction des pollens allergènes* (en élaboration, voir section 2.2.1.3) et la mise à jour de cadres législatifs et réglementaires pour gérer les ressources hydriques ou les aires protégées (Bélanger *et al.*, 2013; Chapin III *et al.*, 2006).

3.3.2.2 Lois, règlements et normes

Les politiques et programmes gouvernementaux s'appuient souvent sur des lois, règlements, normes et guides conçus pour appuyer la mise en œuvre des meilleures pratiques. L'intégration de l'adaptation dans le cadre législatif se fait soit à travers de nouveaux règlements ou lois, soit par la modification de lois ou règlements existants (EEA, 2013). C'est justement l'un des objectifs de la *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020* (Gouvernement du Québec, 2012). À cet égard, il existe déjà des lois au Québec qui intègrent l'adaptation, comme la *Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau* et visant à renforcer leur protection et la *Loi sur la sécurité des barrages*. Des efforts sont faits aussi pour inclure les concepts sous-jacents à l'adaptation dans d'autres lois comme la *Loi sur la sécurité civile* et la *Loi sur l'aménagement durable du territoire et l'urbanisme* (Gouvernement du Québec, 2012). De plus, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC) a amorcé en février 2015 un processus de modernisation de la *Loi sur la qualité de l'environnement* pour entre autres, inclure l'adaptation aux changements climatiques dans le processus d'autorisation environnementale (MDDELCC, 2015).

En ce qui concerne les normes, plusieurs exemples intégrant des objectifs d'adaptation existent dans divers secteurs. Par exemple, la norme BNQ 2019/2013 du Bureau de normalisation du Québec qui propose un aménagement stratégique des aires de stationnement pour éviter la formation d'îlots de chaleur dans un objectif de protection de santé publique (BNQ, 2013). En agriculture, les changements climatiques ont été intégrés dans la mise à jour du guide technique utilisé pour la conception des structures d'entreposage en fonction des accumulations d'eau attendues pour la période 2016-2044 (Godbout *et al.*, 2013). Le MDDELCC a développé aussi le *Guide de gestion des eaux pluviales* qui rappelle l'importance de prendre en compte les impacts appréhendés des changements climatiques pour mieux planifier la gestion des eaux pluviales au Québec (Rivard, 2011). Par ailleurs, des outils visant des associations professionnelles sont utiles pour transformer les pratiques courantes. Ainsi, le *Protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques* a été développé pour aider les ingénieurs canadiens à intégrer les changements climatiques dans leur pratique (Engineers Canada, 2011).

Les lois, les règlements et les normes peuvent contribuer de manière positive à l'intégration de l'adaptation, mais il reste à en évaluer leurs effets réels en termes de réduction des vulnérabilités. En effet, l'efficacité de ces outils –ou leur application– peut quelques fois être questionnée. Ainsi, Drejza *et al.* (2011) ont trouvé que, malgré des lois mises en place depuis 1979 pour contrer le développement en rives de cours d'eau, le nombre de constructions sur les rives a augmenté de plus de 133 % depuis que les lois sont en place. Cela montre à quel point il est primordial d'étudier les retombées des outils législatifs, réglementaires et normatifs et d'en assurer le suivi pour mieux comprendre leur fonctionnement. Ces outils sont en effet plus efficaces lorsqu'ils sont accompagnés d'efforts de sensibilisation et d'une meilleure compréhension des comportements de la population face aux risques

L'existence de cadres légaux et normatifs en appui à l'adaptation n'est pas suffisante pour assurer leur utilisation (Mimura *et al.*, 2014). Il importe de se pencher aussi sur les facteurs facilitant l'adaptation et les barrières à leur utilisation (Burch *et al.*, 2010). Une étude menée dans plusieurs municipalités de la Colombie-Britannique sur

la mise en œuvre des plans municipaux d'adaptation note que les barrières sont mal comprises et que traduire les plans en actions demeure un défi et ce, malgré les capacités socioéconomiques à s'adapter de la population (Burch *et al.*, 2010). En effet, l'existence de capacités humaines et techniques n'est pas une condition suffisante pour la mise en œuvre des outils législatifs et normatifs. Peu de recherches se sont penchées sur les effets de facteurs tels que le «leadership», la culture organisationnelle, le besoin d'information pertinente sur le plan local, le contexte intergouvernemental, qui peut grandement affecter la manière dont la capacité d'adaptation est mobilisée (Burch *et al.*, 2010), ou encore le contexte politique auquel la plupart des organisations font face (Mimura *et al.*, 2014). Au Québec, Le Goff *et al.* (2012) suggèrent d'évaluer la marge de manœuvre accordée par les cadres légaux et réglementaires pour intégrer les enjeux reliés aux changements climatiques dans le secteur forestier, ainsi que la flexibilité des politiques et des plans d'aménagement pour y intégrer la question des changements climatiques. Une telle suggestion serait aussi pertinente pour d'autres secteurs d'activités.

3.3.2.3 Outils économiques et financiers

Les outils économiques et financiers identifiés au Québec comprennent, entre autres, les assurances, les taxes et les subventions ainsi que l'ajustement ou l'augmentation des prix des ressources.

L'assurance comme moyen de distribution des risques est un des leviers les plus étudiés dans la littérature sur l'adaptation. Au Québec, le secteur agricole (Bryant *et al.*, 2007) et les entreprises touristiques reconnaissent le rôle de l'assurance pour les protéger (Insight Investment *et al.*, 2008 dans Bleau *et al.*, 2012), mais l'effet des assurances sur les comportements des assurés, comme incitatif à réduire leurs risques, n'est pas clairement établi. Cet effet pourrait même être faible dans la mesure où les assurés ont tendance à augmenter leur exposition aux risques une fois qu'ils sont assurés (Kunreuther *et al.*, 2009; Kunreuther et Roth, 1998).

D'autres recherches pointent vers des incitatifs financiers, comme le prélèvement de taxes sur les surfaces imperméables ou pour encourager l'implantation de pratiques de gestion optimales à la source végétalisées (PGOSV) sur des terrains privés (Dagenais *et al.*, 2014), ou encore la réduction des subventions pour des activités qui réduisent les services écologiques (Chapin III *et al.*, 2006).

De plus, plusieurs auteurs suggèrent que les compteurs d'eau associés à une tarification appropriée (Côté *et al.*, 2013; Parent *et al.*, 2012) pourraient s'appliquer aux régions du Québec dans le secteur de l'approvisionnement aux niveaux municipal, communautaire et industriel (Parent *et al.*, 2012). La *Stratégie québécoise d'économie d'eau potable* propose d'ailleurs l'installation généralisée de compteurs d'eau dans les industries, commerces et institutions (ICI) accompagnée d'une tarification appropriée pour diminuer le gaspillage d'eau (Côté *et al.*, 2013). Pour l'agriculture, un ajustement de la tarification de l'eau est proposé par le GIEC pour s'adapter à l'augmentation de la demande en eau, jumelée à une réduction anticipée de sa disponibilité (Chambwera *et al.*, 2014). À cet égard, plusieurs pays ont mis en place des structures variées, qui ne sont pas sans défis (p. ex. : absence de compteurs d'eau, tarif basé sur des frais annuels plutôt que sur l'utilisation réelle), pour établir des tarifs pour la consommation de l'eau à des fins domestiques et agricoles (Chambwera *et al.*, 2014).

Finalement, la diversification économique est considérée comme un moyen de réduire l'exposition aux risques, y compris les risques climatiques. Elle est préconisée notamment pour réduire la vulnérabilité des communautés arctiques (Chapin III *et al.*, 2006), ainsi que des secteurs touristique (section 2.1.5) et agricole (section 2.1.2). À cet égard, l'agroforesterie peut être une approche intéressante puisqu'elle permet aux agriculteurs de s'adapter aux changements climatiques tout en diversifiant leurs productions et leurs sources de revenus (Olivier, 2013). Par ailleurs, plusieurs entreprises touristiques font de la diversification des activités pour offrir des options d'activités pour les quatre saisons et pour les périodes de mauvais temps (Insight Investment *et al.*, 2008, dans Bleau *et al.*, 2012).

Par conséquent, même si les leviers institutionnels sont en place, leur efficacité et leurs retombées seront bien plus grandes, tout comme leur complémentarité, s'ils sont activés de manière coordonnée, avec tous les acteurs concernés, et intégrés à tous les niveaux (encadré 3-2).

3.3.3 Le savoir et l'information

En plus d'une bonne coordination entre les acteurs, il faut s'assurer que le savoir et l'information s'échangent bien entre eux. Du point de vue de la communauté scientifique, il s'agit d'un enjeu important car chacun de ces acteurs a des besoins d'information spécifiques. Selon le contexte d'utilisation et le public-cible, cette information peut prendre différentes formes : information spécialisée pour soutenir la prise de décision en adaptation; connaissances hybrides combinant les savoirs scientifique et traditionnel; éducation et sensibilisation pour changer les comportements. Ces diverses formes d'échanges du savoir et de l'information sont détaillées dans les sections suivantes.

3.3.3.1 Outils d'information spécialisés en appui à l'adaptation

Au Québec, plusieurs outils ont été développés récemment pour cibler des besoins spécifiques dans différents domaines d'expertise. On peut citer par exemple l'*Atlas hydro-climatique du Québec méridional* (CEHQ, 2013), l'*Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise* (Logan *et al.*, 2011), l'*Atlas agro-climatique du Québec* (<http://www.agrometeo.org>), la cartographie en ligne pour les îlots de chaleur (Gouvernement du Québec, 2013a) et les fiches techniques pour les ingénieurs (Ouranos, 2012). Ces outils peuvent aider à identifier les vulnérabilités (p. ex. des infrastructures) ou à élaborer des stratégies d'adaptation aux conditions climatiques projetées.

L'information technique présentée sous forme cartographique est très prisée pour appuyer la planification et la prise de décisions en adaptation. Par exemple, dans les villages nordiques du Nunavik, des cartes ont été développées pour caractériser les zones où le pergélisol a la capacité de soutenir des bâtiments et des infrastructures et les zones à risque pour les constructions (Allard *et al.*, 2013; Allard et Lemay, 2013; Fortier *et al.*, 2011; De Grandpré, *et al.*, 2010; L'Hérault *et al.*, 2013). La production de cartes de risques climatiques actuels et futurs alimente aussi les décisions d'adaptation à New York. Par le biais du partenariat avec l'Agence fédérale de gestion des urgences (FEMA), les cartes pour établir les taux des assurances associés aux inondations sont en train d'être mises à jour en utilisant des données topographiques récentes, ce qui permet à la ville de planifier la gestion des impacts des changements climatiques d'une façon plus efficace (City of New York, 2012; Bierbaum *et al.*, 2012).

Sujet d'une grande complexité, l'accessibilité des informations scientifiques sur les changements climatiques demeure difficile pour les décideurs qui ne sont pas des scientifiques ni des climatologues. Afin de relever ce défi, Ouranos a publié en 2014 un *Guide sur les scénarios climatiques* (Charron, 2014) pour aider les décideurs à se familiariser avec différents types d'information climatique.

Internet est un mode de communication puissant et maintenant incontournable. Par exemple, dans le domaine de la santé, la communication des informations sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques passe en grande partie par le portail *Mon climat – ma santé* (<http://www.monclimatmasante.qc.ca/>).

Toutefois, produire davantage d'information et de meilleure qualité ne garantit pas son utilisation. Au Canada et ailleurs, même si un grand nombre d'outils pour appuyer l'adaptation aux changements climatiques ont été développés dans les dernières années (Warren et Lemay, 2014), la façon dont ils sont utilisés par les usagers reste encore à documenter et à évaluer.

Encadré 3-2. Importance d'une coordination institutionnelle entre les acteurs de l'adaptation

Le GIEC recense cinq types de barrières institutionnelles à l'adaptation : i) la coordination entre les niveaux administratifs (national, provincial, municipal); ii) l'absence de mesures incitatives et de programmes nationaux clairs, ce qui peut constituer un fardeau pour les gouvernements locaux, ou des lignes directrices nationales trop lourdes qui peuvent limiter les initiatives locales; iii) la rigidité des institutions et des politiques; iv) la nécessité de reconnaître les dimensions politiques dans la planification et la mise en œuvre; et v) l'amélioration de la coordination entre les parties prenantes formelles gouvernementales et privées (Mimura et al., 2014). La coordination entre les acteurs de l'adaptation est donc au cœur de cette problématique. Il est primordial que ces barrières institutionnelles soient identifiées, débattues et prises en compte au moment d'élaborer les stratégies d'adaptation aux changements climatiques (Simonet 2011b). Au Québec, une étude menée au niveau municipal a démontré que le système institutionnel public en place ne semble pas toujours être prêt à relever les défis posés par l'adaptation (Simonet, 2013). Selon cet auteur, la complexité de ces défis, qui résulte d'une multitude d'interrelations, exige une importante mobilisation en termes de pratiques, d'acteurs et d'implications, et nécessite probablement des dynamiques organisationnelles mieux ancrées avec la réalité du terrain.

Dans le secteur de l'agriculture, une mesure d'adaptation qui viserait à accroître la production des cultures vers le nord et à adopter des variétés à plus haut rendement pour tirer profit de saisons de croissance plus longues et plus chaudes ferait idéalement intervenir : «des chercheurs, pour aider à recenser les zones appropriées aux cultures, les tolérances variétales [...]; les gouvernements pour promouvoir le développement des cultures, diffuser des informations [...] et les processus de conversion de l'utilisation des terres; les entreprises, pour mettre au point, tester et commercialiser des cultures et des variétés nouvelles, fournir les intrants nécessaires [...], et les producteurs, pour faire des choix individuels, tels que les cultures ou les variétés de remplacement, pour modifier l'utilisation des terres et les autres stratégies d'utilisation des ressources et, éventuellement, pour modifier les emplacements des cultures.» (Felmate et Thistlethwaite, 2011).

3.3.3.2 Connaissances hybrides

La combinaison des connaissances scientifiques et des connaissances locales (savoirs autochtones et traditionnels, ainsi que d'autres connaissances acquises par des moyens non scientifiques) est de plus en plus importante dans l'évaluation des impacts, des vulnérabilités et de l'adaptation aux changements climatiques (Adger *et al.*, 2014). En effet, plusieurs études démontrent que l'intégration de connaissances hybrides augmente la capacité d'adaptation et réduit la vulnérabilité des communautés aux changements climatiques (Adger *et al.*, 2014; Allard et Lemay, 2013; Johnston et Edwards, 2013; Jones *et al.*, 2014).

Les savoirs locaux peuvent compléter de diverses façons les connaissances scientifiques. D'abord, les savoirs autochtones et traditionnels apportent des éclaircissements sur les variables climatiques et complètent les données scientifiques avec des précisions et des nuances qui parfois ne sont pas considérées par les sciences du climat (Nakashima *et al.*, 2012). Ainsi, Riseth *et al.* (2010) ont montré que les observations sur la neige et l'état de la glace des communautés Sami en Suède et en Norvège corroborent les registres météorologiques de ces deux variables climatiques. Au Québec, le jumelage des connaissances traditionnelles avec des photos et des images satellitaires a permis d'identifier la diminution du couvert de glace comme un facteur aggravant les problèmes d'érosion côtière au Nunavik (Clerc *et al.*, 2011).

Bien que les savoirs locaux soient davantage transmis sous forme de récits oraux et d'observations ponctuelles, ils peuvent être combinés aux technologies de télédétection et aux scénarios climatiques pour évaluer l'impact des changements climatiques et créer de nouvelles informations pertinentes pour la planification de

l'adaptation (Jones *et al.*, 2014). En Alaska, Hansen *et al.* (2013) ont évalué l'impact des changements climatiques sur la chasse en utilisant les observations sur le climat des chasseurs de la région. Clerc *et al.* (2011) ont validé des données scientifiques sur les impacts des changements climatiques sur les infrastructures côtières dans des villages nordiques en utilisant les observations des conditions de glace et d'événements météorologiques extrêmes des aînés. De façon similaire, les chercheurs du projet *Accès au territoire et à ses ressources* ont utilisé les connaissances sur la récolte d'aliments traditionnels des aînés et des experts locaux de cinq villages du Nunavik pour élaborer des cartes de sentiers hivernaux traditionnels et de sentiers alternatifs, des zones à risque et des refuges (Allard et Lemay, 2013).

