Gouvernement du Canada | Government of Canada

VIVRE AVEC LES **CHANGEMENTS CLIMATIQUES** AU **CANADA :**

perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation



Canada

Gouvernement du Canada | Government of Canada

VIVRE AVEC LES **CHANGEMENTS CLIMATIQUES** AU **CANADA :**

perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation

Canada

Éditeurs :

F.J. Warren et D.S. Lemmen
Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques
Ressources naturelles Canada

Citation recommandée :

Warren, F.J. et D.S Lemmen (éd.) *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, 286p.

Cette publication est aussi disponible via le site web suivant :
adaptation.rncan.gc.ca

Also available in English under the title: Canada in a Changing Climate: Sector Perspectives on Impacts and Adaptation

Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à **droitdauteur.copyright@rncan-nrcan.gc.ca**.

N° de cat. : M174-2/2014F (Imprimé)
ISBN : 978-0-660-22250-9

N° de cat. : M174-2/2014F-PDF (En ligne)
ISBN : 978-0-660-22251-6

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre des Ressources naturelles, 2014

Cette évaluation est un produit de la Plateforme d'adaptation du Canada, qui rassemble des représentants du gouvernement, de l'industrie et des organisations professionnelles, afin qu'ils collaborent aux priorités en matière d'adaptation. Veuillez visiter le lien ci-dessous afin d'obtenir plus d'information au sujet de la Plateforme d'adaptation, et afin de télécharger de nouveaux produits, y compris des études de cas, des outils d'adaptation, des documents d'orientation et des rapports :

adaptation.rncan.gc.ca

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes suivantes pour leurs conseils, leur soutien et leur contribution tout au long du processus en tant que membres de la Commission d'experts d'évaluation :

Alain Bourque (Ouranos)
Paul Kovacs (Institut de prévention des sinistres catastrophiques)
Jimena Eyzaguirre (ESSA Technologies Ltd.)
Linda Mortsch (Environnement Canada)
Terry Robert (Fraser Basin Council)
Eric Schroff (Gouvernement du Yukon)

Nous remercions aussi les personnes suivantes pour prendre le temps de fournir des critiques, avis d'experts d'un ou plusieurs chapitres du rapport :

Zeba Ali
Shareen Amin
Faron Anslow
Michel Archambault
Kumiko Azetsu-Scott
Marie-Caroline Badjeck
Jim Barnes
Pierre Bernier
Peter Berry
Dominique Berteaux
Sébastien Biner
Danny Blair
Anne Blondlot
Marie-Eve Bonneau
Jeff Bowman
Joan Brunkard
Christopher Bryant
Sarah Burch
Brent Burton
Elizabeth Bush
Leah Carson
Norm Catto
Ginger Chew
Quentin Chiotti
James Christian
Jenna Craig
Jennifer Davis
Jackie Dawson
Ramon De Elia
Brad de Young
Claude Desjarlais
Thea Dickinson
Susan Doka
Al Douglas
Claude Duguay
Megan Duncan
Caren Dymond
Kris Ebi
Susan Evans
Jimena Eyzaguirre
Wayne Fan
Paul Fesko
Manon Fleury
Don Forbes
James Ford
Jenny Fraser
John Fyfe
Fawziah (ZuZu) Gadallah
Sylvie Gauthier
Pierre Gosselin
Stephanie Gower
Gloria Gutman
Mark Haines
Charles Hannah
Norm Henderson
Ole Hendrickson
Joseph Henton
Karen Hodges
Jane Inch
Mark Johnston
Sarah Kalff
Pam Kertland
Heather Kharouba
Paul Kovacs
François Lalonde
Van Lantz
David Lapp
Caroline Larrivée
Diane Lavoie
Wendy Leger
Chris Lemieux
George Luber
Sharon Ludlow
Jim MacLellan
Dan McKenney
Ian McLachlan
Maria Mirabelli
M. Monirul Mirza
Wendy Monk
Ana Rosa Morena
Nathalie Morin
Toni Morris-Oswald
Linda Mortsch
Marc Nelitz
Elizabeth Nelson
Marie-Eve Neron
Dirk Nyland
Sarah O'Keefe
Kenneth Olsen
Robert Page
Kathy Palko
Lynne Patenaude
Ian Perry
Eva Riccius
Jake Rice
Gregory Richardson
Dieter Riedel
John Rislahti
Susan Roberecki
Jeanne Robert
Terry Robert
Alex Rosenberg
Vincent Roy
Dave Sauchyn
Paul Schramm
Eric Schroff
Ryan Schwartz
Robert Siron
Risa Smith
Chuck Southam
Tim Takaro
Jason Thistlethwaite
Matthew Wiens
Mary-Ann Wilson
Hannah Wittman
Rebecca World
Fuyuen Yip
Terry Zdan
Xuebin Zhang

Ce rapport n'aurait pu être réalisé sans l'aide de nos étudiants. Nous tenons à reconnaître les élèves suivants pour leur dévouement au travail, l'attention au détail et la positivité indéfectible :

Stéphanie Elias
Adam Garbo
Dong Young Lee
Laurisse Noël
Cynthia Smith

TABLE DES MATIÈRES

Synthèse 1
F.J. Warren et D.S. Lemmen

Chapitre 1 : Introduction 19
F.J. Warren et D.S. Lemmen

Chapitre 2 : Un aperçu des changements climatiques au Canada 23
Principaux auteurs : E.J. Bush, J.W. Loder, T.S. James, L.D. Mortsch et S.J. Cohen

Chapitre 3 : Ressources naturelles 65
Principaux auteurs : D.S. Lemmen, M. Johnston, C. Ste-Marie et T. Pearce

Chapitre 4 : La production alimentaire 99
Principaux auteurs : I.D. Campbell, D.G. Durant, K.D. Hyatt et K.L. Hunter

Chapitre 5 : Industrie 135
Principaux auteurs : P. Kovacs et J. Thistlethwaite

Chapitre 6 : Biodiversité et aires protégées 159
Principaux auteurs : P. Nantel, M.G. Pellatt, K. Keenleyside et P. A. Gray

Chapitre 7 : Santé humaine 191
Principaux auteurs : P. Berry, K.-L. Clarke, M.D. Fleury et S. Parker

Chapitre 8 : Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport 233
Principaux auteurs : J. Andrey, P. Kertland et F.J. Warren

Chapitre 9 : Adaptation : établir un lien entre la recherche et la pratique 253
Principaux auteurs : J. Eyzaguirre et F.J. Warren

SYNTHÈSE

Principaux auteurs :

Fiona J. Warren et **Donald S. Lemmen** *(Ressources naturelles Canada)*

Citation recommandée :

Warren, F.J. et D.S. Lemmen. « Synthèse », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 1-18.

RÉSUMÉ

Ces cinq dernières années, les résultats de nouvelles recherches et l'acquisition d'expérience pratique nous ont permis de mieux comprendre les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques au Canada. Suivent certaines des principales conclusions de la présente mise à jour du rapport d'évaluation de 2008 intitulé *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* :

1. Le climat du Canada change et on observe des variations de la température de l'air, des précipitations, de la couverture de neige et de glace et d'autres indicateurs. D'autres changements d'ordre climatique sont inévitables.
2. Les changements d'ordre climatique ont un effet de plus en plus important sur le milieu naturel, les secteurs économiques du Canada et la santé des Canadiens.
3. Les phénomènes météorologiques extrêmes constituent l'une des préoccupations majeures du Canada et nous sommes de plus en plus persuadés que certains phénomènes météorologiques extrêmes deviendront soit plus fréquents, soit plus marqués, ou les deux, à mesure que le climat continuera de se réchauffer.
4. Il est convenu que l'adaptation constitue un élément indispensable de réaction aux changements climatiques, venant compléter les mesures prises à l'échelle mondiale en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'adaptation permet d'améliorer la résilience sociale et économique des Canadiens aux répercussions des changements climatiques.
5. On a de plus en plus fréquemment recours aux mesures d'adaptation qu'un engagement accru suscite. La poursuite de ces efforts permettra de renforcer la capacité, de tenir compte des besoins en matière de renseignements et de relever les défis.
6. L'adaptation peut parfois convertir les risques en possibilités, et les possibilités en avantages.
7. La collaboration et la gestion adaptative sont des méthodes de plus en plus adoptées par les gouvernements et l'industrie afin de promouvoir l'adaptation.

INTRODUCTION

Le climat change, tant au Canada que partout ailleurs dans le monde. À l'échelle mondiale, les évaluations internationales confirment l'augmentation des températures de l'air et des océans, la modification de la configuration des précipitations, la fonte des glaciers, la diminution de la couverture de neige et de l'étendue de la glace de mer, l'élévation du niveau de la mer et l'évolution des phénomènes extrêmes (GIEC, 2013). Tandis que la vitesse des changements varie d'un indicateur à l'autre, la nature des changements va de pair avec le réchauffement climatique, et les modèles climatiques prévoient que bon nombre des tendances observées se poursuivront au cours des prochaines décennies et au-delà. Il est essentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES; atténuation) si l'on veut parvenir à atténuer l'ampleur et la vitesse des changements climatiques mais, en raison de l'inertie du système climatique, d'autres répercussions sont inévitables, même en ayant recours à des mesures d'atténuation agressives à l'échelle mondiale. Par conséquent, nous devons également nous adapter, accorder nos activités et nos décisions afin de réduire les risques, de limiter les dommages et de tirer profit des nouvelles possibilités. Tous les ordres de gouvernement, les chercheurs, les organisations du secteur privé et les organisations non gouvernementales considèrent désormais l'adaptation comme un complément essentiel de l'atténuation.

En 2008, le gouvernement du Canada a publié une évaluation scientifique d'envergure nationale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques (*Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*). Cette évaluation s'est servie d'une approche régionale dans le but d'analyser les répercussions des changements climatiques et les vulnérabilités aux changements climatiques actuelles et futures au Canada, ainsi que les possibilités d'adaptation. Elle s'appuyait sur les conclusions de la première évaluation d'envergure nationale du Canada (*Étude pancanadienne*, 1998) et tirait ses conclusions de tous les documents pertinents disponibles.

Le présent rapport, *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, est une mise à jour de l'évaluation de 2008. Il a tout particulièrement recours aux nouveaux renseignements et connaissances, tirés pour la plupart de documents publiés jusqu'à la fin de 2012, pour évaluer les progrès réalisés en matière de compréhension des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques d'un point de vue sectoriel. Cette synthèse s'appuie sur chacun des chapitres du rapport, qui présentent pour l'un un aperçu des changements climatiques au Canada (ch. 2), et pour d'autres une perspective thématique portant sur les secteurs (ch. 3 à 8), et sur la conclusion, qui traite de la recherche et de la pratique en matière d'adaptation (ch. 9). Les principales conclusions des chapitres 3 à 9 sont résumées dans l'encadré 1. Le reste de la synthèse s'articule autour de conclusions de haut niveau, soutenues par des observations et des exemples tirés d'une analyse intégrative des thèmes présentés dans le rapport[1].

[1] La présente synthèse ne répète pas les références fournies dans les chapitres en question, mais renvoie le lecteur aux chapitres du rapport présentant des références particulières. Des références particulières sont parfois incluses lorsque la source n'a pas été citée dans un autre chapitre ou pour apporter des précisions supplémentaires.

ENCADRÉ 1

PRINCIPALES CONCLUSIONS TIRÉES DES CHAPITRES

Ressources naturelles (foresterie, énergie et exploitation minière, chapitre 3)

- Les changements climatiques aggraveront les risques climatiques actuels liés à la planification et à la gestion des ressources naturelles. Ces risques sont liés aux répercussions et aux catastrophes naturelles associées aux conditions météorologiques extrêmes (p. ex., chaleur, froid, précipitations) et aux changements progressifs comme la dégradation du pergélisol, l'élévation du niveau de la mer et la migration des espèces végétales. Les changements climatiques offriront également de nouvelles possibilités aux secteurs des ressources naturelles, particulièrement en ce qui a trait au développement économique du Nord.
- Afin de mieux comprendre comment fonctionne l'adaptation au niveau des secteurs des ressources naturelles, il est essentiel de tenir compte des multiples facteurs de stress. Les changements climatiques en tant que tels sont rarement élevés au rang des priorités, car les entreprises mettent davantage l'accent sur d'autres facteurs de stress immédiats tels les facteurs économiques. Il existe des occasions d'intégrer les considérations de l'incidence des changements climatiques aux processus de planification actuels.
- L'évaluation environnementale, la divulgation des risques et les rapports concernant l'aménagement forestier durable comptent parmi les exemples de processus qui peuvent contribuer à promouvoir les mesures d'adaptation. Ces processus permettent aux gouvernements, aux investisseurs et au public d'évaluer le niveau de compréhension des industries en ce qui a trait aux risques associés aux changements climatiques, et d'exercer une influence sur les mesures prises pour les atténuer.
- Bien que la prise de conscience quant aux répercussions des changements climatiques et la mise en œuvre des mesures d'adaptation ne fassent aucun doute au sein des secteurs où l'on observe clairement un lien direct entre le climat et l'approvisionnement en ressources, notamment dans les domaines de la foresterie et de l'hydroélectricité, le recours aux méthodes de gestion adaptative visant à atténuer les répercussions des changements climatiques est néanmoins manifeste dans l'ensemble des secteurs des ressources naturelles.

Production alimentaire (chapitre 4)

- Les répercussions des changements climatiques varient grandement au sein des secteurs de l'agriculture, des pêches et de l'approvisionnement alimentaire non commercial, mais les défis communs comprennent les pertes accrues causées par les ravageurs envahissants et les maladies, ainsi que les risques pour les systèmes de transport dont dépendent les secteurs.
- Selon les perspectives nettes à moyen terme, on prévoit une légère augmentation de la production alimentaire agricole. Des saisons de croissance plus longues et plus chaudes permettraient de cultiver à de plus hautes latitudes des cultures de plus grande valeur et exigeant des températures plus élevées (où les conditions du sol le permettent), d'allonger les saisons d'alimentation à l'extérieur du bétail et d'étendre la production du sirop d'érable vers le nord. Cependant, il est probable que de nouvelles espèces de ravageurs et de nouvelles maladies feront leur apparition et que des épidémies plus importantes des ravageurs actuels se produiront, ainsi que des défis associés aux phénomènes météorologiques extrêmes et à la capacité de prévision limitée de la variation météorologique interannuelle, soit une situation qui aurait une incidence négative sur la production.
- Les collectivités nordiques et éloignées remarqueront probablement d'importants changements dans leur environnement – certains allégeront les préoccupations relatives à la sécurité alimentaire, alors que d'autres pourraient aggraver la diminution des stocks d'aliments prélevés dans la nature et les difficultés à approvisionner les secteurs isolés.
- On prévoit que le Canada demeurera un exportateur net d'aliments d'origine marine dans l'ensemble, et que la biomasse totale de production provenant de la pêche de capture sauvage au Canada augmentera, en raison de changements dans la répartition des espèces de poisson provoqués par le climat. Les répercussions régionales attribuables aux espèces envahissantes, les changements physiques de l'habitat et les réactions de la société aux changements dans la disponibilité et l'accessibilité des ressources alimentaires aquatiques détermineront peu à peu les modèles d'utilisation futurs et les répercussions économiques globales.
- L'aquaculture présente de meilleures possibilités d'adaptation aux changements climatiques que les autres modes de pêches, ce qui la rend moins vulnérable et en meilleure posture que la pêche de capture, particulièrement la pêche de subsistance, pour tirer profit des possibilités qui se présentent.

Encadré 1 suite à la page suivante

Industrie (chapitre 5)

- L'activité industrielle est tributaire des variations climatiques et des événements extrêmes; le type et l'ampleur des répercussions sur la production, les activités et le revenu varient considérablement, tant entre les différents secteurs qu'au sein d'une même industrie.
- Les pratiques de l'industrie ont, jusqu'à présent, surtout été modifiées à la suite d'un changement climatique ou d'événements extrêmes, plutôt qu'en prévision des futurs changements climatiques. Les exemples d'adaptation représentent l'exception, plutôt que la norme, dans le secteur.
- Les mesures d'adaptation mises en œuvre varient d'un secteur à l'autre et pourraient n'être qu'en partie déclarées pour des raisons stratégiques. Par rapport aux autres secteurs, les secteurs du tourisme et de l'assurance semblent les plus prometteurs en ce qui concerne le recours aux mesures d'adaptation pour tirer profit des éventuelles possibilités.
- Il existe peu de publications sur les effets indirects qu'entraînent les changements climatiques sur l'industrie, notamment en ce qui concerne la demande exprimée par les consommateurs, la chaîne d'approvisionnement, l'immobilier et les autres actifs, l'adaptation des autres secteurs, les responsabilités légales ou les règlements administratifs.
- Le manque d'information sur les répercussions à l'échelle locale pour les entreprises, les incertitudes quant aux coûts et aux avantages des différentes mesures d'adaptation, et la faible demande en matière de leur mise en œuvre constituent autant de freins à l'adaptation.

Biodiversité et aires protégées (chapitre 6)

- Les variations de la répartition des espèces qui sont induites par le climat ont été documentées pour les plantes et les animaux au Canada. À plusieurs endroits, ces variations au niveau des aires de répartition vont probablement entraîner la formation de nouveaux écosystèmes ayant des ensembles d'espèces, des attributs structurels et des fonctions écologiques différents des écosystèmes existants.
- Les changements environnementaux actuels et prévus dépassent la capacité d'adaptation naturelle de certaines espèces, en intensifiant le stress qu'elles subissent, ce qui menacera la biodiversité. Par conséquent, les changements climatiques amplifient l'importance de gérer les écosystèmes d'une manière susceptible d'améliorer la résilience et de protéger la biodiversité.
- Les aires protégées, notamment les parcs, les réserves fauniques et les zones marines protégées, joueront un rôle important dans la conservation de la biodiversité en offrant aux espèces indigènes un « refuge » ou des couloirs de migration, dont la fonction consiste à conserver la diversité génétique.
- Bon nombre de provinces canadiennes élargissent leur réseau de parcs et d'aires protégées dans le cadre de leur plan global de gestion et de leurs stratégies d'adaptation aux changements climatiques. La recherche connexe, la surveillance, la science grand public, la sensibilisation du public et les programmes d'expérience du visiteur favorisent la compréhension, mobilisent le public et l'aide à participer au processus décisionnel.
- La restauration écologique peut renforcer la résilience face aux changements climatiques. L'intégration des stratégies d'adaptation aux changements climatiques au processus décisionnel concernant la restauration est complexe, au Canada comme ailleurs.

Santé humaine (chapitre 7)

- Depuis 2008, les données démontrent de plus en plus la vaste gamme de risques sanitaires imputables aux changements climatiques auxquels sont exposés les Canadiens. Par exemple, les maladies liées au climat (telles que la maladie de Lyme) et les vecteurs progressent en direction du nord au Canada et devraient continuer à gagner du terrain. En outre, de nouvelles études semblent indiquer que les changements climatiques aggraveront les problèmes de pollution atmosphérique dans certaines régions du pays. Une plus grande réduction des émissions de contaminants atmosphériques pourrait cependant compenser les changements induits par le climat sur les niveaux d'ozone troposphérique et de particules en suspension.
- Les collectivités restent exposées à un certain nombre de dangers naturels liés au climat qui poseront de plus en plus de risques pour la santé future. Les inondations et les feux de friches survenus récemment ont gravement touché les collectivités en détruisant les infrastructures et en obligeant la population à se déplacer.
- De nombreuses mesures d'adaptation sont mises en œuvre de l'échelle locale à l'échelle nationale afin d'aider les Canadiens à se préparer en vue de faire face aux effets sur la santé des changements climatiques. La planification de l'adaptation tient compte des causes sous-jacentes de la vulnérabilité de la santé, qui varient au sein des collectivités urbaines, rurales, côtières et nordiques.
- Les autorités sanitaires locales, territoriales et provinciales se familiarisent de plus en plus avec les changements climatiques et les risques sanitaires au moyen d'évaluations et d'études ciblées. Certaines administrations ont d'ailleurs commencé à inclure les enjeux relatifs aux changements climatiques dans leurs politiques et leurs programmes de santé. Les efforts visant à accroître la sensibilisation du public aux moyens d'atténuer les risques sanitaires liés au climat sont également évidents.
- Les mesures et les outils d'adaptation, tels que les systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur, les projections relatives à l'expansion des maladies à transmission vectorielle et l'écologisation des milieux urbains, peuvent contribuer à protéger les Canadiens des effets actuels et futurs des changements climatiques.

Encadré 1 suite à la page suivante

Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport (chapitre 8)

- Une infrastructure bien entretenue résiste mieux aux changements climatiques. C'est d'autant plus vrai face aux changements graduels des variations de températures et de précipitations. Les répercussions des phénomènes météorologiques extrêmes, qui constituent les principaux facteurs de vulnérabilité, peuvent mettre l'infrastructure hydraulique à rude épreuve.
- Ces cinq dernières années, le travail effectué par le Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) a permis de mieux comprendre les infrastructures du Canada et de les adapter aux changements climatiques. Le protocole d'évaluation axé sur les risques mis au point par le CVIIP a une portée générale et permet aux ingénieurs et aux planificateurs d'observer et de traiter les changements climatiques comme un parmi tant d'autres facteurs ayant une incidence sur la résilience du système, et d'agir en conséquence.
- La prise en considération des changements climatiques dans la gestion adaptative des ressources permet de mieux tenir compte des facteurs climatiques au niveau de la surveillance continue du système, et de prendre des décisions éclairées sur les approches les plus rentables en matière de conception, d'exploitation et d'entretien d'infrastructures.
- Bien que les codes, normes et autres instruments (CNAI) soient considérés comme un important outil potentiel d'adaptation de l'infrastructure, rares sont les exemples de CNAI au Canada qui ont été élaborés en tenant compte des changements climatiques passés ou futurs. Les risques climatiques actuels et futurs qui pèsent sur les systèmes d'infrastructures doivent faire l'objet d'une analyse approfondie afin d'aider à établir la nature des changements requis pour procéder à l'élaboration de codes et des normes qui tiennent compte des changements climatiques.

Adaptation : établir un lien entre la recherche et la pratique (chapitre 9)

- Des mesures d'adaptation sont entreprises au Canada afin d'atteindre toute une série d'objectifs, par exemple, renforcer la capacité d'adaptation, améliorer la résilience à certains phénomènes climatiques (surtout aux phénomènes climatiques extrêmes) et accroître la capacité de gérer les différentes conditions climatiques. De tous les secteurs, ceux qui démontrent une sensibilité et une exposition marquées aux aléas climatiques sont habituellement ceux qui s'emploient le plus activement à prendre des mesures en vue de comprendre, d'étudier et de gérer la vulnérabilité et les risques liés aux changements climatiques.
- L'adaptation n'est plus seulement un enjeu local, bien que les exemples à l'échelle municipale semblent être les plus nombreux. Il existe des mesures adoptées par tous les ordres de gouvernement, les groupes communautaires et l'industrie, dont la plupart représentent des initiatives de collaboration.
- La compréhension des obstacles et des difficultés liés à l'adaptation s'est améliorée, tout en réalisant qu'il faut tenir compte de facteurs autres que les déterminants fondamentaux de la capacité adaptative. Par conséquent, le niveau de compréhension, en ce qui concerne la façon de surmonter les principaux obstacles et de faciliter l'adaptation, s'est améliorée.
- La mise en place des mesures d'adaptation au Canada n'en est qu'à ses débuts. Les exercices de planification et d'élaboration de politiques, et les efforts entrepris pour renforcer la capacité et accroître la sensibilisation représentent la majorité des mesures d'adaptation documentées. On note qu'il y a relativement peu d'exemples documentés de mise en œuvre de changements particuliers dans le but de réduire la vulnérabilité aux éventuels changements climatiques, et qu'on ne profite pas des possibilités qui se présentent.
- Plusieurs facteurs peuvent contribuer à accélérer la transition entre la prise de conscience et la mise en place de mesures, notamment un leadership, des campagnes de sensibilisation ciblées et des stratégies ou des politiques de soutien. Le fait de vivre des phénomènes météorologiques extrêmes et d'être témoin des effets des changements graduels, comme l'élévation du niveau de la mer, contribue également à stimuler le recours aux mesures d'adaptation.

LE CLIMAT DU CANADA CHANGE ET ON OBSERVE DES VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR, DES PRÉCIPITATIONS, DE LA COUVERTURE DE NEIGE ET DE GLACE ET D'AUTRES INDICATEURS. D'AUTRES CHANGEMENTS D'ORDRE CLIMATIQUE SONT INÉVITABLES (CHAPITRE 2).

Ces soixante dernières années, le climat s'est réchauffé au Canada, avec une augmentation des températures moyennes à la surface de la terre de 1,5 °C entre 1950 et 2010 (figure 1). Cette vitesse de réchauffement représente à peu près le double de la moyenne mondiale rapportée pour la même période par Hartmann *et al.*, 2013. Le réchauffement se produit même plus rapidement dans certaines régions du nord du Canada et se manifeste à toutes les saisons, bien que le réchauffement le plus important se produise en hiver et au printemps. Le nombre de journées extrêmement chaudes par an a également augmenté, tandis que le nombre de nuits froides a diminué. Le tableau 1 donne des exemples de changements documentés au Canada pour plusieurs indicateurs du système climatique.

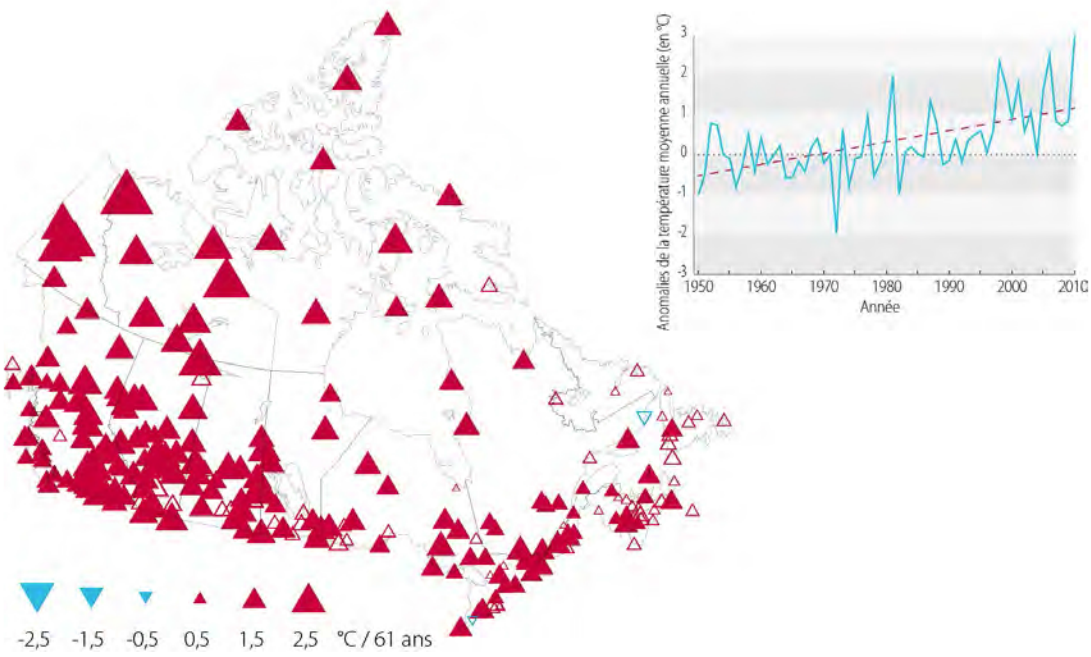


FIGURE 1 : Modèles de la variation de la température moyenne annuelle au Canada au cours de la période s'étendant de 1950 à 2010. Les triangles orientés vers le haut (en rouge) et orientés vers le bas (en bleu) indiquent les tendances positives et négatives, respectivement. Les triangles pleins illustrent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 % *(source : Vincent et al., 2012)*. ***Encart*** : Variation de la température moyenne annuelle (en °C) enregistrée au Canada entre 1950 et 2010, par rapport à la température moyenne annuelle enregistrée durant la période s'étendant de 1961 à 1990 (représentée par 0 sur l'axe des ordonnées) *(source : Vincent et al., 2012; Environnement Canada, 2011)*.

Élément du système climatique	Tendances observées
Température	
Température annuelle de l'air – Canada	La température moyenne annuelle de l'air à la surface de la masse terrestre canadienne a subi une hausse de 1,5 °C au cours de la période s'étendant de 1950 à 2010
Températures extrêmes	
Températures extrêmement chaudes – Canada	La fréquence des journées chaudes (lorsque la température maximale quotidienne est supérieure au 90e percentile quotidien) en été accuse une augmentation à l'échelle nationale depuis 1950
Températures extrêmement froides – Canada	La fréquence des nuits froides (lorsque la température minimale quotidienne est inférieure au 10e percentile quotidien) en hiver accuse une baisse à l'échelle nationale depuis 1950
Précipitations et autres indicateurs hydrologiques	
Précipitations annuelles – Canada	Le Canada est devenu de façon générale plus humide ces dernières décennies, comme l'indique la tendance à la hausse des précipitations annuelles moyennes
Chutes de neige/de pluie – sud du Canada	Plusieurs régions du sud du Canada ont subi une variation du type de précipitations caractérisée par une baisse des chutes de neige et une hausse des chutes de pluie.
Écoulement fluvial – Canada	Les observations semblent indiquer des tendances à la baisse des écoulements fluviaux maximum et minimum au cours de la période s'étendant de 1970 à 2005 dans une bonne partie du sud du Canada, mais des hausses des écoulements minimum dans l'ouest du Nunavut, les Territoires du Nord-Ouest, le Yukon et le nord de la Colombie-Britannique
Chutes de neige – Canada	Les chutes de neige annuelles ont diminué dans la majeure partie du sud du Canada et ont augmenté dans le nord du Canada au cours des soixante dernières années
Couverture neigeuse – Canada	Des tendances négatives en ce qui concerne la couverture neigeuse ont été observées au printemps à la surface de la masse terrestre canadienne; les plus fortes diminutions se produisant en juin
Pergélisol	
Température du sol – Canada	Les températures du pergélisol relevées dans de nombreux trous de sonde partout au Canada ont augmenté au cours des vingt à trente dernières années
Niveau de la mer	
Niveau de la mer – mondial	Le niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale a augmenté d'environ 21 cm entre 1880 et 2012 à une vitesse moyenne de 1,6 mm/an
Niveau relatif de la mer – Canada	Une élévation du niveau relatif de la mer de plus de 3 mm/an a été observée le long des lignes de côte du Canada atlantique et de la mer de Beaufort, les niveaux les plus faibles ayant été relevés le long de la côte du Pacifique; une baisse du niveau relatif de la mer de 10 mm/an a été observée autour de la baie d'Hudson, où la terre s'élève rapidement en raison du relèvement postglaciaire
Glace de mer	
Étendue de la glace saisonnière – Arctique	L'étendue minimale de la glace à la fin de l'été a diminué de 13 % par décennie au cours de la période s'étendant de 1979 à 2012, tandis que l'étendue maximale de la glace de mer en hiver a diminué de 2,6 % par décennie
Type de glace – Arctique	Le type de couverture de glace a subi un changement, passant d'une couverture dominée par une glace épaisse pluriannuelle à une couverture de plus en plus dominée par une glace fine de première année
Est du Canada	Des diminutions de l'étendue de la glace de mer ont été observées dans la région de Terre-Neuve-et-Labrador et la région du golfe du Saint-Laurent
Glaciers	
Masse glaciaire – Yukon, Colombie-Britannique, Alberta	Les glaciers de la Cordillère nord-américaine perdent de leur masse, diminuent rapidement et n'ont pas subi de fonte aussi importante depuis plusieurs millénaires; les glaciers en Colombie-Britannique et en Alberta ont perdu respectivement 11 et 25 % de leur surface émergée au cours de la période s'étendant de 1985 à 2005, tandis que les glaciers au Yukon ont perdu environ 22 % de leur surface émergée depuis 1950.
Masse glaciaire – Extrême Arctique	Des bilans massiques négatifs significatifs se remarquent depuis le début des années 1960 jusqu'à la première décennie du XXIe siècle; le taux de perte massique des glaciers de l'ensemble de l'Extrême Arctique augmente considérablement depuis 2005, en raison du réchauffement des températures estivales dans la région
Glace de lac et de rivière	
Fonte de la glace au printemps – Canada	Des tendances de fonte de la glace (lacs) et de débâcle de la glace (rivières) précoces sont observées dans la majeure partie du pays depuis le milieu du XXe siècle, mais sont particulièrement évidentes dans l'ouest du Canada
Climat océanique	
Océans du Canada	Des variations à long terme de la température des océans (en hausse), de la salinité (variable) et de l'acidité (en hausse) ont été observées dans les trois océans bordant le Canada; des diminutions à long terme de la teneur en oxygène dissous en subsurface ont également été observées dans l'océan Atlantique et l'océan Pacifique au large du Canada

TABLEAU 1 : Exemples de changements observés au Canada (tirés du chapitre 2). La durée des relevés d'observation varie en fonction de l'indicateur.

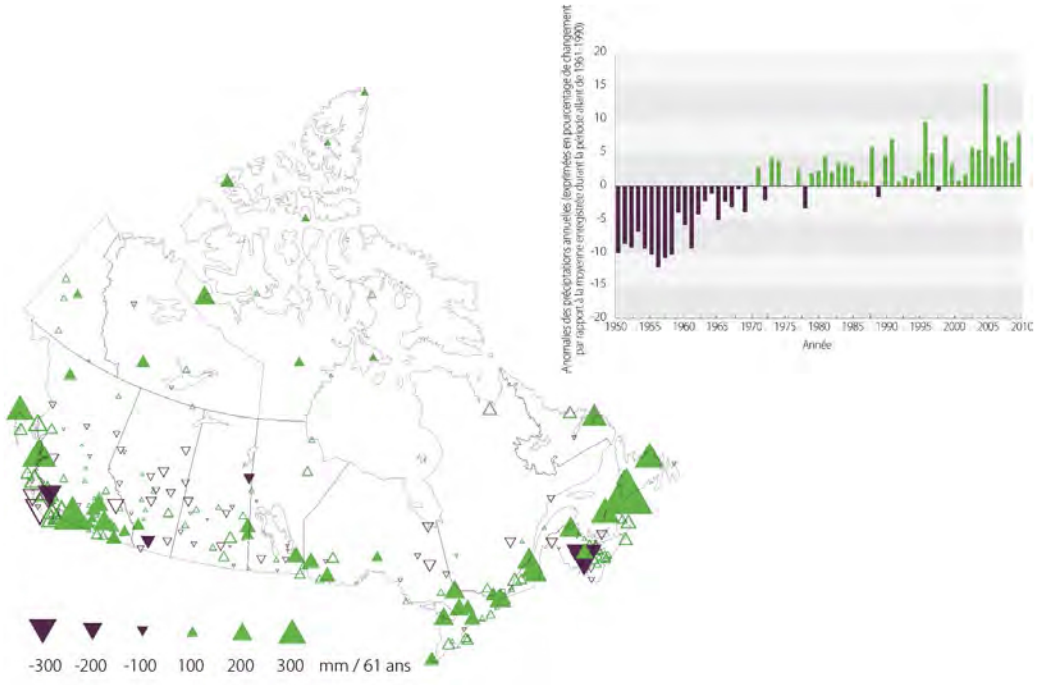


FIGURE 2 : Modèles de la variation des précipitations annuelles au cours de la période s'étendant de 1950 à 2010. Les triangles orientés vers le haut (en vert) et orientés vers le bas (en marron) indiquent les tendances positives et négatives, respectivement. Les triangles pleins illustrent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 % *(source : Mekis et Vincent, 2011b)*. *Encart* : Anomalies des précipitations annuelles (exprimées en pourcentage de variation par rapport à la moyenne enregistrée durant la période s'étendant de 1961 à 1990) au Canada, de 1950 à 2010 *(source : Mekis et Vincent, 2011a; Environnement Canada, 2011)*.

Au cours de la même période (1950 à 2010), le Canada est devenu dans l'ensemble plus humide, avec des tendances à la hausse des précipitations moyennes annuelles dans de nombreuses régions et dans l'ensemble du pays (figure 2). Les tendances des précipitations annuelles sont moins uniformes à la surface de la masse terrestre canadienne que celles de la température annuelle de l'air. Tandis que d'importantes variations des précipitations extrêmes ont été observées dans certaines régions du pays, aucun modèle cohérent ne se manifeste à l'échelle de l'ensemble du pays.

Des tendances ont également été observées en ce qui concerne d'autres indicateurs climatiques au Canada (*voir* le tableau 1). L'Arctique a connu une diminution rapide de la couverture de glace de mer, en été comme en hiver (figure 3). De plus, les chutes de neige ont diminué dans le sud du Canada, tandis que la couverture neigeuse fond plus tôt au printemps et que l'étendue des glaciers diminue dans l'ouest du Canada et l'Arctique.

À l'échelle mondiale, le niveau de la mer a augmenté au cours du siècle dernier en raison de la hausse des températures des océans (dilatation thermique) et de la fonte des glaciers, des calottes glaciaires et des inlandsis. Le mouvement terrestre vertical a une forte incidence sur la dynamique à l'échelle régionale de l'élévation du niveau de la mer le long des côtes canadiennes, se traduisant par une élévation rapide du niveau de la mer à certains endroits où la terre s'affaisse et par une baisse à certains endroits où la terre se soulève (*voir* le tableau 1).

D'autres changements d'ordre climatique sont inévitables. En moyenne, des températures plus élevées et des chutes de pluies plus abondantes sont attendues dans l'ensemble du pays, conjuguées à une augmentation des phénomènes de chaleur extrême et de pluies abondantes, et une diminution de la couverture de neige et de glace. Le niveau de la mer le long de nombre de nos côtes continuera de s'élever, et les tendances accrues au réchauffement des eaux et à l'acidification des océans devraient se faire de plus en plus manifestes dans la plupart des eaux océaniques canadiennes au cours des cents prochaines années. Un aperçu des changements prévus pour certains indicateurs climatiques au Canada est présenté dans le tableau 2[2].

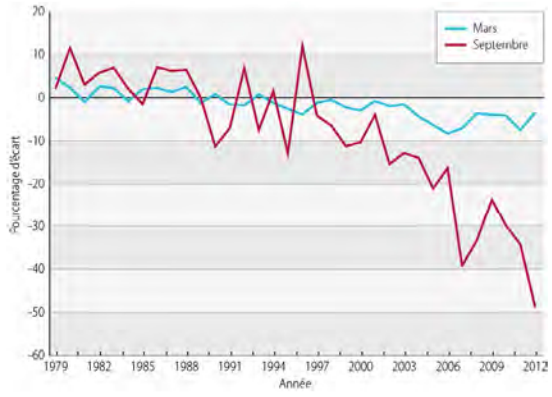


FIGURE 3 : Tendances de l'étendue de la glace de mer arctique durant la période s'étendant de 1979 à 2012 présentées sous forme de séries temporelles des écarts exprimés en pourcentage de l'étendue de la glace en mars et en septembre, par rapport aux moyennes enregistrées pour la période s'étendant de 1979 à 2000. Les deux tendances sont statistiquement significatives *(source : Perovich et al., 2012)*.

[2] Tandis que les changements présentés dans le tableau 2 s'appuient sur les prévisions de changement climatique communément utilisées jusqu'en 2012, ils concordent sensiblement avec les résultats fondés sur les prévisions plus récentes (telles que celles utilisées dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC).

Température	Changements prévus
Température saisonnière	Le réchauffement sera plus important en hiver et, à cette saison, le nord du Canada devrait connaître les hausses les plus importantes de la température de l'air; en été, le sud du Canada et la région centrale intérieure devraient connaître les hausses les plus importantes de la température de l'air (l'ampleur du réchauffement prévu varie de façon considérable en fonction du scénario d'émissions)
Températures extrêmes quotidiennes	Le XXI[e] siècle devrait être marquée par une hausse de la fréquence et de l'ampleur des journées et des nuits anormalement chaudes et une baisse de la fréquence et de l'ampleur des journées et des nuits anormalement froides
Phénomènes de chaleur prolongée	La durée, la fréquence et/ou l'intensité des vagues de chaleur devraient augmenter dans la plupart des masses territoriales, y compris le Canada
Températures extrêmement chaudes rares	Les températures extrêmement chaudes rares devraient devenir plus fréquentes; par exemple, une journée de chaleur extrême à période de récurrence de vingt ans se manifesterait plutôt à tous les cinq ans dans la majeure partie du Canada d'ici le milieu du siècle
Précipitations et autres indicateurs hydrologiques	
Précipitations saisonnières	On prévoit une hausse des précipitations dans la majeure partie du pays à chaque saison, à l'exception de certaines régions du sud du Canada qui devraient enregistrer une baisse des précipitations en été et à l'automne
Précipitations abondantes	On prévoit des phénomènes de précipitations abondantes plus fréquents, avec un risque accru d'inondation
Phénomènes de précipitations rares	Les phénomènes de précipitations abondantes rares devraient devenir deux fois plus fréquents dans la majeure partie du Canada d'ici le milieu du siècle
Écoulement fluvial	On prévoit une augmentation de l'écoulement fluvial en hiver dans de nombreuses régions du sud du Canada; l'écoulement fluvial annuel moyen devrait diminuer dans certaines régions de l'Alberta et de la Saskatchewan, tandis que les prévisions pour les autres régions varient en fonction des différents scénarios
Couverture neigeuse	
Durée d'enneigement	On prévoit une diminution générale de la durée d'enneigement dans l'hémisphère nord, les principaux changements étant anticipés dans les régions maritimes montagneuses telles que la côte ouest de l'Amérique du Nord
Épaisseur de la couche de neige	On prévoit une hausse de l'accumulation neigeuse maximale sous les latitudes boréales polaires en raison de l'augmentation prévue des précipitations au cours de la saison froide
Pergélisol	
Température du sol	On prévoit la poursuite du réchauffement du pergélisol à des vitesses dépassant celles observées jusqu'à maintenant dans les relevés. Les températures moyennes faibles enregistrées dans la plus grande partie du pergélisol de l'Arctique signifient que la fonte complète du pergélisol plus froid prendra de nombreuses décennies, voire de nombreux siècles
Niveau de la mer	
Élévation du niveau de la mer à l'échelle planétaire jusqu'en 2100	Selon les estimations, l'élévation du niveau de la mer à l'échelle planétaire devrait être de l'ordre de quelques dizaines de centimètres à plus d'un mètre d'ici 2100
Élévation du niveau de la mer à l'échelle planétaire après 2100	Les prévisions concernant le niveau de la mer à l'échelle planétaire au-delà de 2100 indiquent une élévation continue du niveau de la mer à l'échelle planétaire au cours des prochains siècles et millénaires; le niveau de la mer à l'échelle planétaire pourrait subir une hausse de plusieurs mètres
Variation du niveau relatif de la mer	Le soulèvement et la subsidence de la terre, ainsi que l'évolution des océans, auront une incidence sur la dynamique des changements le long des côtes canadiennes; le niveau de la mer continuera d'augmenter dans les régions où la terre s'affaisse et le niveau de la mer continuera de baisser dans les régions où la terre se soulève rapidement, alors que les endroits où elle se soulève lentement peuvent passer d'une baisse du niveau de la mer à une hausse du niveau de la mer
Étendue de la glace de mer	
Glace de mer en été dans l'Arctique	Il est fort probable que l'océan arctique connaisse des étés presque sans glace d'ici le milieu du siècle, bien que la glace de mer en été puisse durer plus longtemps dans l'archipel arctique canadien
Glace de lac	
	En raison du devancement continu du moment de la débâcle de la couverture de glace et des retards du moment de l'englacement de la couverture de glace, la durée de la couverture de glace devrait diminuer de jusqu'à un mois d'ici le milieu du siècle

TABLEAU 2 : Exemples de changements prévus dans le système climatique du Canada, obtenus des ensembles de modèles climatiques mondiaux basés sur les scénarios du rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES)[3]. De façon générale, l'ampleur des changements indiqués augmentera dans le cas de scénarios d'émissions plus élevées.

[3] Les nouvelles prévisions pour le Canada seront disponibles en accédant au site du Réseau canadien des scénarios de changements climatiques (cccsn.ec.gc.ca).

LES CHANGEMENTS D'ORDRE CLIMATIQUE ONT UN EFFET DE PLUS EN PLUS IMPORTANT SUR LE MILIEU NATUREL, LES SECTEURS ÉCONOMIQUES DU CANADA ET LA SANTÉ DES CANADIENS (CHAPITRES 3 À 8).

Le milieu naturel est intrinsèquement sensible au climat. On a documenté des variations au niveau des aires de répartition de certaines espèces d'oiseaux, de papillons et d'arbres en raison du réchauffement, tout comme des variations de la chronologie des événements du cycle de vie de ces espèces (telles une migration précoce vers les aires de reproduction et la floraison précoce des plantes). Les érables, par exemple, se déplacent sensiblement vers le nord depuis 1971 (*voir* l'étude de cas 1, ch. 4). Des déplacements vers le nord ont également été observés dans les écosystèmes de la mer de Béring tels que démontrés par des exemples d'assemblages d'espèces australes déplaçant des populations aquatiques boréales (ch. 4).

On a également documenté des diminutions de populations d'oiseaux d'Amérique du Nord, dont 20 espèces communes ont perdu plus de 50 % de leur population au cours des 40 dernières années (ch. 7). Les perturbations forestières accrues associées aux insectes, à la sécheresse et aux feux de forêt ont augmenté les taux de mortalité des arbres en Colombie-Britannique et dans les Prairies. Les taux de mortalité ont également augmenté au sein des populations de saumon rouge, en raison de la hausse des températures de l'eau dans le fleuve Fraser (ch. 7), tandis que les taux de production du saumon ont chuté (ch. 4).

Outre les répercussions sur le milieu naturel, les changements climatiques touchent de nombreux secteurs économiques du Canada, ainsi que la santé humaine. Cela comprend les répercussions sur les secteurs particulièrement sensibles au climat tels que la foresterie, l'agriculture, les pêches, l'hydroélectricité, les transports, le tourisme et l'assurance. L'infestation par le dendroctone du pin ponderosa dans l'ouest du Canada en est un parfait exemple. La hausse des températures en hiver dans la région est un facteur qui a permis aux populations de dendroctones de se répandre de façon sans précédent, se traduisant par la plus importante infestation jamais relevée (*voir* l'étude de cas 1, ch. 3). En date de 2012, près de 18,1 millions d'hectares de forêt ont été touchés (figure 4; ch. 3). Les répercussions sur la santé comprennent le prolongement de la saison des herbes à poux, qui, par exemple, s'est prolongée de plus de 25 jours à Saskatoon et à Winnipeg entre 1995 et 2009 (ch. 7), et la propagation des vecteurs de la maladie de Lyme (tiques), qui est responsable de l'augmentation du nombre annuel de cas canadiens de 30 à plus de 250 au cours de ces dernières années (ch. 7).