Un autre aspect où les connaissances autochtones appuient les connaissances scientifiques est la mise en œuvre des systèmes de surveillance et de prévisions environnementales. Certaines communautés autochtones ont déjà amorcé un processus proactif d'adaptation aux impacts actuels des changements climatiques et possèdent leurs propres stratégies pour faire face à des environnements instables (Nakashima *et al.*, 2012). En intégrant leur savoir au suivi des variables climatiques, nous obtenons de nouveaux renseignements pour une meilleure prise de décision en adaptation (Allard et Lemay, 2013). À l'inverse, les communautés autochtones peuvent également profiter des connaissances scientifiques. Par exemple, les communautés inuites d'Arctic Bay et de Igloodik utilisent déjà les prévisions météorologiques à la télévision et à la radio pour compléter les prévisions traditionnelles (Ford *et al.*, 2007).

Les savoirs locaux, qu'ils proviennent d'experts-professionnels ou de citoyens résidents, sont tout à fait pertinents, surtout quand l'absence de données scientifiques constitue un frein au processus d'adaptation (Joerin *et al.*, 2014). Ainsi, Doyon *et al.* (2011) ont inclus l'avis d'experts des parties prenantes d'une collectivité forestière des Hautes-Laurentides (comprenant une coopérative forestière, une collectivité autochtone, une association de pourvoiries et une association de zones d'exploitation contrôlées) pour déterminer les impacts potentiels ainsi que la capacité d'adaptation, les barrières et les mesures d'adaptation. Dans un autre secteur d'activités, Mehdi *et al.* (2014) ont élaboré des scénarios futurs de changements d'occupation des sols pour le bassin de la baie Missisquoi à partir des réponses à un sondage envoyé aux agriculteurs de la région et d'autres informations collectées auprès des acteurs du bassin versant. Joerin *et al.* (2014) quant à eux ont élaboré des modèles systémiques représentant les liens entre le climat et le milieu urbain qui mettent en évidence les impacts des changements climatiques. Ces modèles ont été validés par la suite dans des ateliers sectoriels d'évaluation des niveaux de risque et des groupes de discussion avec une variété d'acteurs du milieu.

Les exemples précédents confirment la plus-value qu'apporte la combinaison des savoirs locaux et des connaissances scientifiques. L'information hybride qui en résulte a une grande valeur pour l'adaptation, car elle met en évidence des éléments que les scientifiques ne prennent pas forcément en compte. Cela dit, des efforts sont encore nécessaires pour assurer l'intégration des savoirs locaux dans les stratégies et politiques d'adaptation (Adger *et al.*, 2014). Le défi demeure grand pour trouver les moyens d'intégrer ces deux types de connaissances (Jones *et al.*, 2014). Les consultations avec les communautés au tout début de l'élaboration d'un projet de recherche contribuent au développement des informations et des stratégies d'adaptation pertinentes pour ceux qui sont affectés directement par les changements climatiques (Leclerc et Raphoz, 2014).

3.3.3.3 Éducation et sensibilisation

La prise de conscience est une des premières étapes (figure 3-1) pour s'adapter aux changements climatiques (Crowley *et al.*, 2012) et cela passe par la sensibilisation des acteurs concernés par l'adaptation : décideurs, gestionnaires, entrepreneurs, travailleurs et citoyens (Cadieux *et al.*, 2011). Avoir une meilleure compréhension des impacts, des vulnérabilités et des risques climatiques actuels et futurs facilite la prise de décision, le

développement et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation robustes (Joerin *et al.*, 2014; Peace *et al.*, 2013). De plus, sensibiliser davantage les individus, les organisations et les institutions aux enjeux des changements climatiques contribue à augmenter leur capacité d'adaptation (Klein *et al.*, 2014).

La sensibilisation des gestionnaires, décideurs et professionnels des secteurs public et privé est importante, en raison des rôles d'orienteurs et de facilitateurs qu'ils jouent auprès des populations locales. En effet, ils peuvent agir en tant que conseillers, fournisseurs d'information et de lignes directrices, éducateurs et même agents de liaison entre les populations locales, les institutions et même les organismes de recherche (Bryant *et al.*, 2007). Au Québec, les résultats des études de Debailleul *et al.* (2013) et Joerin *et al.* (2014) démontrent que des efforts sont encore nécessaires pour accroître l'éducation et la sensibilisation au sein des secteurs public et privé sur les enjeux des changements climatiques. Debailleul *et al.* (2013) ont rencontré des difficultés à trouver des experts pour analyser et commenter les scénarios des changements climatiques en matière de production agricole, tandis que Joerin *et al.* (2014) ont constaté que la sensibilité des professionnels de l'aménagement et des gens d'affaires aux enjeux des changements climatiques est diversifiée et inégale. Ce dernier groupe, par exemple, ne se sent pas particulièrement interpellé par le sujet. Selon les entrepreneurs rencontrés, la culture entrepreneuriale, qui réagit à des besoins à court terme, constitue un frein important à l'intégration de l'adaptation dans la gestion des entreprises. Pourtant, ils peuvent aussi être les «porteurs de ballons» dans le dossier de l'adaptation (p. ex. pour promouvoir et appuyer des innovations essentielles à l'adaptation) et donc la sensibilisation des gens d'affaires ne devrait pas être négligée. Selon Marshall *et al.* (2013), investir dans la sensibilisation des entreprises du secteur primaire, qui est le plus directement touché par le climat, est recommandé pour le succès des stratégies d'adaptation à grande échelle.

La sensibilisation des populations et des communautés québécoises aux changements climatiques est variée. Dans le secteur de l'agriculture, par exemple, Bryant *et al.* (2007) ont noté que certaines communautés agricoles sont plus conscientisées que d'autres et que cette différence s'explique, en partie, par le réseau de relations sociales qui est plus fort dans certaines communautés que d'autres. Joerin *et al.* (2014) ont aussi observé cette variabilité et ils avancent qu'il y a un certain sentiment d'indépendance vis-à-vis du climat, lié au fait que l'utilisation des technologies (climatisation, fabrication de neige artificielle, etc.) nous libère des contraintes climatiques et que cette perception représente un obstacle à surmonter pour que les acteurs locaux soient plus conscients des risques climatiques. De leur côté, Cadieux *et al.* (2011) soulignent aussi que le premier défi à relever dans le secteur forestier est la sensibilisation des acteurs locaux. C'est aussi le cas pour les communautés côtières puisque Bernatchez *et al.* (2008) mentionnent qu'il est encore nécessaire de les sensibiliser aux risques climatiques et aux avantages et désavantages des mesures d'adaptation existantes pour y faire face.

Les jeunes sont un des groupes démographiques les plus importants à éduquer et à sensibiliser par rapport aux changements climatiques et à l'adaptation. À cet égard, Mameamskum (2013) propose diverses actions pour sensibiliser les jeunes des communautés autochtones, parmi lesquelles on peut mentionner : la mise en place de programmes de mentorat entre des chasseurs expérimentés et des jeunes entre autres; déterminer des occasions pour enregistrer et transmettre le patrimoine oral; entraîner les jeunes à des activités de suivi des écosystèmes et des espèces clés, p. ex. le caribou. Un bel exemple en est le programme de suivi environnemental (axé sur les variables climatiques), impliquant la participation des élèves de niveau secondaire, qui se met en place dans les écoles du Nunavik grâce au projet *Avativut : La science au Nunavik* (CEN, 2015).

Dans la mise en œuvre des activités de sensibilisation, il est important de partager l'expertise des acteurs de tous les secteurs et à toutes les échelles pour assurer la cohérence entre les objectifs d'adaptation de chacun (Bleau *et al.*, 2012). La sensibilisation doit se réaliser également sur la base de sources fiables (gouvernement, institutions de recherche) et de l'expérience des acteurs par rapport aux événements passés (p. ex. saison anormalement chaude, canicule) (TRNEE, 2012).

La participation d'un large éventail de parties prenantes de la population dans les premières étapes de l'élaboration de mesures d'adaptation favorise la sensibilisation et permet aux gestionnaires de saisir rapidement les mesures d'adaptation faisant l'objet d'une plus grande acceptabilité sociale (Joerin *et al.*, 2014). Cela contribue donc à réduire les différentes barrières à l'adaptation (Cloutier *et al.*, 2014). Une autre possibilité est la participation des citoyens dans la mise en œuvre des programmes de suivi environnemental. Ainsi, dans le Nord québécois, on s'attend à ce que les programmes de suivi communautaire contribuent à sensibiliser les résidents aux changements environnementaux tout en collectant des données qui aideront à accroître les connaissances sur les impacts des changements climatiques (Allard et Lemay, 2013).

Enfin, dans le contexte de l'adaptation, l'objectif ultime de la sensibilisation des populations est de modifier les comportements des gens afin de réduire leurs vulnérabilités aux changements climatiques. En outre, les gouvernements peuvent créer des incitatifs en utilisant par exemple, des outils économiques (voir section 3.2.2.3) pour encourager certains comportements considérés bénéfiques à la société et générer des changements planifiés. Les valeurs culturelles, l'éthique, la langue et la signification et la psychologie jouent un rôle déterminant dans le processus d'adaptation et peuvent même influencer la prise de décision (Swim *et al.*, 2011). Chaque individu et chaque organisation a ses propres valeurs, sa propre culture et ses propres perceptions sur les risques climatiques, ce qui fait en sorte qu'ils répondront de manière différente à de nouvelles informations (Jones *et al.*, 2014). Il est donc important de bien comprendre tous ces facteurs qui influencent ultimement la mise en œuvre de l'adaptation.



3.4 Pour une mise en œuvre réussie de l'adaptation

3.4.1 Les obstacles et les limites

Les obstacles à l'adaptation bloquent, retardent ou dévient le processus d'adaptation, affectant négativement son efficacité, ce qui se solde par des coûts d'adaptation plus élevés ou des occasions manquées. Toutefois, ils peuvent être surmontés par le biais d'efforts concertés, la mise en œuvre d'une gestion créative ou encore par des changements dans les façons de penser et d'agir (Moser et Ekstrom, 2010).

En général, les obstacles peuvent être classés dans les catégories suivantes : technologiques, physiques, biologiques, économiques, financières, sociales, culturelles, institutionnelles et de gouvernance (Klein *et al.*, 2014). Le gouvernement canadien, dans son rapport *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation* (2014) énumère cinq principales barrières à l'adaptation : l'information et la communication, les ressources (financement, compétences, technologie), la gouvernance et les normes, le leadership, et la psychologie et les valeurs (Eyzaguirre et Warren, 2014). Concernant ces derniers aspects, les facteurs cognitifs ont une influence importante sur les processus de décision lors de l'élaboration et de la mise œuvre d'actions d'adaptation. Parmi ces facteurs, l'interprétation même du terme « adaptation » peut poser problème et sa compréhension varie notamment selon l'âge, le secteur professionnel ou encore la collectivité d'origine (Simonet, 2011a). En effet, plusieurs auteurs montrent que la signification du terme reste « fuyante » et varie selon les chercheurs, laissant une large marge d'interprétation (Mustelin *et al.*, 2013). Au niveau local, les acteurs territoriaux et les décideurs publics se heurtent également à l'imprécision du terme (Simonet, 2011b).

Au Québec, quelques études nous montrent que les barrières généralisables à l'adaptation dans la province seraient liées à l'accès aux informations pertinentes et à leur communication (Debailleul *et al.*, 2013; Porter *et al.*, 2014), à la carence des compétences (Joerin *et al.*, 2014), à la présence de difficultés dans la gouvernance (Le Goff *et al.*, 2012) et à la perception des gens d'avoir une capacité d'adaptation élevée. Des barrières propres aux différents secteurs existent aussi. Par exemple, en agriculture, des producteurs agricoles proches de la retraite sont moins enclins à investir dans de nouvelles technologies ou de nouvelles approches, sauf si leur relève est assurée (voir section 2.1.2).

Les limites à l'adaptation sont des barrières absolues, c'est-à-dire, des seuils au-delà desquels l'état d'un système ne peut pas être soutenu, ce qui mène à une perte irréversible ou à un changement radical pour s'adapter aux nouvelles conditions. Klein *et al.* (2014) note que « ces limites apparaissent lorsque les mesures d'adaptation requises pour éviter des risques intolérables au vu des objectifs des intervenants ou des besoins d'un système ne sont pas envisageables ou ne sont pas disponibles dans l'immédiat ». Dans le cas des récifs coralliens, par exemple, il suffit d'une augmentation de 2-3°C au-dessus de la température moyenne estivale maximale annuelle pour déclencher le blanchiment corallien (Morgan, 2011). Ces températures sont donc des limites au-dessus desquelles les récifs coralliens ne pourront pas s'adapter aux changements climatiques (IPCC, 2013). C'est dans ce genre de contexte très précis que l'adaptation transformationnelle est particulièrement utile, pour faire face à ces limites à l'adaptation (Moser et Ekstrom, 2010).

3.4.2 L'adaptation transformationnelle

L'adaptation transformationnelle implique des changements radicaux dans notre façon d'agir (p. ex. : changer l'utilisation des sols; déménager une population pour la protéger des risques associés à l'érosion côtière) et de penser (p. ex. : changer de paradigmes) (Eyzaguirre et Warren, 2014), souvent pour faire face aux limites de nos systèmes actuels. L'adaptation transformationnelle est importante parce qu'elle offre des options et des

stratégies d'adaptation là où les mesures d'adaptation incrémentales atteignent justement leurs limites (Klein *et al.*, 2014). Cela dit, elle n'est pas sans risques ou sans coûts, ce qui peut nuire à sa mise en œuvre (Rickards et Howden, 2012). Par exemple en zones côtières, les investissements nécessaires pour déménager une population et la résistance face à cette décision pourraient être considérables. Dans un autre domaine, les organismes génétiquement modifiés (OGM) sont souvent proposés comme mesure technologique pour assurer la production agricole dans un contexte de changements climatiques. Ces transformations peuvent provoquer des objections ou des réticences sociétales, liées entre autre aux enjeux de santé, aux effets pour la biodiversité et aussi pour une question d'éthique.

Kates *et al.* (2012) et le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (SCBD, 2009) identifient trois types de mesures d'adaptation transformationnelle : celles qui s'adoptent à des échelles supérieures, celles qui sont nouvelles (à une région, à une ressource ou à un système en particulier) et celles qui transforment des endroits et qui changent les emplacements. Dans tous les cas, le concept d'adaptation transformationnelle est nouveau et il est encore en évolution. Plusieurs auteurs dont Eyzaguirre et Warren (2014), Jones *et al.* (2014) et Park *et al.* (2012) ont identifié les différentes voies que les acteurs de l'adaptation peuvent suivre entre l'adaptation incrémentale et l'adaptation transformationnelle, mais la distinction entre ces deux types d'adaptation est encore subjective et elle dépend du contexte (Klein *et al.*, 2014).

Au Québec, les études sur l'adaptation aux changements climatiques touchent rarement à des options transformationnelles. Par contre, quelques exemples d'adaptation qui pourront engendrer des changements dans la façon d'agir et de penser ont été identifiés pour quelques secteurs. Ainsi, dans le secteur du tourisme, l'arrêt d'une activité touristique est considéré comme une option d'adaptation dans certains cas (Insight Investment *et al.*, 2008 dans Bleau *et al.*, 2012); le long des côtes, le déménagement des populations et des bâtiments situés dans les zones à risque est considérée aussi comme une option d'adaptation viable (Tecsult Inc., 2008); dans le secteur des pêches et de l'aquaculture, l'abandon de la pêche de certaines espèces ou la relocalisation des activités aquacoles impliquent des changements d'activités économiques pour les communautés qui en dépendent (Brzeski, 2011).

3.4.3 La maladaptation

Selon Magnan (2013), « la maladaptation désigne un processus d'adaptation qui résulte directement en un accroissement de la vulnérabilité à la variabilité et aux changements climatiques et/ou en une altération des capacités et des opportunités actuelles et futures d'adaptation ». La maladaptation fait référence aussi « aux actions qui pourraient conduire à un accroissement des risques et des vulnérabilités aux changements climatiques ou à la réduction du bien-être, dans le présent et/ou dans le futur » (Noble *et al.*, 2014). La maladaptation existe potentiellement dans tous les secteurs et à toutes les échelles, nationale, régionale, municipale, individuelle, privée, etc. (Barnett et O'Neill, 2010). On peut en citer quelques exemples : la gestion de l'eau à la source sur des terrains en pente qui provoque de l'érosion sur les terrains voisins (C. Larrivée, comm. pers.); la diversification des activités dans le secteur du tourisme qui mise sur des activités générant plus d'émissions de GES (Bleau *et al.*, 2012); le traitement chimique contre certaines espèces envahissantes qui provoque une dégradation de la qualité de l'environnement ou un risque pour la santé humaine (Tougas-Tellier *et al.*, 2013); l'utilisation de pesticides, dommageables pour l'environnement, pour combattre les nouveaux ravageurs des cultures attendus dans un contexte de réchauffement climatique (Mimee *et al.*, 2014).