Le nord du Canada a connu un réchauffement particulièrement rapide ces dernières années (*voir* la figure 1). Les répercussions des changements climatiques sur les moyens de subsistance, la culture, la santé mentale et le bien-être ont été rapportées par les résidents du Nord (ch. 7). Par exemple, les préoccupations en matière de sécurité associées à l'état des glaces et aux tempêtes marines moins prévisibles représentent un enjeu, tout comme les effets de la diminution de la glace de mer sur les activités traditionnelles de pêche (ch. 4) et les répercussions de la fonte du pergélisol sur l'infrastructure (ch. 8). Les routes d'hiver dans le nord du Canada subissent une diminution de l'épaisseur de la glace et un raccourcissement de leur période d'exploitation, tous deux des facteurs contribuant à une diminution de leur fiabilité et à une réduction des volumes de chargement qui peuvent être transportés en toute sécurité. Par exemple, l'abrègement de la saison d'activité des routes d'hiver en 2006 a contraint la mine de diamant Diavik à dépenser 11,25 millions de dollars supplémentaires pour se faire ravitailler par air en carburant (ch. 3). Les collectivités du Nord dépendent également du réseau de routes d'hiver pour leur approvisionnement en denrées alimentaires, médicaments et autres biens abordables.

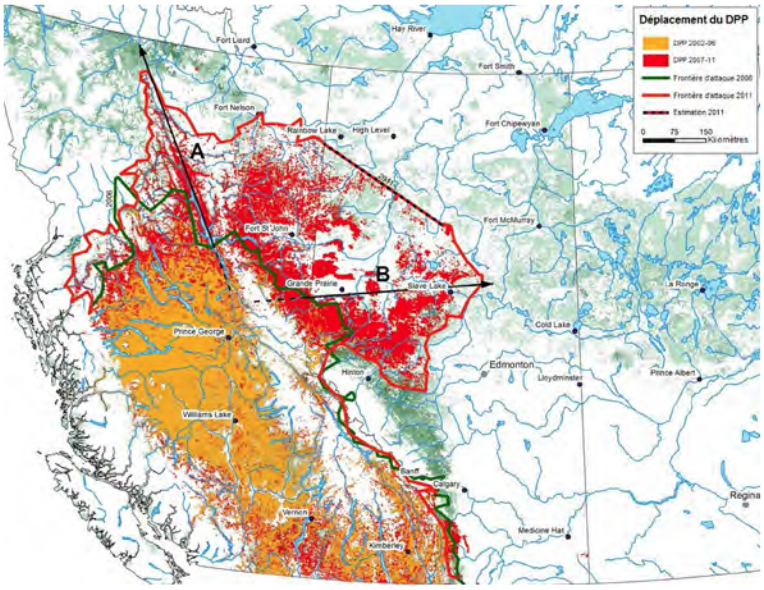


FIGURE 4 : Aires de répartition du dendroctone du pin ponderosa, montrant les changements survenus entre 2002 et 2006 et entre 2007 et 2011, ainsi que la nature des changements *(source : Ressources naturelles Canada, 2012c).*

Considérés dans l'ensemble, tous ces effets observés témoignent du fait que les changements climatiques se produisent à l'heure actuelle et que leurs répercussions se manifestent à l'échelle du pays. Bien que le climat ne constitue en fait que l'un des facteurs responsable de la situation dans la plupart des cas, ces exemples sont représentatifs des types de répercussions qui, selon toute vraisemblance, ne feront que s'accentuer à mesure que le climat continuera d'évoluer.

LES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES CONSTITUENT L'UNE DES PRÉOCCUPATIONS MAJEURES DU CANADA (CHAPITRES 3 À 8) ET NOUS SOMMES DE PLUS EN PLUS PERSUADÉS QUE CERTAINS PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES DEVIENDRONT SOIT PLUS FRÉQUENTS, SOIT PLUS MARQUÉS, OU LES DEUX, À MESURE QUE LE CLIMAT CONTINUERA DE SE RÉCHAUFFER (CHAPITRE 2).

Les pertes liées à des conditions météorologiques particulièrement mauvaises ont augmenté partout au pays. Les phénomènes météorologiques extrêmes, notamment les tempêtes (vent, glace et neige), les inondations et les vagues de chaleur ont eu d'importantes répercussions économiques (figure 5), ainsi que des répercussions sur la santé et la sécurité des Canadiens. En 2011, le secteur canadien de l'assurance a versé la somme record de 1,7 milliard de dollars pour les dommages matériels associés aux phénomènes météorologiques tels les inondations, les tempêtes de vent et les feux de friches. Ce record sera battu en 2013, lorsque l'évaluation des pertes assurées à la suite des inondations dans le sud de l'Alberta (juin) et à Toronto (juillet) sera achevée (BAC 2013a, b). Tandis que des facteurs autres que le climat contribuent également à la tendance à la hausse des remboursements (p. ex., exposition accrue de la propriété, augmentation du patrimoine et infrastructure vieillissante), ces pertes, au même titre que les nombreuses répercussions possibles sur la santé (ch. 7), sont la preuve de la vulnérabilité des Canadiens aux phénomènes météorologiques extrêmes.

Nous sommes de plus en plus persuadés que certains types de phénomènes météorologiques extrêmes deviendront soit plus fréquents, soit plus marqués, ou les deux, en raison des changements climatiques (ch. 2). Par exemple, à l'échelle planétaire, nous sommes *pratiquement certains*[4] que les journées et les nuits chaudes seront plus fréquentes et/ou plus marquées, et il est *très probable*[4] que les vagues de chaleur seront plus longues, plus fréquentes et/ou plus marquées. On prévoit également une augmentation de la fréquence des phénomènes de fortes précipitations et des variations extrêmes du niveau de la mer. Au Canada, les études ont démontré que les sécheresses, notamment dans le sud des Prairies, les fortes précipitations, avec un risque accru d'inondation (ch. 2), les feux de forêt (ch. 3), les tempêtes (ch. 5) et les journées et les nuits chaudes (figure 6; ch. 7) seraient plus fréquents et/ou plus marqués étant donné des conditions climatiques plus chaudes.

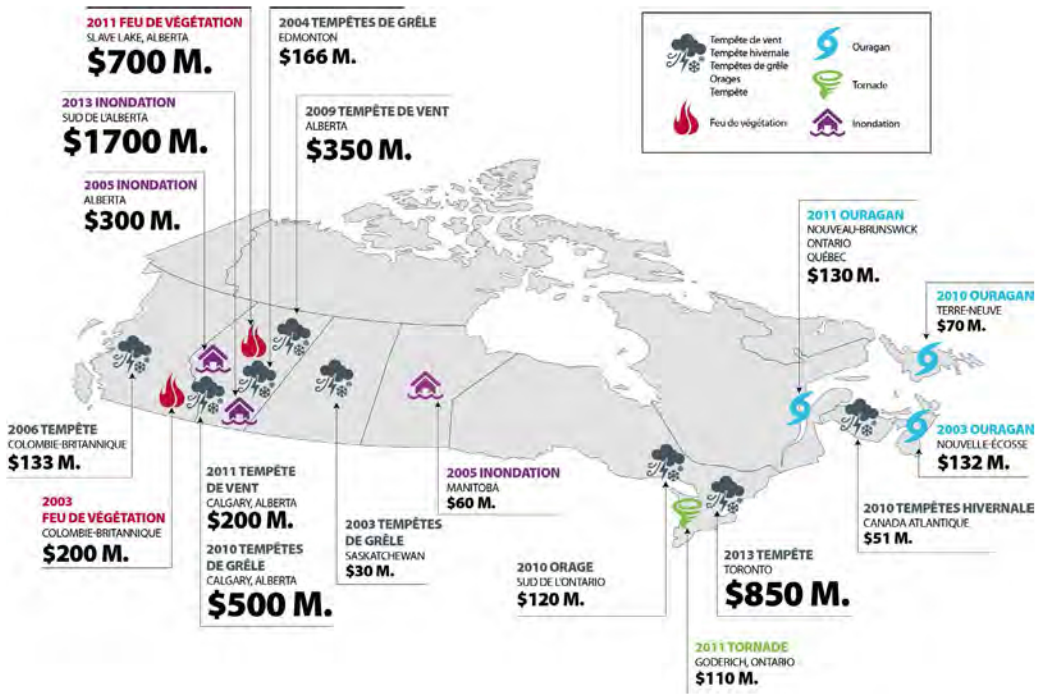


FIGURE 5 : Exemples de pertes assurées en raison de phénomènes météorologiques extrêmes au Canada - (millions de dollars) *(sources : Bureau d'assurance du Canada, 2008, 2011b, 2013a, b; McBean, 2012).*

[4] Le GIEC indique la probabilité à l'aide de l'échelle suivante : pratiquement certain - probabilité de l'ordre de 99 à 100 %; très probable - probabilité de l'ordre de 90 à 100 %; probable - probabilité de l'ordre de 66 à 100 %; autant probable qu'improbable - probabilité de l'ordre de 33 à 66 %; improbable - probabilité de l'ordre de 0 à 33 %; très improbable - probabilité de l'ordre de 0 à 10 %; absolument improbable - probabilité de l'ordre de 0 à 1 %.

On a déterminé que les phénomènes météorologiques extrêmes représentaient des enjeux cruciaux pour tous les secteurs mentionnés dans le présent rapport. Par exemple, les phénomènes liés à la disponibilité en eau (tant l'excès que la pénurie) sont préoccupants, tant dans le cas de la plupart des secteurs économiques qu'au chapitre de la biodiversité et de la santé humaine. Les inondations peuvent mettre les infrastructures à rude épreuve en provoquant d'importantes répercussions, non seulement au niveau local mais également à plus grande échelle, en raison des dommages causés aux réseaux de transport et des perturbations infligées aux conditions d'accessibilité et à la chaîne d'approvisionnement (ch. 8). La sécheresse est également associée à de nombreuses répercussions économiques et sociales immédiates et à long terme (ch. 4).

Le secteur agricole repose sur la prévision interannuelle des conditions météorologiques saisonnières, qui lui permet de planifier de façon plus aisée la sélection de cultures et les investissements dans l'infrastructure (ch. 4). Les conditions non prévisibles peuvent entraîner des pertes agricoles non prévues. Par exemple, une vague de chaleur sans précédent en Ontario en mars 2012 a entraîné la floraison des arbres fruitiers avec cinq semaines d'avance et des gelées ultérieures en avril ont détruit près de 80 % de la floraison des pommiers (Environnement Canada, 2013). Les pertes totales de fruits tendres cette année ont été évaluées à 100 millions de dollars (Environnement Canada, 2013).

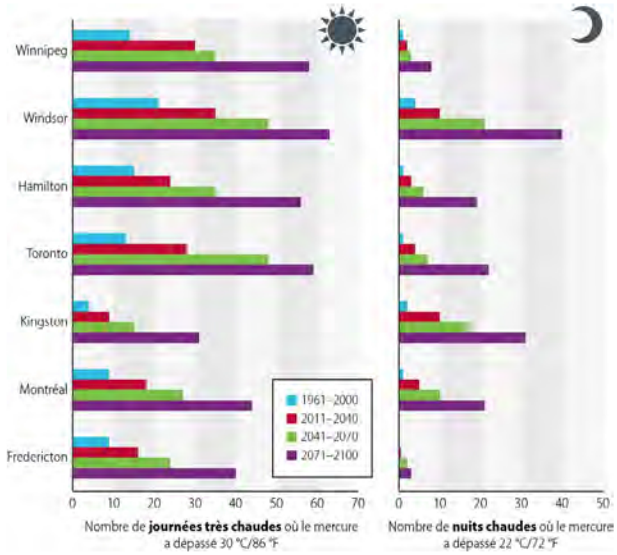


FIGURE 6 : Données historiques et nombre prévu de journées et de nuits chaudes dans certaines villes du Canada *(source : Casati et Yagouti, 2010)*.

IL EST CONVENU QUE L'ADAPTATION CONSTITUE UN ÉLÉMENT INDISPENSABLE DE RÉACTION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES. ELLE PERMET D'AMÉLIORER LA RÉSILIENCE SOCIALE ET ÉCONOMIQUE DES CANADIENS AUX RÉPERCUSSIONS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (CHAPITRES 3 À 9).

Au Canada, il existe une prise de conscience et une acceptation accrues de la nécessité de s'adapter aux changements climatiques (ch. 9). L'engagement accru en matière d'adaptation est manifeste dans tous les secteurs, dans tous les ordres de gouvernement, dans certaines industries et compagnies, ainsi que dans la documentation spécialisée (figure 7) et les médias. Les discussions s'attachent désormais à déterminer les domaines pour lesquels des mesures d'adaptation s'imposent et à améliorer la compréhension du processus d'adaptation, c'est-à-dire la façon d'aborder l'adaptation et les points à améliorer en matière de capacité d'adaptation.

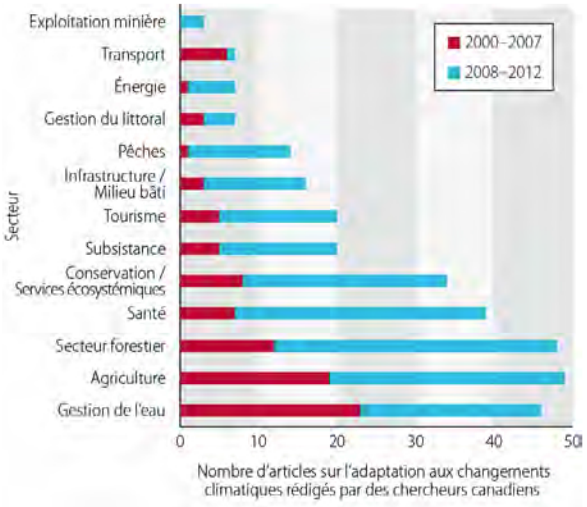


FIGURE 7 : Nombre d'articles sur l'adaptation aux changements climatiques rédigés entre 2000 et 2012 par des chercheurs canadiens, classés par secteur.

Cette situation est particulièrement évidente dans le cas des secteurs qui sont les plus exposés aux conditions météorologiques et à la variabilité des conditions météorologiques. L'expérience directe de la variation des conditions telles que le raccourcissement des saisons d'enneigement dans le cas du tourisme d'hiver (ch. 5), la modification des configurations de l'écoulement dans celui de la production d'hydroélectricité (ch. 3) et l'augmentation des effets de la chaleur sur la santé (ch. 7), ainsi que les phénomènes météorologiques extrêmes (p. ex., les inondations, les sécheresses et les feux de friches), permet de prendre davantage conscience des changements climatiques et de la gravité de ses éventuelles répercussions. Dans le secteur forestier, par exemple, de graves feux de friches et infestations de ravageurs en Colombie-Britannique et en Alberta ont contribué à une prise de conscience accrue de la nécessité de s'adapter aux changements climatiques, incitant l'industrie et les gouvernements à commencer à adopter des méthodes de gestion adaptative qui tiennent compte de façon proactive des risques et des possibilités, au lieu de dépendre des stratégies de gestion des crises (ch. 3). À la suite des inondations du printemps 2013 en Alberta, le gouvernement provincial a introduit des politiques visant à limiter les pertes lors des prochaines inondations, y compris de nouvelles restrictions sur le réaménagement dans les zones de canaux d'évacuation des crues et les périmètres d'inondation (Government of Alberta, 2013).

Les politiques, les règlements et les lignes directrices sont des mécanismes que les gouvernements peuvent utiliser dans le but d'améliorer la prise de conscience et d'encourager ou d'exiger le recours à des mesures d'adaptation. La ville de Vancouver, par exemple, a examiné ses politiques de protection contre les inondations et encourage désormais les demandeurs ayant des projets dans des zones établies de risque d'inondation à prévoir une élévation du niveau de la mer d'un mètre (ch. 8). Dans le cas du secteur privé, les facteurs permettant d'améliorer la prise de conscience comprennent l'introduction d'exigences en matière de déclaration pour le risque matériel, et la volonté de demeurer concurrentiel et de satisfaire la demande commerciale. La divulgation financière des risques liés aux changements climatiques semble être un outil prometteur susceptible d'encourager le recours aux mesures d'adaptation au sein de l'industrie (ch. 3, 5).

ON A DE PLUS EN PLUS FRÉQUEMMENT RECOURS AUX MESURES D'ADAPTATION QU'UN NIVEAU D'ENGAGEMENT ACCRU SUSCITE. LA POURSUITE DE CES EFFORTS PERMETTRA DE RENFORCER LA CAPACITÉ, DE TENIR COMPTE DES BESOINS EN MATIÈRE DE RENSEIGNEMENTS ET DE RELEVER LES DÉFIS (CHAPITRES 3 À 9).

Depuis la parution de l'évaluation de 2008, le nombre d'activités d'adaptation entreprises a augmenté de façon considérable au Canada, essentiellement pour ce qui est de la planification (y compris les stratégies, les cadres et les documents d'orientation) et des initiatives cherchant à améliorer la capacité d'adaptation (tableau 3). L'étendue et la portée de ces exemples attestent du fait qu'il existe de nombreuses méthodes différentes d'adaptation. Toutefois, les mesures d'adaptation sont essentiellement de nature progressive; elles s'appuient en outre sur les initiatives existantes, supposent la poursuite des tendances actuelles du climat et se sont articulées autour de mesures de type « sans regrets » qui s'avèrent être bénéfiques, peu importe la direction que prend l'évolution du climat. Dans de nombreux cas, les mesures d'adaptation ont été motivées par le fait de vivre des phénomènes météorologiques extrêmes ou d'être témoin de leurs répercussions.

Activités d'adaptation	Secteur
Les gouvernements provinciaux de la Colombie-Britannique, de l'Alberta et du Québec modifient les lignes directrices en matière de transfert de semences applicables aux activités de reboisement afin de tenir compte de la variation des enveloppes climatiques	Foresterie (ch. 3)
Une société hydroélectrique intègre des considérations liées aux changements climatiques dans les prévisions de la demande, afin de déterminer les ajustements à apporter aux taux facturés et d'étayer les plans d'approvisionnement	Énergie (ch. 3)
L'industrie minière applique des techniques visant à protéger les infrastructures du Nord contre la fonte du pergélisol (p. ex., fondations sur pieux plus profondes, fondations ajustables)	Exploitation minière (ch. 3)
Le gouvernement fédéral examine les régimes fiscaux afin d'aider les producteurs à gérer le risque afférent au climat (p. ex., en permettant le report du revenu)	Agriculture (ch. 4)
Les associations industrielles en Colombie-Britannique élaborent un plan d'action du tourisme en réaction aux dommages causés par le dendroctone du pin ponderosa	Tourisme (ch. 5)
Les compagnies d'assurance de biens modifient leurs garanties (p. ex., elles n'offrent plus d'assurance contre le refoulement d'égout dans les collectivités qui soumettent périodiquement des réclamations)	Assurance (ch. 5)
Bon nombre de municipalités ont mis en place des programmes de subventions en vue d'encourager l'installation de clapets anti-retour dans le but de réduire les dommages causés par les inondations attribuables à une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des précipitations	Logement résidentiel (ch. 5)
Le gouvernement du Manitoba protège l'aire d' hivernage de la harde de caribous de la toundra de Qamanirjuaq dans la zone de transition entre l'écosystème de la forêt boréale et la toundra	Biodiversité et aires protégées (ch. 6)
Le gouvernement met au point des outils afin d'aider les responsables de la santé publique à appliquer les méthodes de surveillance et de contrôle des maladies à transmission vectorielle	Santé humaine (ch. 7)
Les collectivités du pays élaborent des systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur afin de protéger la santé en cas de chaleur extrême	Santé humaine (ch. 7)
Une évaluation des risques de trois routes côtières en Nouvelle-Écosse a permis de présenter des recommandations qui comprennent des initiatives de protection technique du rivage et le déplacement de routes choisies plus à l'intérieur des terres.	Infrastructure (ch. 8)
Cambridge et Milton, en Ontario, effectuent des évaluations économiques des implications des changements climatiques au niveau de la conception des infrastructures de drainage.	Infrastructure (ch. 8)

TABLEAU 3 : Exemples d'activités d'adaptation dans les différents secteurs.

Les progrès en matière d'adaptation sont évidents, et les exemples présentés dans le présent rapport sont caractéristiques des types de mesures qui s'imposeront de plus en plus à mesure que le climat continuera d'évoluer. Toutefois, des travaux supplémentaires sont requis. Tous les chapitres du présent rapport mettent en évidence les besoins en matière de renseignements ainsi que les lacunes sur le plan des connaissances et des données, et de nombreux chapitres traitent des obstacles et des défis à relever en ce qui concerne l'adaptation, y compris le manque de ressources et de motivation, et les questions liées à la gouvernance (ch. 9). En outre, l'analyse des exemples disponibles permet de constater que l'on dispose de relativement peu d'exemples de mesures d'adaptation concrètes mises en œuvre sur place dans le but de limiter la vulnérabilité aux changements climatiques prévus. Cela indique que, à l'instar des autres pays développés, l'adaptation au Canada dans l'ensemble n'en est qu'à ses débuts. On reconnaît également que la méthodologie de la présente évaluation, axée telle qu'elle l'est plus particulièrement sur les documents scientifiques disponibles, peut se solder par une sous-estimation du nombre réel de mesures d'adaptation entreprises au Canada.

L'adaptation planifiée demande du temps. L'adaptation requiert souvent des recherches, la participation des parties intéressées et des modifications des politiques et des règlements. Par exemple, lorsqu'une route toutes saisons pour assurer l'accès aux sites d'exploitation minière dans le Nord est proposée comme solution à la question de la fiabilité réduite des réseaux de routes de glace (ch. 8), ce type de projet ne peut pas être entrepris sans une planification détaillée, des consultations et des études des répercussions sur l'environnement. Dans le secteur des pêches, les pêcheurs ne peuvent pas se contenter d'ajuster leurs récoltes en fonction de la variation des ensembles d'espèces; cela requiert que les gouvernements révisent les plans de gestion des pêches et les permis de pêche (ch. 4).

Par ailleurs, dans certains cas, il sera impossible et/ou coûteux de maintenir les activités actuelles, d'où découle le besoin d'engager des discussions dont le cadre s'étend au-delà de la simple considération de méthodes progressives de type « sans regrets » à l'adoption de changements plus transformationnels. Le concept émergeant du changement transformationnel a trait à des adaptations plus considérables et à plus grande échelle qui sont nouvelles, tant au niveau d'une région donnée qu'à celui d'un système de ressources donné (ch. 9). Le changement transformationnel peut également remettre en question le statu quo et, par conséquent, les perceptions de ce qui est acceptable. Les exemples comprennent le déplacement de villages entiers, en raison de l'élévation du niveau de la mer; la conversion de parcelles forestières en forêt-parc, afin de limiter les pertes liées aux incendies de forêt; et la mise au point d'une infrastructure de protection contre les inondations conçue en vue de lui permettre de céder en toute sécurité (en limitant les pertes et les dommages) au lieu de résister à des phénomènes de grande ampleur. Le recours à l'adaptation transformationnelle s'imposera vraisemblablement de plus en plus à mesure que le climat continuera de changer.

L'ADAPTATION PEUT PARFOIS CONVERTIR LES RISQUES EN POSSIBILITÉS, ET LES POSSIBILITÉS EN AVANTAGES (CHAPITRES 3 À 9).

Tandis que la recherche sur l'adaptation et la programmation de l'adaptation sont plutôt axées sur les mesures visant à réduire la vulnérabilité aux répercussions négatives, certaines répercussions des changements climatiques pourraient présenter des possibilités. Savoir saisir ces opportunités exige le recours aux mesures d'adaptation appropriées.

Certains des exemples les plus frappants à cet effet se manifestent dans les secteurs du tourisme et de l'agriculture, qui sembleraient tous deux pouvoir tirer profit d'étés plus longs. En s'adaptant de façon efficace (p. ex., adoption de stratégies permettant de gérer les éventuelles pénuries d'eau), les principaux marchés du tourisme par temps chaud au Canada pourraient tirer profit des changements climatiques comme, par exemple, l'industrie du golf, qui bénéficierait d'une saison prolongée et d'une demande accrue (ch. 5). De même, avec des températures plus élevées en été, différents types de cultures pourraient croître à de plus hautes latitudes (p. ex., maïs et soja dans de nouvelles régions au Québec, canola à Prince George, en Colombie-Britannique, et petites céréales semées au printemps dans l'ouest de l'Alberta et le nord de la Colombie-Britannique; ch. 4). Pour ce faire, les producteurs devront adapter leur sélection de cultures et leur calendrier (p. ex., semer plus tôt afin de réduire l'exposition à des conditions plus sèches à la fin de l'été) afin de profiter de ces possibilités. Dans tous les cas, il faudra également atténuer les risques liés à l'augmentation des ravageurs envahissants, aux vagues de chaleur et à d'autres phénomènes extrêmes. Au Nord, les variations du climat et de l'état des glaces offrent d'éventuelles possibilités économiques liées à l'exploitation des ressources naturelles et au tourisme (ch. 3, 5, 6). Toutefois, en plus de présenter des opportunités d'emploi et d'investissement, de telles activités posent également des risques d'ordre environnemental et culturel.

Les idées et les approches novatrices peuvent permettre de réduire les pertes liées aux changements climatiques, au moins à court terme. Par exemple, confronté à un excédent de bois bleui du fait de l'infestation du dendroctone du pin ponderosa, le secteur forestier de la Colombie-Britannique a commencé à commercialiser le produit sous forme de revêtements intérieurs et de meubles en bois uniques après avoir réalisé des études, grâce auxquelles il a été en mesure de confirmer que le bois répondait à des normes acceptables (ch. 3). Également en Colombie-Britannique, la ville de Vancouver a tourné la tempête de vent de 2006 au parc Stanley et les dommages qu'elle a causés en une occasion d'accroître la participation du public dans le parc et de replanter une forêt résistant davantage au vent (ch. 3). Certains exploitants d'entreprises touristiques et certains sites récréatifs envisagent de promouvoir le « tourisme de la dernière chance », qui incite de nouveaux visiteurs à se rendre à un parc afin d'y observer des caractéristiques ou des paysages changeants (p. ex., glaciers ou certaines espèces sauvages) avant leur déclin ou leur disparition (ch. 5, 7).

LA COLLABORATION ET LA GESTION ADAPTATIVE SONT DES MÉTHODES DE PLUS EN PLUS ADOPTÉES PAR LES GOUVERNEMENTS ET L'INDUSTRIE AFIN DE PROMOUVOIR L'ADAPTATION (CHAPITRE 9).

La collaboration s'avère être un mécanisme important en vue d'une adaptation réussie et efficace aux changements climatiques. Les secteurs ont un défi commun à relever, soit la nécessité de s'adapter à des changements cumulatifs continus au moyen de ressources limitées. En se basant sur les réalisations des autres (p. ex., évaluations, communautés de pratique et ateliers) et en collaborant avec les organisations qui ont les mêmes objectifs, il est possible de parvenir à des synergies et des gains d'efficacité. De nombreux exemples de collaboration entre les différents ordres de gouvernement, et groupes industriels et non gouvernementaux, sont présentés dans le présent rapport (*voir* l'encadré 2) et une collaboration continue sera le moteur principal du progrès de l'adaptation. Tandis que les rôles et les mandats peuvent différer d'une compétence à l'autre et d'une organisation à l'autre, les objectifs finaux visant à limiter la vulnérabilité aux changements climatiques et à améliorer la résilience sont des préoccupations communes à tous.

De nombreux secteurs commencent à utiliser des méthodes de gestion adaptative (figure 8) en vue de gérer les changements d'ordre climatique et d'autres facteurs de stress et incertitudes connexes (qui seront toujours présents dans le processus décisionnel en matière d'adaptation). La gestion adaptative comporte la surveillance, l'ajustement, l'expérimentation et la réévaluation continus, et exige d'aborder l'adaptation de façon souple et réactive. Les exemples de méthodes de gestion adaptative présentés dans ce rapport comprennent des activités liées à la production hydroélectrique (ch. 3), la gestion des niveaux de l'eau des Grands Lacs (ch. 8, 9) et la gestion des peuplements forestiers (ch. 3).

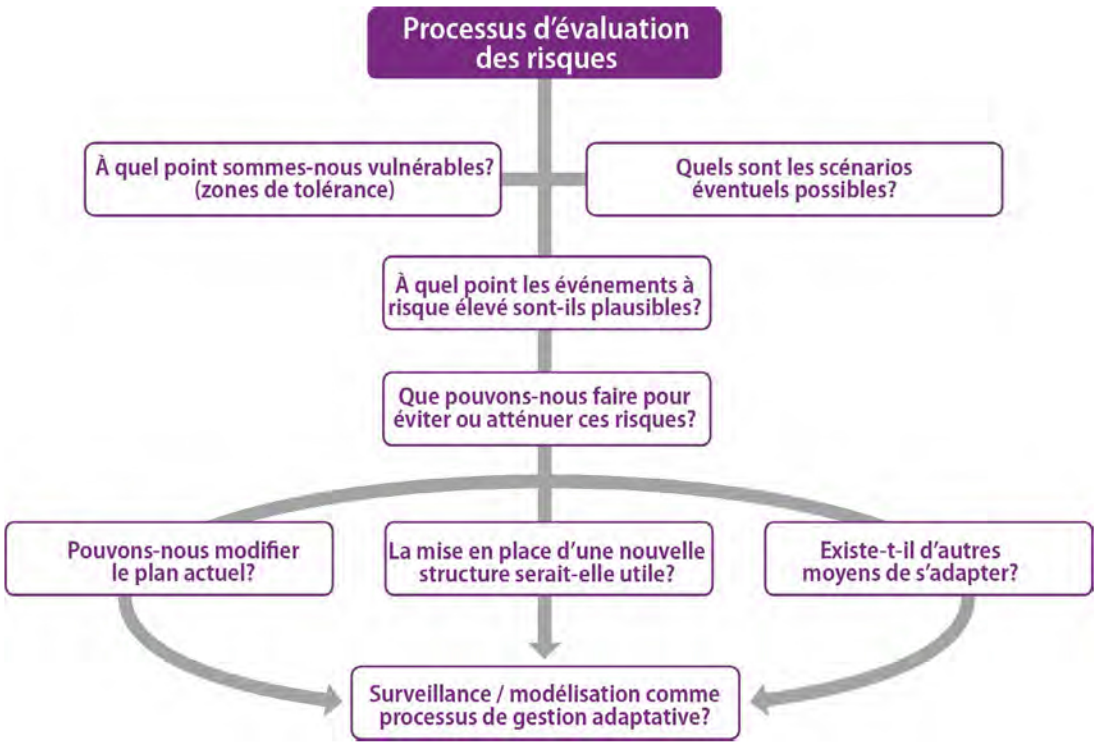


FIGURE 8 : Processus d'évaluation de la gestion adaptative *(extrait modifié tiré de Leger et Read, 2012, figure 2-1, p. 8).*

ENCADRÉ 2

EXEMPLES D'ÉTUDES DE CAS METTANT EN ÉVIDENCE LA COLLABORATION

Approche fondée sur la collaboration visant à améliorer le processus décisionnel en matière d'adaptation (chapitre 9, étude de cas 1): Le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux et territoriaux du Canada ont investi dans une approche fondée sur la collaboration qui se veut la pierre angulaire ayant pour objet de favoriser l'acquisition de connaissances et la prise de mesures en matière d'adaptation, par l'entremise d'activités passées (p. ex., le Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation [C-CIARN]) et d'initiatives en cours. La Plateforme d'adaptation constitue le mécanisme le plus récent permettant d'améliorer la collaboration en matière d'adaptation au Canada: elle rassemble les gouvernements, les organisations professionnelles, les associations industrielles et les représentants du secteur financier afin de se pencher sur des priorités partagées en matière d'adaptation.

Un exemple tiré du passé de la capacité des institutions à s'adapter dans le secteur agricole : les Prairies (chapitre 4, étude de cas 3) : Les collectivités locales et l'industrie agricole ont travaillé en collaboration avec les chercheurs en milieu universitaire, ainsi que le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux, afin de trouver des solutions en vue d'améliorer la résilience aux conditions de sécheresse qui prévalaient au début du XX^{e} siècle. Grâce à cette collaboration, de nouvelles méthodes agricoles innovantes ont été introduites et la gestion agricole est devenue plus efficace.

L'outil d'évaluation du risque pour les municipalités (chapitre 5, étude de cas 2) : Le Bureau d'assurance du Canada a réuni un groupe d'experts formé d'hydrologistes, de spécialistes du climat, de gestionnaires des risques et d'ingénieurs en infrastructure, afin de mettre au point un outil (outil d'évaluation du risque pour les municipalités ou OÉRM) permettant de déterminer les zones à risque d'exposition aux inondations de sous-sols à l'échelle du quartier.

Bâtir une habitation qui dépasse les exigences du code du bâtiment (chapitre 5, étude de cas 4) : L'Institut de prévention des sinistres catastrophiques et la Compagnie d'assurance générale Co-operators ont travaillé ensemble pour démontrer les avantages de la construction améliorée en construisant une maison modèle à West Point, dans Île-du-Prince-Édouard. La maison modèle, conçue en vue de mieux résister aux intempéries, intégrait de nouvelles technologies et pratiques afin de garantir la capacité de la maison à résister à des vents extrêmement violents.

Restauration écologique ayant recours à une approche fondée sur le paysage (chapitre 6, étude de cas 4) : Des partenaires de la conservation du secteur public et du secteur privé ont contribué à la plantation de plus de 4,5 millions d'arbres et d'arbustes indigènes, et à l'application de techniques de restauration pour recréer les caractéristiques des forêts anciennes de la zone carolinienne et aider à préserver la biodiversité dans la réserve de biosphère mondiale de Long Point, qui comprend la Réserve nationale de faune de Long Point, sur la rive nord du lac Érié, en Ontario. Ces travaux aident à créer des corridors, ainsi qu'à accroître le degré de résilience des écosystèmes et la capacité d'adaptation, dans l'ensemble de la réserve de biosphère.

Programmes de surveillance faisant appel aux citoyens (chapitre 6, étude de cas 5) : Dans le cadre du programme bénévole de recensement des poissons et des invertébrés mis en œuvre par la Reef Environmental Education Foundation (REEF), les participants sont formés afin de reconnaître les espèces cibles, qu'ils comptent en plongée à l'aide d'un simple formulaire de recensement itinérant. Plus de 3700 recensements bénévoles ont été effectués le long des côtes de la Colombie-Britannique grâce à ce programme, ce qui représente plus de 2800 heures d'observation sous-marine à plus de 300 endroits.

Inondations au Manitoba en 2011 : favoriser une approche provinciale d'adaptation psychosociale à l'égard des dangers naturels (chapitre 7, étude de cas 3) : De nombreuses organisations, y compris le Bureau de gestion des opérations en cas de catastrophe de Santé Manitoba; les Services sociaux d'urgence; l'Organisation des mesures d'urgence; Affaires autochtones et Développement du Nord Canada; Agriculture, Alimentation et Initiatives rurales Manitoba; Services à la famille et Services ruraux Manitoba; Conservation et Gestion des ressources hydriques Manitoba; et Affaires autochtones et du Nord Manitoba, ont travaillé en collaboration afin d'organiser une table ronde à l'échelle provinciale sur le rétablissement psychosocial après les inondations de 2011 en réaction aux inondations de 2011 au Manitoba.

Encadré 2 suite à la page suivante

Évaluation de la vulnérabilité du réseau d'alimentation en eau de la ville de Calgary (chapitre 8, étude de cas 1) : En 2011, la ville de Calgary a mené, en collaboration avec Ingénieurs Canada, une évaluation de la vulnérabilité au risque de son réseau d'alimentation en eau. L'équipe a travaillé en collaboration afin de déterminer quelles étaient les conditions climatiques représentant les plus grands risques à la conception, la construction, l'exploitation et la gestion du réseau d'alimentation en eau, afin d'améliorer la résilience et la qualité du système.

Lignes directrices sur les digues de mer en Colombie-Britannique (chapitre 8, étude de cas 2) : Le gouvernement provincial de la Colombie-Britannique, l'association provinciale des ingénieurs et des géoscientifiques professionnels, et d'autres organisations ont travaillé en collaboration avec les décideurs et les planificateurs afin de tenir compte de l'élévation du niveau de la mer dans la cartographie des zones côtières inondables, la conception de digues marines et l'aménagement du territoire. En se fondant sur ces résultats, un groupe de travail a mis au point un guide d'introduction national sur l'élévation du niveau de la mer (www.env.gov.bc.ca/cas/adaptation/pdf/SLR-Primer.pdf – disponible en anglais seulement), afin d'aider les autres collectivités à cerner, à évaluer et à comparer les possibilités d'adaptation, et de présenter différents types d'outils d'adaptation.

Promouvoir l'adaptation en partageant l'information et les connaissances par l'intermédiaire d'une communauté de pratique virtuelle (chapitre 9, étude de cas 4) : La Communauté de pratique de l'adaptation au changement climatique (CdPACC) est un portail interactif qui permet aux chercheurs, aux experts, aux décideurs et aux praticiens de l'ensemble du Canada de se réunir pour poser des questions, susciter des idées, partager des connaissances et communiquer avec les autres acteurs qui effectuent des travaux sur l'adaptation aux changements climatiques. Il s'agit d'un important réseau de partage de l'information et des connaissances sur l'adaptation aux changements climatiques au Canada.

CONCLUSION

Des changements du système climatique et des répercussions connexes sur les systèmes naturel et humain se produisent au Canada. Par conséquent, la nécessité de s'adapter est de plus en plus reconnue et mise en œuvre par les gouvernements, l'industrie et d'autres organisations. Au cours des cinq dernières années, notre compréhension du processus d'adaptation s'est améliorée et nous avons observé un nombre croissant d'exemples d'adaptation. Nous avons en outre noté une plus grande participation à la question, et des changements ont été apportés aux politiques, aux plans et aux pratiques afin d'accroître la résilience aux changements climatiques. Il est nécessaire de mettre encore davantage l'accent sur l'adaptation afin de renforcer les mesures d'atténuation et d'ainsi aider à prévenir et à réduire les futures répercussions, tout en tirant profit des éventuelles possibilités. Désormais, nous sommes conscients de la nécessité de nous adapter et nous avons la capacité de le faire dans de nombreux cas, mais pour passer à l'action, nous devrons réaliser des efforts continus de collaboration dans le but de réduire les obstacles, de relever les défis et d'accroître la volonté de s'adapter.

RÉFÉRENCES

Alberta Government. « Flood choices for Albertans », Government of Alberta, 2013, <https://pabappsuat.alberta.ca/albertacode/images/Flood-Choices-for-Albertans.pdf>.

Bureau d'assurance du Canada. « Facts of the General Insurance Industry in Canada », *Bureau d'assurance du Canada*, Toronto, 2008.

Bureau d'assurance du Canada. *Les tempêtes de vent dans le sud de l'Alberta causent des dommages éprouvés par les biens assurés d'une valeur de 200 millions de dollars*, Bureau d'assurance du Canada, 2011b, <http://www.ibc.ca/fr/Media_Centre/News_Releases/2011/12-22-2011.asp>.

Bureau d'assurance du Canada. « June Alberta Floods are Costliest Insured Natural Disaster in Canadian History – Estimate of insured losses exceed $1.7 billion », *Media Release*, 23 septembre 2013, 2013a, en ligne. <ibc.ca/en/Media_Centre/News_Releases/2013/June_Alberta_Floods_are_Costliest_Insured_Natural_Disaster_in_Canadian_History.asp>.

Bureau d'assurance du Canada. « Preliminary insured losses released in the most expensive natural disaster in Ontario history – IBC expects the number to go even higher », *Media Release*, 14 août septembre 2013, 2013b, en ligne. <ibc.ca/en/Media_Centre/News_Releases/2013/Preliminary_insured_losses_released_in_the_most_expensive_natural_disaster_in_Ontario_history.asp>.

Casati, B. et A. Yagouti. « Analysis of extreme temperature indices in nine Canadian communities using the Canadian Regional Climate Model projections for public health planning », Ouranos, 2010.

Environnement Canada. « Aperçu annuel 2011, Bulletin des tendances et des variations climatiques », Environnement Canada, 2011, <http://ec.gc.ca/adsc-cmda/default.asp?lang=Fr&n=F3D25729-1>.

Environnement Canada. « Les dix événements météorologiques les plus marquants au Canada en 2012 », Environnement Canada, 2013, <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=70B4A3E9-1>.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques,* contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Quin, G.-K. Plattner, M. Tignore, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013.

Hartmann, D.L., A.G. Klein Tank et M. Rusticucci. « Chapter 2: Observations: Atmosphere and surface – Final draft underlying scientific-technical assessment », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Quin, G.-K. Plattner, M. Tignore, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013.

Leger, W. et J. Read. « Adaptive management: strategy and legacy », dans *Lake Superior Regulation: Addressing Uncertainty in Upper Great Lakes Water Levels*, rapport final rédigé pour le Groupe d'étude international des Grands Lacs d'amont, Adaptive Management Technical Work Group, 2012, 167 p.

McBean, G. Comprendre le climat, rapport rédigé par l'Institut de prévention des sinistres catastrophiques pour le Bureau d'assurance du Canada, 2012.

Mekis, É. et L.A. Vincent. « An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, nº 2, 2011a, pp. 163-177.

Mekis, É. et L.A. Vincent. « Trends in indices related to agroclimatic conditions based on homogenized temperature and adjusted precipitation in Canada », *19th Conference on Applied Climatology*, 18-20 juillet 2011, Asheville, Caroline du Nord, États-Unis, 2011b, <http://ams.confex.com/ams/19Applied/webprogram/Paper190186.html>.

Perovich, D., W. Meier, M. Tschudi, S. Gerland et J. Richter-Menge. « Sea ice », dans *Arctic Report Card 2012*, M.O. Jeffries, J.A. Richter-Menge et J.E. Overland (éd.), 2012, <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>.

Ressources naturelles Canada. La menace que présente le dendroctone du pin ponderosa sur la forêt boréale canadienne, Ressources naturelles Canada, 2012c, <http://scf.rncan.gc.ca/pages/49?lang=fr_CA>.

Vincent, L.A., X.L. Wang, E.J. Milewska, H. Wan, F. Yang et V. Swail. « A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis », *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, D18110, 2012.

Zaturecky, I. et I. Chiu. « Alternative wood products from blue-stained mountain pine beetle lumber: non-structural laminated products », Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria, Colombie-Britannique. Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper 2005-07, 2005. <cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/25479.pdf>.

CITATIONS POUR LES CHAPITRES

Chapitre 2

Bush, E.J., J.W. Loder, T.S. James, L.D. Mortsch et S.J. Cohen. « Un aperçu des changements climatiques au Canada », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 23-64.

Chapitre 3

Lemmen, D.S., M. Johnston, C. Ste-Marie et T. Pearce. « Ressources naturelles », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation,* F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 65-98.

Chapitre 4

Campbell, I.D., D.G. Durant, K.L. Hunter et K.D. Hyatt. « Production alimentaire », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation,* F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 99-134.

Chapitre 5

Kovacs, P. et J. Thistlethwaite. « Industrie », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation,* F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernment du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 135-158.

Chapitre 6

Nantel, P., M.G. Pellatt, K. Keenleyside et P.A. Gray. « Biodiversité et aires protégées », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation,* F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 159-190.

Chapitre 7

Berry, P., K. Clarke, M.D. Fleury et S. Parker. « Santé humaine », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation,* F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 191-232.

Chapitre 8

Andrey, J., P. Kertland et F.J. Warren. « Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation,* F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 233-252.

Chapitre 9

Eyzaguirre, J. et F.J. Warren. « Adaptation : établir un lien entre la recherche et la pratique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation,* F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 253-286.

CHAPITRE 1 : **INTRODUCTION**

Principaux auteurs :

Fiona J. Warren et **Donald S. Lemmen** *(Ressources naturelles Canada)*

Citation recommandée :

Warren, F.J. et D.S. Lemmen. « Introduction », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 19-22.

Le Canada a terminé sa seconde évaluation scientifique nationale des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques en 2008 – *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (Lemmen et al., 2008). À l'échelle régionale, cette évaluation a porté sur les risques posés par les changements climatiques, ainsi que sur les possibilités et les mesures prises pour y remédier, tout en mettant en lumière les principales vulnérabilités et les possibilités d'adaptation, tant au niveau des systèmes humains qu'à celui des infrastructures gérées. Le présent rapport, *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, est une mise à jour de l'évaluation de 2008. Il s'articule autour des progrès réalisés dans le domaine de la recherche et sur le plan des connaissances au cours des six dernières années dans les secteurs économiques, sociaux et environnementaux du Canada.

D'importants progrès ont été effectués depuis 2008 au chapitre de la recherche et de la pratique en matière d'adaptation, tant au Canada qu'à l'échelle internationale. Aujourd'hui, nous comprenons encore mieux les répercussions observées et prévues. Une plus grande attention est désormais accordée aux risques d'ordre climatique, notamment ceux liés aux épisodes de précipitations abondantes et d'inondations. De même, le niveau de confiance relatif aux changements observés dans le système climatique et aux vecteurs de ces changements a augmenté (*voir* l'encadré 1); de même, les répercussions connexes sur le plan social, économique et environnemental sont d'autant plus claires. Il est généralement convenu que les changements climatiques constituent l'un des principaux défis auxquels nous devons aujourd'hui faire face.

Tous s'entendent pour dire que l'adaptation, qui agit en parallèle avec les efforts menés en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre, constitue aujourd'hui un élément indispensable de réaction aux changements climatiques. Elle nécessite de revoir nos processus décisionnels, nos activités ainsi que notre façon de penser face aux changements climatiques observés ou prévus, afin de a) réduire les dommages et de b) tirer parti des éventuelles possibilités. Il peut s'agir aussi bien de changer les comportements, de modifier les processus d'exploitation et d'avoir recours à la technologie, que de revoir la planification ainsi que les pratiques d'investissement, la réglementation et les dispositions législatives. Si l'adaptation en milieu naturel s'effectue spontanément, il n'en va pas de même dans les systèmes humains où il faut souvent miser sur une planification minutieuse fondée à la fois sur la recherche scientifique et une compréhension approfondie des systèmes concernés. Parmi les exemples de mesures d'adaptation abordées dans le présent rapport figurent : 1) l'adoption de fondations sur pieux plus profondes et de fondations ajustables pour protéger l'infrastructure minière contre les dommages causés par la fonte du pergélisol dans le Nord, et 2) la mise en place de systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur afin de protéger les collectivités des effets sur la santé des épisodes de chaleur extrême.

Le volume de publications scientifiques axées sur les répercussions et l'adaptation a considérablement augmenté au cours des dix dernières années, les sujets abordés étant de plus en plus diversifiés. L'intérêt de la recherche s'est parallèlement étendu au-delà de l'incidence biophysique et des mesures d'adaptation possibles pour s'axer sur le processus d'adaptation (les facteurs et les obstacles) selon différentes approches. On compte également de plus en plus d'exemples d'adoption et de mise en œuvre de mesures d'adaptation par les gouvernements, l'industrie et les organismes non gouvernementaux.

EN QUOI CONSISTENT LES ÉVALUATIONS SCIENTIFIQUES ?

Les évaluations scientifiques (figure 1) sont des rapports qui évaluent, analysent d'un œil critique et synthétisent une base de connaissances dynamique fondée sur les publications et la documentation parallèle. D'une portée généralement large, ces études sont habituellement entreprises à l'échelle mondiale, régionale, nationale et, parfois, infranationale. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) mène par exemple des évaluations des changements climatiques à l'échelle mondiale (p. ex., GIEC, 2012, 2013). Dans le cadre de la Plateforme d'adaptation du Canada, la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques (DIACC) de Ressources naturelles Canada travaille en collaboration avec d'autres spécialistes issus du milieu gouvernemental, d'universités et d'organismes non gouvernementaux en vue de mener des évaluations scientifiques des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques dont la fonction consiste à fournir des sources d'information actualisées, pertinentes et accessibles dans le but de soutenir la planification de programmes et de politiques, ainsi que la mise en place de mesures. Outre ce rapport, la DIACC dirige ou codirige des études ciblées sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques dans a) les régions côtières, b) le secteur des transports, et c) le secteur minier du Canada.



FIGURE 1 : Exemples d'évaluations menées par le passé.

ENCADRÉ 1

ÉVOLUTION DU CLIMAT

Il est évident que notre climat est en train de changer. On assiste, à l'échelle mondiale, à une augmentation des températures de l'air et des océans (figure 2), à une diminution de la couverture de neige et de glace, et à l'élévation du niveau de la mer. Ces tendances ont été clairement documentées par un solide ensemble de preuves scientifiques qui gagne en importance (p. ex., GIEC, 2013). Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a conclu dans son quatrième rapport d'évaluation que « le réchauffement du système climatique est sans équivoque » (GIEC, 2007), et a approfondi ce point dans son cinquième rapport d'évaluation en soulignant que les récents changements étaient sans précédent à l'échelle des dernières dizaines d'années et du millénaire (GIEC, 2013). Hormis ces tendances, des changements ont été observés dans la configuration des vents et des précipitations, ainsi que dans certains aspects des phénomènes météorologiques extrêmes (p. ex., sécheresse, vagues de chaleur et cyclones; GIEC, 2012, 2013).

Il est en outre évident que les changements climatiques observés à l'échelle mondiale découlent d'un ensemble de facteurs naturels et anthropiques. Les changements observés au cours du XX^{e} siècle sont essentiellement attribuables à l'activité humaine, qui comprend la combustion de combustibles fossiles et la modification des caractéristiques d'utilisation des terres. Cette influence majoritairement de nature anthropique devrait être maintenue tout au long de ce siècle et même au-delà (GIEC, 2013). S'il est essentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'espoir de diminuer la cadence et l'ampleur des changements climatiques, il est cependant trop tard pour empêcher le réchauffement du système climatique de se poursuivre. Étant donné la nature du système climatique de la Terre, le réchauffement devrait s'intensifier, même si des mesures drastiques d'atténuation devaient être adoptées (GIEC, 2013).

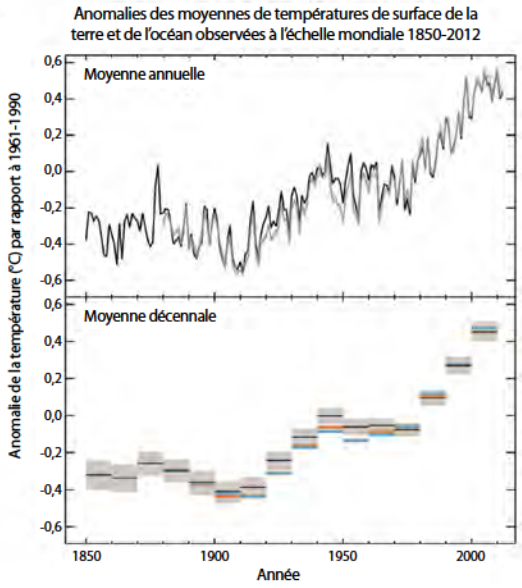


FIGURE 2 : Anomalies des moyennes de températures de surface de la terre et de l'océan observées à l'échelle mondiale (entre 1850 et 2012) à partir de trois ensembles de données. La partie du haut montre les valeurs moyennes annuelles, tandis que celle du bas montre les valeurs moyennes décennales *(source : GIEC, 2013)*.

Cette mise à jour du rapport, qui s'appuie sur les notions et la teneur de l'évaluation de 2008, s'articule autour des récents progrès effectués en matière d'adaptation et de la compréhension accrue de l'incidence des changements climatiques. Les lecteurs qui le souhaitent peuvent trouver de plus amples renseignements dans le rapport précédent, notamment dans le chapitre consacré aux concepts, aux aperçus et aux approches (Warren et Egginton, 2008), ainsi que dans le glossaire. Le présent rapport évalue et résume la documentation existante, y compris les études évaluées par des comités de lecture, les publications et la documentation parallèle, au sujet des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques. L'approche sectorielle/thématique a été retenue, car elle s'avère être la meilleure façon de présenter les connaissances acquises et d'atteindre un plus vaste public. Au lieu d'énumérer de façon exhaustive l'ensemble des répercussions et les enjeux relatifs à l'adaptation dont il faut tenir compte, ces chapitres mettent plutôt en lumière les grandes avancées observées dans les secteurs à l'étude.

FORMAT DU RAPPORT

Le présent rapport – *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation* – comprend neuf chapitres et une synthèse. La présente introduction (chapitre 1) est appuyée par le chapitre suivant intitulé *Un aperçu des changements climatiques au Canada* (chapitre 2) qui présente les changements climatiques observés et prévus (en matière de température, de précipitations et de phénomènes extrêmes) et aborde les répercussions de premier ordre (notamment le changement du niveau de la mer, de la glace de mer, du climat océanique, des niveaux et du débit de l'eau douce, ainsi que de la glace de lac). Si certains résultats observés à l'échelle mondiale ont été pris en considération, le chapitre 2 se concentre surtout sur le Canada et fournit des renseignements d'ordre général susceptibles d'aider les lecteurs à mieux suivre les discussions sur les impacts et l'adaptation dont il est question dans les chapitres thématiques. Il ne s'agit pas de présenter une évaluation exhaustive de l'état actuel des connaissances au sujet du régime des changements climatiques, mais bien de fournir aux spécialistes autres que les climatologues un tour d'horizon des principaux changements observés et prévus.

Les chapitres 3 à 8 constituent le corps de l'évaluation et sont structurés en fonction des secteurs et des thèmes abordés : ressources naturelles, production alimentaire, industrie, biodiversité et aires protégées, santé humaine, infrastructure hydraulique et infrastructure de transport. Ces chapitres abordent les enjeux actuels relatifs au climat, ainsi que les risques et les possibilités liés aux changements climatiques; ils traitent en outre des options, des approches et de la planification afférentes à l'adaptation. On a recours à des études de cas pour traiter en profondeur certains problèmes, pour présenter des exemples d'initiatives d'adaptation qui ont eu un

certain succès et pour cerner les éléments transposables d'un cas à un autre. Chacun de ces chapitres présente initialement les principales observations issues du rapport d'évaluation de 2008. Toutefois, compte tenu des importants écarts entre les différents secteurs et du volume de nouvelles données maintenant disponibles, les chapitres ne suivent pas un modèle commun.

Le chapitre 9, qui est intitulé *Adaptation : établir un lien entre la recherche et la pratique* et qui conclut le présent rapport, aborde les pratiques et la recherche au Canada en matière d'adaptation. Il analyse les progrès effectués sur le plan de la recherche, de la mobilisation, des mesures pratiques d'adaptation, ainsi que de la compréhension des obstacles et des facteurs d'adaptation acquise depuis le rapport d'évaluation de 2008.

RÉFÉRENCES

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changements climatiques 2007 : les éléments scientifiques*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007, 18 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique », rapport spécial des groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Quin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, NY, États-Unis, 2012, 582 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Quin, G.-K. Plattner, M. Tignore, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, 27 p.

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

Warren, F.J. et P. Egginton. « Information de base : concepts, aperçus, et approches », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 27-56.

CHAPITRE 2 : UN APERÇU DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU CANADA

Principaux auteurs :

Elizabeth J. Bush *(Environnement Canada)*, **John W. Loder** *(Pêches et Océans Canada)*, **Thomas S. James** *(Ressources naturelles Canada)*, **Linda D. Mortsch** et **Stewart J. Cohen** *(Environnement Canada)*

Collaborateurs :

Laura Brown, **Ross Brown**, **Chris Derksen**, **Grace Koshida**, **Eva Mekis**, **Robin Rong** et **Lucie Vincent** *(Environnement Canada)*, **David Burgess**, **Mike Demuth**, **Gavin Manson** et **Sharon Smith** *(Ressources naturelles Canada)*, **Peter Chandler**, **Eugene Colbourne**, **Bill Crawford**, **Howard Freeland**, **Peter Galbraith**, **Denis Gilbert**, **Debby Ianson**, **Roger Pettipas**, **Michel Starr**, **Frank Whitney** et **Igor Yashayaev** *(Pêches et Océans Canada)*

Citation recommandée :

Bush, E.J., J.W. Loder, T.S. James, L.D. Mortsch et S.J. Cohen. « Un aperçu des changements climatiques au Canada », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 23-64.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction 25

2. Évolution de la température de l'air at des précipitations. 26
   2.1 Changements observés relatifs à la température et aux précipitations 26
   2.2 Extrapolation des changements relatifs à la température et aux précipitations 32

3. Évolution de la cryosphère 36
   3.1 Pergélisol 37
   3.2 Couverture neigeuse 38
   3.3 Glaciers 39
   3.4 Glace d'eau douce 40
   3.5 Glace de mer 41

4. Évolution des ressources en eau douce 42
   4.1 Changements observés dans la disponibilité de l'eau douce 42
   4.2 Extrapolation des changements relatifs à l'eau douce 45

5. Évolution du climat océanique 47
   5.1 Température océanique 47
   5.2 Salinité et stratification de la densité des océans 49
   5.3 Hypoxie et acidité des océans 51
   5.4 Changement du niveau de la mer 53

6. Synthèse 56

Remerciements 57

Références 58

1. INTRODUCTION

L'incidence du réchauffement climatique planétaire au cours du dernier siècle est indéniable; les données sur les températures océaniques et atmosphériques à l'échelle mondiale, ainsi que les changements observés au niveau d'une série d'autres indicateurs physiques, notamment le recul de la couverture neigeuse et de la couche de glace, sont là pour le prouver. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant de l'activité humaine, soit la principale cause du réchauffement climatique au cours de ces dernières années, devraient continuer à jouer un rôle prédominant dans le réchauffement au cours du siècle à venir, réchauffement dont l'ampleur sera fortement tributaire de la hausse ou de la résorption des émissions de GES d'origine anthropique. Ces conclusions communément admises sont soutenues par un vaste ensemble de données probantes (p. ex., GIEC, 2007; AMAP, 2011; CNRC, 2011; GIEC, 2012, 2013), et fournissent un contexte global, en vue de l'examen des changements climatiques actuels et prévus au Canada.

Le présent chapitre donne un aperçu des changements observés, ainsi que des changements à venir, relativement à un certain nombre d'indicateurs clés du système climatique (figure 1) et présente le contexte pour les chapitres suivants, en insistant notamment sur les progrès observés sur le plan des connaissances depuis la parution du rapport d'évaluation de 2008 intitulé *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (Lemmen *et al.*, 2008). Si l'accent est mis sur la portée nationale, les tendances et les changements à l'échelle régionale sont toutefois décrits lorsque des données pertinentes sont disponibles. Une attention toute particulière est accordée à l'Arctique, en raison de l'abondance de données régionales recueillies pour différents paramètres cryosphériques. Étant donné la nature différente des bassins océaniques limitrophes du Canada, il est nécessaire d'ajouter une perspective régionale à la discussion sur les changements du climat océanique, ainsi qu'au chapitre des ressources en eau douce, dans la mesure où la recherche a jusqu'à présent été axée sur les bassins versants.

Le présent chapitre n'a pas recours aux scénarios de changements climatiques pour appuyer l'examen présenté dans les chapitres suivants. Quelques scénarios de changements climatiques, utilisés à titre d'exemple, sont toutefois présentés dans le cas de certains indicateurs et certaines périodes. En outre, le présent chapitre s'attache peu aux conclusions des nombreuses nouvelles analyses et études d'observation et de modélisation qui ont été menées durant la phase de préparation, et qui ont par ailleurs été résumées dans le cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dont le premier volume a paru en 2013 (Stocker et al., 2013).

Ce chapitre présente les données probantes, qui démontrent que des changements climatiques se produisent au Canada, et aborde également les changements futurs, qui auront une incidence sur les environnements naturel et contrôlé, ainsi que sur les nombreuses activités économiques et sociales qui leur sont associées. Le présent chapitre brosse un portrait de ce que le lecteur peut vivre au sein de sa propre communauté. Il permet d'illustrer les forces considérables à l'œuvre, ainsi que la façon dont les changements vécus à l'échelle locale s'imbriqueront dans les changements observés à l'échelle du Canada, de l'Amérique du Nord et de la planète.

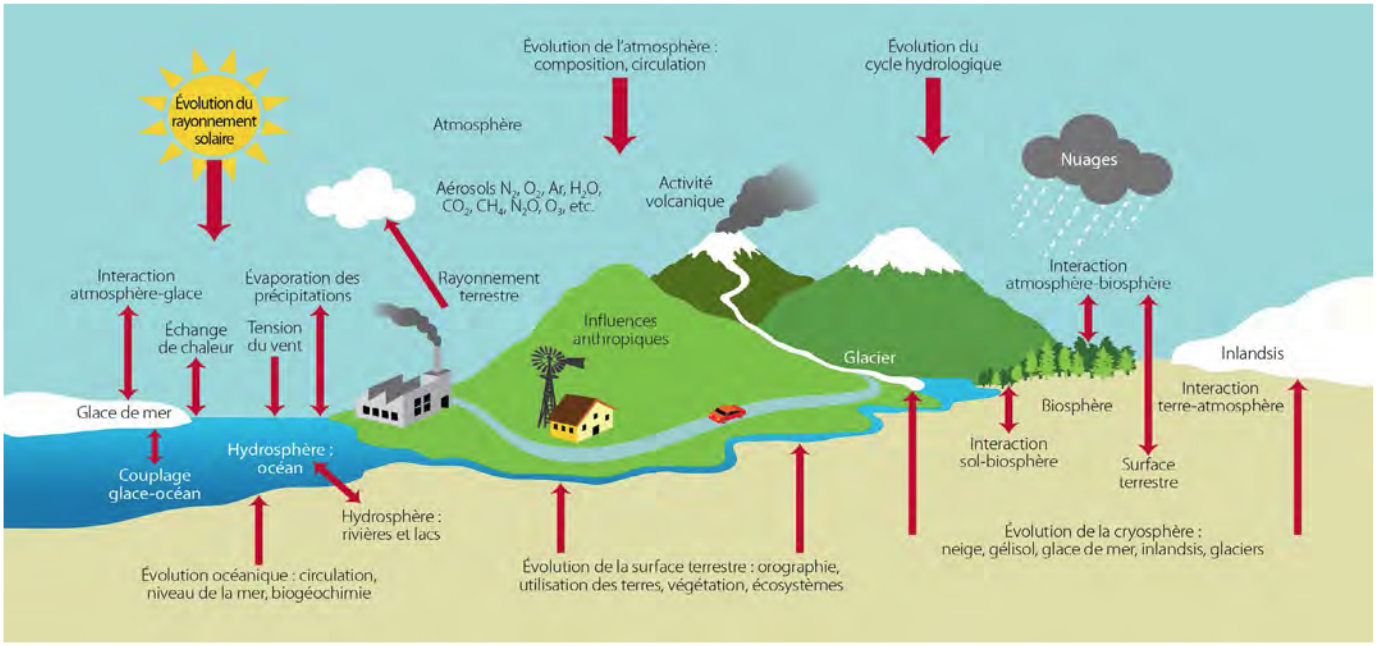


FIGURE 1 : Illustration des principaux éléments du système climatique, à savoir l'atmosphère, l'hydrosphère (composants de l'eau liquide), la cryosphère (composants de l'eau gelée), la lithosphère (surface émergée) et la biosphère (organismes vivants), ainsi que des interactions entre ceux-ci. Le présent chapitre passe en revue quatre des six changements illustrés dans ce schéma, mais ne porte pas sur les changements relatifs aux surfaces émergées ni ceux relatifs à la production solaire *(source : Le Treut et al., 2007)*.

2. ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ET DES PRÉCIPITATIONS

2.1 CHANGEMENTS OBSERVÉS RELATIFS À LA TEMPÉRATURE ET AUX PRÉCIPITATIONS

2.1.1 TEMPÉRATURE

ÉCHELLE MONDIALE

Une tendance au réchauffement observée sur 100 ans[1] indique une hausse de la température de l'air à la surface du globe de 0,74 °C ±0,18 °C entre 1906 et 2005 (GIEC, 2007). Plusieurs études, dont la Déclaration de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) sur l'état du climat mondial (OMM, 2013) et le rapport de l'American Meteorological Society (AMS) sur l'état du climat (Blunden et Arndt, 2012), ont établi que 2010 avait été, à l'échelle mondiale, l'année la plus chaude ou la seconde année la plus chaude jamais enregistrée (l'estimation de la température moyenne à l'échelle mondiale varie légèrement selon les méthodes utilisées par les différents organismes) et ont confirmé l'existence d'une forte tendance au réchauffement à long terme à l'échelle mondiale (figure 2A). En outre, la décennie 2001-2010 a été la plus chaude jamais enregistrée, avec une hausse de température de l'ordre de 0,21 °C par rapport à la décennie 1991-2000, qui avait elle-même été plus chaude que les décennies antérieures, ce qui indique une tendance au réchauffement à long terme (figure 2B, OMM, 2011). La température à la surface des terres s'est réchauffée plus vite que celle à la surface des océans, le réchauffement ayant été particulièrement important sous les latitudes boréales polaires (Trenberth *et al.*, 2007). L'Arctique continue à se réchauffer environ deux fois plus vite que les régions sises à des latitudes plus basses (Richter-Menge et Jefferies, 2011).

Les fluctuations naturelles du climat peuvent entraîner des périodes d'une décennie ou deux durant lesquelles on n'observe qu'un léger changement de la température, même si le niveau de GES dans l'atmosphère augmente (Easterling et Wehner, 2009). Malgré un ralentissement visible du niveau de réchauffement planétaire observé au cours des dix dernières années (*voir* la figure 2A, WMO, 2013), 12 des 13 années les plus chaudes jamais enregistrées ont eu lieu au XX[e] siècle, à l'exception de 1998, qui a subi l'influence du plus fort courant El Niño du siècle dernier (OMM, 2013). La probabilité qu'un ensemble d'années exceptionnellement chaudes survienne à la fin de la période d'observation, sans que le climat ne subisse un réchauffement à long terme, est très faible (Zorita *et al.*, 2008). Si l'on tient compte des changements des facteurs naturels, qui ont une incidence sur la variabilité du climat à court terme (p. ex., éruptions volcaniques et modification du rayonnement solaire), le taux de réchauffement planétaire enregistré depuis 1980 semble stable (Foster et Rahmstorf, 2011).

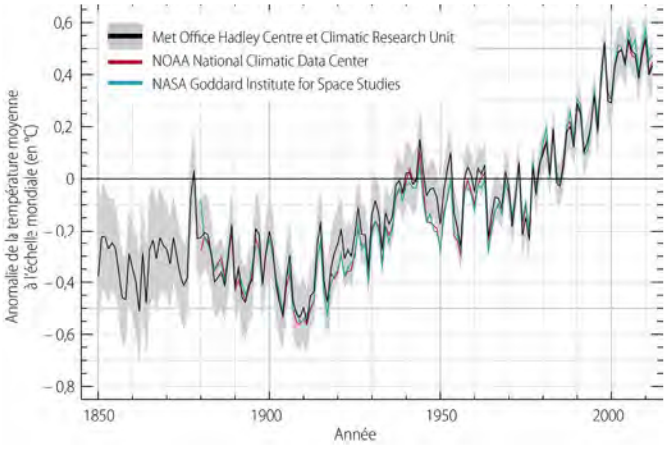


FIGURE 2A : Anomalies de la température moyenne annuelle à l'échelle mondiale (relatives aux moyennes de la période allant de 1961 à 1990) enregistrées entre 1850 et 2012 par le Hadley Centre/CRU (HadCRUT4; la courbe noire et la zone grise représentent respectivement la moyenne et une marge d'incertitude de 95 %), le centre national de données climatiques NOAA (en rouge) et le Goddard Institute for Space Studies de la NASA (en bleu) *(source : OMM, 2013)*.

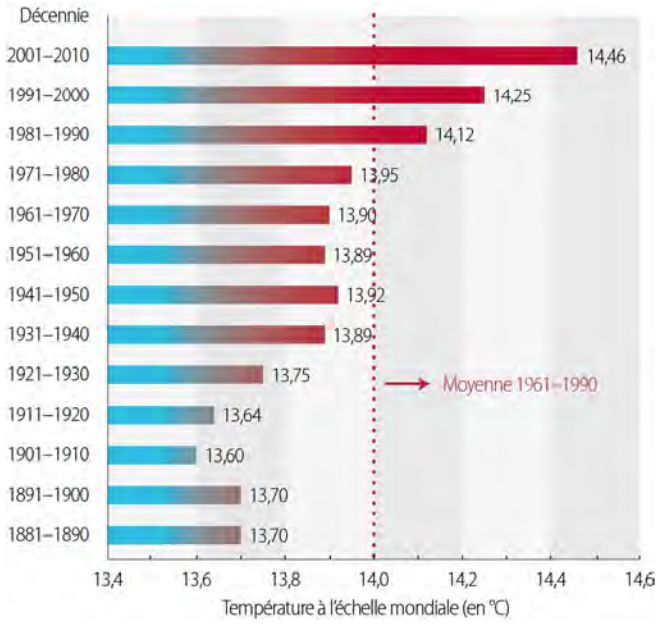


FIGURE 2B : Moyennes mondiales décennales de la température combinée de l'air à la surface des terres et à la surface des océans (°C), calculées à partir de trois jeux mondiaux de données *(source : OMM, 2011)*.

[1] Cette tendance à long terme a récemment été mise à jour pour indiquer une hausse de 0,85 (0,65 à 1,06°C) au cours de la période de 1880 à 2012 (GEIC, 2013).

L'activité humaine se manifeste sur le système climatique en modifiant la surface terrestre (p. ex., déforestation) et en altérant la composition de l'atmosphère, notamment par la hausse des concentrations de GES (qui favorisent le réchauffement) et de particules aériennes ou d'aérosols (qui favorisent essentiellement le refroidissement climatique) dans l'atmosphère. Depuis le milieu du XX^{e} siècle, le réchauffement planétaire a été essentiellement attribuable aux émissions anthropiques de GES (Hegerl *et al.*, 2007). L'incidence de l'activité humaine sur le réchauffement climatique a été démontrée depuis le milieu du XX^{e} siècle en Amérique du Nord (Hegerl *et al.*, 2007; Stott *et al.*, 2010) et au Canada (Zhang *et al.*, 2006), et tout au long du XX^{e} siècle dans l'Arctique (Gillet *et al.*, 2008).

CANADA

La température moyenne annuelle de l'air à la surface de la masse terrestre canadienne a subi une hausse de 1,5 °C au cours de la période allant de 1950 à 2010 (figure 3; Vincent *et al.*, 2012; *voir aussi* l'encadré 1). De récentes études révèlent qu'en 2011 et 2012, la température était de 1,5 °C et de 1,9 °C supérieure à la moyenne enregistrée durant la période de référence (1961-1990); ainsi, 2010 reste l'année la plus chaude enregistrée au Canada, avec une température supérieure à la normale de 3 °C (Environnement Canada, 2012).

Si le réchauffement a été observé de manière uniforme dans la majeure partie du Canada, la tendance s'accentue au nord et à l'ouest, mais est moins marquée le long de la côte atlantique (figure 4; *voir aussi* l'encadré 2). Ce phénomène régional de réchauffement plus intense dans l'ouest par rapport à l'est a été observé dans toute l'Amérique du Nord et est lié aux changements à grande échelle des modèles de circulation océanique et atmosphérique (Trenberth *et al.*, 2007; *voir* l'encadré 3). Les températures minimales quotidiennes enregistrées au Canada entre 1950 et 2010 ont augmenté légèrement plus rapidement que les températures maximales quotidiennes. Si le réchauffement au Canada est généralement observé durant toutes les saisons (Vincent *et al.*, 2012), les hausses les plus importantes enregistrées depuis 1950 surviennent toutefois en hiver et au printemps; l'importance du réchauffement durant ces saisons étant particulièrement notable dans la partie ouest du pays (figure 5). Les tendances au réchauffement sont généralement beaucoup plus faibles en été et à l'automne. Sur le plan géographique, le phénomène est observable à l'échelle du pays durant l'été, tandis qu'il est plus marqué à l'automne dans le nord et dans l'est (figure 5). Le profil spatial des changements de température durant toutes les saisons correspond à la configuration enregistrée jusqu'ici (Zhang *et al.*, 2000), quoique le refroidissement observé dans le nord-est du pays ne soit plus apparent dans les plus longues séries temporelles, en raison du récent réchauffement qu'a subi la région.

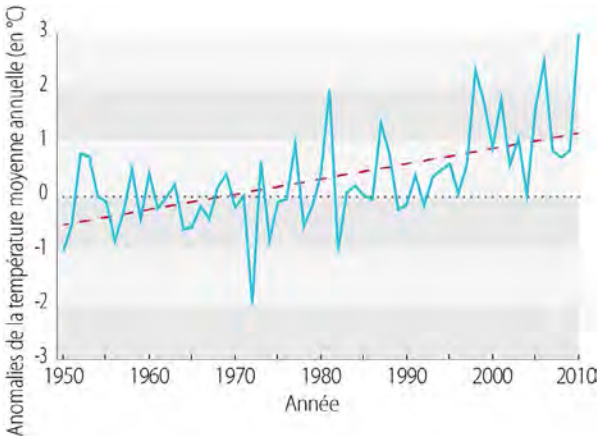


FIGURE 3 : Anomalies de la température moyenne annuelle (en °C) enregistrées au Canada durant la période allant de 1950 à 2010. Les anomalies sont calculées à partir des écarts par rapport aux moyennes de 1961 à 1990 (qui sont représentées par le 0 sur l'axe des ordonnées). La courbe rouge illustre une tendance au réchauffement de 1,5 °C durant la période allant de 1950 à 2010 *(source : Vincent et al., 2012; Environnement Canada, 2011)*.

ENCADRÉ 1

CRÉER DES ENSEMBLES DE DONNÉES CLIMATIQUES EN VUE D'ANALYSER LES TENDANCES À LONG TERME

Le climat du Canada, qui fluctue considérablement d'une région à l'autre, se caractérise par sa grande variabilité, aussi bien saisonnière, qu'annuelle ou pluriannuelle. Lorsqu'il s'agit d'analyses portant sur les changements climatiques, la difficulté réside dans la détection d'une tendance persistante (par exemple de la variation annuelle ou saisonnière de la température ou des précipitations) dans l'espace et le temps, qui n'apparaîtrait pas forcément de façon manifeste en raison du bruit dans les données. Pour y parvenir, il est nécessaire d'obtenir de manière continue des ensembles de données à long terme pour l'ensemble du territoire.

Étant donné que la plupart des stations climatologiques dans le nord du Canada n'ont été installées que vers la fin des années 1940, l'analyse des tendances climatiques de l'ensemble du pays n'a été possible qu'à partir de la seconde moitié du XX^{e} siècle. Durant cette période, des changements ont été apportés aux méthodes d'observation, notamment au type d'appareils utilisés et à l'emplacement de ces derniers, et certains sites ont été déplacés. Ces changements peuvent générer des écarts artificiels – aussi appelés « éléments non homogènes » – qui peuvent nuire à l'analyse des tendances climatiques. En outre, certains appareils provoquent un biais systématique (p. ex., le fait que les pluviomètres ne recueillent qu'une partie des précipitations en raison du vent) nécessitant des corrections. On ne peut obtenir d'estimations fiables qu'en apportant les corrections nécessaires aux données originales, afin de pallier ces changements méthodologiques. On parle alors d'« homogénéisation des données ». Les stations sélectionnées aux fins d'analyse des tendances climatiques à long terme étant situées à l'extérieur des grandes agglomérations urbaines, il n'est pas nécessaire de corriger les données pour tenir compte de l'effet d'îlot thermique urbain.

ENCADRÉ 2

CONFIGURATION SPATIALE DES TENDANCES CLIMATIQUES DANS L'ENSEMBLE DU CANADA

Les données climatiques sont enregistrées à des stations climatologiques réparties dans l'ensemble du pays, puis traitées en vue d'analyser les tendances à long terme (*voir* l'encadré 1). La couverture spatiale des stations climatologiques n'est cependant pas uniforme, dans la mesure où l'on compte plus de stations dans le sud du pays que dans le nord.

Les cartes des tendances en matière de température et de précipitations présentées dans ce chapitre (figures 4 et 5, et 7 à 10) illustrent la répartition spatiale des stations à long terme et montrent les tendances régionales ainsi que leur importance. Ces cartes doivent être analysées et interprétées en fonction de la configuration des changements à grande échelle observés dans les différentes régions du pays et entre celles-ci, plutôt qu'en fonction de la valeur des tendances enregistrées à certains endroits déterminés. Pour illustrer les futurs changements climatiques, on peut se servir de cartes présentant une couverture continue (*voir* la section 2.2), dans la mesure où les modèles utilisés pour générer les simulations du climat futur reposent sur des données de quadrillage, non pas sur des intrants de réseaux météorologiques. Toutefois, étant donné que les variations à l'échelle du quadrillage informatique et celles qui leur sont inférieures ne sont pas résolues dans ces modèles, il convient de continuer à se pencher plus particulièrement sur la configuration à grande échelle.

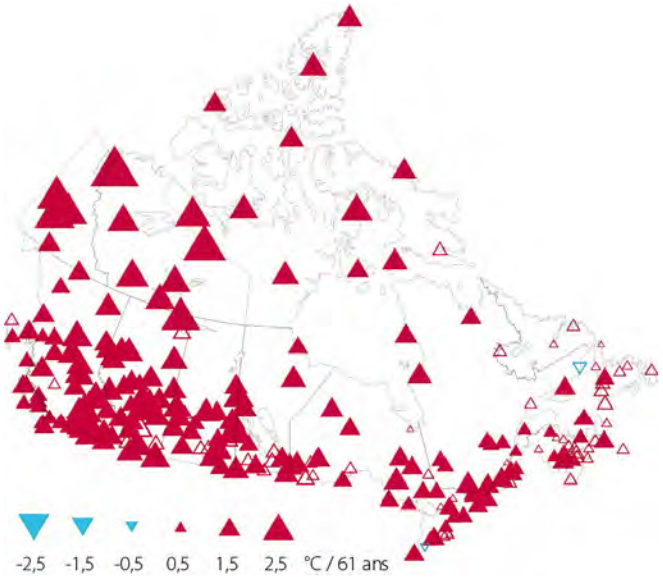


FIGURE 4 : Tendances relatives à la température moyenne annuelle pour la période de 1950 à 2010. Les triangles pointant vers le haut (en rouge) et vers le bas (en bleu) montrent, respectivement, les tendances positives et négatives. Les triangles pleins illustrent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 %. La taille du triangle est proportionnelle à l'ampleur de la tendance. La légende ne répertorie pas forcément les différentes tailles représentées dans la figure *(source : Vincent et al., 2012)*.

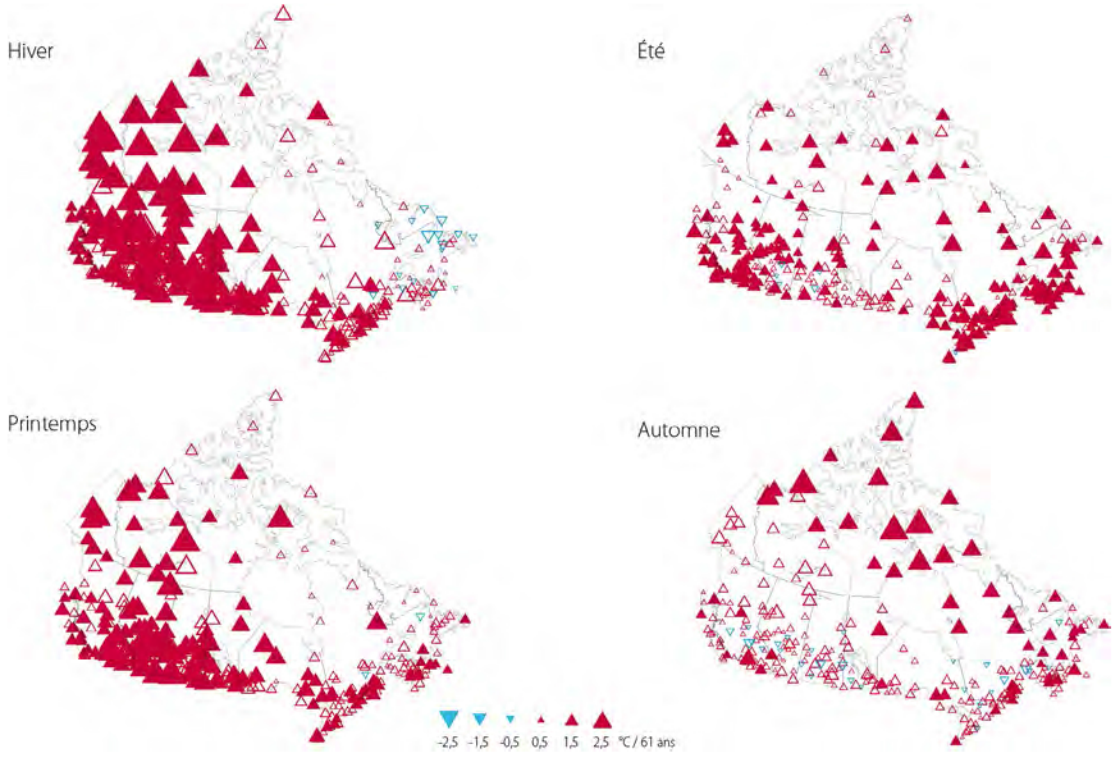


FIGURE 5 : Tendances relatives à la température moyenne saisonnière pour la période de 1950 à 2010. Les triangles pointant vers le haut (en rouge) et vers le bas (en bleu) montrent, respectivement, les tendances positives et négatives. Les triangles pleins illustrent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 %. La taille du triangle est proportionnelle à l'ampleur de la tendance. La légende ne répertorie pas forcément les différentes tailles représentées dans la figure *(source : Vincent et al., 2012)*.

ENCADRÉ 3

VARIABILITÉ INTERNE DU CLIMAT

L'atmosphère, la cryosphère, l'océan et la terre sont étroitement liés par l'échange de courants chauds, d'eau douce, d'énergie et de gaz, formant un système climatique couplé. Étant donné que la cryosphère et l'océan contiennent (et peuvent absorber) de grandes quantités de chaleur et d'eau douce, d'importantes rétroactions peuvent se produire au sein du système, ce qui génère des écarts naturels ou « oscillations » que l'on désigne parfois sous les termes de « variabilité interne du climat ». On constate un accroissement des écarts dans les observations modernes, notamment sur les échelles temporelles décennales et sur les échelles spatiales des bassins océaniques. Parmi les exemples notables figurent les oscillations arctique et nord-atlantique (OA, ONA) de la configuration de la pression atmosphérique, les oscillations décennale du Pacifique et multidécennale de l'Atlantique (ODP, OAM) de la température à la surface des océans, et, à une échelle temporelle plus courte, les écarts attribuables à El Niño/La Niña (chaud/froid) des températures de la partie orientale de l'océan Pacifique tropical.

2.1.2 PRÉCIPITATIONS

Le réchauffement de la surface et de l'atmosphère terrestre a une incidence sur l'évaporation et sur les précipitations, ainsi que sur la configuration de la circulation atmosphérique qui, à son tour, influe sur les chutes de pluie. En général, le réchauffement des températures favorise davantage l'évaporation possible de l'eau de surface, ce qui accroît le risque d'assèchement de la surface et de hausse de l'humidité dans l'air. Étant donné que la hausse de la température de l'air peut accroître l'humidité, on peut s'attendre à une intensification des épisodes de précipitations (Held et Soden, 2006; Trenberth, 2011). La répartition latitudinale des précipitations dans l'hémisphère nord a subi des changements, notamment avec des hausses observées dans les zones de hautes latitudes et des diminutions dans les zones sous-tropicales (Zhang *et al.*, 2007; Min *et al.*, 2008).

Les tendances des précipitations sont plus difficiles à déceler que les tendances de la température (p. ex., Trenberth *et al.*, 2007; Warren et Egginton, 2008). À l'aide de données ajustées de pluviométrie quotidienne, Mekis et Vincent (2011a) ont démontré que le Canada a, dans l'ensemble, subi une hausse des précipitations au cours des dernières décennies (avec une hausse d'environ 16 % des précipitations annuelles durant la période allant de 1950 à 2010 – *voir* la figure 6). Cette hausse est caractérisée par d'importants changements observés en Colombie-Britannique et au Canada atlantique (figure 7). Au cours des 61 dernières années, 21 % des stations ont enregistré des hausses significatives des précipitations annuelles, alors que seulement quelques faibles tendances à la baisse se sont manifestées par endroits dans l'ensemble du pays (Mekis et Vincent, 2011b). Si on note une augmentation des précipitations au printemps et à l'automne dans la plupart des stations, de nombreux sites, notamment dans l'ouest du Canada, enregistrent une baisse des précipitations en hiver (figure 8). La baisse des précipitations observée en hiver est essentiellement attribuable à la diminution des chutes de neige hivernales, les chutes de pluie n'ayant, quant à elles, pas subi d'importants changements durant cette saison (Mekis et Vincent, 2011a).

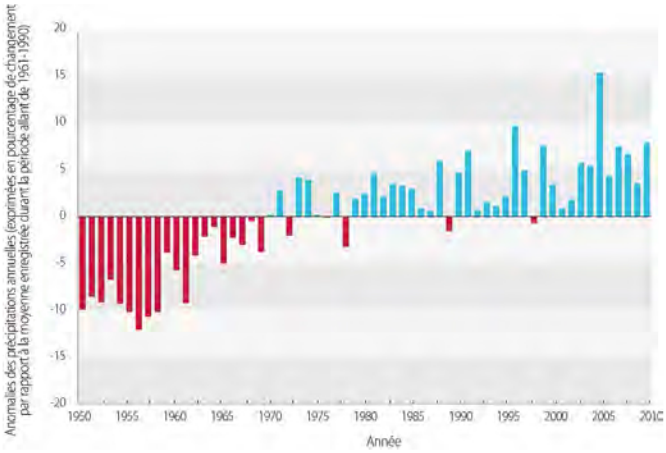


FIGURE 6 : Anomalies des précipitations annuelles (exprimées en pourcentage de changement par rapport à la moyenne enregistrée durant la période allant de 1961 à 1990) au Canada, de1950 à 2010 *(source : Mekis et Vincent, 2011a; Environnement Canada, 2011)*.

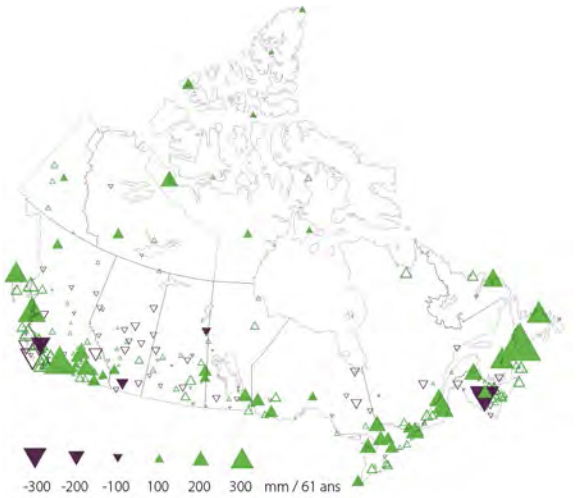


FIGURE 7 : Tendances relatives aux précipitations totales annuelles pour la période allant de 1950 à 2010. Les triangles pointant vers le haut (en vert) et vers le bas (en marron) montrent, respectivement, les tendances positives et négatives. Les triangles pleins illustrent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 %. La taille du triangle est proportionnelle à l'ampleur de la tendance. La légende ne répertorie pas forcément les différentes tailles représentées dans la figure *(source : Mekis et Vincent, 2011b)*.

En séparant les données relatives aux chutes de pluie et celles relatives aux chutes de neige des précipitations totales, on constate que les chutes de pluie annuelles au Canada ont augmenté d'environ 13 % au cours de la période allant de 1950 à 2009 (Mekis et Vincent, 2011a). Si les tendances indiquent une hausse des chutes de pluie dans l'ensemble du pays, ces tendances ne s'avèrent toutefois pas être d'importance significative à bien des endroits (figure 9). Pour ce qui est des tendances saisonnières, de nombreuses stations enregistrent une hausse significative des chutes de pluie au printemps et à l'automne.

Les chutes de neige annuelles ont augmenté d'environ 4 % pour l'ensemble du Canada au cours de la période allant de 1950 à 2009 (Mekis et Vincent, 2011a), quoique de nombreuses stations de l'ouest du Canada enregistrent d'importantes tendances à la baisse, alors que dans le nord du Canada et la région de l'Atlantique, les tendances observées sont à la hausse (figure 9). La variabilité des précipitations hivernales, notamment dans l'ouest du Canada, est fortement soumise aux variations naturelles à grande échelle du climat, comme l'oscillation australe El Niño (ENSO) et l'oscillation décennale du Pacifique ou ODP (*voir* l'encadré 3). Les précipitations inférieures à la normale sont liées aux événements El Niño, ainsi qu'aux phases positives de l'ODP, lesquelles se sont manifestées plus fréquemment depuis le milieu des années 1970 (Bonsal et Shabbar, 2011). Plusieurs régions du sud du Canada ont subi un changement du type de précipitations, caractérisé par des chutes de neige moins importantes et une hausse des chutes de pluie (figure 9), comme le laisserait présager un réchauffement des températures.

2.1.3 EXTRÊMES DE TEMPÉRATURE ET DE PRÉCIPITATIONS

Les changements climatiques seront également marqués par une évolution des extrêmes de température et de précipitations, en raison du changement des conditions moyennes ou de la variabilité (Rummukainen, 2012). On s'attend, par exemple, à ce que le réchauffement s'accompagne d'une baisse des extrêmes de température froide et d'une hausse des extrêmes de chaleur. Le réchauffement planétaire devrait également provoquer, à l'échelle mondiale, une intensification du cycle de l'eau, phénomène

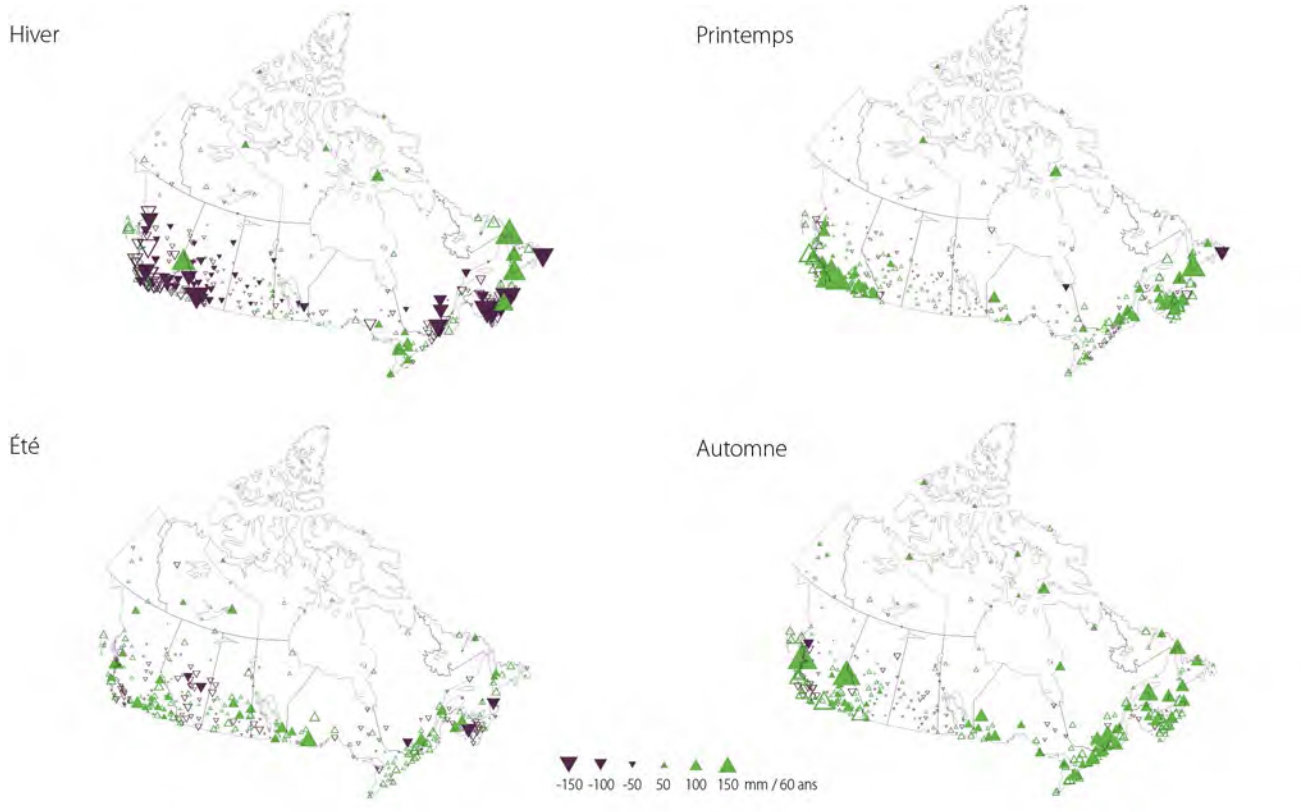


FIGURE 8 : Tendances des précipitations saisonnières pour la période allant de 1950 à 2009. Les triangles pointant vers le haut et vers le bas montrent, respectivement, les tendances positives et négatives. Les triangles pleins illustrent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 %. La taille du triangle est proportionnelle à l'ampleur de la tendance. La légende ne répertorie pas forcément les différentes tailles représentées dans la figure *(source : Mekis et Vincent, 2011a)*.