Selon le dernier rapport du GIEC, plusieurs causes sont à l'origine de la maladaptation (Noble *et al.*, 2014). Une première cause est l'adoption d'actions qui s'avèrent positives pour un groupe ou un secteur à un moment déterminé, mais qui deviennent négatives, soit pour ce groupe ou ce secteur, soit pour d'autres groupes ou secteurs, au même moment ou dans le futur (Noble *et al.*, 2014). La gestion des barrages pour s'adapter aux fluctuations des débits dans une rivière, par exemple, peut avoir comme conséquence l'accélération du courant

du cours d'eau et l'accentuation de l'érosion des berges situées sur des terrains agricoles en aval (Adger *et al.*, 2005; Charles *et al.*, 2013). Dans ce cas-ci, un transfert de la vulnérabilité se produit également. En santé, l'utilisation de la climatisation pour augmenter le confort des personnes pendant les vagues de chaleur, et prévenir les décès et les maladies, augmentera aussi la température extérieure (De Munck *et al.*, 2013; Salamanca et Martilli, 2011) et, à large échelle, pourrait engendrer des pannes électriques en été, par surcharge du réseau (voir section 2.2.2.1).

Une deuxième cause est liée à l'élaboration des stratégies d'adaptation en utilisant des informations imprécises ou inexacts ou en omettant des interactions et des rétroactions entre divers systèmes, secteurs ou acteurs. Un exemple en est la construction d'ouvrages rigides de défense du littoral sans tenir en compte des impacts socioéconomiques de leur mise en œuvre ni de la dynamique naturelle des écosystèmes côtiers. Au Québec, Bernatchez et Fraser (2012) ont démontré que la construction de structures de défense côtières à Percé et à Sept-Îles a favorisé l'érosion des plages, ce qui a conduit à la diminution de la résilience de l'écosystème côtier face aux tempêtes et aux inondations.

La maladaptation peut également survenir quand une importance excessive est accordée à une mesure d'adaptation, celle-ci étant alors survalorisée (Noble *et al.*, 2014). Ainsi, l'utilisation des GPS et des motoneiges semble être une option favorable pour l'adaptation des communautés Inuites aux conditions climatiques de plus en plus changeantes. Mais, en réalité, l'usage de ces appareils encourage des comportements à risque, ce qui augmente leur vulnérabilité aux changements climatiques (Ford *et al.*, 2007).

Barnett et O'Neill (2010) identifient cinq grands types de maladaptation aux changements climatiques. Le premier est lié à l'augmentation des émissions de GES. Les ouvrages de protection contre l'élévation du niveau de la mer en sont un bon exemple. En effet, leur construction et leur entretien impliquent l'utilisation de grandes quantités d'énergie et de béton, ce qui contribue à accroître les émissions de GES (Reid et Swiderska, 2008). Il faut noter ici que l'inverse peut aussi se produire; des mesures pour réduire les GES pourraient augmenter la vulnérabilité des populations, comme par exemple la construction de maisons LEED dans une zone inondable. Pour le moment, ces synergies entre adaptation et réduction des GES ne ressortent pas vraiment dans la littérature qui concerne le contexte québécois.

Le deuxième type de maladaptation concerne des mesures d'adaptation avec des coûts d'opportunité élevés. Ce sont des mesures d'adaptation impliquant un coût économique, social ou environnemental élevé par rapport aux autres options. Cela pourrait même empêcher d'autres mesures d'adaptation d'être financées et mises en place. L'absence d'évaluation des avantages et des coûts d'une mesure d'adaptation peut conduire à de la maladaptation en favorisant par exemple des options d'adaptation peu efficaces.

Le troisième type de maladaptation correspond au renforcement des iniquités. Cela se produit quand une stratégie d'adaptation bénéficie à un groupe ou à un secteur en augmentant la vulnérabilité de ceux qui sont le plus à risque (groupes minoritaires, ménages à faibles revenus, etc.) (Barnett et O'Neill, 2010). Par exemple, dans leur analyse sur les trames vertes urbaines comme mesure d'adaptation aux changements climatiques, Bertrand et Simonet (2012) mentionnent que leur implantation dans certains quartiers « peut potentiellement devenir un facteur d'aggravation des inégalités sociales ». Pour éviter cela, des projets de verdissement soutenus par l'INSPQ en 2010 et 2011 exigeaient spécifiquement de les localiser dans une zone à indice élevé de défavorisation sociale et matérielle (INSPQ, 2010).

Le quatrième type de maladaptation se présente quand les actions pour faire face aux changements climatiques diminuent la motivation à s'adapter, en favorisant une dépendance à un groupe ou à une institution, ou en sanctionnant les efforts d'adaptation (Barnett et O'Neill, 2010). Les assurances sont un bon exemple pour

illustrer ce point; il s'agit d'un mécanisme servant à partager les risques dans la société (Yohe et Tol, 2002). Quand les dommages ne sont pas couverts par les compagnies d'assurance, l'aide publique compense pour les pertes, comme dans le cas des inondations riveraines. Toutefois, l'assurabilité de certains risques peut pousser, involontairement, les individus et les organisations à s'exposer à des risques qu'ils ne prendraient pas s'ils n'étaient pas assurés (Botzen et Van Den Bergh, 2008). Le rôle des assurances pour réduire les risques face aux changements climatiques au Québec est encore peu étudié dans le contexte de l'adaptation.

Finalement, le cinquième type de maladaptation fait référence aux mesures impliquant le développement de grandes infrastructures qui requièrent d'importants investissements à long terme. Avec l'évolution des conditions environnementales, ces mesures d'adaptation peuvent devenir moins efficaces ou moins pertinentes avec le temps. Dans un tel cas, le choix d'investir massivement et à long terme aujourd'hui peut réduire les possibilités de recourt à d'autres options d'adaptation plus efficaces dans le futur, limitant ainsi les capacités d'adaptation futures (Barnett et O'Neill, 2010).

Un des défis dans la planification de l'adaptation est l'inertie de leur mise en œuvre et le fait qu'elles requièrent des échelles de temps différentes selon les mesures ou les actions envisagées. Certaines stratégies d'adaptation pourront prendre quelques décennies à être implantées, en considérant les investissements requis, les changements dans les politiques et le besoin de connaissances. Dans ces circonstances, le processus d'adaptation doit commencer dès maintenant pour les secteurs et les régions qui seront affectés que plus tard, par exemple vers le milieu du siècle (OECD/UNEP, 2011). D'autres stratégies s'avèrent moins coûteuses et moins longues à développer et peuvent déjà s'intégrées dans les activités des entreprises et institutions. C'est le cas par exemple, de l'intégration de mesures d'adaptation dans les stratégies de marketing, de communication ou d'alliances opérationnelles dans le secteur touristique (section 2.1.5) (Bleau *et al.*, 2012).

Pour les infrastructures, l'adaptation aux changements climatiques exige une bonne compréhension des effets à long terme, tels que l'élévation du niveau de la mer et le développement de la résilience face aux événements climatiques extrêmes, comme des crues soudaines (Engineering the Future, 2011). Mais l'horizon de planification des activités de certaines entreprises peut être trop court pour prendre en compte les effets à long terme des changements climatiques, et elles peuvent, de ce fait, être moins enclines à prendre des mesures adaptatives (Agrawala *et al.*, 2011).

Il est possible de prévenir la maladaptation par l'adoption de diverses actions. D'abord, lorsque des stratégies d'adaptation sont sélectionnées, il est important de prendre en considération l'ensemble des solutions, des scénarios climatiques possibles, ainsi que les coûts d'opportunités et les implications sociales (Charles *et al.*, 2013; Macintosh, 2013). Ensuite, il est important d'examiner les liens entre les divers secteurs pour éviter le transfert de vulnérabilité (Charles *et al.*, 2013). Les objectifs de gestion et les valeurs varient d'une institution à l'autre, d'un groupe à l'autre et d'un secteur à l'autre. Une option d'adaptation perçue comme positive par un groupe peut donc s'avérer être de la maladaptation pour un autre. Il est par conséquent nécessaire de trouver des compromis, ce qui peut représenter un défi pour les gestionnaires (Klein *et al.*, 2014). Finalement, l'adoption d'approches plus souples et itératives pour la mise en œuvre des stratégies d'adaptation favorise des ajustements et une réponse plus appropriée aux besoins et aux objectifs des parties prenantes. En outre, cela permet aussi l'intégration de nouvelles informations ou de nouveaux scénarios (Macintosh, 2013).

3.4.4 La gestion adaptative

L'adaptation aux changements climatiques implique la prise de décisions dans un contexte d'incertitude, et la gestion adaptative est une approche qui permet de répondre à ce défi. Elle vise à évaluer et à faire le suivi de la mise en œuvre des stratégies d'adaptation et à utiliser les résultats de ces activités pour modifier et ajuster les stratégies (Wong *et al.*, 2014). Donc, elle permet une prise de décision éclairée à la lumière des leçons tirées

et des informations disponibles (Jones *et al.*, 2014). Les stratégies d'adaptation formulées dans l'optique d'une gestion adaptative fonctionnent bien dans un large éventail d'avenirs plausibles et à long terme (Jones *et al.*, 2014). Au Québec, des approches de gestion adaptative pour faire face aux changements climatiques sont préconisées dans la gestion des forêts publiques (Auzel *et al.*, 2012; Le Goff *et al.*, 2012), dans la gestion intégrée des ressources en eau (Biron *et al.*, 2013; Charles *et al.*, 2013; Milot *et al.*, 2013), ainsi que pour la gestion des aires protégées (Bélanger *et al.*, 2013) par exemple.

La possibilité de créer de la flexibilité se trouve aussi sur le plan des options physiques. Hallegatte (2009) suggère qu'en raison des incertitudes sur les changements et les impacts futurs, les infrastructures de longue vie devraient plutôt être développées pour être robustes à plusieurs scénarios climatiques en choisissant des options dites sans regret³, ou encore favoriser des options flexibles et réversibles en développant des marges de sécurité, notamment la réduction des horizons de temps pour la prise de décision.

La résilience au changement en général est également encouragée dans plusieurs secteurs économiques; par exemple, dans le secteur forestier, en augmentant la redondance des mesures d'adaptation (Millar *et al.*, 2007). Dans le secteur des pêches et de l'aquaculture, en mettant en place des suivis périodiques du recrutement des poissons pour pouvoir ajuster à l'avance les modalités d'exploitation (Nilo *et al.*, 1997).

Sur le plan des options institutionnelles, les politiques et les plans d'aménagements doivent également être flexibles afin de permettre le développement et l'implantation de réponses adaptées aux besoins régionaux (Joyce *et al.*, 2009; Odgen et Innes, 2007; Stephens *et al.*, 2010). Cette flexibilité permet également de mieux prendre en compte les incertitudes par un ajustement des stratégies au fur et à mesure que les effets des changements climatiques sont mieux connus (Cadieux *et al.*, 2011; Joyce *et al.*, 2009; Lawler *et al.*, 2008).

Finalement, le concept de gestion adaptative devient encore plus pertinent dans un contexte d'incertitudes associées aux impacts des changements climatiques. La gestion adaptative dans la planification et la mise en œuvre de l'adaptation implique de répéter les étapes de sensibilisation, de préparation, de mise en œuvre et d'apprentissage pour intégrer les leçons apprises sur une base continue et itérative (figure 3-1).

3.4.5 La mesure du progrès et l'apprentissage continu

La mesure du progrès des stratégies d'adaptation se fait généralement pour trois objectifs différents, mais indissociables : justifier des ressources (reddition de compte), dans une perspective d'apprentissage continu en matière d'adaptation (Leclerc, 2012) et pour vérifier la performance et la pertinence des mesures mises en place.

Les cadres de suivi et d'évaluation sont parmi les outils les plus fréquemment utilisés pour examiner le progrès de l'adaptation et servent à déterminer, par l'entremise d'indicateurs, les changements factuels et comportementaux pour arriver aux cibles ultimes, puis à surveiller les progrès réalisés dans la mise en œuvre de l'adaptation (Crowley *et al.*, 2012). Les indicateurs sont un moyen de simplifier, quantifier, normaliser et communiquer des informations complexes (CCNUCC, 2010 dans Leclerc, 2012). Ils peuvent porter sur l'efficacité et l'efficience (Crowley *et al.*, 2012), la faisabilité, l'équité, la durabilité et l'acceptabilité des mesures d'adaptation (Leclerc, 2012; Morin, 2008). Ils sont comparés à une base de référence au cours d'un projet ou dans le cadre d'un programme.

³ Une mesure d'adaptation sans regret est une mesure qui permet de réduire la vulnérabilité aux changements climatiques et qui offre des avantages quelles que soient l'évolution du climat (MEDDE, 2013).

L'implication des personnes et des organisations qui sont affectées par les changements climatiques et qui sont responsables de mettre en place les activités est primordiale au succès, non seulement de l'adaptation comme telle mais aussi de la mesure du progrès. Consulter les personnes affectées par des problématiques d'adaptation dès le tout début du développement des systèmes de suivi et d'évaluation est en soi un moyen d'identifier les indicateurs de progrès (Leclerc et Raphoz, 2014). Deux études de cas, une dans le secteur de la santé menée dans le sud du Québec et l'autre sur l'hydroélectricité dans le Nord, ont illustré l'importance des consultations publiques dans le choix des indicateurs, dans la validation des données collectées ainsi que dans la définition spécifique des résultats recherchés et des changements souhaités par les personnes affectées (Leclerc et Raphoz, 2014). Cette consultation assure la mise en œuvre de mesures d'adaptation (et d'indicateurs pour les suivre) correspondant aux valeurs sociétales et reflétant l'acceptabilité sociale, qui est souvent un prérequis pour l'adoption et la pérennité des mesures d'adaptation. Sans cette adhésion, les mesures d'adaptation seront difficilement mises en place et risquent de ne pas avoir les effets positifs escomptés.

Cette représentation du contexte social dans les mesures d'adaptation peut aussi s'observer dans le développement de la base de référence utilisée pour évaluer le progrès dans le temps. La collecte des données et les études de vulnérabilité réalisées pour définir la base de référence contribuent à raffiner les objectifs ainsi que les stratégies d'adaptation et se réalisent souvent quelques années avant le début d'un projet et s'étendent sur plusieurs années (Leclerc et Raphoz, 2014).

La question de la durée du suivi et de la collecte de données est un défi important pour l'adaptation, parce que les impacts des changements climatiques se matérialisent sur une longue période de temps. De plus, le temps nécessaire pour faire le suivi dépend du système et de la région à l'étude. Un programme de suivi mis en place comme mesure d'adaptation devrait s'orienter vers un programme qui permet d'accroître nos connaissances sur les impacts des changements climatiques. C'est le cas notamment pour assurer un suivi efficace de la biodiversité et de son évolution avec les changements climatiques au Québec (Peres-Neto *et al.*, 2013). Pour ce faire, un programme de suivi devra bénéficier d'un financement soutenu au fil des ans.

Un autre aspect à considérer est la quantité et la qualité des données. Au Québec, il existe une importante quantité de données, mais celles-ci sont réparties de manière très inégale sur le territoire et dans les divers secteurs d'activité. En outre, les données ne sont pas toujours accessibles et elles ne sont pas toujours traitées adéquatement, ce qui influence aussi leur qualité. Dans le domaine de la conservation de la biodiversité, par exemple, Peres-Neto *et al.* (2013) mentionnent que la quantité limitée de données disponibles rend difficile l'évaluation de l'état de la biodiversité et, a fortiori, des transformations qu'elle subira à cause des changements climatiques. Une façon d'assurer la pérennité et la durabilité des systèmes de suivi et de collecte de données est de les rattacher à des institutions plutôt qu'à des projets qui ne durent que quelques années (Anderson, 2011; Hinkel, 2011; Leclerc, 2012). À cet égard, des référentiels d'évaluation en adaptation peuvent être utiles pour instaurer une pratique de suivi et d'évaluation dans les institutions publiques. Crowley *et al.* (2012) suggèrent une série de cinq indicateurs génériques représentant le référentiel pour l'*Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale* (ICAR) au Québec (tableau 3-4).

Par conséquent, les cadres de suivi et d'évaluation peuvent aussi servir d'outils d'apprentissage continu sur les facteurs déterminants de la vulnérabilité et de l'efficacité de l'adaptation, non seulement à long terme, mais aussi pour appliquer des pratiques de gestion adaptative dès la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation (Leclerc, 2012; Leclerc et Raphoz, 2014; Peres-Neto *et al.*, 2013). La formulation des objectifs d'adaptation et le choix des indicateurs pour suivre les progrès vers l'atteinte de ces objectifs sont aussi critiques pour une gestion adaptative de l'adaptation (voir section 3.4.4).

Le suivi se fait surtout au cours de la mise en œuvre d'un projet et sert à alimenter les outils de gestion de projet. L'évaluation, quant à elle, demande d'avoir plus de recul par rapport au projet d'adaptation de manière à pouvoir examiner la façon dont il a été réalisé. De par leurs natures analytique et structurée, les méthodologies utilisées dans le domaine de l'évaluation peuvent servir d'outils de design des stratégies d'adaptation et contribuer aussi au développement des méthodes d'analyses, p. ex. évaluation des impacts, vulnérabilités aux changements climatiques (Leclerc et Raphoz, 2014).

3.4.6 Les possibilités créées par les changements climatiques

S'adapter implique aussi de tirer profit des occasions liées aux impacts des changements climatiques. Comme mentionné par la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE, 2012), « il ne s'agit pas seulement de faire face aux changements climatiques, mais d'en bénéficier ». Quand nous tirons avantage de ces occasions, nous renforçons notre capacité d'adaptation (Adger *et al.*, 2005). Dans la partie 2 de ce document, certaines de ces occasions ont été identifiées pour le Québec. À titre d'exemples, mentionnons le secteur agricole, qui pourrait bénéficier d'un accroissement des rendements de quelques cultures, telles que le maïs, le soja et les plantes fourragères, grâce à l'allongement de la saison de croissance et à l'augmentation des unités thermiques (Debailleul *et al.*, 2013; Desjarlais *et al.*, 2010). Dans le secteur de l'aménagement forestier, l'augmentation anticipée de l'activité des feux pourrait améliorer la productivité des forêts là où la croissance des arbres est actuellement limitée par l'épaisseur de la matière organique (Le Goff *et al.*, 2012). Pour la biodiversité, une augmentation de la richesse spécifique (nombre d'espèces) est attendue en raison du déplacement vers le nord des aires de répartition de nombreuses espèces de flore et de faune (Berteaux *et al.*, 2014).

Toutefois, des stratégies proactives sont nécessaires pour exploiter les avantages potentiels qui peuvent résulter des changements climatiques. Un exemple tiré du secteur de l'énergie au Québec illustre cette situation. Arsenault *et al.* (2013) ont évalué la viabilité économique et opérationnelle d'ajouter des turbines à une centrale hydroélectrique sur la rivière Péribonka pour tirer profit de l'augmentation du potentiel

Tableau 3-4 Éléments pour un référentiel d'évaluation du programme ICAR-Québec

Indicateurs proposés		Exemple d'indicateurs pour le secteur forestier
1	Niveau de connaissances des acteurs de l'adaptation sur les risques, les vulnérabilités et leurs impacts potentiels sur le système	Niveau de connaissances des acteurs quant à la vulnérabilité de l'industrie et des gestionnaires de la forêt
2	Niveau de connaissances des acteurs de l'adaptation sur : 1) les coûts infligés au système économique, social et environnemental si aucune mesure d'adaptation aux changements climatiques n'est implantée, ainsi que leur distribution dans les temps et leur probabilité d'occurrence; 2) les coûts et bénéfices de la mesure d'adaptation projetés ou encore ses bénéfices nets (frais de planification, de préparation, de mise en œuvre et de suivi des mesures); et 3) les coûts résiduels des changements climatiques et du partage des coûts	Niveau de connaissances des acteurs quant à la manière de réaliser un suivi hydro-climatique
3	Décision prise quant à la mesure d'adaptation à adopter	Décision prise quand au reboisement
4	Niveau d'utilisation des connaissances et outils produits	Réception des expériences et connaissances par leurs destinataires potentiels
5	Changement observé quant à l'état de la vulnérabilité du système en raison de la mesure d'adaptation adoptée, et par rapport au changement global de la vulnérabilité dû à d'autres facteurs.	Nombre de propriétés inondées

Source: Crowley *et al.* (2012)

hydroélectrique due aux changements climatiques. Ils ont finalement conclu qu'au lieu de mettre en œuvre cette mesure d'adaptation, un meilleur choix serait simplement d'ajuster les règles d'opération et de gestion de la centrale existante. Ce type de recherche est utile pour optimiser les opérations et les décisions d'investissement afin de tirer profit des effets des changements climatiques.

Des occasions existent aussi pour le secteur privé (Nitkin *et al.*, 2009; Peace *et al.*, 2013; UNFCCC, 2014). Selon Peace *et al.* (2013), les entreprises dans divers domaines sont en train de développer de nouveaux produits et services pour répondre aux marchés de plus en plus affectés par les risques climatiques; p. ex. la mise sur le marché de cultivars plus résistants à la sécheresse ou à la salinité, le développement de technologies d'irrigation pour accroître l'efficacité de l'usage de l'eau, la création d'assurances pour des dommages associés aux risques climatiques, la fabrication de matériaux de construction plus résistants aux conditions climatiques, etc. Au Canada par exemple, quelques compagnies développent de l'expertise en matière de techniques de construction pour faire face au réchauffement climatique dans le Nord (TRNEE, 2012).

Les secteurs public et privé sont donc de plus en plus conscients de l'importance de tirer avantage des occasions liées aux changements climatiques (Ohlson *et al.*, 2005; Peace *et al.*, 2013). Toutefois, il reste encore à identifier des moyens pour en profiter pleinement (Bleau *et al.*, 2012) et pour inclure ces occasions dans la planification à long terme, le développement de nouvelles politiques et les décisions d'investissement (Ohlson *et al.*, 2005). Parfois, l'identification des occasions n'est pas toujours évidente. Ainsi, il est possible que les conditions climatiques futures stimulent la croissance des arbres, mais en même temps, cette occasion ne sera palpable que si les caractéristiques des sols, la physiologie et la plasticité des espèces le permettent réellement (Le Goff *et al.*, 2012). En d'autres termes, une opportunité peut s'avérer être une vulnérabilité accrue en bout de ligne (Le Goff *et al.*, 2012). Selon ces auteurs, cette ambivalence va de pair avec la disponibilité des informations sur les impacts des changements climatiques et les perceptions des groupes consultés, p. ex. en termes de niveau de compréhension, de sensibilisation, de préoccupations, de compétences, etc. Dans ce contexte, il est nécessaire de développer des outils aidant à sensibiliser et à mieux comprendre les impacts –autant négatifs que positifs– des changements climatiques.



3.5 Conclusion

La revue de la documentation pertinente au Québec montre un nombre croissant de recherches sur les vulnérabilités, les impacts et l'adaptation aux changements climatiques. Les options d'adaptation d'ingénierie ainsi que les options technologiques sont davantage abordées dans ces études. On constate toutefois un intérêt croissant pour les options d'adaptation basées sur la biodiversité et les services écologiques et pour leurs applications. Cela fait partie des nouvelles pistes de recherche pour l'avenir. En outre, l'adoption des outils législatifs et normatifs ainsi que des incitatifs économiques et financiers a permis de créer plusieurs leviers institutionnels qui fournissent un environnement favorisant l'adaptation. Pour le maintenir, il sera important d'assurer une coordination efficace entre les principaux acteurs de l'adaptation, c'est-à-dire les divers paliers de gouvernements, le secteur privé, la communauté scientifique et les citoyens, incluant les populations les plus vulnérables. De plus, des outils d'information en appui à l'adaptation ont été développés et sont maintenant disponibles pour appuyer les efforts de sensibilisation et de mobilisation de toutes les parties prenantes, étape clé pour enclencher concrètement le processus d'adaptation aux changements climatiques.

Toutes ces études indiquent que le Québec possède une forte capacité d'adaptation et beaucoup d'expertises et de technologies pour pouvoir s'adapter au climat actuel ainsi qu'aux conditions climatiques projetées pour les décennies à venir. En revanche, les défis potentiels en matière d'adaptation à plus long terme demeurent entiers et devront être abordés dans les futures recherches en impacts et adaptation. Des scénarios climatiques ont été développés sur des horizons temporels à long terme (p. ex. pour la fin du siècle) et les stratégies d'adaptation devront s'y appuyer. Ces défis incluent notamment l'analyse des obstacles et des limites à l'adaptation, les options d'adaptation transformationnelles et comment éviter la maladaptation. Il reste aussi à documenter et à comprendre comment les recherches et les outils développés pour appuyer l'adaptation ont été appliqués jusqu'à présent. Cela nécessite la mise en œuvre de cadres de suivi et d'évaluation pour mesurer le progrès de l'adaptation au Québec. Dans ce contexte, une adaptation planifiée et proactive, s'appuyant sur une approche de gestion adaptative, aiderait grandement le Québec à faire face efficacement aux changements climatiques et à leurs conséquences.

RÉFÉRENCES

- Adger, W.N., Pulhin, J.M., Barnett, J., Dabelko, G.D., Hovelsrud, G.K., Levy, M., Oswald Spring, U. et Vogel, C.H. (2014). Human security. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L., Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et M.L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 755–791). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.
- Adger, W.N., Arnell, N.W. et Tompkins, E.L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15(2), 77–86.
- Agrawala, S., Carraro, M., Kingsmill, N., Lanzi, E. et Prudent-Richard, G. (2011). Participation du secteur privé à l'adaptation au changement climatique: approches de la gestion des risques climatiques. Paris: Éditions OCDE. 58 p.
- Allard, M. et Lemay, M. (dir.). (2013). *Le Nunavik et le Nunatsiavut: de la Science aux Politiques Publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation*. Québec : ArcticNet Inc. 315 p.
- Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E. et Sarrazin, D. (2013). Le pergélisol et les changements climatiques au Nunavik et au Nunatsiavut : importance en matière d'infrastructures municipales et de transports. Dans M. Allard and M. Lemay (dir.), *Le Nunavik et les Nunatsiavut: de la Science aux Politiques Publiques: Une étude Intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation* (p. 175–199). Québec : ArcticNet Inc.
- Anderson, S. (2011). Assessing the effectiveness of climate adaptation. *Lessons from adaptation in practice*, 2 p. Repéré à <http://pubs.iied.org/17104IIED>
- Andrade, A., Medina, M.M., Shutze, K. et Ville, J. (2010). Ecosystem-based adaptation - Lessons from the Chingaza Massif in the High Mountain Ecosystem of Colombia. Dans *Building resilience to climate change. Ecosystem-based adaptation and lessons from the field* (p. 20–31).
- Anquez, P. et Herlem, A. (2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes , impacts et solutions*. Montréal, Québec : Chaire de responsabilité sociale et de développement durable-UQAM. 19 p. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ARROND_RPP_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PDF-ILOTS.PDF
- Arsenault, R., Brissette, F., Malo, J.-S., Minville, M. et Leconte, R. (2013). Structural and Non-Structural Climate Change Adaptation Strategies for the Péribonka Water Resource System. *Water Resources Management*, 27(7), 2075–2087. doi:10.1007/s11269-013-0275-6
- ASTHO (2012). *Third national climate assessment feedback report by the Association of State and Territorial Health Officials*, ASTHO. Arlington, VA. 7 p.
- Aubé, M., Drolet, C., Matte, A. et Sottile, M.-F. (2011). *Changements climatiques: Vulnérabilité et adaptation des immeubles*. Québec. 105 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/157_Chang_climatiques_CHQ.pdf

Auzel, P., Gaonac'h, H., Poisson, F., Siron, R., Calmé, S., Belanger, M., Bourassa, M.M., Kestrup, A., Cuerrier, A., Downing, A., Lavallée, C., Pelletier, F., Chambers, J., Gagnon, A.E., Bedard, M.C., Gendreau, Y., Gonzales, A., Mitchell, M., Whiteley, J. et Larocque, A. (2012). Impacts des changements climatiques sur la biodiversité du Québec : Résumé de la revue de littérature. Montréal, Québec. 29 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/231_Revuedelitterature-ResumeWeb.pdf

Bark, R., Colby, B.G. et Dominguez, F. (2010). Snow days? Snowmaking adaptation and the future of low latitude, high elevation skiing in Arizona, USA. *Climatic Change*, 102(3-4), 467–491.

Barnett, J. et O'Neill, S. (2010). Maladaptation. *Global Environmental Change*, 20(2), 211–213.

Bélanger, L., Berteaux, D., Bouthillier, L., Brassard, F., Casajus, N., Cumming, S., David, V., Denoncourt, A., Deshaies, M.-È., Desmarais, M.-È., Domaine, É., Jutras, S., Lamarre, J.F., Marchal, J., McIntire, E., Ricard, M., St-Laurent, M.-H. et Tremblay, J.-P. (2013). Adaptation aux changements climatiques de la conservation de la nature et du système d'aires protégées du Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 83 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/198_RapportBelangeretBrassard2013.pdf

Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. et GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*. 115 (february), 411-428.

Bernatchez, P. et Fraser, C. (2012). Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Québec, Canada. *Journal of Coastal Research*, 285, 1550–1566.

Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et Morissette, A. (2008). Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Rimouski, Québec. 256 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/145_Bernatchezetal2008.pdf

Berteaux, D., Casajus, N. et de Blois, S. (2014). Changements climatiques et biodiversité du Québec : vers un nouveau patrimoine nature. Québec: Presses de l'Université du Québec. 240 p.

Bertrand, F. et Simonet, G. (2012). Les trames vertes urbaines et l'adaptation au changement climatique : perspectives pour l'aménagement du territoire. *Vertigo - La Revue Électronique En Sciences de L'environnement*, (12). Repéré à <http://vertigo.revues.org/11869>

Bierbaum, R., Smith, J. B., Lee, A., Blair, M., Carter, L., Chapin, F. S., Fleming, P., Ruffo, S., Stults, M., McNeeley, S., Wasley, E. et Verduzco, L. (2012). A comprehensive review of climate adaptation in the United States: more than before, but less than needed. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(3), 361–406.

Biron, P. (2013). Espace de liberté des rivières et connectivité. *In Vivo*, 33(22), 6–7.

Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Choné, G., Cloutier, C.-A., Ouellet, M.-A., Demers, S., Olsen, T., Desjarlais, C. et Eyquem, J. (2014). Freedom Space for Rivers: A Sustainable Management Approach to Enhance River Resilience. *Environmental Management*, 1–18.

Biron, P., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Ouellet, M.-A., Choné, G., Cloutier, C.-A. et Needelman, M. (2013). Espace de liberté : un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 125 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/299_RapportBironetal2013.pdf

Bizikova, L., Neale, T. et Burton, I. (2008). *Canadian Communities' Guidebook for Adaptation to Climate Change. Including an approach to generate mitigation co-benefits in the context of sustainable development.* Vancouver, British Columbia : Environment Canada et University of British Columbia. 104 p.

Blangy, S., Germain, K. et Archambault, M. (2011). *Stratégies d'adaptation aux changements climatiques pour l'industrie touristique québécoise - synthèse des cinq ateliers sectoriels et régionaux.* Montréal: Chaire de tourisme Transat ESG UQAM. 76 p. Repéré à https://chairedetourisme.uqam.ca/upload/files/ateliers_rapport_dec2011.pdf

Bleau, S., Germain, K., Archambault, M. et Matte, D. (2012). *Analyse socioéconomique des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques de l'industrie touristique au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos).* Montréal, Québec. 197 p.

BNQ. (2013). *Norme BNQ 2019-190/2013 : Lutte aux îlots de chaleur urbains – Aménagement des aires de stationnement – Guide à l'intention des concepteurs.* Québec. 104 p.

Botzen, W. J. W. et Van Den Bergh, J. C. J. M. (2008). *Insurance Against Climate Change and Flooding in the Netherlands: Present, Future, and Comparison with Other Countries.* *Risk Analysis*, 28(2), 413–426.

Boucher, I. et Fontaine, N. (2010). *La biodiversité et l'urbanisation : Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable.* Québec : Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAPAQ). 178 p.