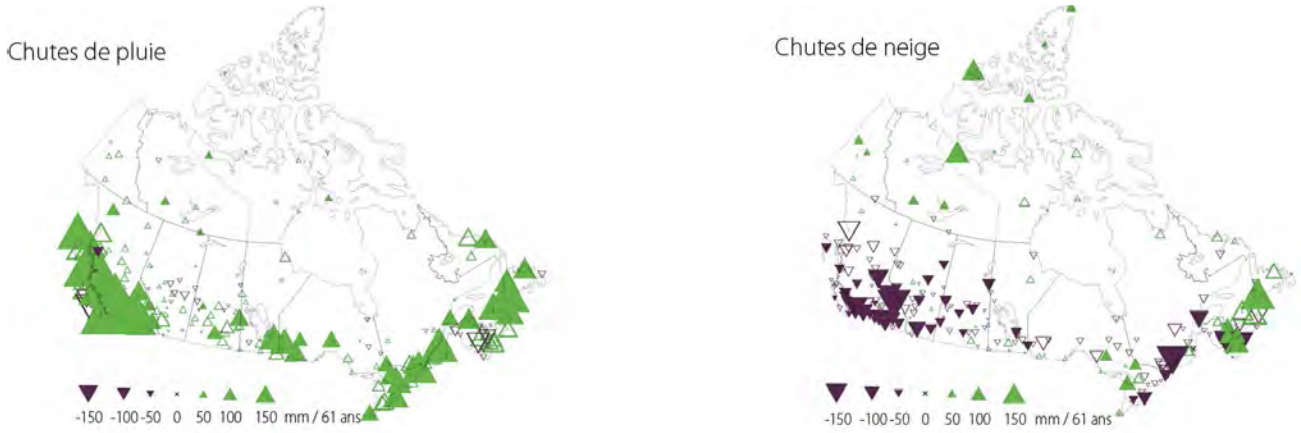


FIGURE 9 : Tendances des chutes de pluie et des chutes de neige annuelles pour la période allant de 1950 à 2009. Les triangles pointant vers le haut et vers le bas montrent, respectivement, les tendances positives et négatives. Les triangles pleins illustrent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 %. La taille du triangle est proportionnelle à l'ampleur de la tendance. La légende ne répertorie pas forcément les différentes tailles représentées dans la figure *(source : Mekis et Vincent, 2011a)*.

susceptible d'entraîner une augmentation de l'intensité des extrêmes de sécheresse et d'humidité, ainsi que des risques connexes tels que les inondations et les sécheresses (Giorgi et al., 2011; Trenberth, 2011). Un événement extrême étant de par sa nature plutôt rare, il est difficile d'analyser les changements qu'il occasionne (Zhang et al., 2011a).

De nombreux éléments à l'échelle mondiale indiquent un changement des extrêmes quotidiens de température, caractérisé par une hausse du nombre de journées et de nuits chaudes et une diminution des journées et des nuits froides, dans la majeure partie des terres émergées (Seneviratne *et al.*, 2012). On a également observé une hausse de la durée ou de la fréquence d'événements plus longs (p. ex., vagues de chaleur), quoique ces résultats ne soient pas aussi fiables que ceux indiquant un changement des extrêmes quotidiens de température. Il y a généralement moins d'uniformité et de cohérence dans la configuration des changements des extrêmes de précipitations observés que dans celle des changements d'extrêmes de température. Étant donné que l'on compte, sur la planète, un plus grand nombre d'endroits où les précipitations abondantes ont tendance à augmenter plutôt qu'à décroître, on a conclu dans l'évaluation globale à une hausse des précipitations abondantes à l'échelle mondiale (Seneviratne *et al.*, 2012).

Au Canada, les tendances de la température, qui ont été actualisées depuis l'évaluation de 2008, démontrent que le nombre d'épisodes froids continue à décroître, tandis que le nombre d'épisodes chauds continue d'augmenter. La fréquence des nuits froides durant l'hiver (lorsque la température quotidienne minimale est inférieure au 10^{e} percentile quotidien) a diminué au cours de la période allant de 1950 à 2010 dans la plupart des stations du pays, mais de légères tendances à la hausse sont toutefois observables dans le sud du Québec et au Canada atlantique. De même, alors que la fréquence des journées chaudes durant l'été (lorsque la température quotidienne maximale est supérieure au 90^{e} percentile quotidien) a augmenté à l'échelle nationale, de faibles tendances à la baisse ont été observées à plusieurs endroits dans les Prairies canadiennes. Dans la plupart des stations, la fréquence annuelle des nuits froides a diminué, tandis que celle des journées chaudes a augmenté, ce qui est conforme aux évaluations des tendances observées partout en Amérique du Nord (soit au Canada, aux États-Unis et au Mexique; Peterson *et al.*, 2008). Les analyses menées en vue de déterminer l'évolution des extrêmes sur une période de récurrence de 20 ans révèlent que les extrêmes de températures minimales accusent un taux de réchauffement supérieur à celui des extrêmes de températures maximales, et que les tendances ont été beaucoup plus marquées dans l'Arctique canadien que dans le sud du pays (Wang *et al.*, 2013). Aucune évaluation plus récente des tendances relatives aux vagues de chaleur estivales n'a été menée à l'échelle du Canada.

En ce qui concerne les extrêmes de précipitations au Canada, deux indices – les « journées très humides » (nombre de jours où les précipitations sont supérieures ou égales à la valeur du 95^{e} percentile), et les « jours de fortes précipitations » (nombre de jours où les précipitations atteignent ou dépassent les 10 mm) – ont été recalculés dans le but d'actualiser l'analyse présentée dans le rapport d'évaluation de 2008 pour la période allant de 1950 à 2010 (Vincent et Mekis 2006, actualisé; figure 10). Les résultats révèlent des configurations similaires aux premières conclusions, sans modification uniforme des extrêmes de précipitations pour l'ensemble du Canada. À l'échelle continentale, si plusieurs indices de fortes précipitations ont subi une augmentation depuis 1950, leur répartition n'a cependant pas été uniforme à l'échelle de l'Amérique du Nord (Peterson *et al.*, 2008). Les tendances relatives à l'intensité des précipitations sont à la hausse sur près des deux tiers de la surface terrestre de l'hémisphère nord pour laquelle on a obtenu des données en quantité suffisante (Min *et al.*, 2011).

La sécheresse est un événement extrême qui n'a pas de définition précise, mais qui renvoie de manière générale à de longues périodes de temps anormalement sec responsables du tarissement des ressources en eau. Une série d'indices permet d'en évaluer l'évolution. Bien que la sécheresse se produise dans la plupart des régions du Canada, la majeure partie des recherches se sont penchées sur les Prairies canadiennes, qui sont particulièrement touchées par ce phénomène (Bonsal *et al.*, 2011). L'examen de la variabilité de la durée des sécheresses estivales dans le sud des Prairies en fonction de différentes échelles temporelles révèle que les épisodes enregistrés au XX^{e} siècle ont été relativement anodins en comparaison avec ceux observés au cours des siècles antérieurs (Bonsal *et al.*, 2012). Aucune tendance notable en matière de sécheresse n'a été observée au pays au XX^{e} siècle (Bonsal *et al.*, 2011). Tout au long de la première moitié du XX^{e} siècle , des analyses menées à l'échelle mondiale ont permis de dégager des tendances régionales relatives à une aggravation des conditions de sécheresse dans le sud et l'ouest du Canada (Dai, 2011; Seneviratne *et al.*, 2012).

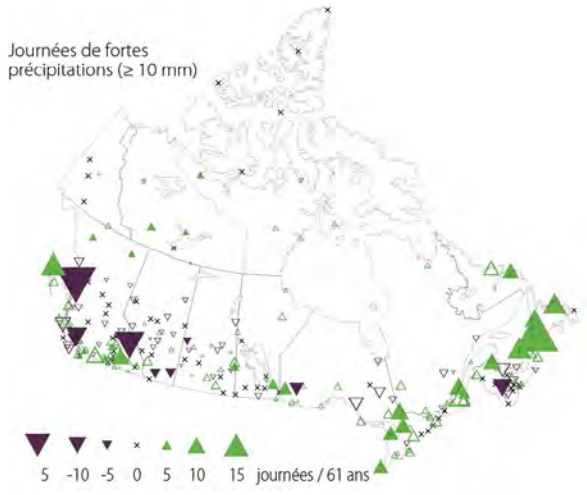


FIGURE 10: Tendances des extrêmes de précipitations pour la période allant de 1950 à 2010. Les triangles pointant vers le haut et vers le bas montrent, respectivement, les tendances positives et négatives. Les triangles pleins illustrent des tendances d'importance significative à un niveau de 5 %. La taille du triangle est proportionnelle à l'ampleur de la tendance. La légende ne répertorie pas forcément les différentes tailles représentées dans la figure. Le symbole « x » indique une tendance proche de zéro *(source : Vincent et Mekis, 2006, actualisé).*

2.2 EXTRAPOLATION DES CHANGEMENTS RELATIFS À LA TEMPÉRATURE ET AUX PRÉCIPITATIONS

2.2.1 SCÉNARIOS ET MODÈLES CLIMATIQUES

Les extrapolations des changements climatiques sont obtenues à partir d'expériences menées sur de superordinateurs à l'aide de modèles mathématiques du système couplé atmosphère-glace-océan-terre. Reposant sur les lois physiques qui régissent le comportement du système et les interactions entre ses composantes, ces modèles climatiques (ou terrestres) permettent de simuler la réaction du système aux facteurs de changement. Dans ce type d'expérience, les modèles évoluent selon les modifications apportées aux facteurs de forçage du climat, notamment aux émissions anthropiques de GES et d'aérosols. En règle générale, les chercheurs examinent les résultats des expériences menées sur plusieurs modèles, à l'aide d'un même scénario ou de multiples scénarios de forçage (*voir* l'encadré 4).

À partir des scénarios du SRES (*voir* l'encadré 4), le Quatrième rapport d'évaluation du GIEC fournit des estimations et des probabilités (dont les valeurs sont comprises entre 66 et 100 %) de l'évolution de la température moyenne à l'échelle mondiale pour la période allant de 2090 à 2099 (par rapport à 1980-1999) de l'ordre de 1,8 °C (1,1 à 2,9 °C) pour B1; de 2,8 °C (1,7 à 4,4 °C) pour A1B et de 3,4 °C (2,0 à 5,4 °C) pour A2 (Meehl *et al.*, 2007b). Le rapport conclut également que l'Amérique du Nord devrait très vraisemblablement (entre 90 et 100 % de probabilité) se réchauffer au cours de ce siècle, et que sa moyenne annuelle de réchauffement devrait dépasser la moyenne mondiale dans la plupart des régions, et ce plus particulièrement durant l'hiver et dans les régions nordiques (Christensen *et al.*, 2007). La possibilité de voir la partie nord-est du Canada se refroidir n'a pu être écartée, en raison du refroidissement possible de l'Atlantique Nord lié à la diminution de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique. Si les précipitations annuelles moyennes devraient augmenter dans l'ensemble du Canada, les précipitations dans le sud du pays devraient, quant à elles, augmenter en hiver et au printemps et diminuer en été.

Ce chapitre présente également un certain nombre d'extrapolations des changements liés au climat de la température de l'air en surface et des précipitations au Canada, élaborées à partir des résultats moyens (moyennes calculées) d'un ensemble de 17 (B1) ou de 16 (A2) modèles climatiques mondiaux dans le cadre du CMIP3. Ces extrapolations visent à illustrer, de manière générale, l'ampleur des changements potentiels à l'échelle du Canada au cours de ce siècle découlant d'un scénario de forçage relativement faible (B1) ou relativement fort (A2). Les niveaux d'émissions de combustible fossile d'origine anthropique à l'échelle mondiale se rapprochent davantage des niveaux d'émissions supérieurs établis en vertu des scénarios du SRES (Peters *et al.*, 2012). Le lecteur peut se reporter au chapitre 2 du rapport d'évaluation de 2008 (Warren et Egginton, 2008) pour obtenir de l'information générale sur la modélisation climatique et l'évaluation des répercussions, ainsi qu'au Réseau canadien des scénarios de changements climatiques (cccsn.ec.gc.ca), sur lequel il trouvera des renseignements plus techniques, y compris des conseils sur la façon d'intégrer des incertitudes dans les extrapolations climatiques élaborées dans le cadre d'exercices de planification de l'adaptation.

ENCADRÉ 4

ÉLABORATION D'UN SCÉNARIO DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les scénarios de changements climatiques futurs présentés dans le rapport d'évaluation de 2008 (Lemmen *et al.*, 2008) reposent sur un ensemble d'expériences menées de manière coordonnée par un petit nombre de groupes de modélisation du climat mondial aux fins du Troisième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2001). Les expériences étaient fondées sur un sous-ensemble des scénarios d'émissions présentés dans le Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES) du GIEC (Nakićenović *et al.*, 2000; résumé dans Warren et Egginton, 2008). Une nouvelle série d'expériences sur les changements climatiques coordonnées à l'échelle internationale a été menée sur place par un nombre beaucoup plus important de groupes de modélisation du climat aux fins du Quatrième rapport du GIEC (GIEC, 2007). Cet ensemble d'expériences coordonnées, présentées dans la troisième phase du projet d'intercomparaison de modèles climatiques (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 ou CMIP3) décrit dans Meehl *et al.* (2007a), s'appuie également sur les scénarios du SRES mis au point par le GIEC, parmi lesquels trois ont été systématiquement modélisés par la plupart des groupes, pour couvrir une fourchette du futur forçage radiatif anthropique allant de faible (B1), à moyen (A1B) et à moyen-élevé (A2). Si ces trois scénarios saisissent en grande partie la portée des émissions extrapolées à partir d'ensembles plus vastes de scénarios du SRES, ils ne permettent cependant pas d'en couvrir tout le registre. En outre, aucun des scénarios présentés dans le SRES ne tenait expressément compte des efforts d'atténuation des changements climatiques, quoiqu'ils aient toutefois anticipé des émissions relativement faibles ou relativement élevées dans des situations futures, et ce, même en l'absence de politiques concrètes concernant ces émissions.

Le plus récent projet d'intercomparaison de modèles climatiques (CMIP5) repose sur un nouvel ensemble de scénarios d'extrapolation des changements climatiques futurs (Moss *et al.*, 2010; Hibbard *et al.*, 2011; van Vuuren *et al.*, 2011; Taylor *et al.*, 2012). Ces scénarios dits « scénarios RCP » (soit Representative Concentration Pathway), décrivent les trajectoires des concentrations atmosphériques au fil du temps (pour les GES, les aérosols et d'autres polluants atmosphériques, et leur incidence sur les trajectoires du forçage radiatif net). Quatre scénarios susceptibles d'intéresser les milieux politique et scientifique ont été retenus pour représenter une gamme de facteurs de forçage radiatif tout au long du XXIe siècle, y compris des scénarios présumant la mise en place d'importantes mesures d'atténuation, et d'autres partant du principe que peu de mesures seraient adoptées. Les scénarios RCP se distinguent ainsi des SRES du fait qu'ils tiennent expressément compte des efforts d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

Fondées sur les nouveaux scénarios RCP, les expériences menées dans le cadre du CMIP5 ont fourni une orientation au débat sur les futurs changements climatiques à l'échelle mondiale, continentale et régionale du Cinquième rapport d'évaluation du Groupe de travail I du GIEC. Le résultat des simulations effectuées dans le cadre du CMIP5 n'était pas disponible au moment de la rédaction du présent chapitre. La collectivité responsable des répercussions et des mesures d'adaptation n'a eu, de son côté, que peu de temps pour mener des recherches à l'aide de ces nouvelles extrapolations. De nouveaux scénarios de changements climatiques pour le Canada, fondés sur ces expériences, seront proposés au milieu canadien de la recherche ainsi qu'aux particuliers intéressés, par le biais du Réseau canadien des scénarios de changements climatiques au cccsn.ec.gc.ca.

2.2.2 CHANGEMENTS RELATIFS À LA TEMPÉRATURE ET AUX PRÉCIPITATIONS SAISONNIÈRES

Les cartes des scénarios d'extrapolation des changements saisonniers de la température de l'air en surface (figure 11) et des précipitations (figure 12) sont présentées pour le milieu et la fin du siècle, relativement aux moyennes de 1961 à 1990, en fonction des résultats moyens obtenus à partir des multiples modèles du CMIP3 pour les scénarios d'émissions faibles (B1) et moyennes à élevées (A2) du SRES (*voir* l'encadré 4). Ces extrapolations correspondent généralement à celles présentées dans le rapport d'évaluation de 2008.

Les cycles de réchauffement varient manifestement en fonction des saisons; les plus importantes augmentations observées en hiver se manifestent dans les zones de hautes latitudes (nord du Canada), tandis que le réchauffement estival se produit essentiellement dans les zones de latitudes moyennes (sud du Canada). Le réchauffement estival devrait globalement être plus uniforme à l'échelle du pays, les principaux changements étant prévus pour les terres continentales intérieures. Les plus forts gradients latitudinaux apparaissent en automne, et surtout en hiver. Les résultats moyens agglomérés s'appliquant à l'ensemble du domaine démontrent que, même selon le scénario d'émissions faibles (B1), d'ici le milieu du siècle, la température dans l'ensemble du Canada devrait avoir augmenté d'environ 1,5 à 2,5 °C durant la saison pour laquelle on anticipe le plus faible réchauffement (été). D'après le scénario A2, les températures moyennes enregistrées en hiver dans la majeure partie du Canada devraient augmenter d'environ 3 à 7 °C vers la fin du siècle, avec un réchauffement pouvant atteindre plus de 9 °C dans la baie d'Hudson et l'Extrême Arctique, ainsi qu'à proximité de ces régions (figure 11, panneau P). Ce cycle de réchauffement plus intense sous les latitudes boréales polaires est une caractéristique presque universelle des extrapolations de modèles climatiques que l'on retrouve dans un certain nombre de scénarios d'émissions, et qui est fortement liée au recul de la couverture de neige et de glace de mer (Serreze et Barry, 2011).

L'extrapolation des changements de configuration des précipitations est généralement moins fiable que celle portant sur les températures, et se caractérise par un plus grand degré de variabilité entre les modèles. On prévoit une hausse des précipitations dans la majeure partie du pays à chaque saison, à l'exception de certaines régions du sud du Canada qui devraient enregistrer de plus faibles précipitations en été et à l'automne (figure 12, panneaux F-L). Même dans les régions où les précipitations estivales augmentent, la hausse des taux d'évaporation liée aux étés plus chauds favorisera une tendance à des conditions plus sèches. Le sud du Canada devrait devenir plus aride, bien que l'on constate d'importants écarts entre les scénarios (Sheffield et Wood, 2008; Dai, 2011).

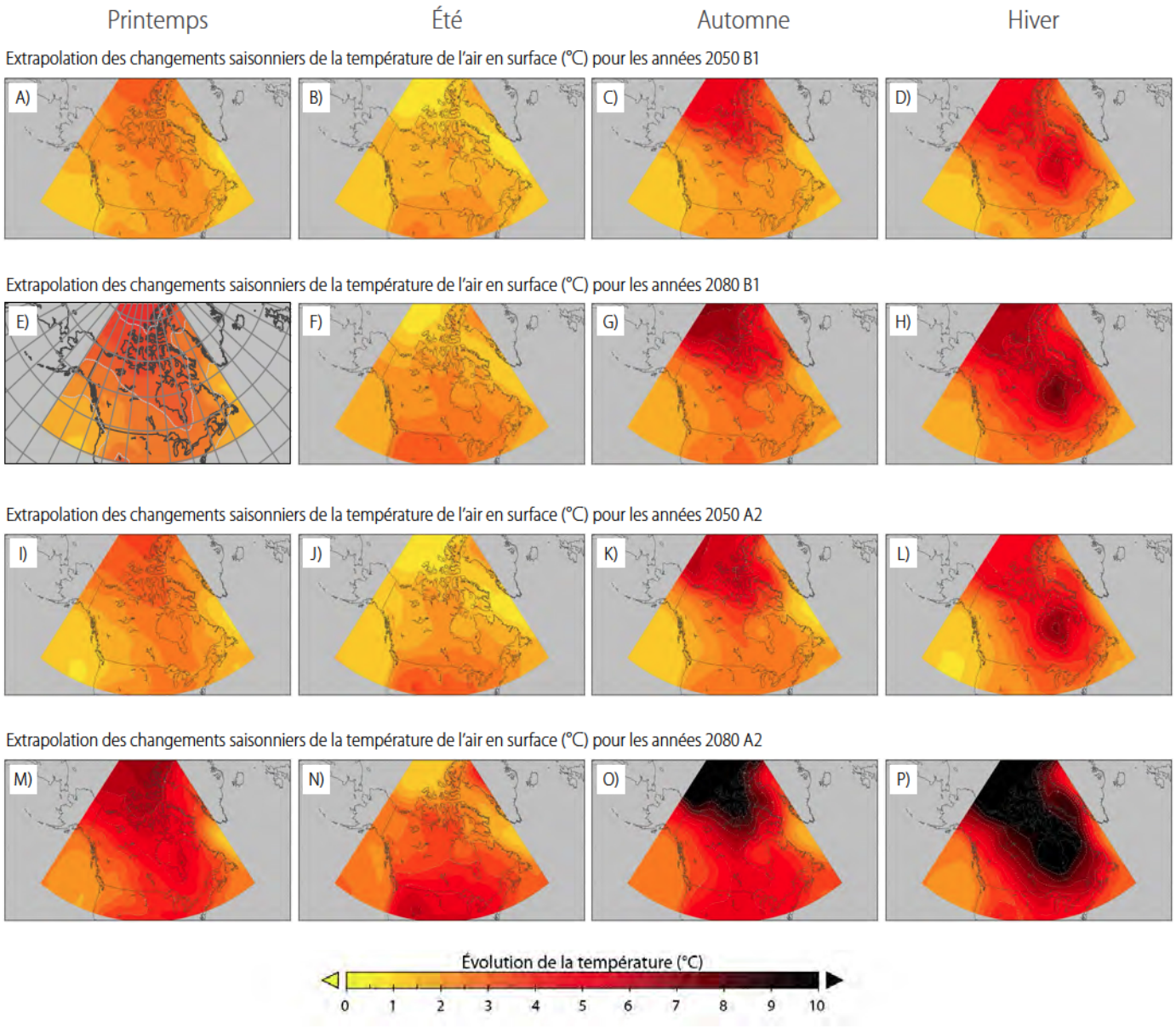


FIGURE 11 : Extrapolation des changements saisonniers de la température à l'échelle du Canada selon divers scénarios du SRES. Les changements sont exprimés par rapport aux valeurs moyennes entre 1961-1990. La première rangée (A à D) représente le scénario B1 du SRES pour le milieu du siècle, la deuxième (E à H), le scénario B1 pour la fin du siècle, la troisième (I à L) représente le scénario A2 pour le milieu du siècle, et la quatrième (M à P), le scénario A2 pour la fin du siècle. Le panneau 1 (A, E, I, M) est le printemps, le panneau 2 (B, F, J, N) est l'été, le panneau 3 (C, G, K, O) est l'automne, le panneau 4 (D, H, L, P) est l'hiver *(source : Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique)*.

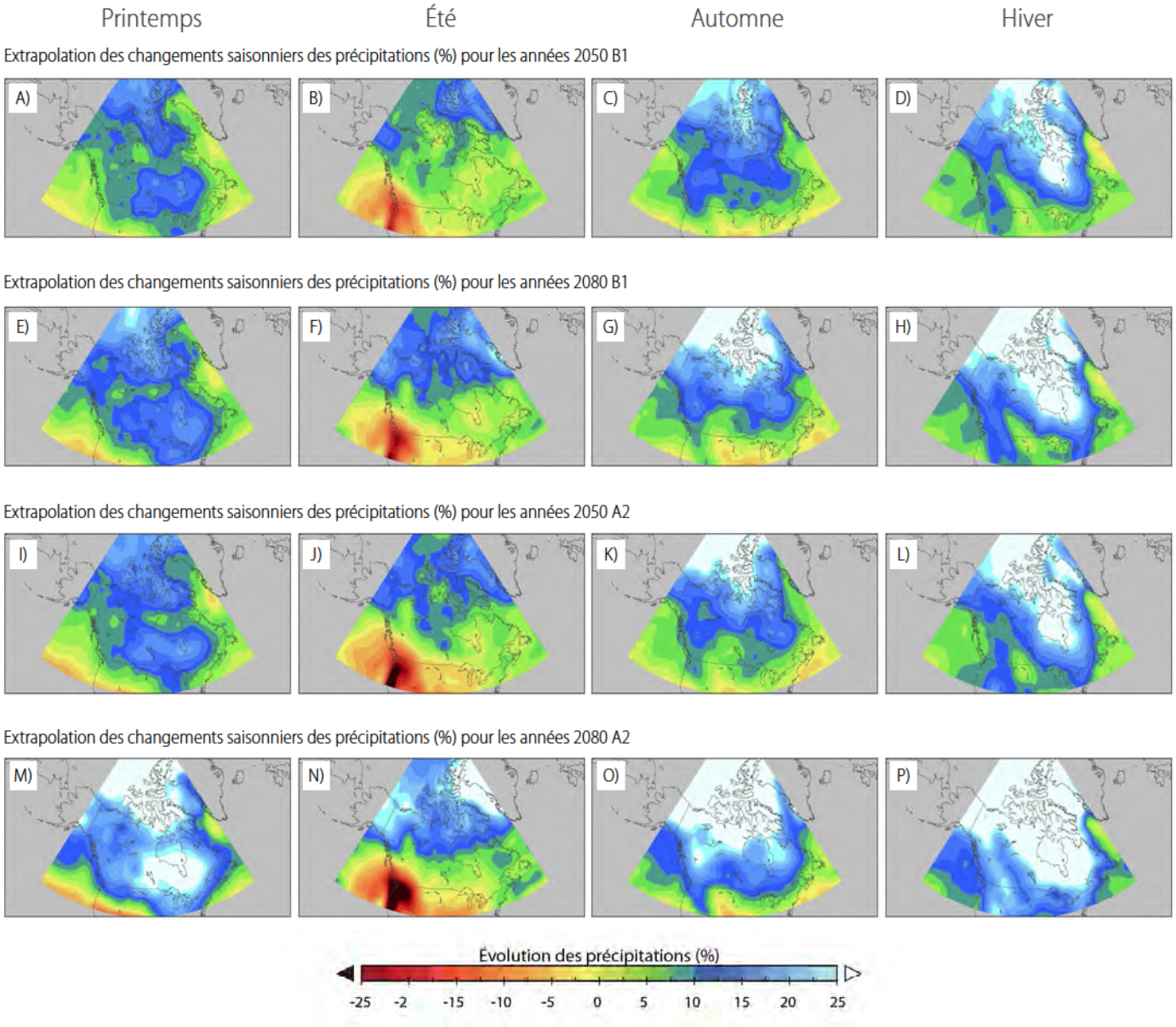


FIGURE 12 : Extrapolation des changements saisonniers des précipitations à l'échelle du Canada, selon divers scénarios du SRES. Les changements sont exprimés par rapport aux valeurs moyennes entre 1961-1990. La première rangée (A à D) représente le scénario B1 pour le milieu du siècle, la deuxième (E à H), le scénario B1 pour la fin du siècle, la troisième (I à L) représente le scénario A2 pour le milieu du siècle, et la quatrième (M à P), le scénario A2 pour la fin du siècle. Le panneau 1 (A, E, I, M) est le printemps, le panneau 2 (B, F, J, N) est l'été, le panneau 3 (C, G, K, O) est l'automne, le panneau 4 (D, H, L, P) est l'hiver *(source : Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique)*.

2.2.3 CHANGEMENTS RELATIFS AUX EXTRÊMES DE TEMPÉRATURE ET DE PRÉCIPITATIONS

Dans le cadre de la planification de l'adaptation, les changements relatifs aux extrêmes climatiques constituent un enjeu de taille. Le Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique (SREX) du GIEC (GIEC, 2012) offre une évaluation complète des changements prévus en matière d'événements météorologiques et climatiques extrêmes tels que les inondations et les sécheresses – à l'échelle mondiale, continentale et régionale –, et s'appuie sur des études principalement fondées sur les expériences de modélisation du CMIP3 (*voir* l'encadré 4; Seneviratne *et al.*, 2012). Les auteurs du rapport ont conclu qu'il est pratiquement certain (probabilité de l'ordre de 99 à 100 %) qu'une hausse de la fréquence et de l'ampleur des journées et des nuits chaudes, à laquelle s'ajoute la diminution de la fréquence et de l'ampleur des journées et des nuits froides, sera observée à l'échelle mondiale au cours du XXIe siècle, et que la durée, la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur devraient très probablement s'accroître sur la majeure partie de la surface terrestre (Seneviratne *et al.*, 2012). Kharin *et al.* (2007) ont conclu que la période de récurrence d'une journée de chaleur extrême se manifestant actuellement à tous les 20 ans[2], passerait à cinq ans dans la majeure partie du Canada d'ici le milieu du siècle. D'ici la fin du siècle, ces épisodes de chaleur devraient être encore plus courants (Gutowski *et al.*, 2008; Seneviratne *et al.*, 2012).

En ce qui concerne les précipitations, Kharin *et al.* (2007) ont établi que les périodes de récurrence de 20 ans des épisodes de précipitations quotidiennes extrêmes passeraient à 10 ans d'ici le milieu du siècle dans les zones de moyenne à haute latitudes, en fonction de scénarios d'émissions moyennes à élevées. Si les auteurs du SREX ont conclu que la fréquence des fortes précipitations devrait s'accroître au cours du XXIe siècle dans de nombreuses régions du monde, ils ont également souligné les incertitudes relativement importantes qui persistent au niveau des projections de précipitations extrêmes (Seneviratne *et al.*, 2012). Les modèles climatiques régionaux, ou les approches utilisées dans le cadre des études statistiques des phénomènes de sous-échelle, peuvent révéler d'importants détails sur les configurations spatiales des changements, qui ne seraient pas forcément visibles dans les études menées à l'échelle mondiale. Par exemple, le modèle régional canadien du climat (MRCC) a été utilisé pour explorer les futurs changements concernant les épisodes de précipitations extrêmes sur un jour ou plusieurs jours durant la saison chaude (avril à septembre) à l'aide du scénario d'émissions A2 (Mladjic *et al.*, 2011). Outre la hausse des valeurs des précipitations extrêmes sur un à sept jours pour les futures périodes de récurrence de 20 ans et plus dans la plupart des régions du Canada (c.-à-d. que l'on s'attendait à des précipitations plus importantes pour les événements ayant une période de récurrence de 20 ans), les auteurs de l'étude ont également conclu que le MRCC sous-estime les extrêmes de précipitations dans la majeure partie du pays, lorsqu'ils sont comparés aux changements observés.

Les études portant sur le risque des changements relatifs à la sécheresse révèlent une forte tendance à la diminution de l'aridité en hiver, et à l'augmentation de l'aridité en été sur une grande partie du territoire canadien. Toutefois, l'absence de concordance des modèles sur l'orientation des changements extrapolés dans de nombreuses régions du Canada, y compris le centre sud du pays, démontre que ces résultats doivent être interprétés avec prudence (*voir* la figure 3.9 dans Seneviratne *et al.*, 2012). L'indice de sécheresse choisi semble également avoir une incidence sur les résultats (Bonsal *et al.*, 2012). On a eu recours au MRCC pour évaluer l'évolution potentielle de la fréquence des jours de sécheresse dans l'ensemble du Canada sur une période allant d'avril à septembre, selon le scénario d'émissions A2 du SRES. Le nombre moyen de jours de sécheresse et la durée des périodes sèches (pour des périodes de récurrence données) accusent une augmentation dans certaines régions du sud du Canada. Les conditions de sécheresse pourraient particulièrement toucher le sud des Prairies dans l'avenir (Sushama *et al.*, 2010, *voir aussi* Bonsal *et al.*, 2012).

3. ÉVOLUTION DE LA CRYOSPHÈRE

Le Canada est un pays nordique où la neige et la glace dominent la couverture terrestre de la majeure partie du pays pendant la plus grande partie de l'année. La présence ou l'absence de neige et de glace sur la surface et sous celle-ci, ainsi que les variations saisonnières, jouent un rôle important sur le plan climatique tant à l'échelle locale qu'à l'échelle mondiale. La modification des composantes de la cryosphère – glace de mer, glace d'eau douce (lac et rivière), couverture neigeuse, glaciers, calottes glaciaires, inlandsis et pergélisol – est un important indicateur de l'évolution du climat, en raison de la sensibilité de ces composantes aux changements climatiques et de l'importance des répercussions connexes. Par exemple, la cryosphère comprend d'importantes réserves d'eau douce sous forme de glaciers, de calottes glacières et d'inlandsis. Lorsque la vitesse de fonte est supérieure au rythme d'accumulation, ce qui est actuellement le cas dans la majeure partie du Canada, l'eau rejetée contribue à faire hausser le niveau des océans. Lorsque la glace se trouve dans un sol gelé (pergélisol), la fonte peut causer l'effondrement de la structure du sol, ce qui entraîne des répercussions sur l'infrastructure sous-jacente et sur l'hydrologie locale. Dans de nombreuses régions du pays, l'approvisionnement en eau et l'humidité du sol peuvent subir les effets de l'évolution de la couverture neigeuse et de la couche de glace; ainsi, le ruissellement dû à la fonte printanière revêt bien souvent une importance capitale lorsqu'il s'agit de satisfaire la forte demande en eau durant la période estivale. Le recul de la glace de mer dans l'Arctique aura des conséquences directes sur la population locale, dont la vie en communauté et les activités économiques seront gravement perturbées. En outre, le recul de la glace de mer favorisera l'accès à l'océan Arctique, ainsi que l'activité maritime dans cette région, ce qui aura des effets tant sur le plan social, qu'économique et environnemental.

[2] Lorsque l'on dit d'un événement qu'il a une période de récurrence de 20 ans, cela signifie que l'événement a en moyenne 5 % de chance de se produire au cours d'une année donnée. De même, un événement ayant une période de récurrence de deux ans a 50 % de chance de survenir au cours d'une année donnée.

Les activités de recherche sur l'Arctique ont pris de l'ampleur au Canada et dans d'autres pays au cours de la troisième Année polaire internationale (API; 2007-2008). Ces efforts, ainsi que de récents rapports sur les changements climatiques dans la région arctique, fournissent des renseignements sur les dernières tendances observées relativement à plusieurs indicateurs cryosphériques (PSEA, 2011; Derksen *et al.*, 2012; NOAA, 2012), qui s'inscrivent dans le cadre d'un ensemble croissant de données probantes sur la diminution généralisée de l'étendue spatiale et de la masse de la cryosphère, en raison du réchauffement de la température de l'air dans l'ensemble des régions circumpolaires du Nord. Le présent rapport comprend des renseignements actualisés sur un certain nombre d'indicateurs clés, concernant notamment le Canada.

3.1 PERGÉLISOL

Le pergélisol englobe la moitié septentrionale de la masse terrestre canadienne. Une zone à pergélisol discontinu relativement étroite et chaude s'étend au sud de la zone à pergélisol continu, plus vaste, qui se prolonge jusqu'à l'Extrême Arctique (Smith, 2011). Dans la zone à pergélisol continu, le pergélisol peut avoir une profondeur allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres. Des températures du sol inférieures aux variations saisonnières en profondeur constituent un bon indicateur de la variabilité du climat de l'échelle décennale à centennale (Romanovsky *et al.*, 2010). Les températures du pergélisol mesurées dans des trous de sonde à de nombreux sites d'observations dans l'ensemble du Canada ont augmenté au cours des 20 à 30 dernières années (Smith *et al.*, 2010; figure 13). L'ampleur du réchauffement varie d'une région à l'autre du fait des différences climatiques, ainsi que d'autres facteurs, notamment l'altitude, la couverture neigeuse et les propriétés physiques du pergélisol. Dans l'ensemble, la température du pergélisol plus froid a augmenté plus rapidement que celle du pergélisol plus chaud. Cette différence est en partie fondée sur l'absence de végétation et l'épaisseur de la couverture neigeuse dans les zones de hautes latitudes qui, au sud de la limite forestière, sert à isoler le sol de la température de l'air (Romanovsky *et al.*, 2010). Lorsque le pergélisol avoisine 0 °C, l'énergie sert à convertir la glace en eau (transition) plutôt qu'à changer la température.

Dans l'ensemble du nord-ouest canadien, le réchauffement du pergélisol s'est maintenu au cours des 20 à 30 dernières années, mais des données probantes sont toutefois venues démontrer que le rythme du réchauffement a récemment ralenti. Le réchauffement n'a commencé qu'en 1993 dans l'est de l'Arctique et le nord du Québec, mais a progressé relativement rapidement depuis (Smith *et al.*, 2010; actualisé dans Derksen *et al.*, 2012). Les températures du pergélisol ont augmenté d'environ 0,2 °C par décennie en moyenne dans les régions chaudes à pergélisol discontinu. Bien que l'on trouve moins de stations de mesures dans le nord, dans les zones froides de la toundra, on a néanmoins enregistré une hausse de ≥1 °C par décennie de la température du pergélisol depuis le milieu des années 1990 (Smith *et al.*, 2010; actualisé dans Derksen *et al.*, 2012). Ces tendances sont illustrées à la figure 13 pour deux sites représentatifs : Norman Wells (pergélisol chaud) et SFC Alert (pergélisol froid). Les hausses de la température du pergélisol enregistrées sont en grande partie attribuables à l'augmentation de la température de l'air en hiver (Smith *et al.*, 2012).

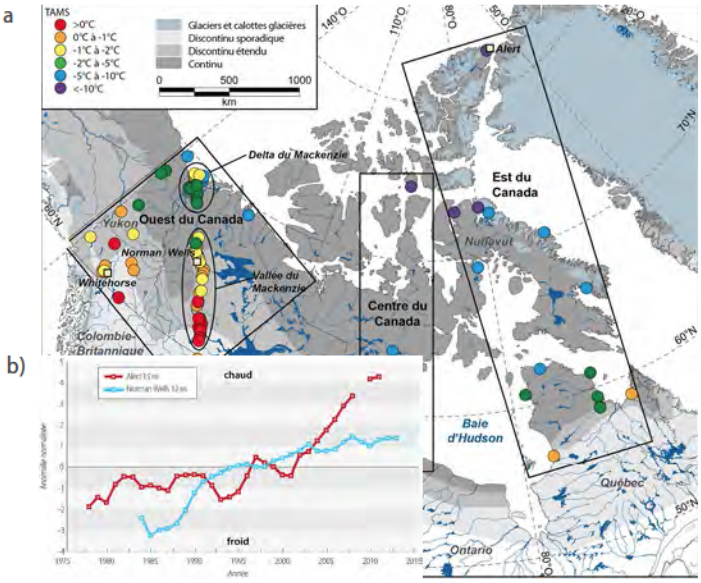


FIGURE 13: a) température annuelle moyenne du sol (TAMS) enregistrée durant l'API (2007-2009;Smith *et al.*, 2010). La TAMS est déterminée au niveau de la profondeur d'amplitude annuelle nulle (profondeur à laquelle pénètre la variation saisonnière) ou de la profondeur de mesure la plus proche. Les zones de pergélisol sont définies selon Heginbottom *et al.* (1995). **b)** séries temporelles d'anomalies normalisées en fonction de la température du pergélisol (Derksen *et al.*, 2012), par rapport à la moyenne de la période allant de 1988 à 2007 observée à un emplacement situé à proximité de Norman Wells (profondeur de 12 m), dans la partie centrale de la vallée du Mackenzie, et à SFC Alert, au Nunavut (profondeur de 15 m), dans l'Extrême Arctique *(source : Sharon Smith, Ressources naturelles Canada).*

Le réchauffement moyen étant plus marqué dans l'Arctique qu'à l'échelle mondiale, la température du pergélisol devrait continuer à augmenter, et ce, à un rythme plus rapide que celui que l'on observe actuellement. Toutefois, malgré le rythme accéléré du réchauffement observé au sein du pergélisol plus froid, les températures moyennes basses de la majeure partie du pergélisol dans l'Arctique font que le dégel complet du pergélisol plus froid pourrait prendre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années (Smith *et al.*, 2010). Ainsi, alors que la mince couche de pergélisol chaud pourrait être amenée à disparaître, dans les régions où le pergélisol est plus froid, le réchauffement climatique se traduira plutôt par un épaississement de la couche active (couche superficielle touchée par une fonte saisonnière) et une diminution de l'épaisseur du pergélisol (Callaghan *et al.*, 2011a).

La fonte du pergélisol devrait avoir d'importantes répercussions tant sur les écosystèmes naturels que sur les communautés humaines. On s'inquiète notamment des effets sur l'hydrologie dans les écosystèmes septentrionaux, sur la décomposition du carbone jusqu'ici retenu dans les sols gelés et donc du rejet connexe de GES dans l'atmosphère, ainsi que sur la perte de soutien structurel qu'offre le sol gelé, ce qui aura une incidence sur le transport et les autres infrastructures (Callaghan *et al.*, 2011a; *voir aussi* les chapitres 3 et 8 du présent rapport).

3.2 COUVERTURE NEIGEUSE

La variabilité annuelle de la couverture neigeuse, qui se mesure en fonction de l'étendue de la couverture de neige et de la durée d'enneigement, est étroitement liée à la température de l'air, notamment durant la période de fonte printanière, au moment où les rétroactions d'albédo de surface sont les plus fortes (Brown *et al.*, 2010; Brown et Robinson, 2011). L'évolution des données printanières sur la couverture neigeuse arctique obtenues par satellite entre 1967 et 2012 témoigne de réductions significatives en Amérique du Nord et en Eurasie en mai et en juin (lorsque la couverture neigeuse est essentiellement située dans la région arctique; Derksen et Brown, 2011, 2012). Le record du plus faible niveau d'étendue de la couverture neigeuse enregistré en juin a été atteint tous les ans en Eurasie depuis 2008, et au cours de trois des cinq dernières années (2008-2012) en Amérique du Nord. Le recul de l'étendue de la couverture neigeuse en juin durant la période allant de 1979 à 2012 (-18 % par décennie en comparaison avec la moyenne enregistrée pour la période allant de 1979 à 2000) est supérieur à celui de l'étendue de la glace de mer en septembre (-13 % par décennie) au cours de la même période (*voir* la section 3.5). Les diminutions de l'étendue de la couverture neigeuse observées en juin au cours de la dernière décennie dépassent maintenant l'étendue minimum de la couverture neigeuse au mois de juin simulée par un ensemble de modèles climatiques pour cette même période (Derksen et Brown, 2012).

Des tendances négatives d'importance significative observées au printemps sur la masse terrestre canadienne (Statistique Canada, 2012; figure 14) témoignent d'un recul de la couverture manteau neigeuse de l'ordre de 7, 13 et 34 % respectivement en avril, mai et juin durant la période allant de 1972 à 2010. Sur le plan régional, la fonte précoce a entraîné d'importantes diminutions de la couverture neigeuse printanière dans l'ouest et le nord du Canada (figure 15, Zhang *et al.*, 2011b), ce qui concorde avec les tendances au réchauffement observées dans ces régions. Les tendances relatives à l'étendue de la couverture de neige printanière au Canada suivent une tendance au recul du manteau neigeux printanier observé à plus grande échelle dans l'hémisphère nord, tendance qui s'est accélérée au cours des dernières décennies, compte tenu du rythme de recul consigné dans les ensembles de données à long terme portant sur la période allant de 1922 à 2010 (Brown et Robinson, 2011).

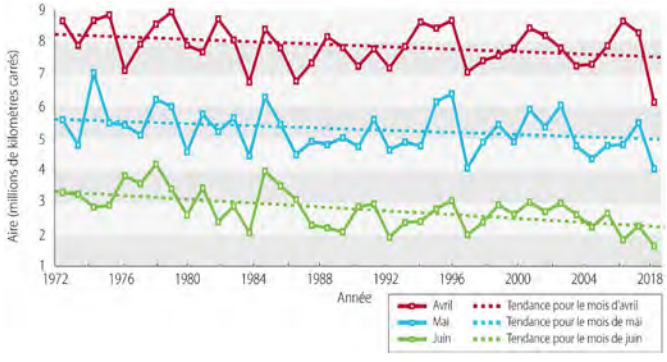


FIGURE 14 : Évolution de l'étendue de la couverture neigeuse printanière sur la masse terrestre canadienne, de 1972 à 2010, pour les mois d'avril (courbes rouges), de mai (courbes blues) et de juin (courbes vertes) *(source : Statistique Canada, 2012)*.

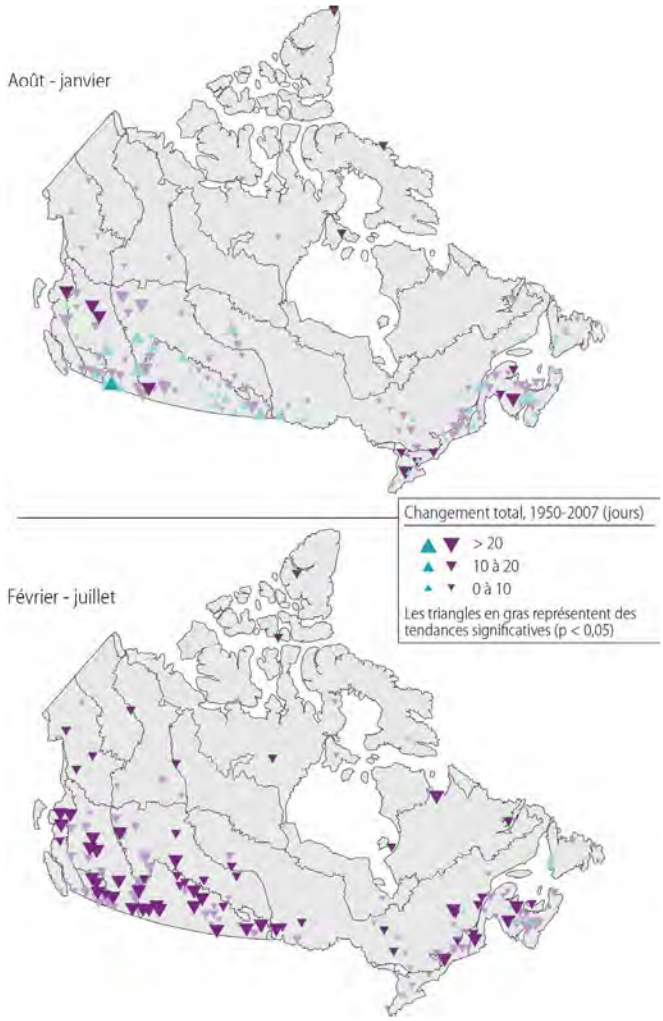


FIGURE 15 : Évolution du nombre de jours avec au moins 2 cm de neige au sol, de 1950 à 2007, durant a) la première moitié de la saison d'enneigement (d'août à janvier), ce qui révèle une modification de la date d'apparition de la couverture neigeuse, et b) la seconde moitié de la saison d'enneigement (de février à juillet), ce qui révèle une modification de la date de fonte de la couverture neigeuse. Les données ont été recueillies à partir d'observations quotidiennes de l'épaisseur de la couche de neige. Les régions délimitées sur la carte représentent des écozones terrestres *(source : Zhang et al., 2011b)*.

À l'échelle du Canada, si aucune tendance concernant la durée d'enneigement automnal n'a été constatée dans les observations quotidiennes de l'épaisseur de la couche de neige (figure 15), certaines stations ont toutefois signalé une tendance d'importance significative à l'échelle régionale à l'apparition plus tardive de la couverture neigeuse. On a cependant constaté une tendance significative à l'apparition plus tardive de l'engel et de la couverture neigeuse dans l'Arctique depuis 1979 (p. ex., Markus *et al.*, 2009; Liston et Hiemstra, 2011).

La difficulté de mettre au point des scénarios présentant l'évolution future de la couverture neigeuse à l'aide de modèles climatiques mondiaux réside à la fois dans l'incapacité des modèles actuels à tenir compte de processus déterminants dans l'évolution de la couverture neigeuse et dans les lacunes relatives aux observations requises pour

effectuer une évaluation exhaustive des modèles (Callaghan *et al.*, 2011b). On prévoit des diminutions généralisées de la durée d'enneigement dans l'hémisphère nord (figure 16; Raisanen, 2008; Brown et Mote, 2009), les principaux changements étant anticipés dans les régions maritimes montagneuses telles que la côte ouest de l'Amérique du Nord. Cette extrapolation se fonde sur le fait que les précipitations hivernales dans ces régions sont très sensibles au moindre changement de température (Brown et Mote, 2009). Les modèles climatiques prévoient également une hausse de l'accumulation neigeuse maximale sous les latitudes boréales polaires en raison de l'augmentation des précipitations durant la saison froide.