Bourgeois, G. (2014). *Webinaire: L'érosion des berges et l'aménagement du territoire.* Dans *Séminaires scientifiques Ouranos.* Montréal, le 4 juin 2014.

Bowron, B. et Davidson, G. (2011). *Climate Change Adaptation Planning : a Handbook for Small Canadian Communities.* Canadian Institute of Planners. 59 p.

Bryant, C., Singh, B., Thomassin, P. et Baker, L. (2007). *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 (Rapport scientifique final pour Ouranos).* Montréal, Québec. 49 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/149_Bryant1.pdf

Brzeski, V. (2011). *Comment adapter l'industrie des pêches de la région du Canada atlantique aux changements climatiques ?* Ecology Action Centre. Repéré à [https://www.ecologyaction.ca/files/images-documents/file/Coastal/CCCheticamp/Peche et changement climatique brochure.pdf](https://www.ecologyaction.ca/files/images-documents/file/Coastal/CCCheticamp/Peche%20et%20changement%20climatique%20brochure.pdf)

Burch, S., Sheppard, S. R. J., Shaw, A. et Flanders, D. (2010). *Planning for climate change in a flood-prone community: Municipal barriers to policy action and the use of visualizations as decision-support tools.* *Journal of Flood Risk Management*, 3(1), 126–139.

Burkett, V., Suarez, A. G., Bindi, M., Conde, C., Mukerji, R., Prather, M., St. Clair, A.L. et Yohe, G. (2014). *Point of departure.* Dans C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K.L., Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 169–194). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.

Cadieux, É., Gauthier, M.-M., Jayen, K. et Le Goff, H. (2011). Évaluation des vulnérabilités et de la capacité adaptative de la stratégie d'aménagement écosystémique du projet pilote de la réserve faunique des Laurentides face aux changements climatiques. 91 p.

Carter, T. et Butler, C. (2008). Ecological Impacts of Replacing Traditional Roofs with Green Roofs in Two Urban Areas. *Cities and the Environment*, 1(2), 1–17.

Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M. et Davison, J. B. (2010). Green roofs; Building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582–1591.

CEHQ. (2013). Atlas hydroclimatique du Québec méridional: Impacts des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec: Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 51 p. Repéré à http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/atlas/atlas_hydroclimatique.pdf

CEN. (2015). La science au Nunavik : Avativut. Repéré à <http://www.cen.ulaval.ca/avativut/>

Chambwera, M., Heal, G., Dubeux, C., Hallegatte, S., Leclerc, L., Markandya, A., McCarl, B.A., Mechler, R. et Neumann, J.E. (2014). Economics of adaptation. Dans C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L., Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et M.L. L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 945–977). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.

Chapin III, F. S., Hoel, M., Carpenter, S. R., Lubchenco, J., Walker, B., Callaghan, T. V., Folke, C., Levin, S.A., Mäler, K.-G., Nilsson, C., Barrett, S., Berkes, F., Crépon, A.-S., Danell, K., Rosswall, T. Starrett, D., Xepapadeas, A. et Zimov, S. A. (2006). Building resilience and adaptation to manage Arctic change. *Ambio*, 35(4), 198–202.

Charles, M., Milot, N. et Lepage, L. (2013). Adaptation aux changements climatiques: un outil informatif à l'intention des intervenants membres des Organismes de bassin versant du Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos) . Montréal, Québec. 48 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/309_OutildeformationLepageMilot2013.pdf

Charron, I. (2014). Guide sur les scénarios climatiques: Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation. Montréal, Québec: Ouranos. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/351_GuideCharron_FR.pdf

Chen, C.-F. (2013). Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review. *Ecological Engineering*, 52, 51–58.

Chuku, C.A. (2009). Pursuing an integrated development and climate policy framework in Africa: options for mainstreaming. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(1), 41-52.

City of Grand Rapids. (2011). Sustainability plan, FY 2011 through FY 2015. As amended June 21, 2011. Grand Rapids, MI. 41 p.

City of Keene. (2010). Keene comprehensive master plan. City of Keene Planning Department, NH, 324 p. Repéré à http://www.ci.keene.nh.us/sites/default/files/CMPprint-final-1027-fullversion_2.pdf

City of New York (2012) PlaNYC: Progress report 2012—A greener, greater New York. New York, NY. Repéré à http://www.nyc.gov/html/planyc/downloads/pdf/publications/planyc_progress_report_2012.pdf

Clerc, C., Gagnon, M., Breton-Honeyman, K., Tremblay, M., Bleau, S., Gauthier, Y., Aloupa, S., Kasudkuak, A., Furgal, C., Bernier, M et Barrett, M. (2011). Changements climatiques et infrastructures marines au Nunavik - Connaissances locales et point de vue des communautés des Quaqtuaq, Umiujaq et Kuujjuaq (Rapport final présenté au ministère des Affaires Indiennes et du Nord du Canada). 149 p.

Cloutier, G., Joerin, F., Dubois, C., Labarthe, M., Legay, C. et Viens, D. (2014). Planning adaptation based on local actors' knowledge and participation: a climate governance experiment. *Climate Policy*, 1–17.

Cogliastro, A., Kouchner, C. et Bouttier, L. (2013). Interactions entre les arbres et les cultures dans des systèmes de cultures intercalaires agroforestières dans un contexte de changements climatiques. Communication présentée à la journée scientifique – Agroforesterie. 7 février 2013. Drummondville, Québec.

Colls, A., Ash, N. et Ikkala, N. (2009). *Ecosystem-based Adaptation : A natural response to climate change*. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature (IUCN). 16 p. Repéré à http://cmsdata.iucn.org/downloads/iucn_eba_brochure.pdf

Cooper, J.A.G. et Pile, J. (2014). The adaptation-resistance spectrum: A classification of contemporary adaptation approaches to climate-related coastal change. *Ocean & Coastal Management*, 94, 90–98.

Côté, I.M. et Darling, E.S. (2010). Rethinking ecosystem resilience in the face of climate change. *PLoS Biology*, 8.

Côté, B., Leconte, R. et Trudel, M. (2013). Développement d'un prototype de système d'alerte aux faibles débits et aux prélèvements excessifs dans le bassin versant pilote de la rivière Yamaska (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 111 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/274_RapportCote2013.pdf

Crowley, M., Richard M., Risse, N., Jacob, J., Mehiri, K. et Lamari, M. (2012). Éléments pour un référentiel d'évaluation en adaptation aux changements climatiques : Le cas de l'ICAR-Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec: École nationale d'administration publique. 107 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/243_RapportLamari2012.pdf

Culver, M., Bierwagen, B., Burkett, V., Cantral, R., Davidson, M. A. et Stockdon, H. (2012). Introduction and Context. In V. Burkett and M. Davidson (dir.), *Coastal Impacts, Adaptation, and Vulnerabilities. A Technical Input to the 2013 National Climate Assessment* (p. 1–9). Island Press.

Dagenais, D., Paquette, S., Fuamba, M. et Thomas-Maret, I. (2011, septembre). Keys to successful large-scale implementation of vegetated best management practices in the urban environment. Dans 12th International Conference on Urban Drainage, International Water Association. Porto Allegre, Brésil.

Dagenais, D., Paquette, S., Thomas-Maret, I. et Fuamba, M. (2014). Implantation en milieu urbain de systèmes végétalisés de contrôle à la source des eaux pluviales dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 149 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/171_RapportDagenais2013.pdf

Debailleul, G., Tamini, L.D., Doyon, M., Clerson-Guicherd, F., Jacques, L.-S., Hernandez, M., Olar, M. et Louvel, J. (2013). Analyse prospective de la position concurrentielle du Québec en matière de production agricole dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 193 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/233_RapportDebailleul2013.pdf

De Grandpré, I., Fortier, D. et Stefani, E. (2010). Impact of groundwater flow on permafrost degradation: implication for transportation infrastructures. Dans Proceedings 6th Canadian Permafrost Conference and 63rd Canadian Geotechnical Conference (p. 534–540). Calgary, Alberta. Repéré à <http://pubs.aina.ucalgary.ca/cpc/CPC6-534.pdf>

De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poëuf, P. et Marchadier, C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, 33, 210–227.

Desjarlais, C., Blondlot, A., Allard, M., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivière, C., Lease, N., Roy, R., Savard, J.-P., Turcotte, R. et Villeneuve, C. (2010). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Montréal, Québec: Ouranos. 128 p.

Demers, A.-S. (2006). Les impacts engendrés par la modification du régime hydrique, découlant de l'enneigement artificiel (Mémoire de maîtrise). Université de Sherbrooke. Sherbrooke, Québec. Repéré à <http://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2006/ASDemers.pdf>

Doré, G., Bilodeau, J.-P., Thiam, P.M. et Drolet Perron, F. (2014). Impact des changements climatiques sur les chaussées des réseaux routiers québécois (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 63 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/204_Dore_Bilodeau2012_web_Fr.pdf

Doyon, F., Cyr, D., Poirier, J., Chiasson, G. et Boukendour, S. (2011). Évaluation des vulnérabilités du secteur forestier dans les Hautes-Laurentides face aux impacts biophysiques des changements climatiques. Québec, Montréal. 79 p.

Drejza, S., Bernatchez, P. et Dugas, C. (2011). Effectiveness of land management measures to reduce coastal georisks, eastern Québec, Canada. *Ocean & Coastal Management*, 54(4), 290–301.

Dupras, J., Revéret, J.-P. et He, J. (2013). L'évaluation économique des biens et services écosystémiques dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 218 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/273_RapportReveret2013.pdf

Edwards, J.E. et Hirsh, K.G. (2012). Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : préparer l'avenir. Ottawa, Ontario : Conseil canadien des ministres des forêts. 18 p.

EEA. (2013). *Adaptation in Europe - Addressing risks and opportunities from climate change in the context of socio-economic developments*. Copenhagen, Denmark : European Environmental Agency (EEA). 132 p.

Engineering the Future. (2011). *Infrastructure, Engineering and Climate Change Adaptation – ensuring services in an uncertain future*. Managing. London, United Kingdom: The Royal Academy of Engineering. 107 p. Repéré à <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/engineering-the-future>

Engineers Canada (2011). *PIEVC Engineering Protocol for Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate, Version 10*, Canadian Council of Professional Engineers. 166 p.

Eyzaguirre, J. et Warren, F. (2014). Adaptation : Établir un lien entre la recherche et la pratique. Bourque, A., Douglas, Douglas, A., Fraser, J., MacLellan, J., Morand, A., Mortsch, L., Noel, L., Raphoz, M., Richardson, G., Wellstead, J. Dans F. J. Warren et D. S. Lemmen (dir.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatifs aux impacts et à l'adaptation* (p. 253–286). Ottawa, Ontario. Repéré à http://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/assess/2014/pdf/Chapitre9-Adaptation_Fra.pdf

Felmate, B. et Thistlethwaite, J. (2011). *Adaptation aux changements climatiques : planification des priorités pour le Canada, rapport sur le Projet d'adaptation aux changements climatiques (Canada)* (p. 125). Repéré à <http://agissonsmaintenant.ca/rapport/documents/CCAP-Full-Report-FR.pdf>

Field, C.B., Barros, V.R., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., van Aalst, M., Adger, W.N., Arent, D.J., Barnett, J., Betts, R., Bilir, T.E., Birkmann, J., Carmin, J., Chadee, D.D., Challinor, A.J., Chatterjee, M., Cramer, W., Davidson, D.J., Estrada, Y.O., Gattuso, J.-P., Hijioka, Y., Hoegh-Guldberg, O., Huang, H.-Q., Insarov, G.E., Jones, R.N., Kovats, R.S., Romero Lankao, P., Larsen, J.N., Losada, I.J., Marengo, J.A., McLean, R.F., Mearns, L.O., Mechler, R., Morton, J.F., Niang, I., Oki, T., Olwoch, J.M., Opondo, M., Poloczanska, E.S., Pörtner, H.-O., Redsteer, M.H., Reisinger, A., Revi, A., Schmidt, D.N., Shaw, M.R., Solecki, W., Stone, D.A., Stone, J.M.R., Strzepek, K.M., Suarez, A.G., Tschakert, P., Valentini, R., Vicuña, S., Villamizar, A., Vincent, K.E., Warren, R., White, L.L., Wilbanks, T.J., Wong, P.P. et Yohe, G.W. (2014). *Technical Summary*. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (p. 35-94). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.

FIHOQ. (2014). *Les infrastructures vertes: un verdissement raisonné*. Repéré le 08 août 2014, à <http://www.fihq.qc.ca/milieu-municipal/environnement2/infrastructures-vertes-un-verdissement-raisonne2>

Fisher, G. (2011). *Municipal Climate Change Action Plan Guidebook. Canada-Nova Scotia Agreement on the Transfer of Federal Gas Tax Funds*. Halifax, Nova Scotia: Canada-Nova Scotia Infrastructure Secretariat. 36 p.

Ford, J., Pearce, T., Smit, B., Wandel, J., Allurut, M., Ittusujurat, H., Shappa, K.I.K. et Qrunnut, K. (2007). *Reducing Vulnerability to Climate Change in the Arctic: The Case of Nunavut, Canada*. *Arctic*, 60(2), 150–166.

Fortier, R., LeBlanc, A.-M. et Yu, W. (2011). *Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada*. *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 720–740.

Fournier, R., Poulin, M., Revéret, J., Rousseau, A. et Théau, J. (2013). *Outils d'analyses hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses terres du Saint-Laurent : adaptations aux changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos)*. Montréal, Québec. 114 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/221_RapportFournier2013.pdf

Friesinger, S. et Bernatchez, P. (2010). *Perceptions of Gulf of St. Lawrence coastal communities confronting environmental change : Hazards and adaptation*, Québec, Canada. *Ocean and Coastal Management*, 53(11), 669–678.

Fuamba, M., Walliser, T., Daynou, M., Rousselle, J. et Rivard, G. (2010). *Vers une gestion durable et intégrée des eaux pluviales : Application des propositions d'action publique au Québec*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(2), 209–223.

GIEC (2014). Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L. L. White). Genève, Suisse : Organisation météorologique mondiale. 34 p.

Giguère, M. (2009). Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Québec, Canada : Institut national de santé publique du Québec. 95 p.

Glatzel, K., Wright, H. et Makuch, Z. (2012). Technology Innovation and the Law- the Example of Climate Adaptation Technologies. Dans K. E. Makuch et R. Pereira (dir.), *Environmental and Energy Law* (p. 92 – 116). Oxford, United Kingdom : WileyBlackwell.

Godbout, S., Brassard, P., Pelletier, F., Grenier, M., Grenier, P., Belzile, L., Landry C., Bolduc, F., Benslimane, O. et Bilodeau, D. (2013). Étude des volumes de précipitation et d'évaporation pour le calcul des structures d'entreposage de fumier dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 160 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/301_RapportGodbout2013.pdf

Gonzalez, A., Albert, C., Bronwyn, R., Dumitru, M., Dabrowski, A., Bennett, E. M., Cardille, J. et Lechowicz, M. J. (2013). Corridors, biodiversité, et services écologiques : un réseau écologique pour le maintien de la connectivité et une gestion résiliente aux changements climatiques dans l'Ouest des Basses-Terres du Saint-Laurent (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 68 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/212_RapportGonzalez2014.pdf

Gouvernement du Québec. (2012). Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020. Québec. 41 p. Repéré à http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/strategie-adaptation2013-2020.pdf

Gouvernement du Québec. (2013a). Îlots de chaleur/fraîcheur urbains et température de surface. Repéré le 9 décembre 2013, à <http://www.donnees.gouv.qc.ca/?node=/donnees-details&id=2f4294b5-8489-4630-996a1-84da590f02ee>

Gouvernement du Québec. (2013b). Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Guide d'interprétation. Version révisée 2013. Repéré le 21 mars 2014, à <http://www.mddep.gouv.qc.ca/Eau/rives/guide-interpretationPPRLPI.pdf>

Grant, G. et Lane, C. (2006). Extensive green roofs in London. *Urban Habitats*, 4, 51–65.

Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, 19, 240–247. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003

Hansen, W.D., Brinkman, T.J., Leonawicz, M., Chapin, F.S. et Kofinas, G.P. (2013). Changing Daily Wind Speeds on Alaska's North Slope : Implications for Rural Hunting Opportunities. *Arctic*, 66(4), 448–458.

Hinkel, J. (2011). Indicators of vulnerability and adaptive capacity: Towards a clarification of the science–policy interface. *Global Environmental Change*, 21(1), 198–208.