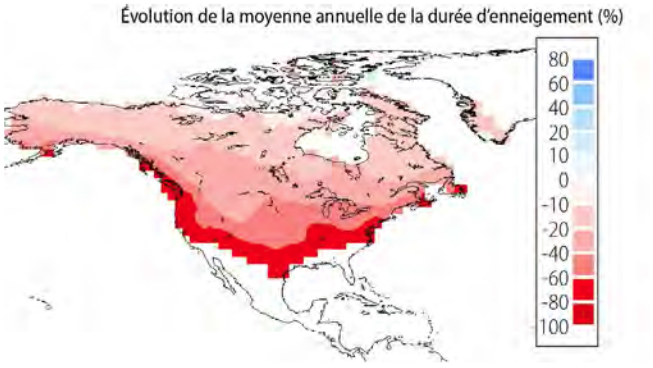


FIGURE 16 : Pourcentage des changements de la durée moyenne annuelle d'enneigement entre 1970 et 1999 et 2070 et 2099 en Amérique du Nord, extrapolé à partir du scénario d'émissions A2 du SRES du GIEC appliqué aux huit modèles climatiques mondiaux utilisés par Brown et Mote (2009, figure 10) *(source : Ross Brown, Division de la recherche climatique)*.

3.3 GLACIERS

De nombreux glaciers peuvent être considérés comme des vestiges du dernier âge glaciaire qui s'est terminé il y a environ 10 000 ans, et ont donc subi une lente érosion (pas nécessairement continue) de leur point d'étendue maximale tout au long des millénaires. Toutefois, les glaciers peuvent également subir des changements assez rapides en raison de l'évolution des températures et des précipitations. Le retrait accéléré des glaciers, qu'on observe à de nombreux endroits depuis la fin du XX^{e} siècle, est probablement le résultat du réchauffement qui s'est produit au cours de cette période (Lemke *et al.*, 2007). Le bilan massique des glaciers (soit la différence entre le gain de masse résultant de l'accumulation de neige et de glace, et la perte de masse découlant de la fonte et du vêlage d'icebergs) est un indicateur fiable des changements climatiques, qui permet de suivre l'évolution des glaciers sur des échelles temporelles de plusieurs années ou de plusieurs décennies.

Les glaciers au Canada se trouvent essentiellement à deux endroits : dans les montagnes de la Cordillère nord-américaine, qui s'étend du Yukon jusqu'au sud de la Colombie-Britannique et de l'Alberta, et le long des côtes orientales de l'archipel arctique canadien, situé dans l'Extrême Arctique. Des pertes de masse significatives ont été observées dans les glaciers de ces deux régions depuis environ 1960 (figure 17; Service mondial de surveillance des glaciers, 2011). Des séries temporelles multidécennales démontrent que les changements ont été plus importants pour les glaciers de la région de la Cordillère nord-américaine (sur les sites de Peyto, de Place et de Helm) que pour ceux de l'Extrême Arctique (stations de Devon nord-ouest, de Meighen et de White; figure 17). Les glaciers de la Cordillère ont, dans l'ensemble, des bilans massiques (soit les pertes massiques nettes) fortement négatifs et n'ont pas subi de fonte aussi importante depuis plusieurs millénaires (Demuth *et al.*, 2008). Par exemple, selon une analyse de l'évolution des glaciers du Yukon sur plusieurs décennies, environ 22 % de la zone émergée de ces glaciers a disparu au cours de la période de 50 ans, depuis 1957-1958 (Barrand et Sharp, 2010). Les glaciers en Colombie-Britannique et en Alberta ont respectivement perdu 11 et 25 % de leur surface émergée au cours de la période de 1985 à 2005 (Bolch *et al.*, 2010).

Les glaciers de l'Extrême Arctique, qui sont plus épais et d'une superficie plus importante, ne réagissent pas aussi rapidement aux changements climatiques régionaux. Si ces glaciers ont moins perdu de masse que ceux de la Cordillère, on constate néanmoins d'importants bilans massiques négatifs depuis le début des années 1960 jusqu'à la première décennie du XXI^{e} siècle (figure 17; Statistique Canada, 2010, Service de surveillance mondial des glaciers, 2011). Le taux de perte massique des glaciers de l'ensemble de l'Extrême Arctique a brusquement augmenté depuis 2005 en raison du réchauffement des températures estivales dans la région (Gardner *et al.*, 2011; Sharp *et al.*, 2011a). Le taux moyen de perte massique observé sur les quatre glaciers étudiés dans les îles de l'archipel de la Reine-Élisabeth entre 2005 et 2009 était près de cinq fois supérieur à la moyenne enregistrée sur environ 40 ans durant la période de 1963 à 2004 (Sharp *et al.*, 2011a). Les récentes séries d'étés chauds dans l'Arctique canadien ont également été liées aux importantes ruptures survenues dans les plateformes de glace flottante qui longe le nord de l'île d'Ellesmere (Copland *et al.*, 2007; Sharp *et al.*, 2011b; Pope *et al.*, 2012).

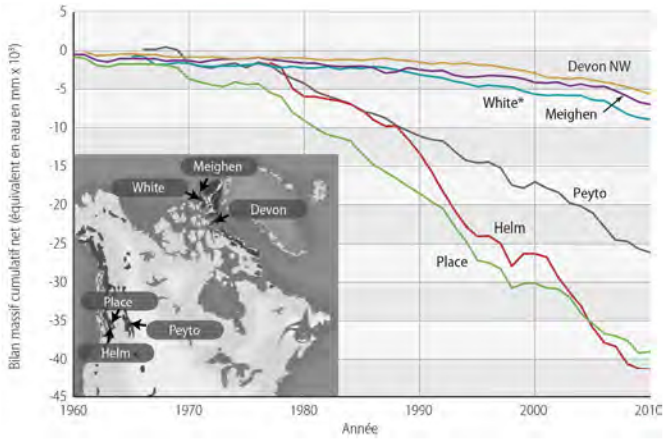


FIGURE 17 : Configuration du bilan massique net cumulatif des glaciers depuis le début des observations sur les sites de référence situés dans l'Extrême Arctique canadien (calottes glaciaires de Devon et de Meighen, et glacier White*), les Rocheuses canadiennes (glacier Peyto) et les monts Cascades, ainsi que la partie sud de la chaîne Côtière (glaciers Helm et Place). Les valeurs représentent l'évolution moyenne de l'épaisseur sur la superficie du glacier (équivalent en eau exprimé en mm x 10^3). Carte en médaillon : emplacement de chacun des sites du panneau A. *Les données relatives au glacier White ont été reproduites avec l'aimable autorisation de l'Université Trent *(source : Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada)*.

L'évolution du bilan massique des glaciers dans l'Extrême Arctique canadien est essentiellement attribuable aux changements relatifs à la fonte estivale, puisque l'accumulation neigeuse ne varie pas beaucoup d'une année à l'autre. Étant donné que la grande sensibilité des glaciers de l'Extrême Arctique à la température fera plus que contrebalancer les hausses de précipitations anticipées, on s'attend à ce que le réchauffement constant favorise l'ablation continue des glaciers. Les glaciers de l'Arctique devraient être une cause importante de l'élévation du niveau de la mer au XXIe siècle (Gardner *et al.*, 2011; Radić et Hock, 2011; Lenaerts *et al.*, 2013; *voir aussi* la section 5.4). La constante réduction de l'étendue des glaciers devrait contribuer à une diminution du ruissellement à long terme et avoir une incidence sur la disponibilité de l'eau des rivières alimentées par les glaciers, ce qui aura des répercussions sur l'habitat aquatique et sur plusieurs activités humaines, notamment la production d'hydroélectricité (Sharp *et al.*, 2011a).

3.4 GLACE D'EAU DOUCE

À l'aide des données sur la couche de glace recueillies de 1950 à 2005, des tendances à la fonte précoce ont été observées dans la majeure partie du pays, mais plus particulièrement dans l'ouest (figure 18; Duguay *et al.*, 2006; Latifovic et Pouliot, 2007). Aucune tendance significative n'a été observée en ce qui concerne les dates d'englacement des lacs (Duguay *et al.*, 2006). Une tendance à la rupture plus précoce de la glace de rivière a également été observée tout au long de la seconde moitié du XXe siècle, notamment dans l'ouest du Canada (Beltaos et Prowse, 2009). L'englacement des rivières se caractérise par sa complexité spatiale, et bien que l'on ait constaté que la glace se formait plus tard à certains endroits, aucune tendance constante n'a été observée à l'échelle du Canada (Beltaos et Prowse, 2009).

La variabilité climatique interne à grande échelle (*voir* l'encadré 3) a également une incidence sur l'évolution de la couche de glace lacustre (p. ex., Bonsal *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2012). Les effets les plus marqués sont généralement attribuables à la variabilité du Pacifique, bien que les régions situées à l'extrême est du Canada soient plus touchées par l'oscillation nord-atlantique et que la région des Grands Lacs soit, quant à elle, soumise à la fois à la variabilité du Pacifique et à celle de l'Atlantique (Brown et Duguay, 2010).

Les modèles relatifs à la glace lacustre engendrés par le MRCC (scénario A2, *voir* l'encadré 4) présentent des extrapolations de l'état de la couche de glace au milieu du XXIe siècle dans l'ensemble du Canada. On s'attend généralement à ce que la rupture de la couche de glace survienne entre une et trois semaines et demie plus tôt, tandis que l'engel devrait se produire jusqu'à deux semaines plus tard. La durée de la couverture de glace pourrait ainsi être réduite d'un mois en fonction de la profondeur du lac; les lacs plus profonds devraient subir une diminution plus importante (Brown et Duguay, 2011; Dibike *et al.*, 2012). La durée de la couverture de glace des rivières devrait également être réduite d'environ trois semaines, d'après l'évolution prévue de l'isotherme 0 °C (Prowse *et al.*, 2007). L'épaisseur maximale de la glace lacustre devrait diminuer de 10 à 30 cm, voire de plus de 40 cm dans certaines régions arctiques (Brown et Duguay, 2011; Dibike *et al.*, 2012). L'évolution de l'épaisseur de la glace sera également touchée par la couverture neigeuse, dans la mesure où la diminution sera plus marquée s'il n'y a pas de couche de neige. On s'attend également à une importante baisse du nombre de régions de l'Extrême Arctique où l'on observe une couche de glace pérenne ou estivale (Brown et Duguay, 2011).

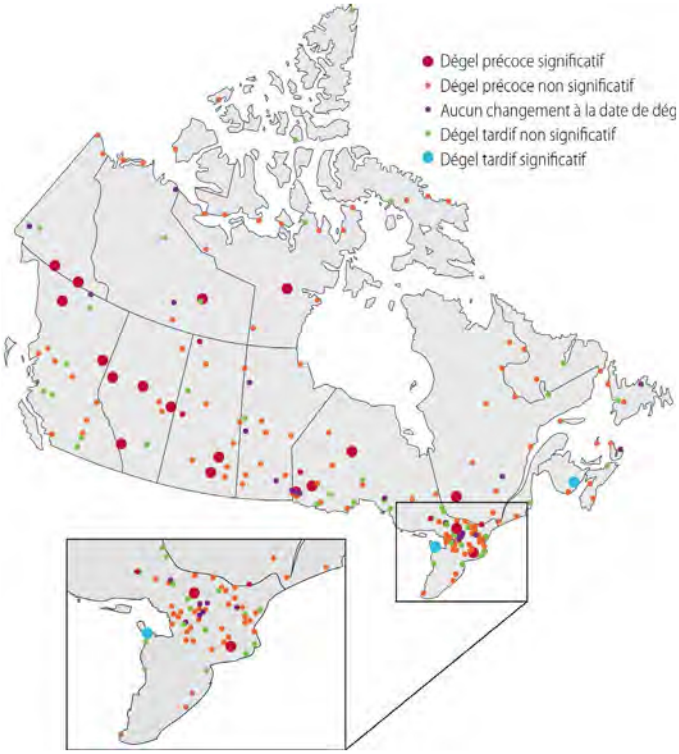


FIGURE 18 : Changements relatifs aux dates de dégel des lacs au Canada, de 1950 à 2005. Lacs pour lesquels une tendance d'importance significative a été observée à un niveau de confiance de 90 % et des mesures ont été prises durant au moins 60 % de la période comprise entre 1950 et 2005 *(source : VeilleAuGel, 2008)*.

L'évolution prévue de la couche de glace aura une incidence sur le rôle des lacs dans les processus énergétiques, hydriques et biogéochimiques dans les régions froides, et devrait entraîner des changements au niveau des écosystèmes lacustres (Prowse *et al.*, 2011b). Le raccourcissement de la saison des glaces et la réduction de la glace d'eau douce auront des effets néfastes sur la durée et la stabilité des routes de glace d'hiver dans le nord du Canada (Furgal et Prowse, 2008; *voir aussi* le chapitre 8).

3.5 GLACE DE MER

De nombreuses études témoignent du recul de la couche de glace de mer arctique durant l'été tout au long de la période où l'on a pu avoir recours à l'imagerie satellite (soit de 1979 à aujourd'hui), ainsi que l'apparition d'une couche de glace plus récente et plus mince (Derksen *et al.*, 2012; Stroeve *et al.*, 2012a et les études auxquelles ils font référence). Les résultats présentés ci-après font état de tendances issues d'études récentes, qui s'appliquent particulièrement à la glace de mer dans les eaux canadiennes septentrionales (y compris les régions de l'Arctique et de la baie d'Hudson, ainsi que la partie nord de la côte Est). Les principaux indicateurs de suivi des changements utilisés sont l'étendue des glaces à la fin de l'été (en septembre), soit au moment de l'année où la couche de glace de mer est à son minimum, et l'étendue des glaces à la fin de l'hiver (en mars), soit lorsque la couche atteint son maximum.

Le recul de l'étendue de la glace de mer arctique en septembre, mentionné dans l'évaluation de 2008 (Lemmen *et al.*, 2008), en fonction de données allant jusqu'à 2005, s'est poursuivi. Le recul observé au cours de la dernière décennie (1999-2010) s'est accéléré par rapport à ce qui avait été observé durant la période de 1979 à 1998 (Stroeve *et al.*, 2012a). Jusqu'à présent, les plus faibles étendues de glace de mer observées en septembre correspondent aux cinq étés qui s'étendent de 2007 à 2011 (Maslanik *et al.*, 2011; Perovich *et al.*, 2011; Comiso, 2012). L'étendue de la glace de mer a atteint un nouveau minimum absolu en septembre 2012, de 18 % inférieur au minimum absolu enregistré en 2007 (Perovich *et al.*, 2012). Durant la période d'observation de la glace de mer par satellite, l'étendue de la glace à la fin de l'été a diminué de 13 % par décennie (de 1979 à 2012). Une réduction de l'étendue maximale de glace de mer en hiver (au mois de mars) est devenue manifeste au cours des dix dernières années. La tendance à la baisse aurait progressé de 2,6 % par décennie depuis le début du recours à l'imagerie satellite, soit de 1979 à 2012 (Perovich *et al.*, 2012; figure 19). L'évolution de l'étendue de la glace de mer a été imputée à un ensemble de facteurs, soit le forçage associé à la hausse des niveaux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et la variabilité naturelle de la température de l'air, de la circulation atmosphériqueocéanique et de la température de l'océan (Min *et al.*, 2008; Stroeve *et al.*, 2012a).

Un certain nombre d'études ont fait état du passage d'une couverture glacielle anciennement caractérisée par une épaisse couche de glace pluriannuelle à une couverture de plus en plus caractérisée par une fine couche de glace de première année (Maslanik *et al.*, 2011; Comiso, 2012; Derksen *et al.*, 2012; Stroeve *et al.*, 2012a). L'étendue de la glace pluriannuelle dans l'océan Arctique (sauf dans la région de l'archipel arctique canadien) a diminué de 33 % en mars et de 50 % en septembre entre 1980 et 2011 (Maslanik *et al.*, 2011). La hausse de la variabilité de la couche de glace de mer en septembre, observée depuis le début des années 1990, a été associée à la progression de la jeune glace (Stroeve *et al.*, 2012a), dans la mesure où la glace de première année réagit rapidement aux conditions climatiques dominantes, soit qu'elle fonde rapidement durant les étés chauds, soit qu'elle se reforme de manière durable lorsque les températures sont suffisamment froides. La diminution du volume et de l'étendue de la glace de mer arctique liée au réchauffement climatique continu devrait se poursuivre au cours des prochaines décennies. Il y a de

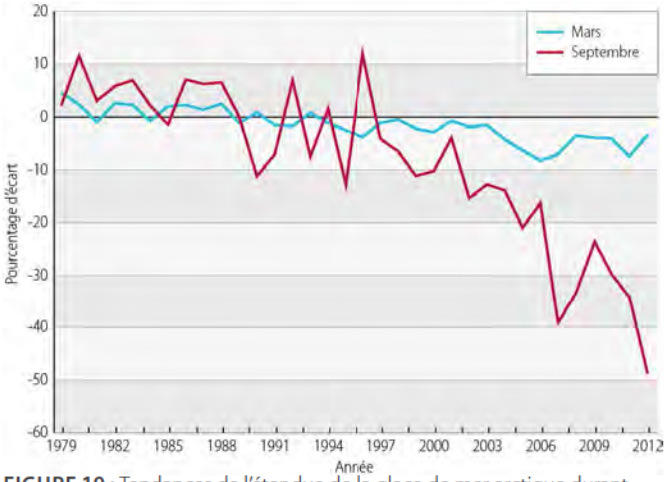


FIGURE 19 : Tendances de l'étendue de la glace de mer arctique durant la période de 1979 à 2012 présentées sous forme de séries temporelles des écarts exprimés en pourcentage de l'étendue de la glace en mars et en septembre, par rapport aux moyennes enregistrées pour la période allant de 1979 à 2000. Le taux de diminution de l'étendue de la glace en septembre et en mars est, respectivement, de 2,6 % et de 13 % par décennie (indiqué par la régression linéaire des moindres carrés). Les deux tendances sont d'importance significative *(source : Perovich et al., 2012).*

fortes probabilités que, d'ici le milieu du siècle, la glace disparaisse presque complètement de l'océan Arctique durant l'été, ce qui signifie qu'on y trouverait presque exclusivement de la glace de première année alors que les éventuels vestiges de glace pluriannuels se retrouveraient possiblement dans la région de l'archipel arctique canadien (Meier *et al.*, 2011; Massonnet, *et al.*, 2012; Stroeve *et al.*, 2012b; Wang et Overland, 2012).

Un document sur l'évolution de la couche de glace dans les zones de glace de mer du Canada portant sur une longue période (remontant aux années 1960) a été préparé à l'aide de données historiques provenant des archives du Service canadien des glaces (Howell *et al.*, 2008a; Tivy *et al.*, 2011). Ces ensembles de données recueillies sur une longue période confirment le recul de la couche de glace estivale dans les eaux canadiennes septentrionales; la couche de glace de mer en été a diminué de 3 à 17 % par décennie entre 1968 et 2010. Le déclin est particulièrement visible dans le détroit d'Hudson et dans le nord de la mer du Labrador (figure 20). Dans la plupart des zones de glace de mer du Canada, la tendance observée depuis 1968 est moins importante que celle enregistrée depuis 1979 (Tivy *et al.*, 2011), ce qui témoigne d'une accélération du déclin au cours des dernières décennies. Les données ont également confirmé l'important recul de la glace pluriannuelle observé dans le sud de la mer de Beaufort et dans le bassin Foxe (où elle a, respectivement, diminué de 16 % et de 20 % par décennie; figure 20). Aucune diminution significative de la glace pluriannuelle n'a cependant été observée dans la région de l'archipel arctique canadien (AAC), ce qui s'explique par l'arrivée de glace pluriannuelle en provenance de l'océan Arctique (Howell *et al.*, 2009).

L'état de la glace dans l'AAC dépend dans une grande mesure des vents dominants. C'est la raison pour laquelle, en dépit des récentes saisons d'eaux libres observées plusieurs années de suite à la fin de l'été dans le passage du Nord-Ouest (PNO; Perovich *et al.*, 2011), l'état de la glace dans le PNO, y compris de la glace pluriannuelle qui peut y être présente, devrait rester variable et pourrait présenter un danger pour la navigation pendant un certain temps (Melling, 2002; Howell *et al.*, 2008a, b; Derksen *et al.*, 2012). Les extrapolations de modèles relatifs au futur état de la glace dans l'AAC corroborent cette conclusion (Sou et Flato, 2009; Stephenson *et al.*, 2011). Les diminutions prévues de la concentration et de l'épaisseur de la glace dans l'AAC (scénario A2) révèlent que la voie sud du PNO pourrait être ouverte en permanence à la navigation d'ici le milieu du siècle (d'après des facteurs d'accessibilité de l'ordre de 60 %, pour ce qui est de la concentration de la glace, et de moins de 1 m, pour ce qui est de son épaisseur). En revanche, l'accès à la voie passant par les eaux profondes du Nord restera restreint par la glace une grande partie du temps (~40 %; Sou et Flato, 2009). Stephenson *et al.* (2011) sont parvenus à une conclusion similaire, mais ne prévoyaient pas d'accès constant au PNO.

Des observations font également état d'un recul important de l'étendue de la glace de mer dans la région de Terre-Neuve-et-Labrador et dans le golfe du Saint-Laurent, en hiver seulement puisque le golfe est exempt de glace pendant l'été (Cavalieri et Parkinson, 2012; Hutchings *et al.*, 2012), bien que l'on ait eu noté une grande variabilité à l'échelle interannuelle et décennale dans les régions du sud (Colbourne *et al.*, 2012; Galbraith *et al.*, 2012b). Si les modèles du CMIP3 et du CMIP5 témoignent bien d'une diminution de l'étendue de la glace dans la région nord-ouest de l'Atlantique au cours des prochaines décennies, ils ne parviennent toutefois pas à cerner toutes les caractéristiques propres à la configuration

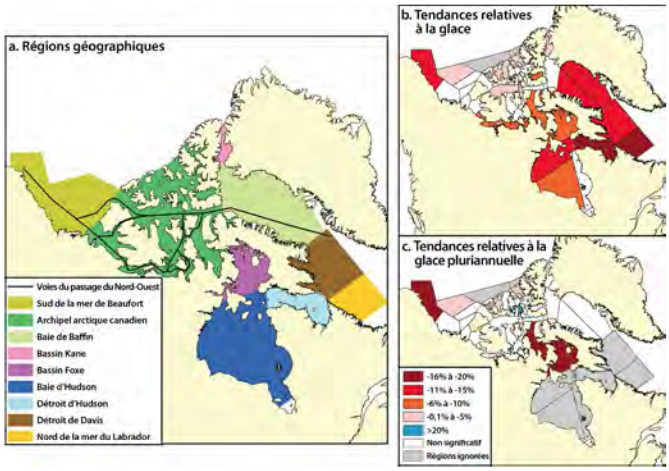


FIGURE 20 : Tendances estivales relatives à la zone totale de glace de mer (b) et à la zone de glace pluriannuelle (c) pour les zones de glace de mer du Canada (a), de 1968 à 2010 (valeurs exprimées en % par décennie). Seules les tendances d'importance significative à un niveau de confiance de 95 % sont présentées *(source: Derksen et al., 2012, actualisé à partir de Tivy et al., 2011).*

des glaces observées dans la région. Compte tenu de l'important recul de la glace de mer observé récemment dans le golfe du Saint-Laurent et au Grand Banc, ainsi que du réchauffement des températures de l'air qui devrait se poursuivre, on pourrait voir des hivers sans glace dans ces régions durant les années chaudes d'ici deux décennies (Hammil et Galbraith, 2012), mais une partie de la couche de glace devrait persister durant les années plus froides.

4. ÉVOLUTION DES RESSOURCES EN EAU DOUCE

Avec plus de 8500 rivières et 2 millions de lacs couvrant presque 9 % de sa masse terrestre totale, le Canada est considéré comme ayant d'importantes ressources hydriques (Monk et Baird, 2011). Cependant, plus des trois quarts du volume d'eau charriée par les rivières se trouve dans le nord, où la densité de la population et le développement sont faibles.

Il est difficile d'obtenir une perspective nationale de la disponibilité de l'eau douce, notamment en raison des importantes variations régionales dont font preuve le climat et les caractéristiques des bassins versants. Le prélèvement, dans les stations de jaugeage, de mesures sur le long terme dans des conditions proches de l'état naturel n'est pas équitablement réparti sur l'ensemble du territoire canadien. On constate des lacunes à cet effet dans l'archipel arctique, le sud des Prairies et certaines parties très développées du pays. Les récentes études sur les tendances et les répercussions des changements climatiques ont surtout été menées à l'échelle régionale. La présente étude utilise le ruissellement et l'écoulement fluvial, ainsi que le niveau des lacs, comme indicateurs des ressources en eau douce, et s'appuie sur les données d'observation à long terme, ainsi que sur la recherche menée sur ces indicateurs.

4.1 CHANGEMENTS OBSERVÉS DANS LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU DOUCE

Tel que mentionné dans les sections précédentes, de nombreux facteurs climatiques clés du régime hydrologique subissent des changements à l'échelle du Canada. Par exemple, dans de nombreuses régions, la proportion des précipitations décroît à mesure que les chutes de neige diminuent; la superficie et la durée de la couverture neigeuse diminuent, ce qui a des répercussions sur le volume et le rythme de l'écoulement printanier; et la hausse de la température de l'air favorise, quant à elle, l'évapotranspiration et la perte d'eau dans l'atmosphère. Ces tendances ont des effets sur l'équilibre hydrique et se manifestent par une modification des périodes de disponibilité de l'eau et du volume d'eau disponible (Bates *et al.*, 2008).

4.1.1 ÉCOULEMENT FLUVIAL

De nombreuses stations de jaugeage dans l'ensemble du Canada (*voir* l'encadré 5) font état de changements dans le ruissellement et l'écoulement fluvial par rapport au débit moyen annuel, le débit médian pour certains mois, le débit maximal et le débit minimal annuels, le rythme et la durée des événements, ainsi que la variabilité de l'écoulement (*voir* le tableau 1). Les cycles varient cependant d'une région à l'autre (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010; Monk *et al.*, 2011). C'est durant les mois d'hiver (de décembre à février) que l'on a observé dans le plus grand nombre de stations de jaugeage une hausse significative du ruissellement. Le ruissellement médian du mois d'avril a également augmenté. Ces tendances peuvent être liées au réchauffement en hiver et au printemps. Le ruissellement a diminué de mai à septembre, en particulier durant le mois d'août (une tendance d'importance significative a été notée dans 28 % des stations; Monk *et al.*, 2011).

Les tendances de l'écoulement maximal annuel, généralement représentatives de la crue nivale associée à la fonte des neiges au printemps ainsi qu'aux épisodes pluvieux, accusent généralement une baisse (figure 21A) – seules 17 % des stations ont toutefois enregistré une tendance à la baisse d'importance significative (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010). L'écoulement minimal annuel a augmenté dans le nord-ouest et dans l'ouest du pays, tandis que l'étiage a diminué dans le sud du Canada (figure 21B). Des tendances annuelles et mensuelles similaires ont été observées dans d'autres études (Abdul-Aziz et Burn, 2006; Burn *et al.*, 2008, 2010; Khaliq; *et al.*, 2008; Cunderlik et Ouarda, 2009; Monk *et al.*, 2011, 2012). Les résultats d'analyse de tendances peuvent varier en fonction de la longueur de la période analysée et des variations naturelles se manifestant sur une décennie ou plus (Khaliq *et al.*, 2008; Chen et Grasby, 2009).

ENCADRÉ 5

ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT FLUVIAL

De nombreux résultats présentés ici sont tirés de l'évaluation nationale intitulée *Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes* (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010; Monk et Baird, 2011), qui a permis d'établir une vision nationale des tendances hydrologiques pour la période de 1970 à 2005. Des données provenant de 172 stations de jaugeage de l'écoulement fluvial ont été recueillies grâce au Réseau hydrométrique de référence. Ces stations présentent des conditions pour ainsi dire « vierges », où l'utilisation de la terre et la couverture terrestre sont relativement stables et où l'incidence sur l'écoulement de la régularisation, du prélèvement et de la dérivation est minime (Brimley *et al.*, 1999; Harvey *et al.*, 1999).

4.1.2 NIVEAU DES LACS

Le niveau des lacs est un indicateur évident de l'équilibre hydrique, de l'influence humaine et des réserves d'eau (Williamson *et al.*, 2009). Bien que le Canada compte un grand nombre de lacs, le nombre restreint de stations d'observation lacustres ne permet pas d'évaluer à l'échelle nationale les tendances relatives au niveau des lacs. La présente section portera donc sur l'examen des récentes analyses régionales menées dans les Prairies et les Grands Lacs laurentiens, qui ont utilisé les niveaux phréatiques ainsi que l'apport d'eau net dans le bassin et ses composantes à titre d'indicateurs.

Variable	Description de la tendance
Ampleur du ruissellement médian mensuel	Peu de tendances émergent. Forte THS du ruissellement au mois d'avril; THS du ruissellement en décembre, janvier, février et mars; et TBS du ruissellement de mai à août
Ampleur du ruissellement minimal (1, 3, 7, 30 et 90 jours)	ATC en général, notamment pour les indicateurs ayant une période d'établissement de la moyenne plus longue. Environ un quart des sites affichent une TBS
Ampleur du ruissellement maximal (1, 3, 7, 30 et 90 jours)	ATC dans la majeure partie des cas, mais un grand nombre de sites (en particulier pour les indicateurs ayant une longue période d'établissement de la moyenne) affichent une TPB
Date du minimum annuel sur une journée	Peu de sites affichent des tendances d'importance significative. Près de la moitié des sites affichent une TPH relativement au minimum annuel tardif
Date du maximum annuel sur une journée	Peu de sites affichent des tendances d'importance significative. La majorité des sites affichent une tendance à un maximum annuel précoce
Fréquence des événements d'écoulement extrêmement faible	ATC pour la majorité des sites
Fréquence des événements d'écoulement extrêmement élevé	ATC pour la majorité des sites
Durée des événements extrêmes	ATC pour la majorité des sites Légère TBS de la durée des événements de faible impulsion
Rapidité des événements	Quelques sites présentent des tendances d'importance significative concernant la vitesse de montée et de baisse. TPH pour la vitesse de baisse et TPB pour la vitesse de montée dans le cas de près de la moitié des sites. THS de nombreux rappels dans un tiers des sites

TABLEAU 1 : Résumé des tendances nationales en matière d'écoulement fluvial, fondé sur l'analyse des résultats du *Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes* pour la période allant de 1970 à 2005, et sur l'examen des publications canadiennes portant sur les tendances hydrologiques *(source : Monk et al., 2011; Monk et Baird, 2011)*. Remarques : TBS - tendance à la baisse d'importance significative ($p < 0,1$); THS - tendance à la hausse d'importance significative ($p < 0,1$); ATC - aucune tendance claire ou tendance à la hausse et à la baisse; TPB - tendance portée à la baisse ($p > 0,1$ - c.-à-d. qui n'est pas significative) et TPH - tendance portée à la hausse ($p > 0,1$ - c.-à-d. qui n'est pas significative).

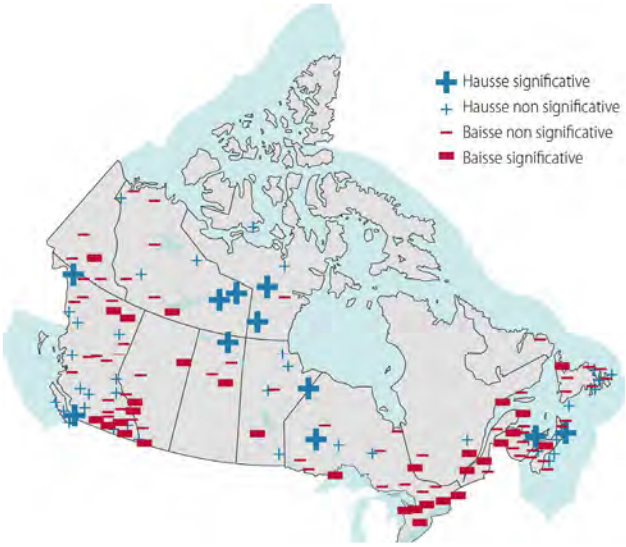


FIGURE 21 A : Tendances de l'écoulement fluvial maximal sur une journée des 172 rivières du Réseau hydrométrique de référence, entre1970 et 2005 *(source : Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010).*

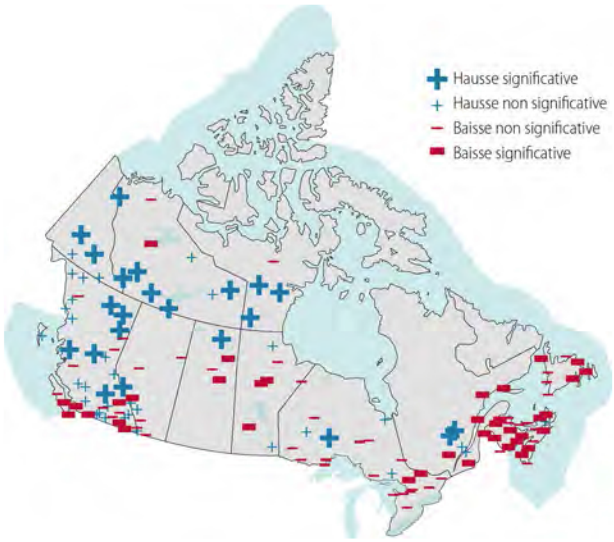


FIGURE 21 B : Tendances de l'écoulement fluvial minimal sur une journée des 172 rivières du Réseau hydrométrique de référence, entre1970 et 2005 *(source : Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010).*

LES PRAIRIES

Van der Kamp *et al.* (2008) ont créé une base de données sur les niveaux phréatiques observés et reconstruits de 16 bassins lacustres fermés dans les Prairies canadiennes semi-arides en vue d'étudier l'évolution à long terme des niveaux phréatiques. Les observations n'ont pas été menées de façon continue entre 1910 et 2006, mais la plupart portaient sur la période allant des années 1960 à nos jours. De nombreux lacs affichent une tendance à la baisse de leurs niveaux phréatiques, ce qui pourrait toutefois s'expliquer par la variabilité décennale. Il est probable que cette diminution soit le résultat d'une interaction dynamique entre la baisse du ruissellement et des précipitations et la hausse des pertes attribuables à l'évaporation. Toutefois, à partir des années 1960, certains lacs de la région centre-est de la Saskatchewan ont vu leurs niveaux phréatiques s'élever, phénomène peut-être attribuable aux changements climatiques, ainsi qu'à d'autres facteurs tels que les pratiques agricoles ou encore une modification de la couche terrestre et de l'utilisation du sol.

GRANDS LACS LAURENTIENS

Les niveaux phréatiques des Grands Lacs laurentiens varient. Les niveaux d'eau atteignent généralement leur maximum en été et sont au plus bas en hiver et au printemps. Des études ont cependant mis en évidence un début précoce du cycle saisonnier et des changements de l'amplitude des niveaux phréatiques (Argyilan et Forman, 2003; Lenters, 2004). Les niveaux phréatiques des lacs ont également subi des fluctuations interannuelles ou interdécennales de moins de 2 m (selon le lac) au cours de la période de 1918 à 2012 (Wilcox *et al.*, 2007; Pêches et Océans Canada, 2013a). La dernière période où des niveaux phréatiques élevés ont été enregistrés pour l'ensemble des Grands Lacs remonte aux années 1980. Les niveaux ont ensuite rapidement baissé, principalement entre 1997 et 2000 (Assel *et al.*, 2004). Les niveaux phréatiques des Grands Lacs d'amont (Supérieur, Michigan et Huron) observés entre 1998 et 2013 étaient bas. Les niveaux moyens mensuels du lac Michigan-Huron étaient au plus bas en décembre 2012 et en janvier 2013 (Environnement Canada, 2013; Pêches et Océans Canada, 2013b), alors que le niveau du lac Supérieur a atteint son minimum absolu en août et en septembre 2007 (Pêches et Océans Canada, 2007). Un certain nombre de facteurs potentiels ont été cernés, notamment les changements climatiques, le relèvement tectonique et l'influence de l'homme sur l'environnement (p. ex., dragage des voies interlacustres; ÉIGLA, 2012). Une baisse similaire du niveau phréatique observée à la même époque dans des bassins d'infiltration voisins du Wisconsin semble indiquer que les variations climatiques régionales peuvent être un facteur commun (Stow *et al.*, 2008). La modification des niveaux phréatiques des Grands Lacs a également été associée aux modèles de circulation océanique et atmosphérique, à savoir l'oscillation multidécennale de l'Atlantique, l'oscillation décennale du Pacifique et l'oscillation australe El Niño (Ghanbari et Bravo, 2008; Hanrahan *et al.*, 2009; Wiles *et al.*, 2009).

L'alimentation en eau des Grands Lacs peut également être représentée par l'apport d'eau net dans le bassin – une évaluation quantitative des facteurs tels que les précipitations lacustres, le ruissellement et l'évaporation, qui ont une incidence sur les niveaux d'eau. L'analyse de ces facteurs sous-jacents et des tendances dans le lac Supérieur (1860-2007) et le lac Michigan-Huron (1860-2006) a mis en évidence l'existence d'une tendance linéaire négative dans les niveaux phréatiques (notamment depuis la fin du XX^{e} siècle), qui pourrait être liée aux changements observés dans les taux d'évaporation et de précipitations nettes (soit les précipitations moins l'évaporation; Sellinger *et al.*, 2008; Lamon et Stow, 2010). Les auteurs de l'ÉIGLA (2012) ont analysé en profondeur les tendances et les étapes charnières relatives aux composantes de l'équilibre hydrique pour la période allant de 1948 à 2008 (figure 22; *voir aussi* l'étude de cas 4 au chapitre 8). L'évaporation a augmenté dans l'ensemble des Grands Lacs depuis 1948, mais cette tendance a, dans la plupart des cas, été compensée par une hausse des précipitations. Ce n'est cependant pas le cas pour le bassin du lac Supérieur où, si l'évaporation a effectivement augmenté, les précipitations sont restées relativement constantes, entraînant ainsi une baisse au niveau des réserves d'eau. Étant donné que la majeure partie des tendances observées se situent dans la fourchette de variabilité naturelle, il n'est pas possible d'attribuer ces phénomènes aux changements climatiques (Hayhoe *et al.*, 2010).

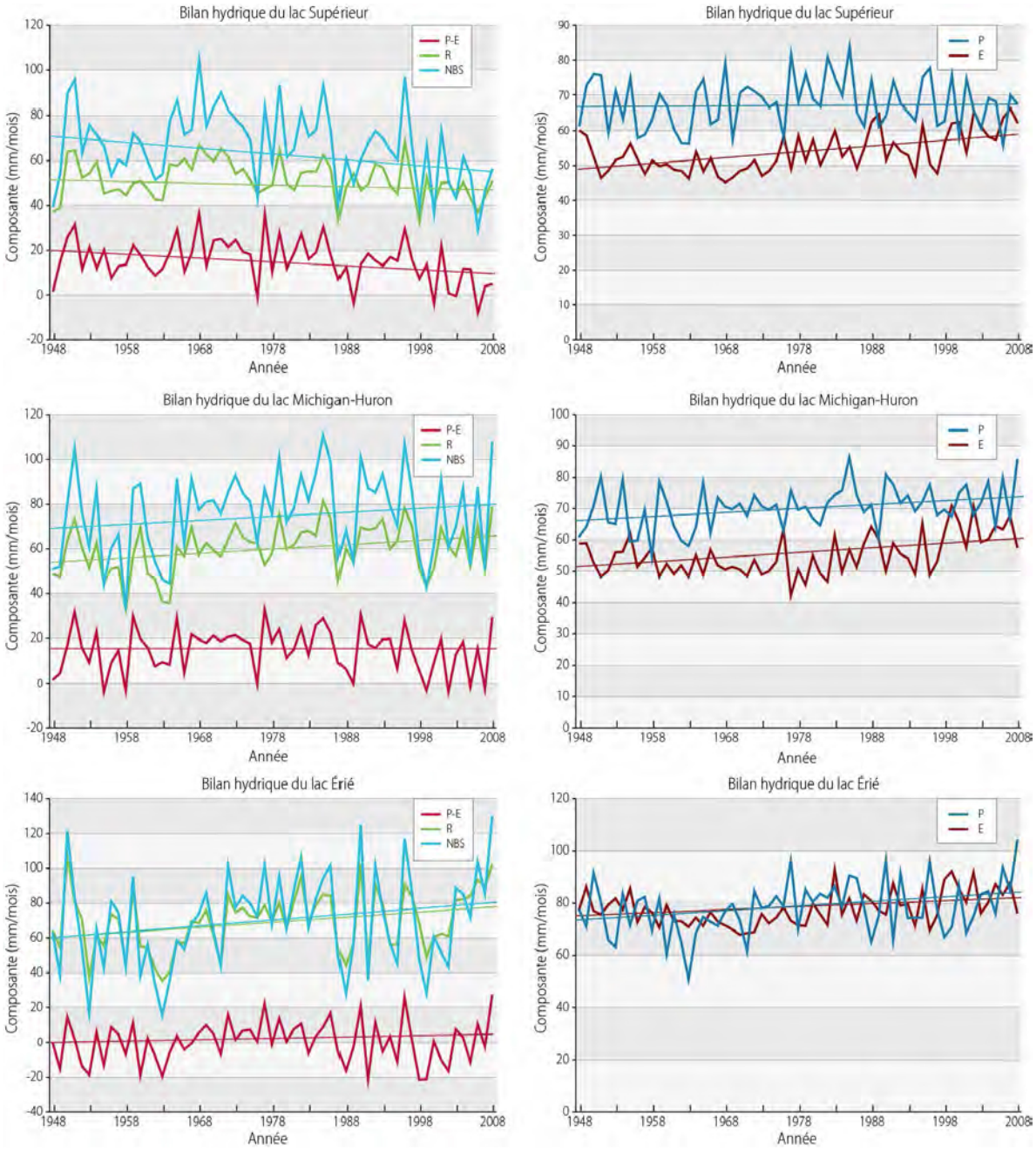


FIGURE 22 : Tendances de la moyenne des précipitations lacustres nettes (P), des précipitations moins l'évaporation (P-E), du ruissellement (R) et de l'apport d'eau net dans le bassin (AENB) pour la région haute des Grands Lacs de l'Amérique du Nord pour la période allant de 1948 à 2008 *(source : ÉIGLA, 2012, données tirées de Fortin et Gronewold, 2012)*.

4.2 EXTRAPOLATION DES CHANGEMENTS RELATIFS À L'EAU DOUCE

Aucune synthèse nationale des études portant sur les changements prévus des ressources en eaux de surface n'a été publiée depuis l'examen, effectué par Lemmen *et al.* (2008), des principales conclusions pour chaque région. Cependant, plusieurs études régionales sur des bassins versants publiées depuis 2008 présentent des extrapolations du ruissellement en fonction de différents scénarios de changements climatiques (figure 23 et tableau 2).

Région	Projections	Principales références
Rivière Baker (Colombie-Britannique)	La plupart des scénarios pour les années 2050 prévoient une hausse de l'écoulement hivernal et une baisse de l'écoulement estival, ainsi qu'une baisse de l'équivalent en eau de la neige	Bennett *et al.*, 2012
Rivière Campbell (Colombie-Britannique)	Hausse de l'écoulement hivernal et baisse de l'écoulement estival dans les années 2050; pas de consensus sur l'évolution de l'écoulement annuel moyen	Schnorbus *et al.*, 2011, 2012; Bennett *et al.*, 2012
Ruisseau Trepanier, bassin de l'Okanagan (Colombie-Britannique)	Baisse de la moyenne de l'écoulement fluvial annuel et estival, et crue printanière survenant deux semaines plus tôt dans les années 2050 que durant la période allant de 1983 à 1993	Harma *et al.*, 2012
Rivière Ingenika (Colombie-Britannique)	Hausse de l'écoulement hivernal dans les années 2050; pas de consensus sur l'évolution de l'écoulement estival	Bennett *et al.*, 2012
Fleuve Fraser (Colombie-Britannique)	Pas de consensus sur l'extrapolation de la moyenne annuelle de l'écoulement dans les années 2050 pour le fleuve Fraser; l'écoulement estival devrait diminuer quel que soit le scénario	Shrestha *et al.*, 2012b
Rivière Athabasca (Alberta)	Diminution de l'écoulement moyen et de l'écoulement minimal annuels dans les années 2080	Kerkhoven et Gan, 2011; Shrestha *et al.*, 2012b
Sud des Prairies (affluents de la rivière Saskatchewan en Alberta et en Saskatchewan)	Diminution de l'écoulement annuel dans les années 2050, sauf dans le cas de la rivière Cline, en Alberta, qui subira une hausse en raison d'une augmentation importante de l'écoulement hivernal	Lapp *et al.*, 2009; Shepherd *et al.*, 2010; Forbes *et al.*, 2011; Kienzle *et al.*, 2012; St. Jacques *et al.*, 2012
Churchill (Manitoba)	En comparant différents modèles hydrologiques, on constate que deux extrapolations de modèles hydrologiques sur trois prévoient une hausse de l'écoulement annuel dans le cas d'un ensemble de scénarios climatiques, tandis que le dernier modèle prévoit, quant à lui, une diminution	Bohrn, 2012
Lac Winnipeg – Bassins du cours supérieur de la rivière Assiniboine et de la rivière Morris (Manitoba)	Hausse prévue de l'écoulement annuel pour le bassin du cours supérieur de la rivière Assiniboine, et dans le cas de la plupart des scénarios pour le bassin de la rivière Morris	Shrestha *et al.*, 2012a; Stantec, 2012
Ruisseau Spencer (Ontario)	Hausse de la moyenne annuelle, ainsi que de la moyenne automnale et hivernale de l'écoulement, et diminution du débit de pointe printanier (mars et avril)	Grillakis *et al.*, 2011
Rivière Credit (Ontario)	Prévisions variées concernant l'écoulement annuel	EBNFLO Environmental and AquaResource Inc., 2010
Grands Lacs (Ontario)	Diminution dans les années 2050 de l'apport d'eau net dans les bassins des lacs Michigan-Huron et Érié; peu de changement pour le lac Supérieur	Chen *et al.*, 2011; MacKay et Seglenieks, 2013
Affluents du Saint-Laurent, au Québec (y compris les rivières Richelieu, Saint-François, Yamachiche, Saint-Maurice et Batiscan)	Hausse dans les années 2050 de l'écoulement hivernal moyen, la plupart des scénarios anticipant une diminution de l'écoulement estival et une augmentation de l'écoulement annuel	Boyer *et al.*, 2010
Chaudière (Québec)	Pas de consensus sur les changements prévus dans les années 2020 pour l'écoulement annuel moyen	Quilbé *et al.*, 2008
Bassin de la rivière Pinus (Labrador, NL)	Hausse de la moyenne de l'écoulement fluvial annuel dans les années 2050, avec un pic printanier survenant deux semaines plus tôt que durant la période allant de 1971 à 2000	Roberts *et al.*, 2012

TABLEAU 2 : Récapitulatif de l'extrapolation des changements relatifs à l'eau douce. *Voir aussi* la figure 23.