HM Government. (2013). The national adaptation programme: Making the country resilient to a changing climate. Repéré à https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/209866/pb13942-nap-20130701.pdf

- Horton R.M., Solecki W.D. et Rosenzweig C. (2012). *Climate change in the Northeast: a sourcebook*. 313 p.
- IISD. (2013). *Pilot Application Adaptive Design & Assessment Policy Tool* (Government of British Columbia agriculture programs). Winnipeg, Manitoba : International Institute for Sustainable Development (IISD). 82 p.
- INSPQ. (2010). Appel de propositions de projets de lutte aux îlots de chaleur urbains. Bulletin d'information en santé environnementale (BISE). Repéré Octobre 18, 2014, à <http://www.inspq.qc.ca/actualit%C3%A9s-appel-de-propositions-de-projets-de-lutte-aux-%C3%AEilots-de-chaleur-urbains>
- IPCC. (2013) Summary for Policymakers. Dans: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (dir.)]. Cambridge, United Kingdom et New York, USA : Cambridge University Press. 29 p.
- IUCN. (2009). Déclaration des position. L'adaptation fondée sur les écosystèmes (EbA). UNFCCC Climate Change Talks, 28th Septembre - 9th Octobre 2009. Paragraph (p. 1–5). Bangkok : International Union for the Conservation of Nature (IUCN). Repéré à http://cmsdata.iucn.org/downloads/iucn_position_paper_eba_september_09.pdf
- Jackson, E., Barry, L. et Marzok, N. (2011). *Changing climate, changing communities: guide and workbook for municipal climate adaptation*. Toronto, Ontario: ICLEI-Gouvernements locaux pour le développement durable. 234 p.
- Joerin, F., Després, C., Potvin, A., Rodriguez, M., Vachon, G. et Vandersmissen, M.-H. (2014). *Changements climatiques et transformation urbaine : un projet de recherche-action pour renforcer la résilience de la Communauté métropolitaine de Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos)*. Montréal, Québec. 180 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/174_RapportJoerin2014.pdf
- Johnston, M.H. et Edwards, J.E. (2013). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : analyse d'études de cas au Canada*. Ottawa, Ontario : Conseil canadien des ministres des forêts. 37 p.
- Johnston, M. et Hessel, H. (2012). Climate change adaptive capacity of the Canadian forest sector. *Forest Policy and Economics*, 24, 29–34. doi:10.1016/j.forpol.2012.06.001
- Jones, R.N., Patwardhan, A., Cohen, S., Dessai, S., Lammel, A., Lempert, R., Mirza, M.M.Q et von Storch, H. (2014). Foundations for Decision Making. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, et L.L. White (dir), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (p. 195-228). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.
- Joyce, L., Blate, G., McNulty, S., Millar, C., Moser, S., Neilson, R. et Peterson, D. (2009). Managing for Multiple Resources Under Climate Change: National Forests. *Environmental Management*, 44(6), 1022–1032.
- Kates, R.W., Travis, W.R. et Wilbanks, T.J. (2012). Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(19), 7156–7161.
- Klein, R.J.T., Buckley, E.N., Nicholls, R.J., Ragoonaden, S., Aston, J., Capobianco, M., Mitzutani, N. et Nunn, P.D. (2000). Coastal Adaptation. Dans B. Metz, O.R. Davidson, J.-W. Martens, S.N.M. van Rooijen et V. van Wie McGrory (dir.), *Methodological and Technological issues in Technology Transfer* (p. 349–372). Cambridge, United Kingdom et New York, NY: Cambridge University Press.

Klein, R.J.T., Midley, G.F., Preston, B.L., Alam, M., Berkhout, F.G.H., Dow, K. et Shaw, M.R. (2014). Adaptation Opportunities, Constraints, and Limits. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 899-943) Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.

Köhler, M. (2005). Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin. *Urban Habitats*, 4, 3–26.

Kowalczyk, A. (2011). Green roofs as an opportunity for sustainable development in urban areas. *Sustainable Development Applications*, 2, 63–77.

Kurukulasuriya, P. et Rosenthal, S. (2003). *Climate Change and Agriculture : A Review of Impacts and Adaptations*. 106 p.

Kunreuther, H., Meyer, R. et Michel-Kerjan, E. (2009). Overcoming decision biases to reduce losses from natural catastrophes. Dans E. Shafir (dir.), *The Behavioral Foundations of Public Policy* (p. 398–414). Princeton, NJ, Woodstock, United Kingdom: Princeton University Press.

Kunreuther, H. et Roth, R. (1998). *Paying the Price: The Status and Role of Insurance* (1^e édition). Washington, DC : Joseph Henry Press. 320 p.

Lackstrom, K., Dow, K., Haywood, B., Brennan, A., Kettle, N. et Brosius, A. (2012) Engaging climate-sensitive sectors in the Carolinas (Technical report CISA-2012-03). *Carolinas Integrated Sciences and Assessments*, Columbia. 180 p.

Lapointe, M., Boisclair, D., Bergeron, N.E., Curry, R.A., MacQuarrie, K.K., St-Hilaire, A.A., McKenzie, J.J.M.M. et Cunjak, R.R.A. (2013). Critical thermal refugia for Atlantic salmon and brook trout populations of eastern Canadian rivers (Rapport scientifique final pour Ouranos et CRSNG, extrait). Montréal, Québec. 13 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/285_RapportLapointe2013.pdf

Lawler, J.J., Tear, T.H., Pyke, C., Shaw, M.R., Gonzalez, P., Kareiva, P., Hansen, L., Hannah, L. Lausmeyer, K., Aldous, Al., Bienz, C et Pearsall, S. (2008). Resource management in a changing and uncertain climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(1), 35–43.

Leclerc, L. (2012). Rapport de synthèse sur la mesure du progrès en adaptation : Document de support à l'Atelier national sur la mesure du progrès en adaptation au Canada, 7 et 8 mars 2012. Montréal, Québec. 34 p.

Leclerc, L. et Raphoz, M. (2014). Developing knowledge on monitoring and evaluation of progress through analogues in the health and hydroelectricity sectors (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 33 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/326_RapportRaphoz2014.pdf

Le Goff, H. et Bergeron, Y. (2014). Vulnerability assessment to climate change of three ecosystem-based forest management projects in Quebec. *The Forestry Chronicle*, 90(02), 214–227.

Le Goff, H. et Jayen, K. (2011). Évaluation des vulnérabilités et de la capacité adaptative aux changements climatiques de la stratégie d'aménagement écosystémique de Tembec dans l'UAF 85-51 (Rapport scientifique préliminaire pour Ouranos). Québec. 84 p.

Le Goff, H., Leduc, A. et Jayen, K. (2012). Évaluation des vulnérabilités aux changements climatiques de trois projets d'aménagement forestier écosystémique et implications pour le développement d'une stratégie d'adaptation pour l'aménagement forestier au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 72 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/167_RapportLeGoff-2012.pdf

L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M.-P., Ducharme, M.-A., Larrivée, K., Grandmont, K. et Lemieux, C. (2013). Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik (Rapport scientifique final pour Ouranos). Québec. 90 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/172_RapportLHAraultetal2013.pdf

Lepage, M., Bourgeois, G. et Bélanger, G. (2012). Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision. Québec : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 11 p.

Linham, M.M. et Nicholls, R.J. (2010). Technologies for Climate Change Adaptation: Coastal Erosion and Flooding (X. Zhu dir.). UNEP Risø Centre on Energy, Climate and Sustainable Development. 150 p. Repéré à http://www.unep.org/pdf/TNAhandbook_CoastalErosionFlooding.pdf

Logan, T., Charron, I., Chaumont, D. et Houle, D. (2011). Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Montréal, Québec. 55 p. Retrieved from http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011-Sans-Annexes.pdf

Macintosh, A. (2013). Coastal climate hazards and urban planning: how planning responses can lead to maladaptation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(7), 1035–1055. doi:10.1007/s11027-012-9406-2

Magnan, A. (2013). Éviter la maladaptation au changement climatique. *Policy Brief*, (8), 1–4. Repéré à http://www.iddri.org/Publications/Collections/Syntheses/PB0813_AM_maladaptation.pdf

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G. et Khedhaouiria, D. (2013). Gestion des eaux pluviales et changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 366 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/159_RapportMailhot2014.pdf

Mameamskum, J. (2013). Assessment of Climate Change Impacts on the Caribou, the Land, and the Naskapi Nation, and Identification of Priority Adaptation Strategies (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 38 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/323_RapportMameamskum2014.pdf

Mathey, J., Röbber, S., Lehmann, I. et Bräuer, A. (2011). Urban green spaces: potentials and constraints for urban adaptation to climate change. *Resilient Cities*, 1, 479–485.

Marshall, N.A., Park, S., Howden, S.M., Dowd, A.B. et Jakku, E.S. (2013). Climate change awareness is associated with enhanced adaptive capacity. *Agricultural Systems*, 117, 30–34.

MDDELCC (2015). Moderniser le régime d'autorisation environnementale de la Loi sur la qualité de l'environnement. Livre Vert. Ministère du Développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. Québec : Gouvernement du Québec. 86 p.

MEDDE (2013). L'adaptation : principes et outils. Ministère français de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Repéré à <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-concept-d-adaptation.html>

Mehdi, B., Gombault, C., Lehner, B., Michaud, A., Beaubin, I., Sottile, M.-F., Blondlot, A., Bernier, D., Bérubé, J., Lauzier, R. et Mimeault, M. (2014). Augmenter la résilience des bassins agricoles aux changements climatiques et aux changements d'occupation du territoire agricole à venir : Étude de cas de la Baie Missisquoi (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 225 p. Repéré à <http://www.ouranos.ca/fr/publications/resultats.php?q=lehner&t=#rs>

Michaud, A., Drouin, A., Mailhot, A., Talbot, G., Huard, D., Biner, S., Lagacé, R., Rocha, N.-R. et Gagné, G. (2013). Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Québec. 168 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/192_RapportMichaud2013.pdf

Millar, C.I., Stephenson, N.L. et Stephens, S.L. (2007). Climate Change and Forests of the Future: Managing in the Face of Uncertainty. *Ecological Applications*, 17(8), 2145–2151.

Milot, N., Lepage, L., Choquette, A., Lafitte, J., Larivière, V., Larocque, J., Lebeuvre, B., Marquet V. et Veret, A. (2013). Adaptation aux changements climatiques et gestion intégrée de l'eau par bassin versant au Québec: une analyse sociopolitique des défis et des opportunités (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 324 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/308_RapportLepageMilot2013.pdf

Mimee, B., Brodeur, J., Bourgeois, G., Moiroux, J., Gendron St-Marseille, A.-F. et Gagnon, A.-È. (2014). Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec? (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 51 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/332_RapportBrodeur2014.pdf

Mimura, N., Pulwarty, R.S., Duc, D.M., Elshinnawy, I., Redsteer, M.H., Huang, H.-Q., Nkem, J.N. et Rodriguez, R.A.S. (2014). Adaptation planning and implementation. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 869–898). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.

Morin, M. (2008). Concepts de base en sécurité civile. Québec : Ministère de la Sécurité publique. 30 p. Repéré le 05 août 2015 à <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2011-069.pdf>

Morgan, C.L. (2011). Limits to Adaptation: A Review of Limitation Relevant to the Projet « Building resilience to Climate Change – Coastal Southeast Asia. Gland, Switzerland : International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. 60 p.

Moser, S.C. et Ekstrom, J.A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(51), 22026–22031.

Munang, R., Thiaw, I., Alverson, K., Mumba, M., Liu, J., et Rivington, M. (2013). Climate change and Ecosystem-based Adaptation: A new pragmatic approach to buffering climate change impacts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 67–71.

Munroe, R., Roe, D., Doswald, N., Spencer, T., Möller, I., Vira, B., Reid, H., Kontoleon, A., Giuliani, A., Castelli, I. et Stephens, J. (2012). Review of the evidence base for ecosystem-based approaches for adaptation to climate change. *Environmental Evidence*, 1(1), 13. doi:10.1186/2047-2382-1-13

- Mustelin, J., Kuruppu, N., Matus Kramer, A., Daron, J., de Bruin, K. et Guerra Noriega, A. (2013). Climate adaptation research for the next generation. *Climate and Development*, 5(3), 189-193.
- Nakashima, D. J., McLean, G., Thulstrup, K., Castillo, R. et Rubis, T. J. (2012). *Weathering Uncertainty: Traditional Knowledge for Climate Change Assessment and Adaptation*. Paris, France: UNESCO, UNU. 120 p.
- Naumann, S., Anzaldúa, G., Gerdes, H., Freluh-Larsen, A., Davis, M., Berry, P., Burch, S. et Sanders, M. (2010). Assessment of the potential of ecosystem-based approaches to climate change adaptation and mitigation in Europe (Final report to the European Commission, DG Environment, Contract no. 070307/2010/580412/SER/B2). Ecologic institute and Environmental Change Institute, Oxford University Centre for the Environment. 123 p. Repéré à http://ec.europa.eu/environment/nature/climatechange/pdf/EbA_EBM_CC_FinalReport.pdf
- Nilo, P., Dumont, P. et Fortin, R. (1997). Climatic and hydrological determinants of year-class strength of St. Lawrence River lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54, 774-780.
- Nitkin, D., Foster, R. et Medalye, J. (2009). *Business adaptation to climate change: A Systematic Review of the Literature*. London, Ontario : Network for Business Sustainability. 107 p.
- Noble, I.R., Huq, S., Anokhin, Y.A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F.P., Osman-Elasha, B. et Villamizar, A. (2014). Adaptation needs and options. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M., Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R., Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 833-868). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.
- OECD/UNEP. (2011). *Adaptation. Dans Climate Change and Tourism Policy in OECD Countries*. OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264119598-7-en>
- Ogden, A.A.E. et Innes, J. (2007). Incorporating Climate Change Adaptation Considerations into Forest Management Planning in the Boreal Forest. *International Forestry Review*, 9(3), 713-733.
- Ohlson, D.W., McKinnon, G.A. et Hirsch, K.G. (2005). A structured decision-making approach to climate change adaptation in the forest sector. *The Forestry Chronicle*, 81(1), 97-103.
- Olivier, A. (2013). *Contribution de systèmes agroforestiers multifonctionnels à la capacité d'adaptation aux changements climatiques des agro-écosystèmes (Rapport scientifique final pour Ouranos)*. Montréal, Québec. 38 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/194_RapportOlivier2013.pdf
- Ouranos. (2010). *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques : Guide destiné au milieu municipal québécois*. Montréal, Québec. 48 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/111_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf
- Ouranos (2012). *Scénarios climatiques pour l'ingénierie. De l'information climatique pour les ingénieurs*. Repéré le 29 juillet 2015, à http://scenarios.ouranos.ca/fiches_infrastructures/
- Parent, A.-C., Anctil, F., Grenier, P. et Chaumont, D. (2012). *Pour des mesures de conservation et d'utilisation efficace de l'eau adaptables aux changements climatiques pour le bassin du fleuve Saint-Laurent (Rapport scientifique final pour Ouranos)*. Montréal, Québec. 191 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/180_RapportAnctil2012.pdf

Park, S. E., Marshall, N. A., Jakku, E., Dowd, A. M., Howden, S. M., Mendham, E. et Fleming, A. (2012). Informing adaptation responses to climate change through theories of transformation. *Global Environmental Change*, 22(1), 115–126.

Peace, J., Crawford, M. et Seidel, S. (2013). *Weathering the Storm : Building Business Resilience to Climate Change*. Repéré le 12 mai 2014, à <http://www.c2es.org/publications/weathering-storm-building-business-resilience-climate-change>

Pearce, T., Ford, J.D., Duerden, F., Smit, B., Andrachuk, M., Berrang-Ford, L. et Smith, T. (2011). Advancing adaptation planning for climate change in the Inuvialuit Settlement Region (ISR): a review and critique. *Regional Environmental Change*, 11, 1-17.

Peres-Neto, P., Boivin, F., Lee, W.-S., Pandit, S., Samson, J. et Simard, A. (2013). Développement d'un cadre méthodologique et d'échantillonnage pour le suivi de la biodiversité en fonction des changements climatiques (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 320 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/196_RapportPeresNeto2013.pdf

Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Cochrane, K., Howden, S.M., Iqbal, M.M., Lobell, D.B. et Travasso, M.I. (2014). Food security and food production systems. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 485-533). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Proulx, D., Parent, D., Côté, H. et Charboneau, É. (2013). Capacité d'adaptation des producteurs laitiers québécois aux changements climatiques (Revue de littérature). Montréal, Québec. 51 p.