La plupart des bassins versants du Canada sont touchés par l'accumulation neigeuse et les cycles de fonte. L'équivalent en eau maximum de la neige devrait décroître sur la côte de la Colombie-Britannique, dans les Provinces de l'Atlantique et dans la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent, tandis que l'on s'attend à ce que la côte arctique du Nunavut enregistre une hausse (Brown et Mote, 2009).

Dans les bassins versants où se trouvent des glaciers, le recul, qui a déjà été constatée en Colombie-Britannique et en Alberta (Stahl *et al.*, 2008; Marshall *et al.*, 2011; Jost *et al.*, 2012), devrait se poursuivre à mesure que le climat se réchauffe. La fonte des glaces devrait avoir une incidence sur le ruissellement, notamment pendant l'été. Marshall *et al.* (2011) ont étudié le ruissellement des glaciers entre 2000 et 2007, ainsi que des extrapolations allant jusqu'en 2100

(à l'aide des scénarios B1 et A1B du SRES) pour les glaciers des montagnes Rocheuses qui alimentent les rivières Bow, Red Deer, Saskatchewan Nord et Athabasca, ainsi que la rivière de la Paix. Ils s'attendent à ce que le volume des glaciers diminue de 80 % (Athabasca) à 100 % (Red Deer). Les changements anticipés dans le ruissellement des glaciers entre 2000 et 2050 dans le cas du scénario A1B sont de -80 % pour la rivière Saskatchewan Nord, de -100 % pour les rivières Bow et Red Deer, de -75 % pour la rivière de la Paix et de -60 % pour la rivière Athabasca. Comme le ruissellement des glaciers a constitué environ 7 % de l'écoulement estival alimentant les rivières Bow et Saskatchewan Nord durant la période allant de 2000 à 2007, les diminutions prévues doivent être prises en considération dans l'extrapolation relative à l'écoulement durant les périodes d'étiage en été et à l'automne. Des études sont également disponibles pour les bassins versants comprenant des glaciers en Colombie-Britannique (Stahl *et al.*, 2008; Bürger *et al.*, 2011; Jost *et al.*, 2012).

Angel et Kunkel (2010) ont récemment évalué les futurs niveaux des eaux dans le bassin des Grands Lacs sur trois périodes du XXIe siècle (relatives à la période allant de 1970 à 1999), en s'appuyant sur plus de 500 scénarios fondés sur le modèle climatique mondial (MCM) renforcés par les scénarios d'émissions B1, A1B et A2. Si la majeure partie des simulations prévoient une diminution du niveau phréatique, une hausse n'est cependant pas à exclure. Les écarts des prévisions pour la période allant de 2050 à 2064 concernant le niveau du lac Michigan-Huron vont d'une baisse de 1,5 mètre à une hausse de plus d'un mètre. En s'appuyant sur la recherche disponible, et en particulier sur les résultats récemment obtenus grâce au MCR (p. ex., MacKay et Seglenieks, 2013), les auteurs de l'Étude internationale des Grands Lacs d'amont (ÉIGLA) ont conclu qu'à court terme, les diminutions des niveaux phréatiques ne devraient pas être aussi extrêmes que le laissaient entendre les extrapolations faites dans les premières études sur les changements climatiques, et que si l'on peut s'attendre à une baisse des niveaux d'eau, on doit aussi tenir compte de la possibilité d'une hausse du niveau phréatique dans la gestion et la planification des ressources en eau (ÉIGLA, 2012).



FIGURE 23 : Changements prévus de l'écoulement annuel dans les années 2050 à partir des résultats de recherche publiés entre 2008 et 2013. Le symbole « -/+ » signifie que pour un site donné, les prévisions du scénario comprennent à la fois des augmentations et des diminutions. Les sources sont indiquées au tableau 2.

5. ÉVOLUTION DU CLIMAT OCÉANIQUE

Entouré de trois océans et de plateaux continentaux, le Canada a une longue ligne de côte qui comprend bon nombre d'échancrures, de détroits, d'estuaires et de mers littorales. Les changements climatiques océaniques ont été abordés dans les chapitres que Lemmen *et al.* (2008) ont consacré à chaque région, et sont brièvement examinés ici afin de fournir un contexte aux chapitres thématiques de ce rapport actualisé.

La figure 24 synthétise de façon schématique les principaux changements climatiques océaniques observables à grande échelle tels que le réchauffement et l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone (CO_2) dans la partie supérieure de l'océan (ce qui contribue à l'élévation du niveau de la mer et à la diminution du pH), la réduction de la glace de mer et la dessalure dans les zones de hautes latitudes, ainsi que l'augmentation de la salinité de surface dans les zones de basses latitudes.

5.1 TEMPÉRATURE OCÉANIQUE

Les ensembles de données d'observations à l'échelle du Canada démontrent bien l'incidence des changements climatiques sur la température, la salinité, le taux d'acidité, le niveau des eaux et les autres variables océaniques (Hutchings *et al.*, 2012; Christian et Foreman, 2013, Loder *et al.*, 2013a ; Steiner *et al.*, 2013). Cependant, le défi consiste à savoir distinguer la variabilité anthropique de la variabilité naturelle dans les séries temporelles relativement brèves dont on dispose pour la plupart des variables. On constate une importante variabilité naturelle atmosphérique et océanique à l'échelle décennale dans plusieurs régions (*voir* l'encadré 3). Cette variabilité a à son tour d'importantes répercussions à l'échelle régionale sur les éléments océaniques tels qu'El Niño dans le Pacifique et le courant du Labrador dans l'Atlantique.

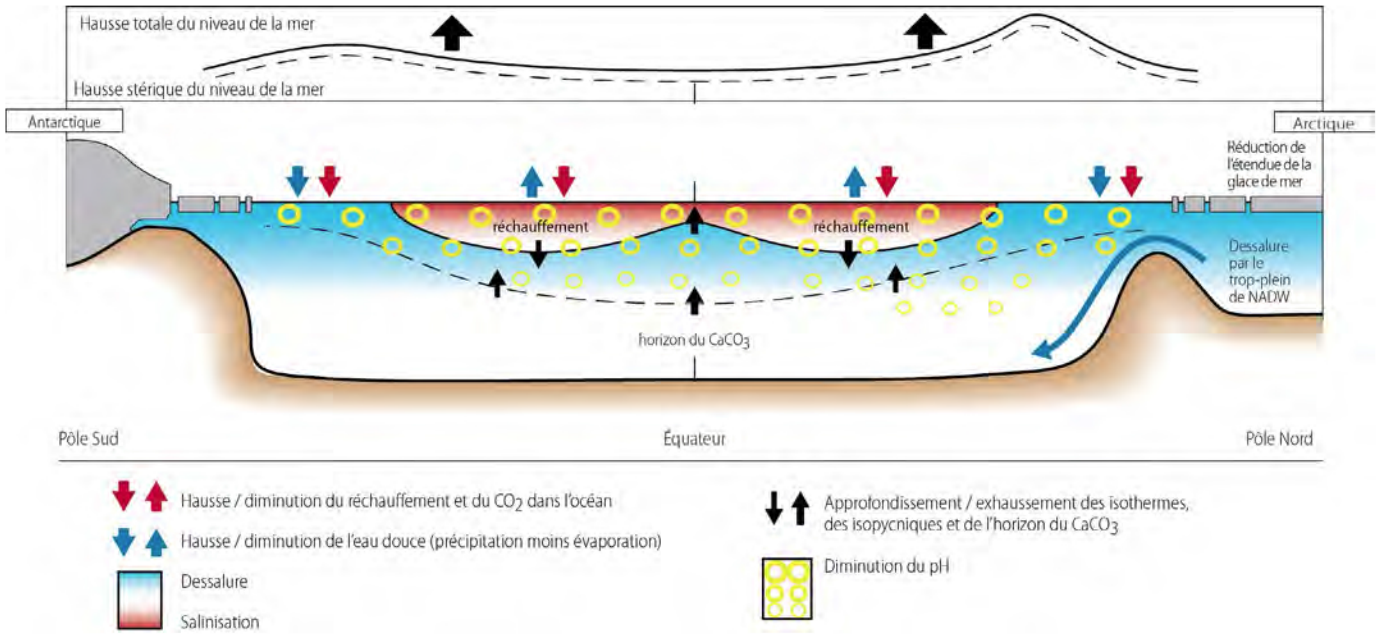


FIGURE 24 : Profil schématique des principaux changements climatiques observés dans l'océan. La légende indique s'il s'agit d'une hausse ou d'une baisse. Dans le texte, l'élévation du niveau « total » de la mer fait référence à l'élévation du niveau « absolu » de la mer, et l'« horizon » du $CaCO^3$ (carbonate de calcium), à la « profondeur de saturation » *(source : Bindoff et al., 2007)*.

5.1.1 CÔTE DU PACIFIQUE

Des tendances au réchauffement à long terme d'environ 0,1 °C par décennie se dégagent des observations des températures des eaux côtières effectuées à différents phares de la Colombie-Britannique au cours des 75 dernières années, et des observations de la ligne P[3] menées au large dans la partie supérieure de l'océan (à une profondeur comprise entre 10 de 50 m) dans le nord-est du Pacifique au cours des 55 dernières années (figure 25; Irvine et Crawford, 2012). Les températures de la partie supérieure de l'océan au large de la Colombie-Britannique témoignent d'une forte variabilité naturelle associée à El Niño, La Niña et l'ODP. Les températures relevées ces dernières années ont notamment été plus froides qu'au cours des deux décennies antérieures, en raison d'un régime climatique observable à l'échelle du Pacifique et attribuable aux épisodes de La Niña. Les eaux de subsurface (de 100 à 150 m) bordant la ligne P affichent une tendance au réchauffement plus faible (environ 0,05 °C par décennie) et une variation sur dix ans similaire à celle de la couche supérieure de l'océan. Ces tendances au réchauffement concordent sur le plan qualitatif avec les ensembles de données portant sur les analyses globales de la surface des océans (Yasunaka and Hanawa, 2011) et de la température de subsurface (Bindoff *et al.*, 2007), qui indiquent une tendance généralisée au réchauffement de l'océan dans le nord-est du Pacifique au cours du siècle dernier.

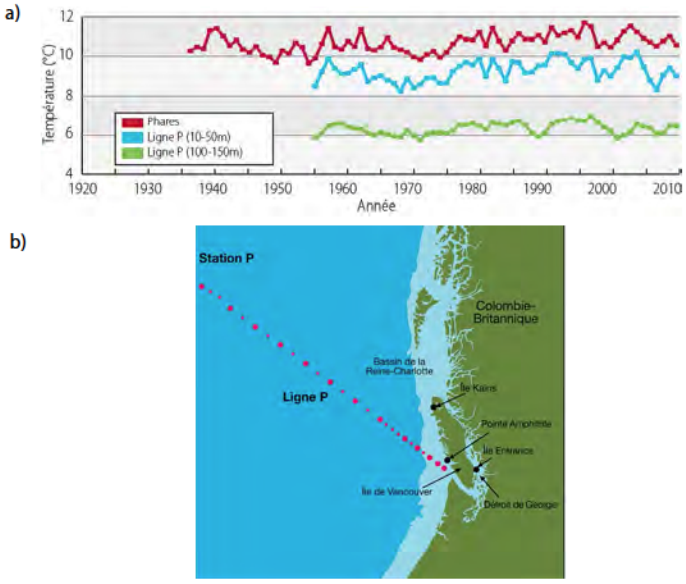


FIGURE 25 : a) Indices moyens annuels de température de l'océan Pacifique au large de la Colombie-Britannique, à partir des données des programmes de surveillance du MPO présentées dans Irvine et Crawford (2012). L'indice des phares (Lighthouses index) est la moyenne de température en surface mesurée quotidiennement à la pointe Amphitrite, à l'île Entrance et à l'île Kains (Chandler, 2012), tandis que les indices de la ligne P sont fondés sur la figure 12 de Robert *et al.* (2012). Les tendances (qui sont, respectivement, de 0,1, 0,09 et 0,05 °C par décennie pour les trois séries temporelles) diffèrent toutes significativement de la valeur zéro à un niveau de confiance de 95 %. **b)** Carte de localisation des stations d'observation de l'océan Pacifique.

[3] La ligne P est une ligne de surveillance de Pêches et Océans Canada (MPO) qui regroupe 26 stations océanographiques, et qui s'étend à environ 1400 km au large de la côte sud-ouest de l'île de Vancouver jusqu'à l'ancien emplacement de la station météorologique océanique Papa, dans le golfe de l'Alaska (Crawford *et al.*, 2007; figure 25b).

5.1.2 CÔTE DE L'ATLANTIQUE

Au large du Canada atlantique, les observations de la température de la partie supérieure de l'océan effectuées au cours des 60 à 80 dernières années dans les régions de latitudes tempérées jusqu'à l'ouest du Grand Banc (notamment la baie de Fundy; figure 26) révèlent généralement des tendances au réchauffement d'une ampleur semblable à celle observée dans le Pacifique. Les tendances au réchauffement sont évidentes aussi bien dans les eaux de surface qu'à proximité du fond dans le golfe du Saint-Laurent (Galbraith *et al.*, 2012a) et le plateau néo-écossais (Hebert *et al.*, 2012). Le réchauffement superficiel du golfe correspond à la hausse des températures de l'air (Galbraith *et al.*, 2012b), et le taux de réchauffement le plus élevé à proximité du fond est associé à une influence grandissante des eaux subtropicales du Gulf Stream (Gilbert *et al.*, 2005).

En revanche, il n'y a eu aucune tendance d'importance significative au réchauffement au cours des 60 à 80 dernières années dans la partie supérieure (150 m) de la mer du Labrador et du plateau de Terre-Neuve (figure 26), où prédomine la variabilité naturelle sur dix ans, essentiellement attribuable à l'oscillation nord-atlantique et à l'oscillation multidécennale atlantique (Yashayaev, 2007; CIEM, 2011; Loder *et al.*, 2013b). L'absence d'une tendance à long terme dans cette région correspond à l'absence de réchauffement de la température de l'eau et de l'air en surface dans une vaste région au sud du Groenland au cours du siècle dernier (Trenberth *et al.*, 2007; Yasunaka et Hanawa, 2011). L'océan s'est réchauffé au cours des 20 à 30 dernières années dans la région de Terre-Neuve-et-Labrador.

5.1.3 CÔTE ARCTIQUE

Il n'y a pas de longues séries temporelles sur la température océanique du Canada arctique, mais les signes manifestes de réchauffement découlant des observations de la température de l'air et de la glace de mer, conjugués aux études océaniques disponibles et aux simulations de modèles (Galbraith et Larouche, 2011; Timmermans, 2012) témoignent d'un réchauffement de la partie supérieure de l'océan dans la plupart des régions.

5.1.4 EXTRAPOLATIONS

Les extrapolations faites à partir des modèles du CMIP3 et du CMIP5 (*voir* l'encadré 4) révèlent un réchauffement généralisé de la partie supérieure de l'océan autour du Canada au cours du XXIe siècle, ainsi qu'une importante variabilité saisonnière et spatiale (Meehl *et al.*, 2007b; Capotondi *et al.*, 2012). L'augmentation des températures en surface prévue, pour la période allant de 2051 à 2100 par rapport à la période allant de 1951 à 2000, à partir des modèles du CMIP3 pour le scénario A1B se situe généralement dans la fourchette de 1 à 3°C (Capotondi *et al.*, 2012). La partie septentrionale de l'Atlantique Nord au sud du Groenland fait figure d'exception : la plupart des modèles y indiquent un réchauffement moins important, vraisemblablement lié à la baisse du transport de la chaleur vers le nord par la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (Drijfhout *et al.*, 2012; Hutchings *et al.*, 2012). On ignore toutefois dans quelle mesure cette anomalie de la température océanique prévue s'étendra aux eaux côtières du Labrador et de Terre-Neuve, compte tenu des difficultés qu'éprouvent les modèles mondiaux à résoudre le problème que pose la variabilité glace-océan dans la mer du Labrador (de Jong *et al.*, 2009).

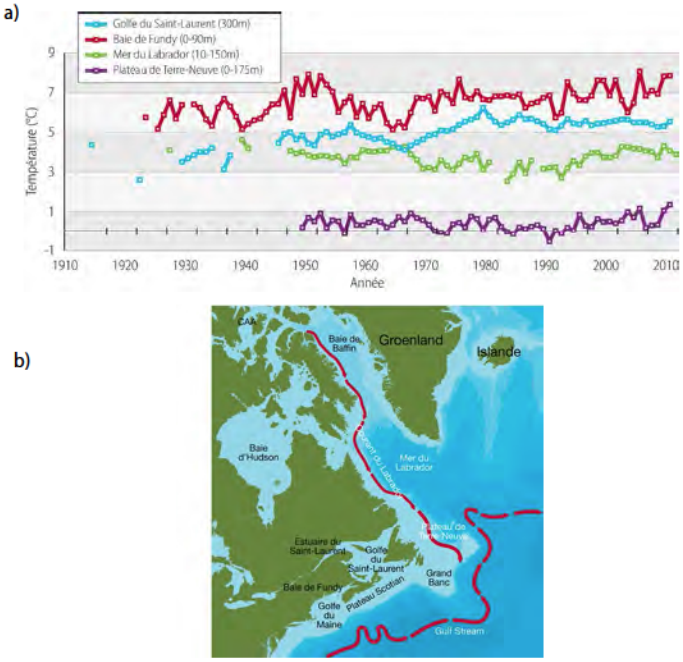


FIGURE 26 : a) Indices moyens annuels de température au large du Canada atlantique issus des programmes de surveillance du MPO. Les séries temporelles de la baie de Fundy (BF; Hebert *et al.*, 2012) proviennent de la station Prince 5 de la baie Passamaquoddy, où des échantillons sont prélevés régulièrement depuis 1926, tandis que les séries temporelles du plateau de Terre-Neuve (PTN; Colbourne *et al.*, 2012) sont issues de la station 27 située au large de St. John's, où des échantillons ont été prélevés pratiquement chaque mois depuis 1950. Les séries temporelles du golfe du Saint-Laurent (GSL), qui concernent les eaux proches du fond (Galbraith *et al.*, 2012a), et celles du centre de la mer du Labrador (ML), qui proviennent des environs de l'ancienne station météorologique océanique Bravo (Yashayaev et Greenan, 2012), reposent sur l'ensemble des données disponibles. Les tendances pour les séries temporelles de la BF et du GSL (respectivement de 0,14 et 0,22 °C par décennie) sont significatives à un niveau de confiance de 95 %, ce qui n'est pas le cas de celles du PTN et de la ML. **b)** Carte de localisation des stations d'observation de l'océan Atlantique.

5.2 SALINITÉ ET STRATIFICATION DE LA DENSITÉ DES OCÉANS

5.2.1 SALINITÉ

La salinité des océans est une composante clé du climat océanique et des écosystèmes marins dans la mesure où elle permet, si l'on tient également compte de la température et de la pression (profondeur), de déterminer la densité de l'eau de mer, soit un facteur qui peut à son tour avoir une incidence sur la circulation océanique, la stratification verticale de la densité et le mélange des eaux en profondeur. Étant donné que la salinité varie en fonction des précipitations, de l'évaporation, du ruissellement d'eau douce en provenance du continent, de la fonte ou du gel de la glace de mer, ainsi que de la circulation océanique et du mélange des eaux,

elle est plus sensible à la variabilité spatiale qu'au changement des températures. En dehors des zones de glace de mer et de ruissellement continental, le recours aux changements du taux de salinité de l'océan permet également d'en arriver à certaines déductions au sujet des changements du cycle hydrologique (soit les précipitations moins l'évaporation) qui s'opèrent à la surface de l'océan (p. ex., Helm *et al.*, 2010).

La salinité dans la plupart des sites situés au large des côtes canadiennes du Pacifique et de l'Atlantique a été fortement touchée au cours des 60 à 80 dernières années par une variabilité à l'échelle décennale semblable à celle observée dans le cas de la température océanique (Petrie, 2007; Yashayaev, 2007; Irvine et Crawford, 2012). Les tendances à long terme sont faibles (< 0,1 usp[4] par décennie; figures 27 et 28). Certaines régions comptent également différentes variations locales, vraisemblablement liées à l'écoulement des rivières. Il y a des signes d'une baisse à long terme de la salinité à faible profondeur au-dessus et au large du plateau du Pacifique, et d'une hausse dans le détroit de Georgie, et à 150 m de profondeur à la station P (figure 27; Chandler, 2012; Freeland, 2013). Les diminutions des valeurs à la surface des zones extracôtières correspondent à la baisse à grande échelle observée dans le nord-est du Pacifique (Durack et Wijffels, 2010).

La salinité à long terme sur la côte atlantique, qui a peu changé par rapport à la variabilité à l'échelle décennale, varie en fonction de l'endroit et de la profondeur dans certaines zones (figure 28; CIEM, 2011). Sur le plateau néo-écossais, dans le golfe du Saint-Laurent et dans la baie de Fundy, une tendance générale à la baisse de la salinité a été observée dans les eaux proches de la surface, tandis qu'une hausse a été observée dans les eaux à proximité du fond, phénomène qui correspond à la montée des eaux subtropicales en direction du pôle (Gilbert *et al.*, 2005; Hebert *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2012). La variabilité de la salinité au large de Terre-Neuve-et-Labrador est également dominée par la variabilité à l'échelle décennale (Yashayaev, 2007; Colbourne *et al.*, 2012). Aucun changement net n'a été observé en 80 ans dans la mer du Labrador; seule une légère tendance négative a été observée sur le plateau de Terre-Neuve. Des observations plus limitées, menées dans l'Arctique, font état d'un refroidissement dans la plupart des régions et d'une hausse de la salinité dans d'autres (p. ex., Timmermans, 2012).

Compte tenu de l'intensification du cycle hydrologique et de la fonte de la glace terrestre et marine qui devraient d'ici peu toucher les latitudes boréales, on s'attend à une baisse de la salinité à long terme dans les zones de moyenne et de haute latitude telles celles au large du Canada (Meehl *et al.*, 2007b; Capotondi *et al.*, 2012). La baisse prévue de la salinité en surface pour la période allant de 2051 à 2100, par rapport à celle allant de 1951 à 2000 selon les modèles du CMIP3 pour le scénario A1B ,se situe généralement dans la fourchette de -1 à -0,4 usp (Capotondi *et al.*, 2012). La pente continentale et les eaux profondes de plateau situées entre le golfe du Saint-Laurent et le golfe du Maine constituent l'exception, dans la mesure où leur degré de salinité devrait atteindre + 0,4 usp en raison de la circulation des eaux subtropicales en direction de l'Atlantique Nord et de la hausse du taux d'évaporation subtropicale.

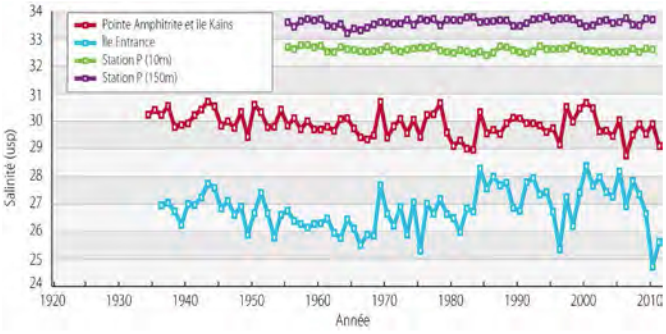


FIGURE 27: Indices moyens annuels de salinité de l'océan Pacifique au large de la Colombie-Britannique, à partir des données des programmes de surveillance du MPO présentées dans Irvine et Crawford (2012). Les valeurs sont exprimées en unités de salinité pratique (usp), soit en parties par milliers. Les séries temporelles des phares (pointe Amphitrite, îles Kains et Entrance) sont tirées de Chandler (2012), tandis que les séries temporelles de la station P, qui proviennent de l'ancienne station météorologique océanique Papa, sont des mises à jour des données publiées par Whitney *et al.* (2007). Les tendances pour la station P (-0,01 et +0,02 usp par décennie, respectivement, à 10 et 150 m), et pour la pointe Amphitrite et l'île Kains (-0,06 usp par décennie) sont significatives à un niveau de confiance de 95 %, tandis que la tendance pour l'île Entrance (+0,07 par décennie) est d'importance significative à un niveau de confiance de 93 %. *Voir* l'emplacement des sites sur la figure 25b.

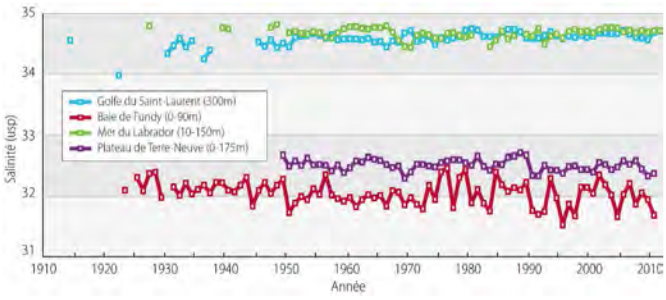


FIGURE 28 : Indices moyens annuels de salinité au large du Canada atlantique issus des programmes de surveillance du MPO. Les sources de données et les sites sont les mêmes que dans le cas de la température (illustré à la figure 26). La tendance à la baisse observée dans la BF (-0,02 usp par décennie) et la tendance à la hausse enregistrée en profondeur dans les eaux du GSL (+0,03 usp par décennie) sont d'importance significative à un niveau de confiance de 95 %. La tendance à la baisse observée pour le PTN (-0,01 usp par décennie) est d'importance significative à un niveau de confiance de 94 %, tandis que la tendance pour la ML n'est pas d'importance significative. *Voir* l'emplacement des sites sur la figure 26b.

[4] Unité de salinité pratique, qui est calculée à partir des propriétés de conductivité de l'eau de mer. Elle correspond aux parties par milliers (ppm) ou aux grammes de sel par kilogramme d'eau (g/kg).

5.2.2 STRATIFICATION VERTICALE DE LA DENSITÉ

La variation saisonnière de la stratification verticale de la densité des eaux dans la partie supérieure de l'océan est un élément très important de la biogéochimie océanique et des écosystèmes marins (*voir* l'encadré 6). Conjuguée au vent et à l'énergie marémotrice, elle a une incidence sur l'échange vertical d'importantes quantités de matières solubles en suspension, et influe donc ainsi sur la ventilation atmosphérique (p. ex., CO_2 et oxygène) des eaux de subsurface, l'approvisionnement ascendant en nutriments des eaux proches de la surface, où se trouve le phytoplancton, la suspension du phytoplancton et la vitesse à laquelle les matières particulaires sombrent à de plus grandes profondeurs.

ENCADRÉ 6

STRATIFICATION DE LA DENSITÉ OCÉANIQUE

La densité de l'eau de mer varie en fonction de la température, de la salinité et de la profondeur. La stratification de la densité océanique a trait au gradient vertical de la densité de l'eau aux termes duquel l'eau légère, relativement chaude et généralement douce à proximité de la surface se superpose à l'eau de subsurface plus froide et plus dense. Une importante stratification saisonnière peut être observée dans la partie supérieure de l'océan au printemps et en été, du fait du réchauffement de l'eau à faible profondeur par le rayonnement solaire et le réchauffement atmosphérique, et de sa dessalure, en raison du ruissellement continental. La forte stratification (gradients de forte densité) a tendance à réduire le mélange en profondeur des eaux dans l'océan. La variabilité spatiale et temporelle de la stratification joue donc un rôle important dans le mélange, aussi bien de la chaleur et du CO_2 vers les profondeurs, que des nutriments (nécessaires au développement planctonique) vers les couches supérieures de l'océan.

Le réchauffement planétaire provoque une stratification verticale accrue de la partie supérieure de l'océan dans la plupart des régions, en raison du réchauffement, et donc de la perte de densité, des eaux de surface. On s'attend à ce que cette tendance soit renforcée par la dessalure (et donc par un plus grand allégement) dans la majeure partie des eaux de surface limitrophes du Canada (Capotondi *et al.*, 2012). Les tendances de la température et de la salinité observées à long terme au large des côtes canadiennes du Pacifique et de l'Atlantique contribuent à l'augmentation à long terme de la stratification dans de nombreuses régions (Colbourne *et al.*, 2012; Hebert *et al.*, 2012; Freeland, 2013), bien que cette évolution soit dans bien des régions toujours dominée par la variabilité à l'échelle décennale (figures 25 à 28). L'extrapolation du modèle du CMIP3 (Capotondi *et al.*, 2012) révèle une stratification accrue de la partie supérieure de l'océan tout au long du siècle pour l'ensemble des eaux limitrophes du Canada, la température et la salinité s'avérant des facteurs déterminants dans la plupart des régions, sauf dans l'Atlantique Nord subpolaire, où les effets de la dessalure prédominent et l'Atlantique Nord subtropical où les effets de réchauffement prédominent. Cette hausse de la stratification aura des répercussions importantes sur d'autres propriétés océaniques, notamment en raison de la diminution du mélange en profondeur des eaux et de la ventilation des eaux de subsurface (p. ex., Helm *et al.*, 2011), ainsi que de la baisse généralisée de l'apport en nutriments aux eaux proches de la surface (p. ex., Hutchings *et al.*, 2012).

5.3 HYPOXIE ET ACIDITÉ DES OCÉANS

5.3.1 HYPOXIE DES OCÉANS

Les observations effectuées au large des côtes canadiennes du Pacifique et de l'Atlantique témoignent d'un déclin général de la concentration en oxygène dissous dans les eaux de subsurface (100-400 m; figure 29), qui se trouvent sous les eaux de surface ventilées de façon plus continue (Gilbert *et al.*, 2005; Whitney *et al.*, 2007; Hutchings *et al.*, 2012; Crawford et Peña, 2013). Cette tendance est attribuable à la fois à une hausse des températures (ce qui réduit la solubilité de l'oxygène) et à la stratification accrue de la partie supérieure de l'océan (ce qui réduit la ventilation); à la lente remontée, dans l'Atlantique, des eaux subtropicales en direction du pôle, à l'eutrophisation causée par l'écoulement des rivières et à la productivité biologique dans certaines régions côtières (Gilbert *et al.*, 2010). Les concentrations dans certaines régions atteignent ou approchent l'hypoxie (*voir* l'encadré 7), une condition qui nuit aux organismes marins (p. ex., Bianucci et Denman, 2011; Mucci *et al.*, 2011), et sont d'une certaine façon liées aux répercussions des changements climatiques.

ENCADRÉ 7

HYPOXIE AQUATIQUE ET OCÉANIQUE

L'oxygène dissous joue un rôle important dans la vie aquatique. On parle généralement d'« hypoxie » océanique lorsque les concentrations en oxygène dissous sont inférieures à 60-80 µmole/kg. L'hypoxie aquatique est plus répandue dans certains lacs et zones côtières où l'oxydation de la matière organique issue du ruissellement et du développement planctonique peut entraîner une raréfaction de l'oxygène et des conditions défavorables à la vie aquatique. La hausse des températures et la stratification accrue de la densité (ainsi que la ventilation réduite) liées aux changements climatiques entraînent une baisse des niveaux d'oxygène dissous dans les eaux de subsurface.

Les faibles concentrations en oxygène constituent déjà un défi de taille pour les écosystèmes et les pêches au large de la côte du Pacifique du Canada, où les concentrations sont généralement hypoxiques entre 400 et 1000 m de profondeur (station P à la figure 29; Whitney *et al.*, 2007; *voir aussi* le chapitre 4 – *Production alimentaire*). Cela est en partie attribuable au fait que ces eaux n'ont pas été en contact avec l'atmosphère depuis des siècles et que l'oxygène s'y est raréfié en raison de l'oxydation de la matière organique qui s'abime. La remontée intermittente de ces eaux au-dessus du plateau du Pacifique a favorisé l'hypoxie des eaux de fond (figure 29; Crawford et Peña, 2013), notamment en été, alors que l'on peut clairement observer une variabilité naturelle à l'échelle décennale.

Les faibles concentrations en oxygène sont également devenues un problème grave dans les eaux profondes de l'estuaire du Saint-Laurent (figure 29), notamment en raison de la présence accrue d'eau subtropicale en profondeur (Gilbert *et al.*, 2005). À partir d'un nombre plus restreint d'observations, on a pu établir que l'oxygène dissous diminue également en profondeur sur le plateau néo-écossais (Petrie et Yeats, 2000) et dans la mer du Labrador (Greenan *et al.*, 2010). Le fait que l'on ne dispose que de peu de données sur les changements touchant l'oxygène dissous dans l'Arctique est attribuable à de multiples facteurs (qui se recoupent dans certains cas). Par exemple, le recul de la couverture de glace peut influer de différentes manières sur la stratification et la ventilation, ainsi que sur les processus biologiques (Gilbert *et al.*, 2010). La baisse du niveau d'oxygène de subsurface, observée au large des autres côtes canadiennes, devrait se poursuivre à mesure que le réchauffement et la quantité de CO_2 dans l'air continuent d'augmenter, et que la stratification de la partie supérieure de l'océan continue de s'intensifier dans la plupart des régions (Meehl *et al.*, 2007b; Hutchings *et al.*, 2012). Les effets des changements climatiques sont particulièrement préoccupants dans les secteurs qui atteignent, ou approchent, l'hypoxie.

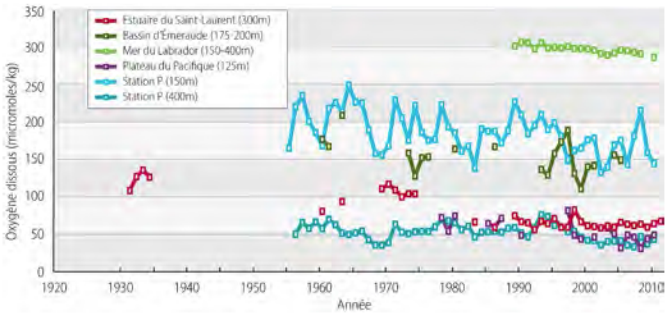


FIGURE 29 : Indices annuels des concentrations en oxygène dissous dans les eaux de subsurface des zones extracôtières canadiennes du Pacifique et de l'Atlantique, issus des programmes de surveillance du MPO et d'autres programmes d'observations. Les indices pour le Pacifique provenant de la station P ont été actualisés en fonction des données publiées dans Whitney *et al.* (2007), et ceux du plateau du Pacifique sont tirés de Crawford et Peña (2013). Les indices pour l'estuaire du Saint-Laurent, le bassin d'Émeraude (plateau néo-écossais) et la mer du Labrador sont actualisés en fonction des données publiées dans Petrie et Yeats (2000), Gilbert *et al.* (2005) et Greenan *et al.* (2010). Toutes les tendances sont d'importance significative à un niveau de confiance de 95 % : celles pour les cinq premiers sites se situent entre -7 à -9 µmole/kg par décennie, et celle de la station P (400 m) est de -2 µmole/kg par décennie. *Voir* l'emplacement des sites sur les figures 25b et 26b.

5.3.2 ACIDITÉ DES OCÉANS

Les changements au niveau de l'acidification de l'océan (*voir* l'encadré 8) a un certain nombre d'effets négatifs sur les écosystèmes marins, notamment la diminution de la stabilité des ions carbonate utilisés par les organismes marins pour former leur coquille ou leur ossature (Doney *et al.*, 2009; Hutchings *et al.*, 2012).

ENCADRÉ 8

ACIDIFICATION DE L'OCÉAN

La circulation accrue de CO_2 d'origine anthropique de l'atmosphère vers l'océan en augmente l'acidité. Le CO_2 entre en réaction avec l'eau de mer pour générer des ions hydrogène et former de l'acide carbonique, processus qui favorise l'acidification de l'eau de mer et en diminue le pH. L'acidification de l'océan est donc une conséquence directe des émissions de CO_2. Le Quatrième rapport d'évaluation (RE4) du GIEC indique, qu'en raison de l'apport de CO_2 provenant de l'atmosphère, le pH océanique a baissé de 0,1 unité depuis 1750, ce qui correspond à une augmentation de 30 % de l'acidité

L'acidité accrue diminue la concentration d'ions carbonate dans l'océan. De nombreux organismes utilisent les ions carbonate pour former leur coquille ou leur squelette. Les « horizons » ou « profondeurs de saturation » sous lesquels les minéraux carbonatés tels que l'aragonite et la calcite, se dissolvent plus rapidement qu'ils ne peuvent être formés se situent à de moins grandes profondeurs, limitant ainsi du même fait les zones de l'océan susceptibles de servir d'habitat à de nombreux organismes marins.

Les observations effectuées dans des zones extracôtières canadiennes du Pacifique et de l'Atlantique (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2009; Greenan *et al.*, 2010) révèlent que le pH diminue à un rythme comparable à celui observé à l'échelle mondiale; soit environ 0,1 unité de pH depuis l'époque préindustrielle (Bindoff *et al.*, 2007). L'acidification est plus marquée dans les eaux douces et froides de l'Arctique, où les profondeurs de saturation du carbonate se situent déjà à proximité de la surface (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2009; Azetsu-Scott *et al.*, 2010), et dans les profondeurs de l'estuaire du Saint-Laurent, où l'augmentation des influences subtropicales et des processus biologiques ont fait en sorte que le déclin du pH devienne un facteur quatre à six fois plus important que dans les eaux de surface du reste du globe (Mucci *et al.*, 2011). L'acidification généralisée de l'océan a également été observée dans le Pacifique Nord (Feely *et al.*, 2008). Dans certaines régions situées au large des trois côtes, les eaux sont déjà considérées comme corrosives pour certains organismes calcaires, dont le squelette ou la coquille peuvent se dissoudre (p. ex., Feely *et al.*, 2008; Yamamoto-Kawai *et al.*, 2009; Mucci *et al.*, 2011).

Les extrapolations fondées sur les scénarios du SRES du GIEC (*voir* l'encadré 4) font état de réductions du pH plus importantes, de l'ordre de 0,14 à 0,35 unité à l'échelle mondiale, tout au long du XXI^{e} siècle (Feely *et al.* 2009; Hutchings *et al.*, 2012), mais des diminutions plus importantes pourraient se manifester à certains endroits. Les effets se feront particulièrement sentir dans les eaux limitrophes du Canada, dans les zones de hautes latitudes, où la profondeur de saturation de l'aragonite devrait remonter au-dessus des 50 m sous la surface d'ici 2100 (Denman *et al.*, 2011).

5.4 CHANGEMENT DU NIVEAU DE LA MER

5.4.1 ÉVOLUTION ACTUELLE ET ANTÉRIEURE DU NIVEAU MOYEN DE LA MER

Le niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale a gagné environ 21 cm entre 1880 et 2012 (figure 30). Le rythme de cette élévation (*voir* l'encadré 9) a augmenté entre le XX^{e} siècle et le début du XXI^{e} siècle. Au XX^{e} siècle, le niveau de la mer a augmenté de 1,7 ±0,5 mm/an, soit d'environ 17 cm tout au long du siècle, tandis qu'il a subi une hausse de 3,1 ±0,7 mm/an de 1993 à 2003 (Bindoff *et al.*, 2007). La tendance s'est poursuivie jusqu'en 2009 (Nerem *et al.*, 2010) et dans les années récentes (*voir* la figure 30). La dilatation thermique de la partie supérieure de l'océan et l'eau de fonte des glaciers, des calottes glacières et des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique sont à l'origine de l'élévation du niveau de la mer. L'élévation du niveau des eaux n'est cependant pas uniforme dans tous les océans. Les études menées sur la hausse du niveau de la mer témoignent d'une grande variabilité spatiale, parfois sur plusieurs décennies (Meyssignac *et al.*, 2012), essentiellement attribuable à la variabilité spatiale à long terme de la dilatation thermique, ainsi qu'aux changements qui s'opèrent au niveau de la salinité. Les autres effets tels que la répartition inégale de l'eau de fonte, jouent également un rôle dans la variabilité spatiale.

À l'extérieur des régions touchées par le soulèvement, le rythme de la subsidence est moins prononcé. La majeure partie de la masse terrestre canadienne est en train de se soulever du fait de l'ajustement isostatique glacial, qui est la réaction tardive de la surface terrestre au retrait des inlandsis à la fin de la dernière ère glaciaire (figure 31; Peltier, 2004). La côte de la baie d'Hudson et le centre de l'archipel arctique s'élèvent rapidement depuis maintenant plusieurs milliers d'années du fait de cet ajustement, ce qui a fait chuter le niveau de la mer. À Churchill, au Manitoba, le marégraphe indique que le niveau de la mer diminue de presque 10 mm/année depuis 1940 (Wolf *et al.*, 2006), mesure qui concorde avec celle du soulèvement crustal qui atteint un peu plus de 10 mm/an (Mazzotti *et al.*, 2011).

ENCADRÉ 9

CHANGEMENT DU NIVEAU ABSOLU ET RELATIF DE LA MER

Les changements du niveau de la mer à l'échelle mondiale sont souvent mesurés en fonction du niveau de la mer dit « absolu », c'est-à-dire calculé par rapport au centre de la Terre. Dans les zones côtières, le changement du niveau de la mer observé ou analysé en fonction d'un point fixe sur la terre ferme est appelé « changement du niveau relatif » de la mer. Le changement du niveau relatif de la mer est le résultat du changement du niveau absolu de la mer et du déplacement vertical de la terre, qui peuvent tous deux varier d'un endroit à l'autre. Le soulèvement terrestre diminue l'élévation du niveau relatif de la mer, tandis que la subsidence du sol l'accroît. Le déplacement vertical de la terre (soulèvement et subsidence) est un facteur déterminant dans l'étude des changements relatifs du niveau de la mer au Canada, quoique les variations régionales du niveau absolu de la mer soient également importantes.

La subsidence de la terre est attribuable au lent écoulement des roches dans les profondeurs de l'écorce terrestre, des zones d'affaissement jusqu'aux zones de soulèvement. Cela a pour conséquence d'inverser le processus d'écoulement, qui s'éloigne désormais des régions auparavant recouvertes d'inlandsis. La majeure partie des Maritimes et de Terre-Neuve, le littoral du Yukon, la côte continentale des Territoires du Nord-Ouest et certaines de ses îles,

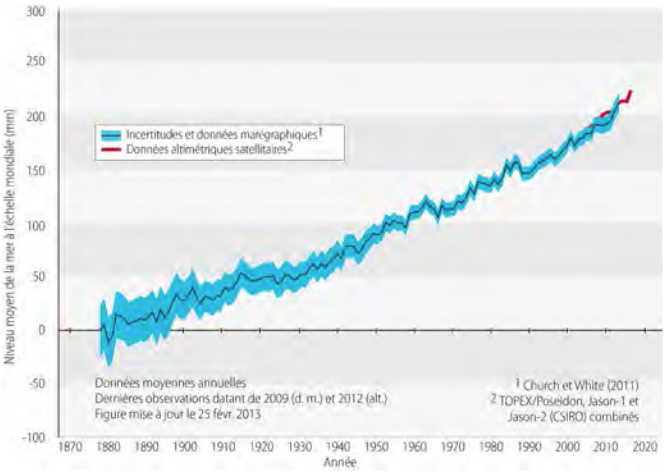


FIGURE 30 : Observations faites, de 1880 à 2012, du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale *(source : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, www.cmar.csiro.au/sealevel/)*. Les observations sont fondées sur des données marégraphiques (1880-2009) et des mesures altimétriques satellitaires recueillies par TOPEX/Poseidon, Jason-1 et Jason-2 (1993-2012).

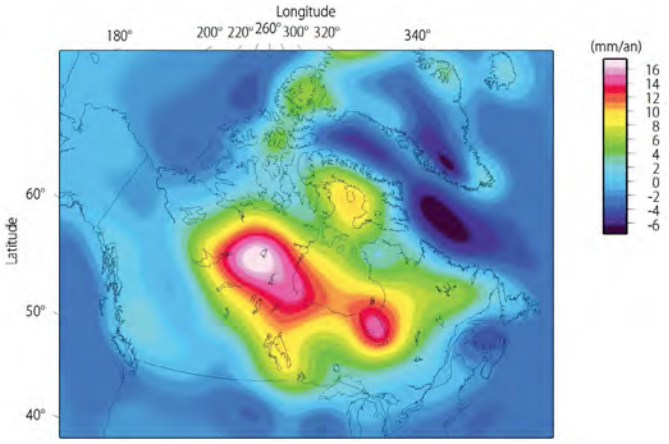


FIGURE 31: Déplacement vertical actuel de la croûte terrestre (en millimètres par an) extrapolé à partir du modèle ICE-5G d'ajustement isostatique glacial *(source : Peltier, 2004)*. Le niveau relatif de la mer est en train de chuter dans les régions où la terre s'élève rapidement, comme dans la baie d'Hudson. Les régions qui s'affaissent, comme la majeure partie des Maritimes, subissent une élévation du niveau relatif de la mer supérieure à celle enregistrée à l'échelle du globe. Les extrapolations faites à partir des modèles ne tiennent pas compte de l'important déplacement vertical de la croûte dans les régions côtières de la Colombie-Britannique attribuable à l'activité tectonique.

ainsi que la côte est de l'île de Baffin, au Nunavut, subissent un affaissement. Ces régions ont enregistré une hausse du niveau relatif de la mer au cours des derniers millénaires. À Halifax et Charlottetown, les relevés marégraphiques révèlent une élévation du niveau relatif de la mer d'environ 3,2 mm/an au cours de la majeure partie du XX^{e} siècle (Forbes *et al.*, 2004, 2009), soit une hausse presque deux fois plus élevée que la hausse du niveau de la mer à l'échelle mondiale au cours du XX^{e} siècle. À Tuktoyaktuk, sur la côte de la mer de Beaufort, dans les Territoires du Nord-Ouest, le niveau relatif de la mer s'est élevé de 3,5 mm/an au cours des 50 dernières années, ce qui concorde avec l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale et le taux de subsidence à cet endroit (Forbes *et al.*, 2010).

L'élévation du niveau relatif de la mer en Colombie-Britannique est de manière générale moins importante que dans les Maritimes, les différences notées sur la ligne de côte étant surtout attribuables au déplacement vertical de la terre causé par le mouvement des plaques tectoniques situées au large. Les répercussions de la fluctuation massique passée et actuelle des glaciers de montagne et un effet d'ajustement isostatique glacial datant de la dernière glaciation continentale se font également sentir. Au XX^{e} siècle et au début du XXI^{e} siècle (de 1909 à 2006), le niveau de la mer a subi une hausse moyenne de l'ordre de 0,6 mm/an à Vancouver et à Victoria, et de 1,3 mm/an à Prince-Rupert, et a baissé de 0,9 mm/an à Tofino (Mazzotti *et al.*, 2008).

La compaction des sédiments est un autre facteur géologique qui a une incidence sur le changement du niveau relatif de la mer. Une subsidence continue de l'ordre de 1 à 2 mm/an attribuable à la compaction des sédiments a été notée dans le delta du Fraser (Mazzotti *et al.*, 2008, 2009). De même, des mesures prises dans le delta du Mackenzie, dans les Territoires du Nord-Ouest, témoignent d'un affaissement pouvant aller jusqu'à plusieurs millimètres par an par rapport à un point de référence stable situé à proximité. La subsidence plus marquée du delta contribue également à l'élévation du niveau de la mer le long de cette ligne de côte s'affaissant sous la pression isostatique (Forbes *et al.*, 2010).