Reid, H. et Swiderska, K. (2008). Biodiversité, changement climatique et pauvreté. London, United Kingdom: International Institute for Environment and Development (IIED). 8 p.

Reyes, G., Kneeshaw, D., Jayen, K. et Le Goff, H. (2011). Évaluation des vulnérabilités et de la capacité adaptative aux changements climatiques de la stratégie d'aménagement Triade en Mauricie (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 78 p.

Richardson, G.R.A. et Otero, J. (2012). Outils d'aménagement locaux pour l'adaptation aux changements climatiques. Ottawa, Ontario: Gouvernement du Canada. 38 p.

Rickards, L. et Howden, S.M. (2012). Transformational adaptation : agriculture and climate change. *Crop & Pasture Science*, 63(March), 240–250.

Riseth, J.Å., Tømmervik, H., Helander-Renvall, E., Labba, N., Johansson, C., Malnes, E., Bjerke, J.W., Jonsson, C., Pohjola, V., Sarri, L.-E., Schanche, A. et Callaghan, T.V. (2010). Sámi traditional ecological knowledge as a guide to science: snow, ice and reindeer pasture facing climate change. *Polar Record*, 47(03), 202–217.

Rivard, G. (2011). Guide de gestion des eaux pluviales : stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain. Québec, Québec : ministère du développement durable, de l'environnement de la Faune et des Parcs (MDDEFP). 362 p.

- Roberts, D., Boon, R., Diederichs, N., Douwes, E., Govender, N., McInnes, A., Mclean, C., O'Donoghue, S. et Spires, M. (2012). Exploring ecosystem-based adaptation in Durban, South Africa: "learning-by-doing" at the local government coal face. *Environment and Urbanization*, 24, 167–195.
- Roy, R., Chartier, I., Desrochers, G., Guay, F., Minville, M., Pacher, G., Roy, L. et Tapsoba, D. (2008, octobre). Impacts des changements climatiques sur le régimes hydrologiques du nord du Québec et mesures d'adaptation envisageables. Présentation aux 21^e entretiens du Centre Jacques-Cartier. Montréal, Québec.
- Salamanca, F. et Martilli, A. (2011). A Study of the Urban Boundary Layer Using Different Urban Parameterizations and High-Resolution Urban Canopy Parameters with WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, (50), 1107–1128.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703.
- SCBD (2009). Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation. Report of the Second Ad Hoc Technical expert Group on Biodiversity and Climate Change. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, CBD Technical Series No. 41. Diversity. Montréal, Canada. 126 p.
- Scott, D., McBoyle, G. et Minogue, A. (2007). Climate change and Quebec's ski industry. *Global Environmental Change*, 17(2), 181–190. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378006000549>
- Schoeneberger, M., Bentrup, G., de Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., Zhou, X. et Current, D. (2012). Branching out: Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(5), 128A–136A.
- Simmons, M. T., Gardiner, B., Windhager, S. et Tinsley, J. (2008). Green roofs are not created equal: The hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*, 11(4), 339–348.
- Simonet, G. (2011a). Enjeux et dynamiques de la mise en œuvre de stratégies d'adaptation aux changements climatiques en milieu urbain, les cas de Montréal et Paris. (Thèse de doctorat, Vol. 1). Université du Québec à Montréal et Université Paris Ouest Nanterre La Defense. 271 p. Repéré à https://ivanhoecambridge.uqam.ca/upload/files/Simonet_Guillaume.pdf
- Simonet G. (2011b). L'atelier "H" ou la représentation de l'adaptation dans l'élaboration du Plan Climat de Paris. *VertigO*, 11 (2), 1-23.
- Simonet, G. (2013). Étude du Plan Stratégique de Développement Durable de la collectivité montréalaise à travers le filtre de l'adaptation aux changements climatiques. *Information Géographique*, 77 (3), 71-89.
- Singh, B. et Bryant, C. (2006). Impact et adaptation aux changements climatiques pour les activités de ski et de golf et l'industrie touristique : le cas du Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 404 p. Repéré à <http://adaptation.ouranos.ca/pdf-ouranos/to.2006.singh.etal.pdf>
- Siron, R. (2013). Aménager le territoire pour s'adapter aux changements climatiques : La biodiversité fait partie de l'équation. *Vecteur Environnement*, (Septembre 2013), 34–37.
- Siron, R. (2014). Biodiversité, services écologiques et changements climatiques. Réduire nos vulnérabilités. *Vecteur Environnement*, 47(5), 30–32.

- Stephens, S. L., Millar, C. I. et Collins, B. M. (2010). Operational approaches to managing forests of the future in Mediterranean regions within a context of changing climates. *Environmental Research Letters*, 5(2).
- Swim, J., Clayton, S., Doherty, T., Gifford, R., Howard, G., Reser, J., Stern, P. et Weber E. (2011). *Psychology & Global Climate Change, addressing a multifaceted phenomenon and set of challenges. A Report of the American Psychological Association Task Force on the Interface Between Psychology and Global Climate Change*. Washington, United States of America: American Psychological Association. 107 p
- Tartera, C., Rivest, D., Olivier, A. et Liagre, F. (2012). Agroforesterie en développement : parcours comparés du Québec et de la France. *The Forestry Chronicle*, 88(1), 21–29.
- Tecslut Inc. (2008). *Analyse coûts-avantages de solutions d'adaptation à l'érosion côtière pour la Ville de Sept-Îles*. 146 p.
- Thomas, I., Bleau, N., Soto Abasolo, P., Desjardins-Dutil, G., Fuamba, M. et Kadi, S. (2012). *Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques , en prenant comme cas d'étude la ville de Montréal (Rapport scientifique final pour Ouranos)*. Montréal, Québec. 137 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/184_RapportThomasBleau2012.pdf
- Tougas-Tellier, M.-A., Morin, J., Hatin, D. et Lavoie, C. (2013). *Impacts des changements climatiques sur l'expansion du roseau envahisseur dans les frayères du fleuve Saint-Laurent (Rapport scientifique final pour Ouranos)*. Montréal, Québec. 56 p. Repéré à http://www.ouranos.ca/media/publication/168_RapportTTellieretal2013.pdf
- TRNEE. (2012). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique (études de cas)*. Ottawa, Ontario : Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE). 107 p.
- UNFCCC. (2014). *Private Sector Initiative - database of actions on adaptation*. Repéré le 12 mai 2014, à http://unfccc.int/adaptation/workstreams/nairobi_work_programme/items/6547.php
- Verchot, L. V., Noordwijk, M., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A., Mackense, J., Bantilan, C., Anupama, K.V. et Palm, C. (2007). Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(5), 901–918. doi:10.1007/s11027-007-9105-6
- Vignola, R., Locatelli, B., Martinez, C. et Imbach, P. (2009). Ecosystem-based adaptation to climate change: What role for policy-makers, society and scientists? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14, 691–696. doi:10.1007/s11027-009-9193-6
- Warren, F. J. et Lemmen, D. S. (dir.). (2014). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Ottawa, Ontario: Gouvernement du Canada. 286 p. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/environnement/ressources/publications/impacts-adaptation/rapports/evaluations/2014/16310>
- Wiederkehr, E. (2013). *Apports de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques - Élaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône (Thèse de doctorat)*. Université de Lyon. 287 p. Repéré à http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/78/21/00/PDF/WIEDERKEHR_Elise_2012_These_VD.pdf
- UNWTO-UNEP. (2008). *Climate Change and Tourism - Responding to Global Challenges*. Madrid, Spain et Paris, France: World Tourism Organization, United Nations Environment Programme. 256 p.

Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K. L., Saito, Y. et Sallenger, A. (2014). Coastal systems and low-lying areas. Dans C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K. J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (dir.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (p. 361–409). Cambridge, United Kingdom et New York, NY : Cambridge University Press.

Yohe, G. et Tol, R.S.J. (2002). Indicators for social and economic coping capacity—moving toward a working definition of adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 12(1), 25–40.

GLOSSAIRE

VERS L'ADAPTATION

Synthèse des connaissances sur les
changements climatiques au Québec

Édition 2015



GLOSSAIRE ¹

A

Adaptation : Démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Dans les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu qu'à ses conséquences.

Adaptation incrémentale : mesures d'adaptation ayant pour but le maintien de la nature et de l'intégrité d'un système ou d'un processus à une échelle donnée.

Adaptation transformationnelle : adaptation qui change les aspects fondamentaux d'un système en réponse au climat et à ses effets.

Ajustement isostatique glaciaire (ou réajustement postglaciaire) : Mouvement vertical des continents et du plancher océanique à la suite de la diminution de la charge exercée par une masse de glace – par exemple depuis le Dernier Maximum glaciaire (21 ka). Ce réajustement est un mouvement terrestre isostatique (Baede, 2007). En termes plus techniques, déformation de la Terre et de son champ de pesanteur découlant de la réponse du système terre-océan aux variations de la charge exercée par la glace et par l'eau associée. On parle parfois d'effets glacio-hydro isostatiques. Cela comprend les déformations verticales et horizontales de la surface terrestre et les variations du géoïde dues à la redistribution de masse au cours des transferts de masse entre la cryosphère et l'océan.

Albédo : Fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface ou par un objet, souvent exprimée sous forme de pourcentage. Les surfaces enneigées ont un albédo élevé, les sols, un albédo élevé à faible et les surfaces couvertes de végétation et les océans, un albédo faible. L'albédo de la Terre fluctue principalement en fonction des variations de la nébulosité, de l'enneigement, de l'englacement, de la surface foliaire et du couvert terrestre.

Adaptation basée sur les écosystèmes : L'utilisation de la biodiversité et des services écosystémiques comme une partie intégrante d'une stratégie d'adaptation pour aider les gens à s'adapter aux différents effets des changements climatiques. L'adaptation basée sur les écosystèmes utilise une gamme d'opportunités pour la gestion durable, la conservation et la restauration des écosystèmes pour offrir des services qui permettent aux gens de s'adapter aux impacts des changements climatiques. Cela a pour but le maintien et l'augmentation de la résilience ainsi que la réduction de la vulnérabilité des écosystèmes et des populations face aux différents impacts des changements climatiques. L'adaptation basée sur les écosystèmes est intégrée de façon appropriée dans des stratégies d'adaptation et de développement plus larges.

Aléa : Phénomène, manifestation physique ou activité humaine susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement (chaque aléa est entre autres caractérisé en un point donné, par une probabilité d'occurrence et une intensité données) (Morin, 2008).

¹ Définitions reprises du GIEC 2013 et 2014, sauf lorsqu'indiqué autrement

B

Barrière à l'adaptation inclus les obstacles et les limites à l'adaptation:

Obstacle à l'adaptation : Toute entrave empêchant d'atteindre un potentiel d'adaptation et susceptible d'être surmontée ou atténuée par une politique, un programme ou une mesure (Lemmen et al., 2008).

Limites à l'adaptation : Le point auquel les objectifs d'un acteur (ou d'un système) ne peuvent être assurés contre les risques intolérables par des actions d'adaptation.

C

Capacité d'adaptation : La totalité des possibilités, des ressources et des institutions propres à un pays, une région, une collectivité ou un groupe, servant à mettre en oeuvre des mesures efficaces d'adaptation (IPCC, 2007; Lemmen et al., 2008).

Catastrophe : Des altérations graves dans le fonctionnement normal d'une communauté ou d'une société dues à des événements physiques dangereux en interaction avec des conditions sociales vulnérables, conduisant à des effets négatifs considérables sur le plan humain, matériel, économique et environnemental qui requièrent une intervention immédiate urgente pour satisfaire aux besoins critiques humains et qui peuvent nécessiter un support externe pour la reconstruction.

Changement climatique : Variation de l'état du climat, qu'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, notamment les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques ou des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres. On notera que la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son article premier, définit les changements climatiques comme des «changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables». La CCNUCC établit ainsi une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat imputable à des causes naturelles.

Climat : Au sens étroit du terme, le climat désigne en général le temps moyen ou, plus précisément, se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (la période type, définie par l'Organisation météorologique mondiale, est de 30 ans). Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, la hauteur de précipitation et le vent. Dans un sens plus large, le climat désigne l'état du système climatique, y compris sa description statistique.

Confiance : Validité d'un résultat, selon la nature, la quantité, la qualité et la cohérence des éléments correspondants (compréhension mécaniste, théorie, données, modèles, avis d'experts, etc.) et selon le degré de cohérence relatif à ce résultat. Elle s'exprime en termes qualitatifs (Mastrandrea et al., 2010).

Cobénéfices : Les effets positifs qu'une politique ou une mesure visant un objectif pourraient avoir sur d'autres objectifs, indépendamment de l'effet net sur le bien-être social global. Les co-bénéfices sont souvent sujets à l'incertitude et dépendent de circonstances locales et de pratiques de mise en oeuvre. Les co-bénéfices sont aussi appelés bénéfices auxiliaires.

E

Équivalent en eau de la neige : 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 (Desjarlais et al., 2010).

Évaluation des impacts des changements climatiques : La pratique d'identifier et d'évaluer, sur le plan monétaire et non monétaire, les effets des changements climatiques sur les systèmes humains et naturels.

Évapotranspiration : Processus combiné d'évaporation à la surface de la Terre et de transpiration de la végétation.

Exposition : Présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu ou dans un contexte susceptibles de subir des dommages.

Événement extrême : (voir Phénomène climatique extrême)

G

Gaz à effet de serre (GES) : Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement terrestre émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. La vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre. Il existe également des gaz à effet de serre résultant uniquement des activités humaines, tels que les hydrocarbures halogénés et autres substances contenant du chlore et du brome, dont traite le Protocole de Montréal. Outre le CO₂, le N₂O et le CH₄, le Protocole de Kyoto traite, quant à lui, d'autres gaz à effet de serre tels que l'hexafluorure de soufre (SF₆), les hydrofluorocarbones (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC).

Gestion adaptative : Un processus de planification itérative, d'exécution et de modifications stratégiques pour la gestion des ressources face à l'incertitude et au changement. La gestion adaptative implique l'ajustement des approches en réponse aux observations de leurs effets et des changements dans un système provoqués suite à la rétroaction des effets et d'autres variables.

H

Hydraulicité : Apports naturels en eau d'une période donnée, en général une année (Desjarlais et al., 2010).

Hydrologie : Relatif à l'étude des eaux (cycle, bilan, régime, condition, événement) (Desjarlais et al., 2010).

I

Îlot de chaleur urbain : Zone urbaine où la température ambiante est supérieure à celle des zones rurales environnantes et où l'on observe également des changements dans l'écoulement, des effets de rétention de chaleur et des modifications de l'albédo de surface.

Incertitude : Degré de connaissance incomplète pouvant découler d'un manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. L'incertitude peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'une imprécision dans les données, d'une ambiguïté dans la définition des concepts ou de la terminologie employés ou encore de projections incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives (ex.: une fonction de densité de probabilité) ou par des énoncés qualitatifs (reflétant par exemple l'opinion d'une équipe d'experts). (Voir Moss et Schneider, 2000; Manning et al., 2004; Mastrandrea et al., 2010.) (Voir aussi Confiance; Probabilité.)

Incidences (voir Impacts) : Effets sur les systèmes naturels et humains. Dans le présent rapport, le terme est employé principalement pour désigner les effets des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes et des changements climatiques sur les systèmes naturels et humains. Il s'agit en général des effets sur la vie des personnes, les modes de subsistance, la santé, les écosystèmes, le patrimoine économique, social et culturel, les services et les infrastructures, découlant de leurs interactions avec les changements climatiques ou les phénomènes climatiques dangereux qui se produisent au cours d'une période donnée, et de la vulnérabilité de la société ou du système exposé. Dans ce sens, on emploie aussi les termes conséquences ou impacts. Les incidences des changements climatiques sur les systèmes géophysiques, notamment les inondations, les sécheresses et l'élévation du niveau de la mer, constituent un sous-ensemble d'incidences appelées impacts physiques.

L

Limites à l'adaptation (voir barrières à l'adaptation)

M

Maladaptation : Les actions qui peuvent conduire à une augmentation du risque de conséquences négatives liées au climat, à une augmentation de la vulnérabilité face aux changements climatiques ou à une diminution du bien-être, maintenant ou dans le futur.

Modèle climatique (spectre ou hiérarchie) : Représentation numérique du système climatique fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus d'interaction et de rétroaction, et qui tient compte d'une partie de ses propriétés connues. Le système climatique peut être représenté par des modèles d'une complexité variable: autrement dit, pour une composante ou une combinaison de composantes donnée, on peut définir un spectre ou une hiérarchie de modèles différant par certains aspects tels que le nombre de dimensions spatiales, le degré de représentation explicite des processus physiques, chimiques ou biologiques, ou le degré d'inclusion de paramétrages empiriques. Les modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) fournissent une représentation d'ensemble du système climatique, qui est une des plus complètes du spectre actuellement disponible. Une évolution se dessine vers des modèles plus complexes à chimie et biologie interactives. Les modèles climatiques sont des outils de recherche pour l'étude et la simulation du climat, ainsi qu'à des fins opérationnelles, notamment pour les prévisions climatiques mensuelles, saisonnières et interannuelles.

N

Niche bioclimatique (enveloppe bioclimatique) : Nous parlons de niche bioclimatique (ou enveloppe bioclimatique) quand la niche écologique d'une espèce est décrite seulement en fonction de variables climatiques (Berteaux et al., 2014).

Niveau de la mer géocentrique : Niveau de la mer en un point précis mesuré par rapport au centre de la Terre (par altimétrie).

Niveau moyen de la mer : Niveau de la surface de l'océan en un point précis pour lequel est établie une moyenne sur une période prolongée, d'un mois ou d'une année par exemple. Ce niveau sert souvent de référence nationale pour établir l'altitude du relief).

Niveau global moyen de la mer : Niveau moyen de la mer moyenné spatialement sur tout le globe.

Niveau relatif de la mer : Niveau de la mer mesuré à l'aide d'un marégraphe par rapport au lieu d'implantation de ce dernier

O

Organisation frontière : Une organisation intermédiaire, un arrangement social ou un réseau qui agit comme un intermédiaire entre la science et la politique.

Obstacle à l'adaptation (voir Barrières)

P

Pergélisol : Sol (terre ou roche incluant de la glace et de la matière organique) qui reste à 0 °C ou moins pendant un minimum de deux années consécutives.

Phénomène climatique extrême ou phénomène météorologique extrême : Phénomène rare à un endroit et un moment de l'année particuliers. Même si les définitions du mot rare varient, un phénomène météorologique extrême devrait normalement se produire aussi rarement, sinon plus, que le dixième ou le quatre-vingt dixième centile de la fonction de densité de probabilité établie à partir des observations. Par définition, les caractéristiques de conditions météorologiques extrêmes peuvent, dans l'absolu, varier d'un lieu à un autre. Lorsque des conditions météorologiques extrêmes se prolongent pendant un certain temps, l'espace d'une saison par exemple, elles peuvent être considérées comme un phénomène climatique extrême, en particulier si elles correspondent à une moyenne ou à un total en lui-même extrême (ex.: une sécheresse ou de fortes pluies pendant toute une saison).

Probabilité : Éventualité d'un résultat particulier, quand il est possible de l'évaluer d'un point de vue probabiliste. Voir aussi Confiance et Incertitude.

Profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) : Scénarios comprenant les séries chronologiques complètes des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre et aérosols, des gaz chimiquement actifs, ainsi que de l'utilisation des terres et de la couverture terrestre (Moss et al., 2008). Ces profils sont représentatifs dans la mesure où ils font partie d'un ensemble de scénarios distincts possibles conduisant à un forçage radiatif aux caractéristiques similaires. On parle de profil d'évolution pour souligner le fait qu'on ne s'intéresse pas seulement aux niveaux de concentration atteints à long terme, mais aussi à la trajectoire suivie pour parvenir à ce résultat.

Projection climatique : Simulation de la réponse du système climatique à un scénario futur d'émissions ou de concentration de gaz à effet de serre et d'aérosols, obtenue généralement à l'aide de modèles climatiques. Les projections climatiques se distinguent des prévisions climatiques par le fait qu'elles sont fonction des scénarios d'émissions, de concentration ou de forçage radiatif utilisés, qui reposent sur des hypothèses concernant, par exemple, l'évolution socioéconomique et technologique à venir, ces hypothèses pouvant se réaliser ou non. Voir aussi Scénario climatique.

Prévision climatique : Une prévision climatique est le résultat d'une tentative d'estimation (à partir d'un état donné du système climatique) de l'évolution réelle du climat à l'avenir, à l'échelle d'une saison, de plusieurs années voire d'une décennie, par exemple. Comme il est possible que l'évolution future du système climatique soit fortement influencée par les conditions initiales, de telles prévisions sont, en général, de nature probabiliste.

R

RCP (voir Profils représentatifs d'évolution de concentration)

Résilience : Capacité des systèmes sociaux, économiques ou écologiques à faire face aux événements dangereux, tendances ou perturbations, à y réagir et à se réorganiser de façon à conserver leurs fonctions essentielles, leur identité et leur structure, tout en maintenant leurs facultés d'adaptation, d'apprentissage et de transformation.

Risque : Conséquences éventuelles et incertaines d'un événement sur quelque chose ayant une valeur, compte dument tenu de la diversité des valeurs. Le risque est souvent représenté comme la probabilité d'occurrence de tendances ou d'événements dangereux que viennent amplifier les conséquences de tels phénomènes lorsqu'ils se produisent. Le risque découle des interactions de la vulnérabilité, de l'exposition et des aléas. Dans le présent rapport, le terme risque sert principalement à désigner les risques liés aux changements climatiques.

Gestion des risques : Les plans, les actions ou les politiques mises en oeuvre pour réduire la probabilité et les conséquences des risques ou pour répondre aux conséquences.

S

Savoir traditionnel : Les connaissances, les innovations et les pratiques des communautés autochtones et locales dans le monde qui sont profondément ancrées dans l'histoire et l'expérience. Le savoir traditionnel est dynamique et s'adapte aux changements culturels et environnementaux, et comporte aussi d'autres formes de savoir et de points de vue. Le savoir traditionnel est généralement transmis oralement de génération en génération. Il est souvent utilisé comme synonyme de savoir autochtone, savoir local, ou savoir traditionnel écologique.

Scénario : Description vraisemblable de ce que nous réserve l'avenir, fondée sur un ensemble cohérent et intrinsèquement homogène d'hypothèses concernant les principales forces motrices (rythme de l'évolution technologique, prix, etc.) et les relations en jeu. Les scénarios ne sont ni des prédictions ni des prévisions, mais permettent cependant de mieux cerner les conséquences de différentes évolutions ou actions.

Scénario climatique : Représentation vraisemblable et souvent simplifiée du climat futur, fondée sur un ensemble intrinsèquement cohérent de relations climatologiques et établie expressément pour déterminer les conséquences possibles des changements climatiques anthropiques, qui sert souvent à alimenter les modèles d'impact. Les projections climatiques servent fréquemment de matière première aux scénarios climatiques, quoique ces derniers nécessitent généralement des informations supplémentaires, par exemple sur le climat actuel observé. Un scénario du changement climatique correspond à la différence entre un scénario climatique et le climat actuel.

Scénario d'émissions : Représentation plausible de l'évolution future des émissions de substances susceptibles d'avoir des effets radiatifs (gaz à effet de serre, aérosols, etc.), fondée sur un ensemble cohérent et homogène d'hypothèses relatives aux éléments moteurs (évolution démographique et socioéconomique, progrès technologique, etc.) et à leurs interactions principales. Les scénarios de concentration, découlant des scénarios d'émissions, servent de données initiales aux modèles climatiques pour le calcul des projections climatiques. Le GIEC a présenté en 1992 un ensemble de scénarios d'émissions qui lui ont servi à établir des projections climatiques (1996). Ces scénarios d'émissions ont été appelés scénarios IS92. Dans le rapport spécial du GIEC consacré aux scénarios d'émissions (Nakićenović et Swart, 2000), de nouveaux scénarios d'émissions, appelés scénarios SRES, ont été publiés, dont certains ont notamment servi de base pour les projections climatiques présentées dans les chapitres 9 à 11 du rapport publié par le GIEC en 2001 et les chapitres 10 et 11 du rapport publié en 2007. De nouveaux scénarios d'émissions associés au changement climatique, à savoir les quatre profils représentatifs d'évolution de concentration, ont été mis au point pour la présente évaluation du GIEC, mais indépendamment de celle-ci. (Voir la partie 1 pour les explications des scénarios SRES et RCP)

T

Troposphère : Partie inférieure de l'atmosphère, s'étendant de la surface de la Terre à environ 10 km d'altitude aux latitudes moyennes (cette altitude variant en moyenne de 9 km aux latitudes élevées à 16 km en zone tropicale), où se forment les nuages et se produisent les phénomènes météorologiques. Dans la troposphère, la température diminue généralement avec l'altitude.

V

Vague de chaleur : Période de conditions atmosphériques anormalement chaudes et désagréables.

Variabilité du climat : Variations de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écarts types, extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles spatiales et temporelles au-delà de la variabilité propre à des phénomènes météorologiques particuliers. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne) ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe).

Vulnérabilité : Propension ou prédisposition à subir des dommages. La vulnérabilité englobe divers concepts ou éléments, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité et l'incapacité de faire face et de s'adapter.

ACRONYMES

AAC : Agriculture et Agroalimentaire Canada
ABE : Adaptation basée sur les écosystèmes
ACIA : Arctic Climate Impact Assessment
AFE : Aménagement forestier écosystémique
AFIC : Association des firmes d'ingénieurs-conseils du Canada
AO : Arctic Oscillation
API : Année polaire internationale
AR : Assessment Report
ASSS : Agence de santé et des services sociaux
ASPC : Agence de la santé publique du Canada
BAC : Bureau d'assurances du Canada
BDC : Base de données canadienne
BIT : Bureau international du travail
BNQ : Bureau de normalisation du Québec
BISE : Bulletin d'information en santé environnementale
CCA : Conseil des académies canadiennes
CAS : Cote air santé
CDB : Convention sur la diversité biologique
CC : Changements climatiques
CCAP : Commission canadienne des affaires polaires
CCM : Chemistry coupled model
CCME : Conseil canadien des ministres de l'environnement
CDC : Centres for Disease Control and Prevention
CEHQ : Centre d'expertise hydrique du Québec
CEN : Centre d'études nordiques, Université Laval
CERIU : Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines
CIRC : Centre international de Recherche sur le Cancer
CMI : Commission mixte internationale
CMIP : Coupled Model Intercomparison Project
CMM : Communauté métropolitaine de Montréal
CMQ : Communauté métropolitaine de Québec
CMP : Crue maximale probable
CNC : Conservation de la Nature Canada
COSEPAC : Comité sur la situation des espèces en péril au Canada
(cQ)2 : Impact des changements climatiques sur l'hydrologie (Q) au Québec
CQRHT : Conseil québécois des ressources humaines en tourisme
CQPF : Conseil québécois de plantes fourragères
CRU : Climatic Research Unit
CSA : Association canadienne de normalisation
CSBQ : Centre de la science de la biodiversité du Québec
CSSS : Centres de santé et des services sociaux
DCCAHA : Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées d'Environnement Canada
DSP : Direction de santé publique
EbA : Ecosystem based adaptation
ECE : Événements climatiques extrêmes

EEA : *European Environmental Agency*
EEE : *Espèce exotique envahissante*
EEN : *Équivalent en eau de la neige*
EME : *Évènement météorologique extrême*
ENAP : *École nationale d'administration publique*
ESAD : *École supérieur d'aménagement du territoire et de développement régional*
ESM : *Earth System Model*
ESMAP : *Energy Sector Management Assistance Program*
FACE : *Free-Air CO2 Enrichment*
FAO : *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*
FCMQ : *Fédération des clubs de motoneigistes du Québec*
FEMA : *Federal Emergency Management Agency*
GES : *Gaz à effet de serre*
GIEC : *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*
GIRE : *Gestion intégrée des ressources en eau*
GIRBa : *Groupe interdisciplinaire de recherche sur les banlieues*
HQ : *Hydro-Québec*
ICAR : *Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale*
ICDC : *Integrated Climate Data Center*
ICLEI : *International Council for Local Environmental Initiatives*
ICU : *îlots de chaleur urbains*
IDF : *courbes statistiques intensité, durée et fréquence des précipitations intenses*
IIED : *International Institute for Environment and Development*
INPES : *Institut national de prévention et d'éducation pour la santé*
INSPQ : *Institut national de santé publique du Québec*
INRS-ETE : *Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement*
IOM : *Institute of Medicine*
IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IRBV : *Institut de recherche en biologie végétale*
IREQ : *Institut de recherche d'Hydro-Québec*
ISFORT : *Institut des Sciences de la Forêt tempérée*
ISQ : *Institut de la statistique du Québec*
ISSCP : *International Satellite Cloud Climatology Project*
LEED : *Leadership in Energy and Environmental Design*
LIDAR : *Light Detection and Ranging*
MADO : *Maladie à déclaration obligatoire au Canada*
MAPAQ : *Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec*
MEA : *Millennium Ecosystem Assessment*
MCI : *Maladies cardiaques ischémiques*
MDDEFP : *Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs*
MDDELCC : *Ministère du développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*
MGC : *Modèles globaux du climat*
MFFP : *Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs*
MFQ : *Ministère de finances du Québec*
MPO : *Pêches et Océans Canada*
MRC : *Modèle régional du climat*
MRCC : *Modèle régional canadien du climat*

MRN : Ministère des Ressources naturelles
MSSS : Ministère de la Santé et des Services sociaux
MSP : Ministère de la Sécurité publique du Québec
MT : Ministère du Tourisme
MTQ : Ministère des Transports du Québec
NARCCAP : North American Regional Climate Change Assessment Program
NASA : National Aeronautics and Space Administration
NAO : North Atlantic Oscillation
NGMM : Niveau global moyen de la mer
NMM : Niveau moyen de la mer
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
NRM : Niveau relatif de la mer
OBV : Organismes de bassins versantes
OECD : Organisation de coopération et de développement économiques
OMS : Organisation mondiale de la Santé
ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
ONGE : Organisation non gouvernementale environnementale
ONUÉH : Programme des Nations Unies pour les établissements humains
PACC : Plan d'action sur les changements climatiques
PACES : Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec
PDE : Plan directeur de l'eau
PDSI : Palmer Drought Severity Index
PIB : Produit intérieur brut
PGO : Pratiques de gestion optimales
PGOSV : Pratiques de gestion optimales à la source végétalisées
PM2.5 : particules fines respirables d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètres
PME : Petites et moyennes entreprises
ppb : parts par milliard
PPRLPI : Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables
PSQA : Programme de surveillance de la qualité de l'air
Qmoy : Débit moyen
RCP : Representative Concentration Pathways
RCIP : Project : Rural Communities Impacting Policy Project
REED : Réseaux entreprises et développement durable
RTA : Rio Tinto Alcan
RTU : Réseaux techniques urbains
ROBVQ : Regroupement des organismes de bassins versants du Québec
SAA : Secrétariat aux affaires autochtones du Québec
SACO : Substances appauvrissant la couche d'ozone
SCBD : Secretariat of the Convention on Biological Diversity
SCDB : Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique
SHQ : Société d'habitation du Québec
SMMR : Scanning Multichannel Microwave Radiometer
SOPFEU : Société de protection des forêts contre le feu
SPC : Sécurité publique Canada

SRES : Special Report on Emissions Scenarios
SREX : Special Report on Extreme Events
SSM/I : Special Sensor Microwave/Image
SUPREME : Système de surveillance et de prévention des impacts sanitaires des événements météorologiques extrêmes
TRNEE : Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie
TNCSE : Table nationale de concertation en santé environnementale
TNC : The Nature Conservancy
TVU : Trame verte urbaine
UKCIP : UK Climate Impacts Programme
UL : Université Laval
UNEP : Programme des Nations Unies pour l'environnement
UNWTO : World Tourism Organization
UQAC : Université du Québec à Chicoutimi
UQAR : Université du Québec à Rimouski
UQAM : Université du Québec à Montréal
UPA : Union des Producteurs Agricoles
UTM : Unités thermique de maïs
UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change
VI&A : Vulnérabilité, Impacts et Adaptation
VNO : Virus du Nil occidental
WHO : World Health Organisation
WMO : World Meteorological Organisation



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

550 Sherbrooke ouest, 19^e étage,
Montréal, Québec, H3A 1B9, Canada.

Tél. : 514-282-6464
Télécopieur : 514-282-7131

www.ouranos.ca