5.4.2 CHANGEMENT FUTUR DU NIVEAU MOYEN DE LA MER

Des incertitudes subsistent quant au rythme auquel le niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale continuera à augmenter au XXI^{e} siècle (figure 32). Selon les prévisions du RE4 du GIEC, l'élévation du niveau de la mer tout au long du XXI^{e} siècle par rapport aux 20 dernières années du XX^{e} siècle devrait être de l'ordre de 18 à 59 cm, selon le scénario d'émissions (Meehl *et al.*, 2007b). Peu importe le scénario utilisé, le facteur de dilatation thermique était prédominant et représentait entre 70 et 75 % des estimations moyennes de l'élévation du niveau de la mer d'ici la fin du siècle (Meehl *et al.*, 2007b). Le rapport indiquait également qu'une accélération du débit des glaciers vers les océans pourrait contribuer à une hausse supplémentaire du niveau de la mer de l'ordre de 10 à 20 cm. Ces résultats ont été obtenus à partir de modèles fondés sur des processus tenant compte des lois physiques et des propriétés connues de l'atmosphère, des océans, des glaciers et des inlandsis.

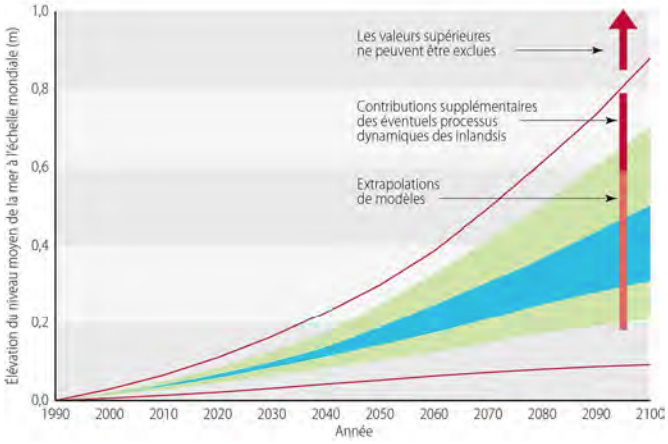


FIGURE 32 : Extrapolation de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale au XXI^{e} siècle, à partir du Troisième rapport d'évaluation du GIEC (TRE, parties en vert et bleu, et courbes rouges; GIEC, 2001), et à la fin du siècle, à partir du Quatrième rapport d'évaluation (RE4, barres colorées; GIEC, 2007). En ce qui concerne le TRE, la partie bleue indique la variation des prévisions moyennes pour un ensemble de scénarios d'émissions, tandis que la partie verte montre la fourchette pour toutes les extrapolations faites à partir de modèles. Les courbes extérieures illustrent une incertitude supplémentaire liée à la glace terrestre. Dans le cas du RE4, la barre rouge claire indique la portée des prévisions du modèle, la barre rouge foncée montre le rôle additionnel possible joué par la dynamique des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique, et la flèche rouge montre que des hausses supérieures du niveau de la mer ne peuvent pas être écartées[5] (*extrait modifié tiré* de Church *et al.*, 2008).

Les projections actualisées, selon l'approche du GIEC (p. ex., Church *et al.*, 2011), révèlent que l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale devrait se situer entre 20 et 80 cm d'ici 2100.

Certaines publications, qui s'appuient sur des méthodes semi-empiriques, laissent entendre que l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale pourrait être plus importante d'ici la fin du XXI^{e} siècle, pour atteindre des valeurs dépassant les 100 cm (p. ex., 75-190 cm, Vermeer et Rahmstorf, 2009; et 57-110 cm, Jevrejeva *et al.*, 2012). Les prévisions semi-empiriques sont fondées sur les relations présumées entre le niveau de la mer et l'équilibre des températures à l'échelle mondiale ou celui de la chaleur atmosphérique. Elles ne tiennent pas compte de l'ensemble des processus physiques responsables des changements du niveau de la mer. On ignore à l'heure actuelle pourquoi les valeurs qui ont été obtenues en matière de hausse du niveau de la mer sont supérieures à celles recueillies à l'aide de la modélisation fondée sur les processus, méthode qui a donné lieu aux résultats publiés dans le Troisième rapport d'évaluation et le Quatrième rapport d'évaluation. On recommande d'examiner avec une certaine réserve les prévisions semi-empiriques, compte tenu de certaines limitations (Church *et al.*, 2011).

[5] Le GEIC a récemment mis à jour les extrapolations de l'élévation du niveau de la mer au futur (Sotcker *et al.*, 2013) et a confirmé que des niveaux d'élévation du niveau de la mer encore plus élevés (au-delà de un mètre) ne pourraient pas être exclus, mais a évalué que la partie plus haute de la gamme pour l'extrapolation de l'élévation du niveau de la mer probable (au-delà de 66%) sera environ un mètre par rapport aux niveaux présents, d'ici la fin du siècle.

Une limite maximale de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale de l'ordre de 200 cm d'ici à 2100 découle de la modélisation glaciologique, afin d'écarter des prévisions de hausses supérieures du niveau de la mer (Pfeffer *et al.*, 2008). L'évaluation des contributions maximum de différents facteurs responsables de la hausse du niveau de la mer, ainsi que des études fondées sur différentes approches, ont permis de définir, aux fins de planification des risques de crues (Katsman *et al.*, 2011), une fourchette supérieure de scénario plausible d'élévation du niveau de la mer de l'ordre de 55 à 115 cm d'ici à 2100.

Ces estimations tiennent compte des contributions de la fonte des calottes glaciaires et des glaciers canadiens. La contribution des glaciers circumpolaires arctiques à l'élévation du niveau de la mer d'ici à 2100 devrait être de l'ordre de 5 à 14 cm; la contribution prévue des champs de glace, des calottes glaciaires et des glaciers arctiques canadiens étant de 1 à 4 cm (PSEA, 2011). Une récente mise à jour révèle que la contribution de l'archipel arctique canadien à l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale sera de l'ordre de 3,5 ±2,4 cm au cours du XXIe siècle (Lenaerts *et al.*, 2013). Étant donné leur plus faible volume en glace, les glaciers de l'ouest du Canada devraient contribuer dans une moindre mesure à la hausse du niveau de la mer (Marzeion *et al.*, 2012).

Comme cela a été le cas jusqu'à présent, les configurations du changement futur du niveau relatif de la mer au Canada continueront d'être touchées par le soulèvement et la subsidence de la terre, la répartition inégale des eaux de fonte, et les changements au niveau de la température, de la salinité et de la circulation des océans (p. ex., Slangen *et al.*, 2012). Du côté de la baie d'Hudson, certaines lignes de côte s'élèvent si rapidement que le niveau de la mer continuera à chuter tout au long du XXIe siècle, sauf dans le cas des scénarios extrêmes d'élévation du niveau des océans à l'échelle mondiale (James *et al.*, 2011). La baisse du niveau de la mer peut notamment entraîner la diminution de la profondeur de carénage, ce qui pourrait présenter un risque pour la navigation et l'entrée au bassin des navires océaniques. Les régions qui sont sujettes à un soulèvement moins rapide pourraient passer d'une baisse du niveau relatif de la mer durant les premières décennies du XXIe siècle à une hausse d'ici 2100, en fonction de la vitesse du soulèvement et de l'importance de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale. Les régions en voie de subsidence subiront, quant à elles, une hausse accrue du niveau de la mer.

La répartition de l'eau de fonte dans les océans est inégale (Mitrovica *et al.*, 2001, 2011). La masse des inlandsis et des glaciers qui fondent réduit leur attraction gravitationnelle à l'eau des océans, ce qui provoque une baisse du niveau de la mer à proximité d'une source d'eau de fonte. À cet endroit, la croûte terrestre réagit de manière élastique à la diminution de la charge, ce qui provoque un soulèvement qui peut aussi contribuer à la baisse du niveau relatif de la mer. Ces configurations de répartition de l'eau de fonte et de réaction élastique de la croûte terrestre (aussi appelée configuration spatiale ou « empreinte » du niveau de la mer) sont importantes au Canada du fait de la présence des calottes glaciaires arctiques et, à l'ouest, des glaciers de montagne et des champs de glace. En outre, la fonte de l'inlandsis du Groenland et des glaciers du golfe de l'Alaska contribue à l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale. Étant donné qu'elles se situent, à l'échelle planétaire, à proximité de ces importantes sources d'eau de fonte, de vastes régions du Canada subiront une hausse moins rapide du niveau relatif de la mer. Les effets de la répartition de l'eau de fonte sont suffisamment marqués dans certaines régions du Canada arctique pour que la fourchette des prévisions relatives au niveau de la mer à l'échelle locale corresponde à moins de la moitié de la fourchette de prévisions à l'échelle mondiale (James *et al.*, 2011).

Les niveaux marins sont également tributaires de la circulation océanique, qui compte pour plus de 2 m de la variation spatiale actuelle du niveau absolu de la mer. Le plus haut gradient du niveau de la mer observé au large des côtes canadiennes se trouve dans le nord-ouest de l'Atlantique où le niveau de la mer dans le Gulf Stream varie d'environ 1,5m. (Thompson *et al.*, 2011). La variabilité des courants océaniques peut favoriser le changement du niveau de la mer sur l'ensemble des trois côtes. On s'attend à ce que l'Arctique et les Maritimes subissent une élévation du niveau de la mer supérieure à la moyenne, en raison des changements relatifs à la circulation océanique (p. ex., Yin, 2012; Ezer *et al.*, 2013), ce qui contrebalance en partie les diminutions découlant de la répartition de l'eau de fonte. Au large de la côte ouest, les changements à long terme du niveau de la mer littorale provoqués par les courants peuvent être masqués par des variations décennales du niveau de la mer attribuables à des changements se manifestant au niveau de la circulation et des températures dans la partie supérieure de l'océan, lesquels sont associés aux importants épisodes d'El Niño et de La Niña (Thomson *et al.*, 2008).

Si les prévisions concernant l'élévation du niveau de la mer à l'échelle planétaire après 2100 sont encore plus incertaines, elles révèlent cependant une hausse continue du niveau de la mer au cours des siècles, voire des millénaires, à venir (p. ex., Huybrechts *et al.*, 2011; Katsman *et al.*, 2011; Jevrejeva *et al.*, 2012). Le niveau de la mer à l'échelle planétaire pourrait tôt ou tard subir une hausse de plusieurs mètres.

5.4.3 NIVEAUX D'EAU EXTRÊMES

La hausse des niveaux moyens de la mer favorise dans une large mesure les niveaux d'eau extrêmes (élevés) qui se manifestent généralement lorsque des ondes de tempête surviennent à marée haute. Les seiches portuaires, les vagues dues au vent et la variabilité interannuelle et saisonnière jouent également un rôle important. La hauteur de la surface des océans varie selon des échelles temporelles, allant de plusieurs années à quelques heures en raison des variations atmosphériques et océaniques, comme l'ENSO, l'oscillation nord-atlantique, l'écoulement et le réchauffement saisonniers, les tempêtes et les changements de la circulation océanique. Dans le Pacifique, des épisodes extrêmes d'ENSO peuvent modifier le niveau de la mer littorale de quelques dizaines de centimètres. Les ondes de tempête peuvent avoir une amplitude supérieure à un mètre sur l'ensemble des trois côtes (Bernier et Thompson, 2006; Manson et Solomon, 2007; Thomson *et al.*, 2008). Cette variabilité à court terme de grande amplitude fait varier considérablement le niveau d'eau maximal tout au long de l'année, ainsi que d'une année à l'autre. Elle s'ajoute à la lente élévation du niveau moyen de la mer, favorisant ainsi une hausse plus importante du niveau de la mer au fil du temps aux endroits d'élévation du niveau relatif de la mer. Dans la baie de Fundy, l'élévation du niveau moyen de la mer provoque une légère hausse de l'amplitude des marées, en raison de la résonance accrue des

marées semi-diurnes (Greenberg *et al.*, 2012), contribuant ainsi davantage à la présence de niveaux d'eau extrêmement élevés à cet endroit.

L'évolution de ces facteurs attribuable au climat aura également une incidence sur les niveaux d'eau extrêmes dans de nombreuses régions du globe. Si les changements climatiques susceptibles d'influer sur l'intensité et la fréquence des tempêtes, des ouragans et des fortes vagues dues au vent sont particulièrement préoccupants, ils devraient cependant évoluer sur le plan géographique et on ignore quelles seront leur forme et leur ampleur dans la plupart des régions (p. ex., Ulbrich *et al.*, 2009; Harvey *et al.*, 2012; Rummukainen, 2012; Seneviratne *et al.*, 2012). Les études portant sur l'évolution de la vitesse des vents dans certaines zones côtières du Canada ne permettent pas de dégager de tendances à long terme (Hundecha *et al.*, 2008; Wan *et al.*, 2010). Certains avancent que les plus fortes tempêtes gagneront en intensité dans les zones de moyennes et de hautes latitudes du Pacifique Nord et de l'Atlantique Nord (p. ex., Mizuta, 2012; Woollings *et al.*, 2012), et que les courants-jets et les trajectoires de tempêtes se déplaceront vers le pôle. Toutefois, certains éléments des changements prévus varient en fonction de la saison et de la région (p. ex., Long *et al.*, 2009; Perrie *et al.*, 2010), ainsi que des modèles utilisés.

Les changements de la couverture de glace de mer ont d'importantes répercussions sur les vagues dues au vent qui atteignent la côte. La glace de mer côtière empêche les vagues de déferler directement sur le rivage, réduisant ainsi l'accumulation de l'eau des vagues (Forbes et Taylor, 1994; Allard *et al.*, 1998). La glace située plus au large forme un obstacle et réduit l'amplitude des vagues avant qu'elles n'atteignent le rivage (Wadhams *et al.*, 1988; Squire, 2007), donc une plus grande quantité d'eau libre favorisera la formation de plus grandes vagues, même si les vents ne changent pas; c'est pourquoi les régions pour lesquelles une diminution de la glace de mer est prévue telles que le Canada atlantique et l'Arctique, pourraient subir une hausse des niveaux d'eau extrêmes, du fait de l'accumulation de l'eau.

Une hausse des niveaux d'eau extrêmes aura généralement pour effet d'accroître l'érosion côtière. Les régions poldérisées, les zones côtières à faible relief et les côtes composées de sédiments meubles sont plus touchées par l'érosion que les hautes côtes rocheuses. Dans l'Arctique, la hausse des températures de l'air et de l'eau peut mener à la dégradation et à la fonte du pergélisol, favorisant ainsi le rejet des sédiments pris dans la glace ainsi que l'érosion (Forbes, 2011). À l'heure actuelle, il semble que la modification à long terme de la fréquence et de l'intensité des inondations et des niveaux d'eau extrêmes sur les côtes canadiennes sera essentiellement attribuable aux changements du niveau moyen de la mer et de la glace de mer, même si les marées, les ondes de tempête et les vagues continueront de jouer un rôle déterminant. On s'attend à ce que les régions susceptibles de subir une élévation du niveau moyen de la mer observent également une hausse des niveaux d'eau extrêmes.

6. SYNTHÈSE

Le réchauffement atmosphérique touche l'ensemble du Canada depuis 1950, en particulier le nord et l'ouest. Si ses effets sont observés à chaque saison, ils sont plus marqués en hiver et au printemps. Les émissions anthropiques de GES constituent la principale cause du réchauffement à long terme au Canada (et dans le reste du monde) depuis le milieu du XX^{e} siècle. D'autres facteurs peuvent avoir une forte incidence sur la variabilité à court terme du climat imposée à une tendance à long terme.

Une série d'indicateurs permettent d'obtenir un tableau cohérent de la façon dont le système atmosphère-glace-océan-terre réagit au réchauffement climatique. Une hausse des extrêmes de chaleur et une baisse des extrêmes de froid ont été observées dans l'ensemble du pays. Le Canada est, dans l'ensemble, plus humide, bien que l'on observe une variabilité de nature spatiale et saisonnière. La diminution des chutes de neige et la hausse des précipitations, observées dans la majeure partie du sud du pays, concordent avec le réchauffement des températures. La réduction de l'étendue spatiale et de la masse de la cryosphère canadienne est démontrée par le déclin rapide de la couverture de neige et de glace, le raccourcissement des périodes d'engel des lacs et des rivières, le réchauffement généralisé du pergélisol et la fonte des glaciers dans l'ouest du Canada et dans l'Extrême Arctique. Les indicateurs de la disponibilité de l'eau douce en surface, comme l'écoulement fluvial, affichent des réactions intégrées aux changements climatiques et cryosphériques; toutefois, il est malgré tout difficile de dégager une configuration spatiale cohérente à l'échelle du pays.

Les fluctuations naturelles du climat telles qu'El Niño et l'oscillation nord-atlantique, contribuent à la variabilité régionale du climat selon de courtes échelles temporelles (décennales). Le réchauffement, qui devrait survenir tout au long de ce siècle, sera associé au maintien et à l'éventuelle accélération de plusieurs des tendances observées au cours des 50 dernières années. Si certains schémas de changement peuvent s'appliquer au Canada dans son ensemble (un climat plus chaud et plus humide, et moins de neige et de glace), on continuera à observer une variabilité régionale et saisonnière. On s'attend notamment à ce que le réchauffement et les effets connexes soient plus importants dans l'Arctique. On ne sait notamment pas comment évolueront les précipitations, mais la diminution potentielle dans le sud du Canada, ainsi que les étés plus chauds et l'évaporation accrue, pourraient accroître l'aridité saisonnière et réduire la disponibilité de l'eau douce dans certaines régions.

L'évolution à long terme du climat océanique (température, salinité, niveaux d'oxygène et acidité) concorde avec la hausse de la quantité de CO_2 atmosphérique et le réchauffement climatique d'origine anthropique observés dans les trois océans limitrophes du Canada. Cependant, la variabilité naturelle, selon des échelles temporelles décennales et multidécennales, a également joué

un rôle dans les changements observés dans certaines zones situées au large du Canada (p. ex., nord-ouest de l'Atlantique). Toutefois, le réchauffement des eaux, la diminution de la glace de mer, la baisse de la salinité de la partie supérieure des océans et la stratification accrue de la densité verticale devraient se faire sentir dans la plupart des eaux canadiennes au cours du siècle à venir. Les tendances observées à l'échelle mondiale en matière d'acidification des océans et de baisse des niveaux d'oxygène de subsurface devraient se maintenir et être davantage manifestes dans les eaux canadiennes.

Les changements du niveau de la mer le long des côtes canadiennes continueront à dépendre de facteurs aussi bien locaux que mondiaux. L'accroissement du réchauffement des eaux et du volume de l'eau de fonte provenant de la glace terrestre favorise l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale. Selon les estimations, l'élévation du niveau de la mer à l'échelle planétaire devrait être de l'ordre de quelques dizaines de centimètres à plus d'un mètre d'ici 2100. Le mouvement vertical de la terre influe fortement sur le changement du niveau relatif de la mer à l'échelle locale. Dans les régions où la terre est en voie de subsidence, comme dans la majeure partie des Maritimes, l'élévation du niveau relatif de la mer est plus rapide que sur le reste du globe, et se poursuivra. Dans les régions où la terre s'élève rapidement (p. ex., les environs de la baie d'Hudson), le niveau de la mer continuera à diminuer, sauf dans le cas des prévisions établies à partir des scénarios extrêmes d'élévation du niveau de la mer. Les régions où la terre s'élève plus lentement peuvent passer d'une baisse à une hausse du niveau relatif de la mer au cours du XXI^{e} siècle. On s'attend à ce que les niveaux marins extrêmes soient plus fréquents au cours du siècle à venir dans les régions de l'Arctique et du Canada atlantique, où l'élévation du niveau relatif de la mer se poursuit et où la glace de mer devrait décroître.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier certains de leurs collègues d'avoir revu les chapitres et d'avoir fait des critiques constructives sur les versions provisoires : John Fyfe et Xuebin Zhang d'Environnement Canada; Kumiko Azetsu-Scott, Diane Lavoie, Charles Hannah et Rick Thompson de Pêches et Océans Canada; ainsi que Don Forbes et Joseph Henton de Ressources naturelles Canada. Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers les réviseurs anonymes externes pour le temps et les efforts qu'ils ont consacrés à ce travail.

RÉFÉRENCES

Abdul-Aziz, A.O.I. et D.H. Burn. « Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin », *Journal of Hydrology*, vol. 319, nº 1-4, 2006, pp. 282-294.

Allard, M., Y. Michaud, M.-H. Ruz et A. Héquette. « Ice foot, freeze-thaw of sediments, and platform erosion in a subarctic microtidal environment, Manitounuk Strait, northern Quebec, Canada », *Revue canadienne des sciences de la Terre*, vol. 35, 1998, pp. 965-979.

Allen, M.R. et W.J Ingram. « Constraints on the future changes in climate and the hydrological cycle », *Nature*, vol. 419, 2002, pp. 224-232.

Angel, J.R. et K.E. Kunkel. « The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 36, 2010, pp. 51-58.

Argyilan, E.P. et S.L. Forman. « Lake level response to seasonal climatic variability in the Lake Michigan-Huron system from 1920 to 1995 », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 29, nº 3, 2003, pp. 488-500.

Assel, R.A., F.H. Quinn et C.E. Sellinger. « Hydroclimatic factors of the recent record drop in Laurentian Great Lakes water levels », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 85, 2004, pp. 1143-1151.

Azetsu-Scott, K., A. Clarke, K. Falkner, J. Hamilton, E.P. Jones, C. Lee, B. Petrie, S. Prinsenberg, M. Starr et P. Yeats. « Calcium carbonate saturation states in the waters of the Canadian Arctic Archipelago and the Labrador Sea », *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, C11021, 2010.

Barrand, N.E. et M.J. Sharp. « Sustained rapid shrinkage of Yukon glaciers since the 1957-1958 International Geophysical Year », *Geophysical Research Letters*, vol. 37, L07501, 2010.

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu et J.P. Palutikof (éd.) *Le changement climatique et l'eau*, Document technique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), Secrétariat du GIEC, Genève, 2008, 236 p.

Beltaos, S. et T. Prowse. « River-ice hydrology in a shrinking cryosphere », *Hydrological Processes*, vol. 23, 2009, pp. 122-144.

Bennett, K.E., A.T. Werner et M. Schnorbus. « Uncertainties in hydrologic and climate change impact analyses in headwater basins of British Columbia », *Journal of Climate*, vol. 25, nº 17, 2012, pp. 5711-5730.

Bernier, N.B. et K.R. Thompson. « Predicting the frequency of storm surges and extreme sea levels in the northwest Atlantic », *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, C10009, 2006.

Bianucci, L. et K.L. Denman. « Carbon and oxygen cycles: sensitivity to changes in environmental forcing in a coastal upwelling system », *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, G01020, 2011.

Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley et A. Unnikrishnan. « Observations: oceanic climate change and sea level », dans *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007, pp. 385-432.

Blunden, J. et D.S. Arndt (éd.) « State of the Climate in 2011 », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, nº 7, 2012, pp. S1-S264.

Bohrn, S.K. *Climate change impact assessment and uncertainty analysis of the hydrology of a northern, data-sparse catchment using multiple hydrological models*, Civil Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, 2012, <http://mspace.lib.umanitoba.ca//handle/1993/13692>.

Bolch, T., B. Menounos et R. Wheate. « Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985-2005 », *Remote sensing of Environment*, vol. 114, 2010, pp. 127-137.

Bonsal, B.R., R. Aider, P. Gachon et S. Lapp. « An assessment of Canadian prairies drought: past, present and future », *Climate Dynamics*, vol. 41, nº 2, 2012, p. 501-516.

Bonsal, B.R., T.D. Prowse, C.R. Duguay et M.P. Lacroix. « Impacts of large-scale teleconnections on freshwater-ice duration over Canada », *Journal of Hydrology*, vol. 330, 2006, pp. 340-353.

Bonsal, B.R. et A. Shabbar. *Oscillations climatiques à grande échelle ayant une incidence sur le Canada, de 1990 à 2008*, Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique nº 4, Conseils canadiens des ministres des ressources, Ottawa (Ontario), 2011, iii + 15 p.

Bonsal, B.R., E.E. Wheaton, A.C. Chipanshi, C. Lin, D.J. Sauchyn et L. Wen. « Drought research in Canada: A Review », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, nº 4, 2011, pp. 303-319.

Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier et A.G. Roy. « Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries », *Journal of Hydrology*, vol. 384, 2010, pp. 65-83.

Brimley, B., J.-F. Cantin, D. Harvey, M. Kowalchuk, P. Marsh, T. Ouarda,B. Phinney, P. Pilon, M. Renouf, B. Tassone, R. Wedel et T. Yuzyk. *Establishment of the Reference Hydrometric Basin Network (RHBN) for Canada*, Environnement Canada, 1999, 41 p.

Brown, L.C. et C.R. Duguay. « The response and role of ice cover in lake-climate interactions », *Progress in Physical Geography*, vol. 34, nº 5, 2010, pp. 671-704.

Brown, L.C. et C.R. Duguay. « The fate of lake ice in the North American Arctic », *The Cryosphere*, vol. 5, 2011, pp. 869-892.

Brown, R., C. Derkesen et L. Wang. « A multi-data set analysis of variability and change in Arctic spring snow cover extent, 1967-2008 », *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, D16111, 2010.

Brown, R.D. et P.W. Mote. « The response of the Northern Hemisphere snow cover to a changing climate », *Journal of Climate*, vol. 22, 2009, pp. 2124-2145.

Brown, R.D. et D.A. Robinson. « Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922-2010 including an assessment of uncertainty », *The Cryosphere*, vol. 5, 2011, pp. 219-229.

Bürger, G., J. Schulla et A.T. Werner. « Estimates of future flow, including extremes, of the Columbia River headwaters », *Water Resources Research*, vol. 47, nº 10, 2011.

Burn, D.H., J.M. Buttle, D. Caissie, G. MacCulloch, C. Spence et K. Stahl. « The processes, patterns, and impacts of low flows across Canada », *Revue canadienne des ressources hydriques*, vol. 33, nº 2, 2008, pp. 107-124.

Burn, D.H., Sharif, M. et K. Zhang. « Detection of trends in hydrological extremes for Canadian watersheds », *Hydrological Processes*, vol. 24, nº 13, 2010, pp. 1781-1790.

Callaghan, T.V., M. Johansson, O. Asinimov, H.H. Christiansen, A. Instanes, V. Romanovsky et S. Smith. « Changing permafrost and its impacts », dans *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere*, Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique, Oslo, Norvège, 2011a, xii + 538 p.

Callaghan, T.V., M. Johansson, R.D. Brown, P.Y. Groisman, N. Labba, V. Radionov, R.G. Barry, O.N. Bulygina, R.L.H. Essery, D.M. Frolov, V.N. Golubev, T.C. Grenfell, M.N. Petrushina, V.N. Razuvaev, D.A. Robinson, P. Romanov, D. Shindell, A.B. Shmakin, S.A. Sokratov, S. Warren et D. Yang. « The changing face of arctic snow cover: a synthesis of observed and projected changes », *AMBIO*, vol. 40, 2011b, pp. 17-31.

Capotondi, A., M.A. Alexander, N.A. Bond, E.N. Curchitser et J.D. Scott. « Enhanced upper ocean stratification with climate change in the CMIP3 models », *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, C04031, 2012.

Cavalieri, D.J. et C.L. Parkinson. « Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010 », *The Cryosphere*, vol. 6, 2012, pp. 881-889.

Chandler, P. « Sea surface temperature and salinity trends observed at lighthouses », dans *State of the physical, biological, and selected fishery resources of Pacific Canadian marine ecosystems in 2011*, pp. 35-37, J.R. Irvine et W.R. Crawford (éd.), Pêches et Océans Canada, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2012/072, 2012, vi + 141 p.

Chen, J., F.P.Brissette, A. Poulin et R. Leconte. « Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed », *Water Resources Research*, vol. 47, W12509, 2011.

Chen, Z. et S.E. Grasby. « Impact of decadal and century-scale oscillations on hydroclimate trend analyses », *Journal of Hydrology*, vol. 365, 2009, pp. 122-133.

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr et P. Whetton. « Regional Climate Projections », dans *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007. p. 847-940.

Christian, J.R. et M.G.G. Foreman. *Tendances et prévisions des changements climatiques – Programme des services d'adaptation aux changements climatiques en milieu aquatique*, Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques, 3023, 2013, xi + 112 p.

Church, J.A., T. Aarup, P.L. Woodworth, W.S. Wilson, R.J. Nicholls, R. Rayner, K. Lambeck, G.T. Mitchum, K. Steffen, A. Cazanave, G. Blewitt, J.X. Mitrovica et J.A. Lowe. « Sea-level rise and variability: synthesis and outlook for the future », dans *Understanding Sea-level Rise and Variability*, J.A. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup et W.S. Wilson (éd.), Wiley & Sons, New Jersey, 2010, 428 p.

Church, J.A., J.M. Gregory, N.J. White, S.M. Platten et J.X. Mitrovica. « Understanding and projecting sea level change », *Oceanography*, vol. 24, nº 2, 2011, pp. 130-141.

Church, J.A., N.J. White, T. Aarup, W.S. Wilson, P.L. Woodworth, C.M. Domingues, J.R. Hunter et K. Lambeck. « Understanding and projecting sea level change », *Sustainable Science*, vol. 3, nº 1, 2008, pp. 9-22.

Church, J. A. et N.J. White. « Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century »; *Surveys in Geophysics*, vol. 32, nº 4-5, 2011, pp. 585-602.

CIEM (Conseil international pour l'exploration de la mer). *ICES status report on climate change in the North Atlantic*, Rapport des Recherches Collectives nº 310, Conseil international pour l'exploration de la mer, 2011, 262 p., <http://www.ices.dk/sites/pub/Publication%20Reports/Cooperative%20Research%20Report%20(CRR)/crr310/CRR%20310%20Climate%20Change.pdf>.

Colbourne, E., J. Craig, C. Fitzpatrick, D. Senciall, P. Stead et W. Bailey. *An assessment of the physical oceanographic environment on the Newfoundland and Labrador Shelf during 2011*, Pêches et Océans Canada, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2012/044, 2012, iv + 32 p.

Comiso, J.C. « Large decadal decline of the Arctic multi-year ice cover », *Journal of Climate*, vol. 25, 2012, pp. 1176-1193.

Copland, L., D.R. Mueller et L. Weir. « Rapid loss of the Ayles ice shelf, Ellesmere Island, Canada », *Geophysical Research Letters*, vol. 34, L21501, 2007.

Crawford, W.R. et A. Peña. « Declining oxygen on the British Columbia continental shelf », *Atmosphere-Ocean*, vol. 51, 2013, pp. 88-103.

Crawford, W.R., J. Galbraith et N. Bolingbroke. « Line P ocean temperature and salinity, 1956-2005 », *Progress in Oceanography*, vol. 75, 2007, pp. 161-178.

Cunderlik, J.M. et T.B. Ouarda. « Trends in the timing and magnitude of floods in Canada », *Journal of Hydrology*, vol. 375, nº 3-4, 2009, pp. 471-480.

Dai, A. « Drought under global warming: a review », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 2, nº 1, 2011, pp. 45-65.

de Jong, M.F., S.S. Drijfhout, W. Hazeleger, H.M. van Aken et C.A. Severijns. « Simulations of hydrographic properties in the northwestern North Atlantic Ocean in coupled climate models », *Journal of Climate*, vol. 22, 2009, pp. 1767-1786.

Demuth, M.N., V. Pinard, A. Pietroniro, B.H. Luckman, C. Hopkinson, P. Dornes et L. Comeau. « Recent and past-century variations in the glacier resources of the Canadian Rocky Mountains: Nelson River system », dans *Terra Glacialis Special Issue – Mountain Glaciers and Climate Changes of the Last Century*, L. Bonardi (éd.), 2008, pp. 27-52.

Denman, K., J.R. Christian, N. Steiner, H.-O. Portner et Y. Nojiri. « Potential impacts of future ocean acidification on marine ecosystems and fisheries: current knowledge and recommendations for future research », *ICES Journal of Marine Science*, vol. 68, nº 6, 2011, pp. 1019-1029.

Derksen, C. et R.D. Brown. « Terrestrial snow (Arctic) », dans State of the Climate in 2010, *Bulletin of the American Meteorological Society*, J.D. Blunden, S. Arndt, M.O. Baringer *et al.* (éd.), vol. 92, nº 6, 2011, pp. S1-S266.

Derksen, C. et R. Brown. « Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections », *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L19504, 2012.

Derksen, C., S.L. Smith, M. Sharp, L. Brown, S. Howell, L. Copland, D.R. Mueller, Y. Gauthier, C.G. Fletcher, A. Tivy, M. Bernier, J. Bourgeois, R. Brown, C.R. Burn, C. Duguay, P. Kushner, A. Langlois, A.G. Lewkowicz, A. Royer et A. Walker. « Variability and change in the Canadian cryosphere », *Climatic Change*, vol. 115, nº 1, 2012, pp. 59-88.

Dibike, Y., T. Prowse, B. Bonsal, L. de Rham et T. Saloranta. « Simulation of North American lake-ice cover characteristics under contemporary and future climate conditions », *International Journal of Climatology*, publié en ligne le 9 février 2011, 2012.

Doney, S.C., V.J. Fabry, R.A. Feely et J.A. Kleypas. « Ocean acidification: the other CO_2 problem », *Annual Review of Marine Science*, vol. 1, 2009, pp. 169-192.

Drijfhout, S., G.J. van Oldenborgh, et A. Cimatoribus. « Is a decline of AMOC causing the warming hole above the North Atlantic in observed and modeled warming patterns? », *Journal of Climate*, vol. 25, 2012, pp. 8373-8379.

Duguay, C.R., T.D. Prowse, B.R. Bonsal, R.D. Brown, M.P. Lacroix et P. Ménard. « Recent trends in Canadian lake ice cover », *Hydrological Processes*, vol. 20, 2006, pp. 781-801.

Durack, P.J. et S.E.Wijffels. « Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming », *Journal of Climate*, vol. 23, 2010, pp. 4342-4362.

Easterling, D.R. et M.F. Wehner. « Is the climate warming or cooling? », *Geophysical Research Letters*, vol. 36, L08706, 2009.

EBNFLO Environmental and AquaResource Inc. *Guide for assessment of hydrologic effects of climate change in Ontario*, document rédigé pour le ministère des Richesses naturelles de l'Ontario et le ministère de l'Environnement en partenariat avec Credit Valley Conservation, 2010.

ÉIGLA (Étude internationale des Grands Lacs d'amont). *Lake Superior regulation: addressing uncertainty in upper Great Lakes water levels*, Rapport final rédigé pour la Commission mixte internationale, mars 2012, 2012, 215 p.

Environnement Canada. *Aperçu annuel 2011*, *Bulletin des tendances et des variations climatiques*, Environnement Canada, 2011, <http://ec.gc.ca/adsc-cmda/default.asp?lang=Fr&n=F3D25729-1>.

Environnement Canada. *Bulletin des tendances et des variations climatiques - Année 2012*, Environnement Canada, 2012, <ec.gc.ca/adsc-cmda/default.asp?lang=Fr&n=77842065-1>.

Environnement Canada. infoNIVEAU : Niveau des Grands Lacs et du Saint-Laurent – Les lacs Michigan-Huron établissent deux nouveaux records en janvier 2013, vol. 21, nº 2, 2013, <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=7AD8D7A7>.

Ezer, T., L.P. Atkinson, W.B. Corlett et J.L. Blanco. « Gulf Stream's induced sea level rise and variability along the U.S. mid-Atlantic coast », *Journal of Geophysical Research*, vol. 118, 2013, pp. 685-697.

Feely, R.A., S.C. Doney et S.R. Cooley. « Ocean acidification: present conditions and future changes in a high-CO_2 world », *Oceanography*, vol. 22, nº 4, 2009, pp. 36-47.

Feely, R.A., C.L. Sabine, J.M. Hernandez-Ayon, D. Ianson et B. Hales. « Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf », *Science*, vol. 320, 2008, pp. 1490-1492.

Forbes, D.L. (editor) (2011): State of the Arctic Coast 2010 – *Scientific Review and Outlook; International Arctic Science Committee, Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, Arctic Monitoring and Assessment Programme*, International Permafrost Association, Helmholtz-Zentrum, Geesthacht, Allemagne, 178 p. <http://arcticcoasts.org>.

Forbes, D.L., M.R. Craymer, T.S. James, S.M. Solomon, P. Marsh, G.K. Manson, D. Whalen et C. Hopkinson. « Sea-level rise, subsidence and potential inundation on the outer Mackenzie Delta », programme de la conférence scientifique de l'API, à Oslo, Polar Science – Global Impact, Oslo, du 8 au 12 juin 2010, 2010, <http://elsevier.conference-services.net/resources/247/1976/pdf/Oslo2010_1904.pdf>.

Forbes, D.L., G.K. Manson, J. Charles, K.R. Thompson et R.B. Taylor. *Halifax Harbour extreme water levels in the context of climate change: scenarios for a 100-year planning horizon*, Commission géologique du Canada, Dossier public 6346, 2009, 21 p.

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

Forbes, D.L. et R.B. Taylor. « Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts », *Progress in Physical Geography*, vol. 18, 1994, pp. 59-89.

Forbes, K.A., S.W. Kienzle, C.A. Coburn, J.M. Byrne et J. Rasmussen. « Simulating the hydrological response to predicted climate change on a watershed in southern Alberta, Canada », *Climatic Change*, vol. 105, nº 3-4, 2011, pp. 555-576.

Fortin, V. et A. Gronewold. « Water balance of the Laurentian Great Lakes », dans *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs, Encyclopedia of Earth Sciences Series*, L. Bengtsson, R.W. Fairbridge et R.W. Herschy (éd.), 2012.

Foster, G. et S. Rahmstorf. « Global temperature evolution 1979-2010 », *Environmental Research Letters*, vol. 6, 044022, 2011.

Freeland, H.J. « Evidence of change in the winter mixed layer in the Northeast Pacific Ocean: a problem revisited », *Atmosphere-Ocean*, vol. 51, 2013, pp. 126-133.

Furgal, C. et T.D. Prowse. « Nord du Canada », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 57-118.

Galbraith, P.S. et P. Larouche. « Sea-surface temperature in Hudson Bay and Hudson Strait in relation to air temperature and ice cover breakup, 1985-2009 », *Journal of Marine Systems*, vol. 87, 2011, pp. 66-78.

Galbraith, P.S., J. Chassé, D. Gilbert, P. Larouche, D. Brickman, B. Pettigrew, L. Devine, A. Gosselin, R.G. Pettipas et C. Lafleur. *Physical oceanographic conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2011*, Pêches et Océans Canada, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2012/023, 2012a, iii + 85 p.

Galbraith, P.S., P. Larouche, J. Chassé et B. Petrie. « Sea-surface temperature in relation to air temperature in the Gulf of St. Lawrence: interdecadal variability and long term trends », *Deep Sea Research Part II*, 2012b, doi : 10.1016/j.dsr2.2012.04.001.

Gardner, A.S., G. Moholdt, B. Wouters, G.J. Wolken, D.O. Burgess, M.J. Sharp, J.G. Cogley, C. Braun et C. Labine. « Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago », *Nature*, vol. 473, 2011, pp. 357-360.

Ghanbari, R.N. et H.R. Bravo. « Coherence between atmospheric teleconnections, Great Lakes water levels, and regional climate », *Advances in Water Resources*, vol. 31, 2008, pp. 1284-1298.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Climate change 2001: the scientific basis*, contribution du Groupe de travail I au Troisième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2001, 881 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Changements climatiques 2007 : 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, R.K. Pachauri et A. Reisinger (éd.), Genève, Suisse, 2007, 103 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX)*, Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.M. Allen, M. Tignor et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2012, 582 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Summary for Policymakers », dans *Climate Change 2013: the Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (éds), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013. p. 3-29.

Gilbert, D., N.N. Rabalais, R.J. Diaz et J. Zhang. « Evidence for greater oxygen decline rates in the coastal ocean than in the open ocean », *Biogeosciences*, vol. 7, 2010, pp. 2283-2296.

Gilbert, D., B. Sundby, C. Gobeil, A. Mucci et G.H. Tremblay. « A seventy-two-year record of diminishing deep-water oxygen in the St. Lawrence estuary: the northwest Atlantic connection », *Limnology and Oceanography*, vol. 50, 2005, pp. 1654-1666.

Gillet, N.P., D.A. Stone, P.A. Stott, T. Nozawa, A.Y. Karpechko, G.C. Hegerl, M.F. Wehner et P.D. Jones. « Attribution of polar warming to human influence », *Nature Geoscience*, vol. 1, 2008, pp. 750-754.

Giorgi, F., E.-S. Im, E. Coppola, N.S. Diffenbaugh, X.J. Gao, L. Mariotti et Y. Shi. « Higher hydroclimatic intensity with global warming », *Journal of Climate*, vol. 24, 2011, pp. 5309-5324.

Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada. *Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010*, Conseils canadiens des ministres des ressources, Ottawa (Ontario), 2010, vi + 148 p., <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=83A35E06-1>.

Greenan, B., G. Harrison, I. Yashayaev, K. Azetsu-Scott, E. Head, W. Li et J. Loder. « Physical, chemical and biological conditions in the Labrador Sea in 2009 », *Atlantic Zone Monitoring Bulletin*, Pêches et Océans Canada, vol. 9, 2010, pp. 11-19, <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/azmp-pmza/docs/bulletin_9_03.pdf>.

Greenberg, D.A., W. Blanchard, B. Smith et E. Barrow. « Climate change, mean sea level and high tides in the Bay of Fundy », *Atmosphere-Ocean*, vol. 50, nº 3, 2012, pp. 261-276.

Grillakis, M.G., A.G. Koutroulis et I.K. Tsanis. « Climate change impact on the hydrology of Spencer Creek watershed in Southern Ontario, Canada », *Journal of Hydrology*, vol. 409, nº 1-2, 2011, pp. 1-19.

Gutowski, W.J., G.C. Hegerl, G. J. Holland, T.R. KNutson, L.O. Mearns, R.J. Stouffer, P.J. Webster, M.F. Wehner et F.W. Zwiers. « Causes of observed changes in extremes and projections of future changes », dans *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands*, T.R. Karl, G.A. Meehl, C.D. Miller, S.J. Hassol, A.M. Waple et W.L. Murray (éd.), Synthesis and Assessment Product 3.3, rapport rédigé par le U.S. Climate Change Science Program et le Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC, 2008, p. 81-116.

Hammill, M.O. et P.S. Galbraith. « Changements dans la couverture saisonnière de glace de mer et leurs effets sur les mammifères marins », dans *Rapport sur l'état des océans pour la zone de gestion intégrée du golfe du Saint-Laurent (GIGSL)*, H.P. Benoît, J.A. Gagné, C. Savenkoff, P. Ouellet et M.-N. Bourassa (éd.), Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques, nº 2986, 2012, ix + 79 p.

Hanrahan, J.L., S.V. Kravtsov et P.J. Roebber. « Quasi-periodic decadal cycles in levels of lakes Michigan and Huron », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 35, 2009, pp. 30-35.

Harma, K.J., M.S. Johnson et S.J. Cohen. « Future water supply and demand in the Okanagan Basin, British Columbia: a scenario-based analysis of multiple, interacting stressors », *Water Resources Management*, vol. 26, nº 3, 2012, pp. 667-689.

Harvey, B.J., L.C. Shaffrey, T.J. Woollings, G. Zappa et K.I. Hodges. « How large are projected 21st century storm track changes? » *Geophysical Research Letters*, vol. 39, no 18, L18707, 2012.

Harvey, K.D., P.J. Pilon et T.R. Yuzyk. « Canada's Reference Hydrometric Basin Network (RHBN) », dans *Partnerships in water resource management: proceedings of the CWRA 52nd Annual Conference*, Association canadienne des ressources hydriques, Nouvelle-Écosse, 1999, pp. 5-70.

Hayhoe, K., J. VanDorn, T. Croley, N. Schlegal et D. Wuebbles. « Regional climate change projections for Chicago and the US Great Lakes », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 36, 2010, pp. 7-21.

Hebert, D., R. Pettipas, B. Petrie et D. Brickman. *Meteorological, sea ice and physical oceanographic conditions on the Scotian Shelf and in the Gulf of Maine during 2011*, Pêches et Océans Canada, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2012/055, 2012, vi + 43 p.

Heginbottom, J.A., M.A. Dubreuil et P.A. Harker (comp.) « Canada – Pergélisol », *Atlas national du Canada* (5e édition), planche 2.1, MCR 4177, Géomatique Canada et Division de la science des terrains, Service d'information de l'Atlas national et Commission géologique du Canada, Ottawa (Ontario), 1995.

Hegerl, G.C., F.W. Zwiers, P. Braconnot, N.P. Gillet, Y. Luo, J.A. Marengo Orsini, N. Nicholls, J.E. Penner et P.A. Stott. « Understanding and attributing climate change », dans *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007. p. 663-745.

Held, I.M. et B.J. Soden. « Robust responses of the hydrological cycle to global warming », *Journal of Climate*, vol. 19, 2006, pp. 5686-5699.

Helm, K.P., N.L. Bindoff et J.A. Church. « Changes in the global hydrological cycle inferred from ocean salinity », *Geophysical Research Letters*, vol. 37, L18701, 2010.

Helm, K.P., N.L. Bindoff et J.A. Church. « Observed decreases in oxygen content of the global ocean », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L23602, 2011.

Hibbard, K.A., D.P. van Vuuren et J. Edmonds. « A primer on the Representative Concentration Pathways (RCPs) and the coordination between the climate and integrated assessment modeling communities », *CLIVAR Exchanges*, vol. 16, nº 2 (Special Issue on WCRP CMIP5), 2011, pp. 12-15.

Howell, S.E.L., A. Tivy, J.J. Yackel et S. McCourt. « Multi-year sea-ice conditions in the Western Canadian Arctic Archipelago region of the Northwest Passage: 1968-2006 », *Atmosphere-Ocean*, vol. 46, nº 2, 2008a, pp. 229-242.

Howell, S.E.L., A. Tivy, J.J. Yackel, B.G.T. Else et C.R. Duguay. « Changing sea ice melt parameters in the Canadian Arctic Archipelago: implications for the future presence of multiyear ice », *Journal Of Geophysical Research: Oceans*, vol. 113, C09030, 2008b.

Howell, S.E.L., C.R. Duguay et T. Markus. « Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979-2008 », *Geophysical Research Letters*, vol. 36, L10502, 2009.

Hundecha, Y., A. St.-Hilaire, T.B. Ouarda et S. El Adlouni. « A nonstationary extreme value analysis for the assessment of changes in extreme annual wind speed over the Gulf of St. Lawrence, Canada », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 47, 2008, pp. 2745-2759.

Hutchings, J.A., I.M. Côté, J.J. Dodson, I.A. Fleming, S. Jennings, N.J. Mantua, R.M. Peterman, B. Riddell, A.J. Weaver et D.L. VanderZwaag. *Sustaining Canada's marine biodiversity: responding to the challenges posed by climate change, fisheries and aquaculture*, Rapport des groupes d'experts rédigé par la Société royale du Canada, 2012, <https://rsc-src.ca/sites/default/files/pdf/RSCMarineBiodiversity2012_ENFINAL.pdf>.

Huybrechts, P., H. Goelzer, I. Janssens, E. Driesschaert, T. Fichefet, H. Goosse et M.-F. Loutre. « Response of the Greenland and Antarctic ice sheets to multi-millennial greenhouse warming in the Earth system model of intermediate complexity LOVECLIM », *Surveys in Geophysics*, vol. 32, 2011, pp. 397-416.

Irvine, J.R. et W.R. Crawford. *State of the physical, biological and selected fishery resources of Pacific Canadian marine ecosystems in 2011*, Pêches et Océans Canada, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2012/072, 2012, vi+ 141 p.

James, T.S., K.M. Simon, D.L. Forbes, A.S. Dyke et D.J. Mate. *Sea-level projections for five pilot communities of the Nunavut climate change partnership*, Commission géologique du Canada, Dossier public 6715, 2011, 23 p.

Jevrejeva, S., J.C. Moore et A. Grinsted. « Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios », *Global and Planetary Change*, vol. 80-81, 2012, pp. 14-20.

Jost, G., R.D. Moore, B. Menounos et R. Wheate. « Quantifying the contribution of glacier runoff to streamflow in the upper Columbia River Basin, Canada », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, nº 3, 2012, pp. 849-860.

Katsman, C.A., A. Sterl, J.J. Beersma, H.W. van den Brink, J.A. Church, W. Hazeleger, R.E. Kopp. D. Kroon, J. Kwadijk, R. Lammersen, J. Lowe, M. Oppenheimer, H.-P. Plag, J. Ridley, H. von Storch, D.G. Vaughan, P. Vellinga, L.L.A. Vermeersen, R.S.W. van der Wal et R. Weisse. « Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta – the Netherlands as an example », *Climatic Change*, vol. 109, 2011, pp. 617-645.

Kerkhoven, E. et T.Y. Gan. « Differences and sensitivities in potential hydrologic impact of climate change to regional-scale Athabasca and Fraser River basins of the leeward and windward sides of the Canadian Rocky Mountains respectively », *Climatic Change*, vol. 106, nº 4, 2011, pp. 583-607.

Khaliq, M.N., T.B. Ouarda, P. Gachon et L. Sushama. « Temporal evolution of low-flow regimes in Canadian rivers », *Water Resources Research*, vol. 44, W08436, 2008.

Kharin, V.V., F.W. Zwiers, X. Zhang et G.C. Hegerl. « Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations », *Journal of Climate*, vol. 20, 2007, pp. 1419-1444.

Kienzle, S.W., M.W. Nemeth, J.M. Byrne et R.J. MacDonald. « Simulating the hydrological impacts of climate change in the upper North Saskatchewan River basin, Alberta, Canada », *Journal of Hydrology*, vol. 412-413, 2012, pp. 76-89.

Lamon, E.C. et C.A. Stow. « Lake Superior water level fluctuation and climatic factors: a dynamic linear model analysis », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 36, 2010, pp. 172-178.

Lapp, S., D.J. Sauchyn et B. Toth. « Constructing scenarios of future climate and water supply for the SSRB: use and limitations for vulnerability assessment », *Prairie Forum*, vol. 34, nº 1, 2009, pp. 153-180.

Latifovic, R. et D. Pouliot. « Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record », *Remote Sensing of Environment*, vol. 106, 2007, pp. 492-507.

Le Treut, H., R. Sommerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson et M. Prather. « Historical overview of climate change science », dans *Climate change 2007: The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.

Lemke, P., J. Ren, R.B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P.W. Mote, R.H. Thomas et T. Zhang. « Observations: changes in snow, ice and frozen ground », dans *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.

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

Lenaerts, J.T.M., J.H. van Angelen, M.R. van den Broeke, A.S. Gardner, B. Wouters et E. van Meijgaard. « Irreversible mass loss of Canadian Arctic Archipelago glaciers », *Geophysical Research Letters*, vol. 40, 2013, pp. 870-874.

Lenters, J.D. « Trends in the Lake Superior water budget since 1948: a weakening seasonal cycle », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 30, 2004, pp. 20-40.

Liston, G.E. et C.A. Hiemstra. « The changing cryosphere: pan-Arctic snow trends (1979-2009) », *Journal of Climate*, vol. 24, 2011, pp. 5691-5712.

Loder, J.W., G. Han, P.S. Galbraith, J. Chassé et A. van der Baaren (éd.). « Aspects of climate change in the Northwest Atlantic off Canada », *Rapports techniques canadiens des sciences halieutiques et aquatiques*, nº 3045, 2013a, x +190 p.

Loder, J.W., Z. Wang, A. van der Baaren et R. Pettipas. « Trends and variability of sea surface temperature in the North Atlantic from the HadISST, ERSST and COBE datasets », *Rapports techniques canadiens sur l'hydrographie et les sciences océaniques*, nº 292, 2013b, viii + 36 p.

Long, Z., W. Perrie, J. Gyakum, R. Laprise et D. Caya. « Scenario changes in the climatology of winter midlatitude cyclone activity over eastern North America and the Northwest Atlantic », *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, D12111, 2009.

MacKay, M. et F. Seglenieks. « On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change », *Climatic Change*, vol. 117, 2013, pp. 55-67.

Manson, G.K. et S.M. Solomon. « Past and future forcing of Beaufort Sea coastal change », *Atmosphere-Ocean*, vol. 45, 2007, pp. 107-122.

Markus, T., J.C. Stroeve et J. Miller. « Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 114, C12024, 2009, pp. 1-14.

Marshall, S., E. White, M. Demuth, T. Bolch, R. Wheate, B. Menounos, M. Beedle et J. Shea. « Glacier water resources on the eastern slopes of the Canadian Rocky Mountains », *Revue canadienne des ressources hydriques*, vol. 36, nº 2, 2011, pp. 109-134.

Marzeion, B., A.H. Jarosch et M. Hofer. « Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers », The Cryosphere, vol. 6, 2012, pp. 1295-1322.

Maslanik, J., J. Stroeve, C. Fowler et W. Emery. « Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011 », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L13502, 2011.

Massonnet, F., T. Fichefet, H. Goose, C.M. Bitz, G. Philippon-Berthier, M.M. Holland et P.-Y. Barriat. « Constraining projections of summer Arctic sea ice », *The Cryosphere*, vol. 6, 2012, pp. 1383-1394.

Mazzotti, S., C. Jones et R.E. Thomson. « Relative and absolute sea level rise in western Canada and northwestern United States from a combined tide gauge-GPS analysis », *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, C11019, 2008.

Mazzotti, S., A. Lambert, J. Henton, T.S. James et N. Courtier. « Absolute gravity calibration of GPS velocities and glacial isostatic adjustment in mid-continent North America », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L24311, 2011.

Mazzotti, S., A. Lambert, M. Van der Kooij et A. Mainville. « Impact of anthropogenic subsidence on relative sea-level rise in the Fraser River delta », *Geology*, vol. 37, 2009, pp. 771-774.

Meehl, G.A., C. Covey, K.E. Taylor, T. Delworth, R. J. Stouffer, M. Latif, B. McAvaney et J.F.B. Mitchell. « The WCRP CMIP3 multi-model dataset: a new era in climate change research », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 88, nº 9, 2007a, pp. 1383-1394.

Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, G.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver et Z.-C. Zhao. « Global climate projections », dans *Climate Change 2007: the Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007b. p. 747-845

Meier, W.N., S. Gerland, M.A. Granskog et J.R. Key. « Sea ice », dans *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere*, Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique, Oslo, Norvège, 2011, xii + 538 p.

Mekis, É. et L.A. Vincent. « An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, nº 2, 2011a, pp. 163-177.

Mekis, É. et L.A. Vincent. « Trends in indices related to agroclimatic conditions based on homogenized temperature and adjusted precipitation in Canada », 19th Conference on Applied Climatology, 18-20 juillet 2011, Asheville, Caroline du Nord, États-Unis, 2011b, <http://ams.confex.com/ams/19Applied/webprogram/Paper190186.html>.

Melling, H. « Sea ice of the northern Canadian Archipelago », *Journal Of Geophysical Research*, vol. 107, nº C11, 2002, p. 3181.

Meyssignac, B., M. Becker, W. Llovel et A. Cazenave. « An assessment of two-dimensional past sea level reconstructions over 1950-2009 based on tide-gauge data and different input sea level grids », *Surveys in Geophysics*, vol. 33, 2012, pp. 945-972.

Min, S-K., X. Zhang, F. Zwiers et T. Agnew. « Human influence on Arctic sea ice detectable from early 1990s onwards », *Geophysical Research Letters*, vol. 35, L21701, 2008.

Min, S-K., X. Zhang, F.W. Zwiers et G. Hegerl. « Human contribution to more-intense precipitation extremes », *Nature*, vol. 470, 2011, pp. 378-381.

Mitrovica, J.X., M.E. Tamisiea, J.L. Davis et G.A. Milne. « Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change », *Nature*, vol. 409, 2001, pp. 1026-1029.

Mitrovica, J.X., N. Gomez, E. Morrow, C. Hay, K. Latychev et M.E. Tamisiea. « On the robustness of predictions of sea level fingerprints », *Geophysical Journal International*, vol. 187, 2011, pp. 729-742.

Mizuta, R. « Intensification of extratropical cyclones associated with the polar jet change in the CMIP5 global warming projections », *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L19707, 2012.

Mladjic, B., L. Sushama, M.N. Khaliq, R. Laprise, D. Caya et R. Roy. « Canadian RCM projected changes to extreme precipitation characteristics over Canada », *Journal of Climate*, vol. 24, 2011, pp. 2565-2584.

Monk, W.A. et D.J. Baird. « Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes : biodiversité dans les rivières et lacs du Canada », dans *État et tendances des écosystèmes en 2010*, Rapport technique thématique nº 20, Conseils canadiens des ministres des ressources, Ottawa (Ontario), vi + 79 p., 2011, <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=137E1147-1>.

Monk, W.A., D.L. Peters, R.A. Curry et D.J. Baird. « Quantifying trends in indicator hydroecological variables for regime-based groups of Canadian rivers », *Hydrological Processes*, vol. 25, 2011, pp. 3086-3100.

Monk, W.A., D.L. Peters et D.J. Baird. « Assessment of ecologically relevant hydrological variables influencing a cold-region river and its delta: the Athabasca River and the Peace-Athabasca Delta, northwestern Canada », *Hydrological Processes*, vol. 26, 2012, pp. 1827-1839.

Moss, R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F.B. Mitchell, N. Nakićenović, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M. Thomson, J.P. Weyant et T.J. Wilbanks. « The next generation of scenarios for climate change research and assessment », *Nature*, vol. 463, 2010, pp. 747-756.

Mucci A., M. Starr, D. Gilbert et B. Sundby. « Acidification of lower St. Lawrence Estuary bottom waters », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, nº 3, 2011, pp. 206-218.

Nakićenović, N., O. Davidson, G. Davis, A. Grübler, T. Kram, E. Lebre La Rovere, B. Metz, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, A. Sankovski, P. Shukla, R. Swart, R. Watson et Z. Dadi. *Special Report on Emissions Scenarios*, Rapport spécial du Groupe de travail III du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, 2000, 599 p.

National Research Council. *Climate Stabilization Targets: Emissions, Concentrations, and Impacts over Decades to Millennia*, National Academies Press, Washington (DC), 2011, 286 p.

Nerem, R.S., D.P. Chambers, C. Choe et G.T. Mitchum. « Estimating mean sea level change from the TOPEX and JasonaAltimeter missions », *Marine Geodesy*, vol. 33, 2010, pp. 435-446.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). *Arctic Report Card*, J. Richter-Menge, M.O. Jeffries et J.E. Overland (éd.), National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012, <www.arctic.noaa.gov/reportcard>.

OMM (Organisation météorologique mondiale). *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2010*, Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, nº 1074, ISBN 978-92-63-21074-6, 2011, <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/documents/1074_fr.pdf>.

OMM (Organisation météorologique mondiale). *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2012*, Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, nº 1108, ISBN 978-92-63-21108-8, 2013, <http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1108_fr.pdf>.

Pêches et Océans Canada – Service hydrographique du Canada. *Niveaux de l'eau, Grands Lacs et port de Montréal, Bulletin de niveaux d'eau mensuels*, Service hydrographique du Canada, 2007, <http://www.waterlevels.gc.ca/C&A/bulletin_f.html>.

Pêches et Océans Canada – Service hydrographique du Canada. *Région du Centre et de l'Arctique, Données historiques des niveaux de l'eau*, Service hydrographique du Canada, 2013a, <http://www.waterlevels.gc.ca/C&A/network_means.html>.

Pêches et Océans Canada – Service hydrographique du Canada. *Niveaux de l'eau, Grands Lacs et port de Montréal, Bulletin de niveaux d'eau mensuels*, Service hydrographique du Canada, 2013b, <http://www.waterlevels.gc.ca/C&A/bulletin_f.html>.

Peltier, W.R. « 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*, vol. 32, 2004, pp. 111-149.

Perovich, D., W. Meir, J. Maslanik et J. Richter-Menge. « Sea ice », dans *Arctic Report Card 2011*, J. Richter-Menge, M.O. Jeffries et J.E. Overland (éd.), 2011.

Perovich, D., W. Meier, M. Tschudi, S. Gerland et J. Richter-Menge. « Sea ice », dans *Arctic Report Card 2012*, M.O. Jeffries, J.A. Richter-Menge et J.E. Overland (éd.), 2012, <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>.

Perrie, W., Y. Yao et W. Zhang. « On the impacts of climate change and the upper ocean on midlatitude northwest Atlantic landfalling cyclones », *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, D23110, 2010.

Peters, G.P., R.M. Andrew, T. Boden, J.G. Canadell, P. Ciais, C. Le Quéré, G. Marland, M.R. Raupach et C. Wilson. « The challenge to keep global warming below 2 °C », *Nature Climate Change*, vol. 3, 2012, pp. 4-6.

Peterson, T.C., X. Zhang, M. Brunet-India et J.L. Vazquez-Aguirre. « Changes in North American extremes derived from daily weather data », *Journal Of Geophysical Research*, vol. 113, D07113, 2008, 9 p.

Peterson, T.C., D.M. Anderson, S.J. Cohen, M. Cortez-Vázquez, R.J. Murnane, C. Parmesan, D. Phillips, R.S. Pulwarthy et J.M.R. Stone. « Why weather and climate extremes matter », dans *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands*, T.R. Karl, G.A. Meehl, C.D. Miller, S.J. Hassol, A.M. Waple et W.L. Murray (éd.), Synthesis and Assessment Product 3.3, rapport rédigé par le U.S. Climate Change Science Program et le Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC, 2008.

Petrie, B. et P. Yeats. « Annual and interannual variability of nutrients and their estimated fluxes in the Scotian Shelf – Gulf of Maine region », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 57, 2000, pp. 2536-2546.

Petrie, B. « Does the North Atlantic Oscillation affect hydrographic properties on the Canadian Atlantic continental shelf? » *Atmosphere-Ocean*, vol. 45, 2007, pp. 141-151.

Pfeffer, W.T., J.T. Harper et S. O'Neel. « Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise », *Science*, vol. 321, 2008, pp. 1340-1343.

Pope, S., L. Copland et D. Mueller. « Loss of multiyear landfast sea ice from Yelverton Bay, Ellesmere Island, Nunavut, Canada », *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 44, nº 2, 2012.

Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique. *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA): climate change and the cryosphere*, Oslo, Norvège, 2011, xii + 538 p.

Prowse, T.D., B.R. Bonsal, C.R. Duguay et M.P. Lacroix. « River-ice break-up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions », *Annals of Glaciology*, vol. 46, 2007, pp. 443-451.

Prowse, T., K. Alfredsen, S. Beltaos, B. R. Bonsal, W.B. Bowden, C.R. Duguay, A. Korhola, J. McNamara, W.F. Vincent, V. Vuglinsky, K.M. Walker Anthony et G.A. Weyhenmeyer. « Effects of changes in Arctic Lake and River Ice », *Ambio*, vol. 40, Supplément nº 1, 2011b, pp. 63-74.

Quilbé, R., A.N. Rousseau, J.-S. Moquet, N.B. Trinh, Y. Dibike, P. Gachon et D. Chaumont. « Assessing the effect of climate change on river flow using general circulation models and hydrological modelling – application to the Chaudière River, Québec, Canada », *Revue canadienne des ressources hydriques*, vol. 33, 2008, pp. 73-94.

Radić, V. et R. Hock. « Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise », *Nature Geoscience*, vol. 4, 2011, pp. 91-94.

Räisänen, J. « Warmer climate: less or more snow? », *Climate Dynamics*, vol. 30, 2008, pp. 307-319.

Richter-Menge, J. et M. Jefferies (éd.) « The Arctic », dans State of the Climate in 2010, , J.D. Blunden, S. Arndt, M.O. Baringer *et al.* (éd.), *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 92, nº 6, 2011, pp. S1-S266.

Robert, M., H. Freeland, B. Crawford et N. Bolingbroke. « Ocean conditions in Gulf of Alaska », pp. 15-24, dans *State of the physical, biological and selected fishery resources of Pacific Canadian marine ecosystems in 2011*, J.R. Irvine et W.R. Crawford (éd.), Pêches et Océans Canada, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2012/072, 2012, vi + 141 p.

Roberts, J., A. Pryse-Phillips et K. Snelgrove. « Modelling the potential impacts of climate change on a small watershed in Labrador, Canada », *Revue canadienne des ressources hydriques*, vol 37, nº 3, 2012, pp. 231-251.

Romanovsky, V.E., S.L. Smith et H.H. Christiansen. « Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during the International Polar Year 2007-2009: a synthesis », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 21, 2010, pp. 106-116.

Rummukainen, M. « Changes in climate and weather extremes in the 21st century », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 3, 2012, pp. 115-129.

Schnorbus, M.A., K.E. Bennett, A.T. Werner et A.J. Berland. *Hydrologic impacts of climate change in the Peace, Campbell and Columbia Watersheds, British Columbia, Canada*, Hydrologic Modelling Project Final Report (Part II), University of Victoria (éd.), Pacific Climate Impacts Consortium, Victoria (Colombie-Britannique), 2011.

Schnorbus, M., A. Werner et K. Bennett. « Impacts of climate change in three hydrologic regimes in British Columbia, Canada », *Hydrological Processes*, 2012.

Sellinger, C.E., C.A. Stow, E.C. Lamon et S.S. Qian. « Recent water level declines in the Lake Michigan-Huron system », *Environmental Science and Technology*, vol. 42, 2008, pp. 367-373.

Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera et X. Zhang. « Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment », dans *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*, rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor et P.M. Midgley (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2012, pp. 109-230.

Serreze, M.C. et R.G. Barry. « Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis », *Global and Planetary Change*, vol. 77, 2011, pp. 85-96.

Service mondial de surveillance des glaciers. *Glacier Mass Balance Bulletin No. 11 (2008-2009)*, M. Zemp, S.U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, M. Hoelzle, F. Paul et W. Haeberli (éd.), 2011.

Sharp, M., D.O. Burgess, J.G. Cogley, M. Ecclestone, C. Labine et G. Wolken. « Extreme melt on Canada's Arctic ice caps in the 21st century », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L11501, 2011a.

Sharp, M., M. Ananicheva, A. Arendt, J.-O. Hagen, R. Hock, E. Joseberger, R.D. Moore, W.T. Pfeffer et G.J. Wolken. « Mountain glaciers and ice caps », dans *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere*, Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique, Oslo, Norvège, 2011b, xii + 538 p.

Sheffield, J. et E.F. Wood. « Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario IPCC AR4 simulations », *Climate Dynamics*, vol. 31, 2008, pp. 79-105.

Shepherd, A., K.M. Gill et S.B. Rood. « Climate change and future flows of Rocky Mountain rivers: converging forecasts from empirical trend projection and down-scaled global circulation modelling », *Hydrological Processes*, vol. 24, 2010, pp. 3864-3877.

Shrestha, R.R., M.A. Schnorbus, A.T. Werner et A.J. Berland. « Modelling spatial and temporal variability of hydrologic impacts of climate change in the Fraser River basin, British Columbia, Canada », *Hydrological Processes*, vol. 26, nº 12, 2012a, pp. 1840-1860.

Shrestha, R.R., Y.B. Dibike et T.D. Prowse. « Modelling of climate-induced hydrologic changes in the Lake Winnipeg watershed », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 38, 2012b, pp. 83-94.

Slangen, A.B.A., C.A. Katsman, R.S.W. van de Wal, L.L.A. Vermeersen et R.E.M. Riva. « Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios », *Climate Dynamics*, vol. 38, 2012, pp. 1191-1209.

Smith, S.L. *Tendances relatives aux conditions du pergélisol et à l'écologie dans le nord du Canada*, Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique nº 9, Conseils canadiens des ministres des ressources, 2011.

Smith, S.L., V.E. Romanovsky, A.G. Lewkowicz, C.R. Burn, M. Allard, G.D. Clow, K. Yoshikawa et J. Throop. « Thermal state of permafrost in North America: a contribution to the International Polar Year », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 21, 2010, pp. 117-135.

Smith, S.L., J. Throop et A.G. Lewkowicz. « Recent changes in climate and permafrost temperatures at forested and polar desert sites in northern Canada », *Revue canadienne des sciences de la Terre*, vol. 49, 2012, pp. 914-924.

Sou, T. et G. Flato. « Sea ice in the Canadian Arctic Archipelago: modeling the past (1950-2004) and the future (2041-60) », *Journal of Climate*, vol. 22, 2009, pp. 2181-2198.

Squire, V.A. « Of ocean waves and sea-ice revisited », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 49, 2007, pp. 110-133.

St. Jacques, J.M., S.L. Lapp, Y. Zhao, E.M. Barrow et D.J. Sauchyn. « Twenty-first century central Rocky Mountain river discharge scenarios under greenhouse forcing », *Quaternary International*, 2012.

Stahl, K., R.D. Moore, J.M. Shea, D. Hutchinson et A.J. Cannon. « Coupled modelling of glacier and streamflow response to future climate scenarios », *Water Resources Research*, vol. 44, nº 2, 2008.

Stantec. *Assiniboine River basin hydrologic model – climate change assessment*, rapport rédigé pour Conservation Manitoba, Climate Change Branch, 2012.

Statistique Canada. *EnviroStats Automne 2010, Tendances du bilan massique de six glaciers canadiens*, Statistique Canada, no 16-002-X au catalogue, vol. 4, nº 3, 2010.

Statistique Canada. *EnviroStats Printemps 2012, Tendances relatives à la couverture de neige au Canada*, Statistique Canada, no 16-002-X au catalogue, vol. 6, nº 1, 2012.

Steiner, N., K.A. Azetsu-Scott, P. Galbraith, J. Hamilton, K. Hedges, X. Hu, M.Y. Janjua, N. Lambert, P. Larouche, D. Lavoie, J. Loder, H. Melling, A. Merzouk, P. Myers, W. Perrie, I. Peterson, R. Pettipas, M. Scarratt, T. Sou, M. Starr, R.F. Tallmann et A. van der Baaren. « Climate change assessment in the Arctic basin Part 1: Trends and projections – a contribution to the Aquatic Climate Change Adaptation Services Program », *Rapports techniques canadiens des sciences halieutiques et aquatiques*, 3042 : xv + 163 p., <http://www.dfo-mpo.gc.ca/library/350169.pdf>.

Stephenson, S.R., L.C. Smith et J.A. Agnew. « Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic », Nature Climate Change, vol. 1, 2011, pp. 156-160.

Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan et S.-P. Xie, « Technical summary », dans *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 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 (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013. p. 33-115.

Stott, P.A., N.P. Gillet, G.C. Hegerl, D.J. Karoly, D.A. Stone, X. Zhang et F. Zwiers. « Detection and attribution of climate change: a regional perspective », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, (mars/avril 2010), vol. 1, 2010, pp. 192-211.

Stow, C.A., E.C. Lamon, T.K. Kratz et C.E. Sellinger. « Lake level coherence supports common driver », *EOS*, vol. 89, 2008, pp. 389-390.

Stroeve, J., M.C. Serreze, M.M. Holland, J.E. Kay, J. Malanik et A.P. Barrett. « The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis », *Climatic Change*, vol. 110, 2012a, pp. 1005-1027.

Stroeve, J.C., V. Kattsov, A. Barrett, M. Serreze, T. Pavlova, M. Holland et W.N. Meier. « Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations », *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L16502, 2012b.

Sushama, L., N. Khaliq et R. Laprise. « Dry spell characteristics over Canada in a changing climate as simulated by the Canadian RCM », *Global and Planetary Change*, vol. 74, 2010, pp. 1-14.

Taylor, K.E., R.J. Stouffer et G.A. Meehl. « An overview of CMIP5 and experiment design », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, 2012, pp. 485-498.

Thompson, K.R., J. Huang, M. Véronneau, D.G. Wright et Y. Lu. « Mean surface topography of the northwest Atlantic: comparison of estimates based on satellite, terrestrial gravity, and oceanographic observations», *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, C07015, 2011.

Thomson, R.E., B.D. Bornhold et S. Mazzotti. « An examination of the factors affecting relative and absolute sea level in coastal British Columbia », *Rapports techniques canadiens sur l'hydrographie et les sciences océaniques*, 260: 49 p., 2008.

Timmermans, M.L. « Sea ice and ocean summary », dans Arctic Report Card 2012, M.O. Jeffries, J.A. Richter-Menge et J.E. Overland (éd.), 2012, pp. 43-55, <www.arctic.noaa.gov/reportcard>.

Tivy, A., S.E.L. Howell, B. Alt, S. McCourt, R. Chagnon, G. Crocker, T. Carrieres et J.J. Yackel. « 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*, vol. 116, C03007, 2011.

Trenberth, K.E. « Changes in precipitation with climate change », *Climate Research*, vol. 47, 2011, pp. 123-138.

Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden et P. Zhai. « Observations: surface and atmospheric climate change », dans *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007, pp. 235-336.

Ulbrich, U., G.C. Leckebuscg et J.G. Pinto. « Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review », *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 96, 2009, pp. 117-131.

van der Kamp, G., D. Keir et M.S. Evans. « Long term water level changes in closed-basin lakes of the Canadian Prairies », *Revue canadienne des ressources hydriques*, vol. 33, nº 1, 2008, pp. 23-38.

Van Vuuren, D.P.J., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakićenović, S.J. Smith et S.K. Rose. « The representative concentration pathways: an overview », *Climatic Change*, vol. 109, 2011, pp. 5-31.

VeilleAuGel. *Les changements dans la glace des lacs annoncent des changements climatiques*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), nº de catalogue EN84-65/2008F-PDF, ISBN 978-1-100-90376-7, 2008, 8 p.

Vermeer, M. et S. Rahmstorf. « Global sea level linked to global temperature », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, nº 51, 2009, pp. 21527-21532.

Vincent, L.A. et É. Mekis. « Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century », *Atmosphere-Ocean*, vol. 44, nº 2, 2006, pp. 177-193.

Vincent, L.A., X.L. Wang, E.J. Milewska, H. Wan, F. Yang et V. Swail. « A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis », *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, D18110, 2012.

Wadhams, P., V.A. Squire, D.J. Goodman, A.M. Cowan et S.C. Moore. « The attenuation rates of ocean waves in the marginal ice zone », *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, nº C6, 1988, pp. 6799-6818.

Wan, H., X.L. Wang et V.R. Swail. « Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds », *Journal of Climate*, vol. 23, 2010, pp. 1209-1225.

Wang, J., X. Bai, H. Hu, A. Clites, M. Colton et B. Lofgren. « Temporal and spatial variability of Great lakes ice cover, 1973-2010 », *Journal of Climate*, vol. 25, 2012, pp. 1318-1329.

Wang, M. et J.E. Overland. « A sea ice free summer Arctic within 30 years: an update from CMIP5 models », *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L18501, 2012.

Wang, X.L, Y. Feng et L.A. Vincent. « Observed changes in one-in-20 year extremes of Canadian surface air temperatures », accepté pour publication dans *Atmosphere-Ocean*, 2013.

Warren, F.J. et P. Egginton. « Information de base : concepts, aperçus, et approches », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 27-56.

Whitney, F.A., H.J. Freeland et M. Robert. « Persistently declining oxygen levels in the interior waters of the eastern subarctic Pacific », *Progress In Oceanography: Time Series of the Northeast Pacific*, vol. 75, nº 2, 2007, pp. 179-199.

Wilcox, D.A., T.A. Thompson, R.K. Booth et J.R. Nicholas. *Lake-Level Variability and Water Availability in the Great Lakes*, Circular 1311, US Geological Survey, National Water Availability and Use Program, Virginie, États-Unis, 2007.

Wiles, G.C., A.C. Krawiec et R.D. D'Arrigo. « A 265-year reconstruction of Lake Erie water levels based on North Pacific tree rings », *Geophysical Research Letters*, vol. 36, L05705, 2009.

Williamson, C.E., J.E. Saros et D.W. Schindler. « Sentinels of Change », *Science*, vol. 323, 2009, pp. 887-888.

Wolf, E., V. Klemann, J. Wunsch et F.-P. Zheng. « A reanalysis and reinterpretation of geodetic and geological evidence of glacial-isostatic adjustment in the Churchill region, Hudson Bay », *Surveys in Geophysics*, vol. 27, 2006, pp. 19-61.

Woollings, T., J.M. Gregory, J.G. Pinto, M. Reyers et D.J. Brayshaw. « Response of the North Atlantic storm track to climate change shaped by ocean-atmosphere coupling », *Nature Geoscience*, vol. 5, 2012, pp. 313-317.

Wu, L., W. Cai, L. Zhang, H. Nakamura, A. Timmermann, T. Joyce, M.J. McPhaden, M. Alexander, B. Qui, M. Visbeck, P. Chang et B. Giese. « Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents », *Nature Climate Change*, vol. 2, 2012, pp. 161-166.

Yamamoto-Kawai, M., F.A. McLaughlin, E.C. Carmack, S. Nishino et K. Shimada. « Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: effects of ocean acidification and sea ice melt », *Science*, vol. 326, 2009, pp. 1098-1100.

Yashayaev, I. « Hydrographic changes in the Labrador sea, 1960-2005 », *Progress in Oceanography*, vol. 73, nº 3-4, 2007, pp. 242-276.

Yashayaev, I. et B. Greenan. *Environmental conditions in the Labrador Sea during 2011*, Organisation des pêches de l'Atlantique Nord-Ouest, Document de recherche scientifique 12/018, N6042, 2012, 17 p., <http://www.nafo.int/science/SCDocs/2012/scrdocs.html>.

Yasunaka, S. et K. Hanawa. « Intercomparison of historical sea surface temperature datasets », *International Journal of Climatology*, vol. 31, 2011, pp. 1056-1073.

Yin, J. « Century to multi-century sea level rise projections from CMIP5 models », *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L17709, 2012.

Zhang, X., L.A. Vincent, W.D. Hogg et A. Niitsoo. « Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th Century », *Atmosphere-Ocean*, vol. 38, 2000, pp. 395-429.

Zhang, X., F.W. Zwiers et P.A. Stott. « Multimodel multisignal climate change detection at regional scale », *Journal of Climate*, vol. 19, 2006, pp. 4294-4307.

Zhang, X., L. Alexander, G.C. Hegerl, P. Jones, A.K. Tank, T.C. Peterson, B. Trewin et F.W. Zwiers. « Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 2, nº 6, 2011a, pp. 851-870.

Zhang, X., R. Brown, L. Vincent, W. Skinner, Y. Feng et E. Mekis. *Tendances climatiques au Canada de 1950 à 2007*, Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique nº 5, Conseils canadiens des ministres des ressources, Ottawa (Ontario), 2011b, iv + 22 p., <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=E0DDE11F-1>.

Zorita, E., T.F. Stocker et H. von Storch. « How unusual is the recent series of warm years? », *Geophysical Research Letters*, vol. 35, L24706, 2008.

CHAPITRE 3 : **RESSOURCES NATURELLES**

Principaux auteurs :

Donald S. Lemmen *(Ressources naturelles Canada)*, **Mark Johnston** *(Saskatchewan Research Council)*, **Catherine Ste-Marie** *(Ressources naturelles Canada)* et **Tristan Pearce** *(Université de Guelph)*

Collaborateurs :

Marie-Amélie Boucher *(Université du Québec à Chicoutimi)*, **Frank Duerden** *(Université de Victoria)*, **Jimena Eyzaguirre** *(ESSA Technologies)*, **James Ford** *(Université McGill)*, **Robert Leconte** *(Université de Sherbrooke)*, **Elizabeth A. Nelson** *(Ressources naturelles Canada)*, **Jeremy Pittman** *(chercheur indépendant)*, **Élizabeth Walsh** *(Ressources naturelles Canada)*

Citation recommandée :

Lemmen, D.S., M. Johnston, C. Ste-Marie et T. Pearce. « Ressources naturelles », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 65-98.

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions 67

1. Introduction 68

2. Évaluations précédentes 68

3. Foresterie 70
- 3.1 Répercussions observées et prévues 71
- 3.2 Adaptation 74

4. Exploitation minière 76
- 4.1 Effets des changements climatiques et options d'adaptation 78
- 4.2 État de l'adaptation au niveau de l'industrie minière canadienne 81

5. Énergie 81
- 5.1 Demande d'énergie 82
- 5.2 Sources d'énergie 84
- 5.3 Transport de l'énergie 92

6. Synthèse 92

Références 94

PRINCIPALES CONCLUSIONS

Les ressources naturelles sont un élément indispensable au bien-être des familles canadiennes et à l'économie nationale et régionale et continueront de lui être nécessaires à l'avenir. Même si les effets biophysiques des changements climatiques qui présentent un intérêt pour la plupart des secteurs des ressources naturelles sont bien compris, l'intégration de ces derniers à la planification des programmes d'activités fait généralement défaut. Voici la liste des principales conclusions qui découlent de la documentation récente publiée dans le domaine de la foresterie, de l'exploitation minière et de l'énergie – les secteurs étudiés dans le présent chapitre :

- Les changements climatiques aggraveront les risques climatiques actuels liés à la planification et à la gestion des industries du secteur des ressources naturelles, y compris les activités associées à l'exploration, à la mise en valeur, à l'exploitation, à la distribution, à la fermeture, à la restauration et à la remise en état. Ces risques sont liés aux répercussions et aux catastrophes naturelles associées aux conditions météorologiques extrêmes (p. ex., chaleur, froid, précipitations) et aux événements à évolution lente comme la dégradation du pergélisol, l'élévation du niveau de la mer et la migration des espèces végétales. Les changements climatiques offriront également de nouvelles occasions aux secteurs des ressources naturelles, particulièrement en ce qui a trait au développement économique du Nord.

- Afin de mieux comprendre comment fonctionne l'adaptation au niveau des secteurs des ressources naturelles, il est essentiel de tenir compte des multiples facteurs de stress. Les changements climatiques en tant que tels sont rarement élevés au rang des priorités, puisque les entreprises mettent l'accent sur d'autres facteurs de stress immédiats tels les moteurs économiques. Il existe cependant des occasions d'intégrer les considérations de l'effet des changements climatiques aux processus de planification actuels.

- L'évaluation environnementale, la divulgation des risques et les rapports concernant l'aménagement forestier durable comptent parmi les exemples de processus qui peuvent contribuer à promouvoir les mesures d'adaptation à l'avenir. Ces processus permettent aux gouvernements, aux investisseurs et au public d'évaluer le niveau de compréhension des industries en ce qui a trait aux risques associés aux changements climatiques et d'exercer une influence sur les mesures prises pour les atténuer.

- Bien que la sensibilisation au niveau des répercussions des changements climatiques et la mise en œuvre de mesures d'adaptation ne fassent aucun doute dans les secteurs où l'on observe un lien direct entre le climat et l'approvisionnement en ressources, notamment dans le domaine de la foresterie et de l'hydroélectricité, l'application de méthodes de gestion adaptative visant à atténuer ces répercussions est également observée à l'échelle des secteurs des ressources naturelles. Les méthodes de gestion adaptative comportent des études continues et des activités de surveillance et d'évaluation, entreprises dans le but d'appuyer les éventuelles procédures, politiques et pratiques de gestion, dont la souplesse permettra de faire face aux incertitudes inhérentes aux changements climatiques.

1. INTRODUCTION

Le Canada possède d'importantes ressources naturelles qui font partie intégrante de l'histoire et de l'identité du pays et qui constituent un élément important de l'économie nationale, provinciale et territoriale. Le présent chapitre traite des secteurs des ressources naturelles – foresterie, exploitation minière et énergie – qui, mis ensemble, comptent pour 13,3 % du produit intérieur brut canadien et procurent environ 950 000 emplois (tableau 1; Ressources naturelles Canada, 2013a).

	Foresterie	Exploitation minière	Énergie	Total
PIB (2012)	1,1 %	3,5 %	9,1 %	13,3 %
Emploi direct	224 410	401 315	335 580	948 735
Exportations de produits nationaux (en milliards de $)	25	90	119	224

TABLEAU 1 : Contribution des secteurs des ressources naturelles à l'économie du Canada en 2011 *(extrait modifié tiré de Ressources naturelles Canada, 2013a).*

L'importance des ressources naturelles du point de vue économique est amplifiée à l'échelle locale. Bien que les collectivités dépendantes des ressources soient surtout petites et situées en région éloignée, la liste comprend également des grandes villes et des villes de taille moyenne, comme Calgary, en Alberta, Hamilton et Sudbury, en Ontario, de même que Prince George et Kamloops, en Colombie-Britannique. Certaines collectivités dépendent uniquement de ces ressources et tirent 80 % ou plus de leurs revenus d'emploi des activités d'exploitation des ressources naturelles (Ressources naturelles Canada, 2009).

La sensibilité au climat de l'exploitation des ressources naturelles dépend du secteur considéré. Les répercussions des changements climatiques sur le rendement économique et la productivité se font davantage sentir dans l'industrie forestière et hydroélectrique. Tous les secteurs des ressources naturelles sont confrontés aux risques climatiques, dont plusieurs sont liés aux phénomènes météorologiques extrêmes et aux catastrophes naturelles connexes qui surviennent pendant les activités d'exploration, d'exploitation, de transformation, de transport, de remise en état et de déclassement (p. ex., Lemmen *et al.*, 2008a). Les investissements des secteurs des ressources naturelles au cours des dix prochaines années fourniront l'occasion d'intégrer les considérations relatives au changement climatique en vue de renforcer la résilience face aux changements climatiques des activités futures. La mise en chantier de plus de 600 projets d'envergure en matière de ressources est prévue au Canada au cours des dix prochaines années, ce qui représente environ 650 milliards de dollars en investissements (Ressources naturelles Canada, 2012a).

Le présent chapitre donne une vue d'ensemble des progrès accomplis en ce qui a trait au niveau de compréhension actuel des effets des changements climatiques sur les secteurs de la foresterie, de l'exploitation minière et de l'énergie au Canada, et de la progression des secteurs quant à la façon de s'adapter à ces effets. Ce survol s'inspire majoritairement de ce qui a été publié depuis la parution du rapport intitulé *Vivre avec les changements climatiques au Canada* (Lemmen *et al.*, 2008a). Après un bref examen des principales conclusions tirées des évaluations précédentes, le présent chapitre est consacré à trois sections distinctes portant respectivement sur la foresterie, l'exploitation minière et l'énergie. Une étude récente renforce la confiance à l'égard des constatations précédentes et donne de nouvelles perspectives. On accorde une attention toute particulière aux avancées dans le domaine de l'adaptation, que révèlent les nombreux niveaux d'engagement perçus à l'échelle des secteurs (comme le fait de passer de l'étape de la sensibilisation à l'étape de la mise en œuvre des politiques et des changements opérationnels). Le chapitre se termine par une synthèse des conclusions touchant les secteurs de la foresterie, de l'exploitation minière et de l'énergie dans le but de présenter un point de vue global des ressources naturelles en tant que secteur économique, de même que les conséquences des répercussions des changements climatiques et de l'adaptation sur la concurrence économique à court et à long terme. Les autres aspects des ressources naturelles sont abordés aux chapitres 4 – *Production alimentaire,* 5 – *Industrie* et 6 – *Biodiversité et aires protégées,* du présent rapport.

2. ÉVALUATIONS PRÉCÉDENTES

Les ressources naturelles occupent une place prépondérante dans les chapitres traitant de chaque région dans le rapport *Vivre avec les changements climatiques au Canada* (Lemmen *et al.*, 2008a) et dans le chapitre 9 (*Le Canada dans le contexte international*) du même rapport (tableau 2). La vulnérabilité des collectivités dépendantes des ressources est une conclusion d'envergure nationale qui ressort de ce rapport. Elle constitue un indice de la forte sensibilité au climat de nombreuses industries axées sur les ressources naturelles, de la diversification limitée de l'économie et, dans bien des cas, d'un accès restreint aux services (Lemmen *et al.*, 2008b). Cette vulnérabilité est amplifiée dans l'Arctique, où la portée des changements climatiques a non seulement été la plus considérable, mais devrait le demeurer, et en raison de l'éloignement des collectivités et de nombreuses activités liées à l'exploitation des ressources naturelles.

Le quatrième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) aborde les questions relatives aux secteurs de la foresterie et de l'énergie dans des chapitres thématiques (Easterling *et al.*, 2007; Fischlin *et al.*, 2007; Wilbanks *et al.*, 2007), dans le chapitre sur l'Amérique du Nord (Field *et al.*, 2007) et dans le chapitre qui étudie les liens entre l'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation (Klein *et al.*, 2007). Bien qu'il n'existe aucune analyse intégrée de la vulnérabilité des secteurs des ressources naturelles, le rapport met en évidence l'importance de comprendre l'effet des nombreux facteurs de stress sur les industries de ce secteur (Easterling *et al.*, 2007).

	Nord	Canada atlantique	Québec	Ontario	Prairies	Colombie-Britannique	International
Foresterie	X	X	X	X	X	X	X
Exploitation minière	X		X	X	X		X
Demande d'énergie		X	X	X	X	X	X
Approvisionnement en énergie	X	X	X	X	X	X	X

TABLEAU 2 : Contenu axé sur les ressources naturelles dans certains chapitres du rapport *Vivre avec les changements climatiques au Canada* (Lemmen *et al.*, 2008a).

FORESTERIE

En raison de leur emplacement septentrional, les forêts canadiennes sont exposées à une plus forte hausse des températures que la moyenne globale (GIEC, 2007), dont les effets considérables varient d'une région à l'autre. Les principales conclusions des évaluations antérieures (Lemmen *et al.*, 2008a; Lemprière *et al.*, 2008, Johnston *et al.*, 2009; Williamson *et al.*, 2009) révèlent ce qui suit :

- L'intensification des régimes de perturbation (p. ex., incendies de forêt, infestation d'insectes et éclosion de maladies) est déjà manifeste et deviendra plus marquée à l'avenir.
- La composition des forêts sera altérée en raison des changements apportés aux régimes climatique et de perturbation.
- Les chemins d'accès forestiers seront touchés par les changements apportés aux régimes de perturbation, l'évolution des coûts d'infrastructure et le raccourcissement de la saison de récolte hivernale, en raison des périodes de gel réduites.
- Les effets nets des changements climatiques sur la productivité forestière seront propres à la collectivité locale et à la région. Des températures plus élevées, des saisons de croissance plus longues et de plus fortes concentrations de dioxyde de carbone (CO_2) pourraient avoir une incidence positive sur la productivité, alors que d'autres facteurs tels le sol, l'eau et les nutriments, ne seront pas limitatifs, mais subiront les effets négatifs associés à l'intensification de la sécheresse et aux perturbations et phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents et plus graves.
- Les répercussions sociales et économiques sur les collectivités forestières (p. ex., coûts relatifs à la sûreté et à la sécurité, emplois dans le secteur forestier et tourisme) seront considérables dans certaines régions.

EXPLOITATION MINIÈRE

Lemmen *et al.* (2008a) consacrent moins de place à l'exploitation minière qu'aux autres secteurs des ressources naturelles, en raison de la pénurie de documents portant sur le sujet disponibles à ce moment. Malgré tout, le rapport énumère les défis que posent le choix des sites, la conception des mines, l'exploitation, les activités et le transport, de même que la fermeture définitive et la restauration des sites dans le contexte des changements climatiques. Les principales constatations font état de ce qui suit :

- Les phénomènes météorologiques extrêmes ont déjà eu des effets négatifs sur certaines activités minières.
- Des vulnérabilités significatives aux changements climatiques ont été observées dans les mines post-opérationnelles et ont une incidence sur l'environnement et les collectivités environnantes.
- Des réductions de la couverture de glace de mer dans l'Arctique pourraient mener à de nouveaux débouchés dans le domaine de l'exploration et de l'exploitation minière dans le Nord, liés en partie à une diminution des coûts d'expédition. Des défis sont également associés aux activités effectuées dans un milieu arctique, y compris les enjeux liés aux mesures de protection de l'environnement et à l'inclusion sociale.
- La diminution de la viabilité des routes d'hiver pourrait avoir une incidence sur l'accès à de nombreux sites miniers exploités en milieu nordique et nécessiter l'établissement d'itinéraires de transport de rechange.
- Des modifications apportées à la conception des mines et des changements opérationnels s'imposeront en vue de gérer les risques de contamination environnementale liée à la dégradation du pergélisol dans le Nord et aux effets des phénomènes météorologiques extrêmes ailleurs dans le monde.
- De nombreux projets récents de développement minier dans le nord du Canada ont tenu compte des effets des changements climatiques prévus dans leurs plans de conception.

ÉNERGIE

L'adaptation de la demande et de l'offre en matière d'énergie aux changements climatiques pose un défi aux industries du secteur énergétique au Canada. Les vulnérabilités particulières varient en fonction de l'emplacement géographique, des sources d'énergie principales et des changements climatiques prévus. Les principales conclusions du rapport de Lemmen *et al.* (2008a) illustrent ce qui suit :

- La demande saisonnière en énergie sera caractérisée par des changements, à savoir une baisse de la demande en chauffage hivernal et une hausse de la demande en climatisation estivale.
- Des écarts entre l'offre et la demande pourraient se manifester, étant donné que la demande de pointe pour la climatisation pourrait coïncider avec la diminution du potentiel hydroélectrique dans certaines régions.

- La production d'hydroélectricité pourrait être touchée par la réduction saisonnière de l'approvisionnement en eau, particulièrement dans les systèmes alimentés par les glaciers. L'intégration des changements apportés aux régimes d'écoulement et aux débits de pointe exigeront sans doute des ajustements au niveau des pratiques en gestion de réservoir.
- Le transport d'électricité est sensible à l'augmentation de la température (plus grande perte énergétique) et aux phénomènes météorologiques extrêmes (dommages à l'infrastructure entraînant des pannes dans le réseau de distribution).
- La dégradation du pergélisol et l'instabilité du terrain qui en découlera poseront un risque au niveau des infrastructures énergétiques (fondations, oléoducs et routes) dans le nord du Canada.

3. FORESTERIE

La forêt occupe une place importante au Canada et couvre plus de 50 % de la surface totale du pays (figure 1; Ressources naturelles Canada, 2011a). Les changements qui surviennent sur les terres forestières du pays sont principalement causés par des régimes de perturbation à grande échelle. Chaque année, les incendies de forêt et les infestations de ravageurs forestiers touchent 5 % du territoire forestier (Ressources naturelles Canada, 2011a). Le climat est un élément déterminant dans la répartition, la composition, la productivité et la dynamique des forêts, de même que dans les régimes de perturbation. À ce titre, on prévoit que les changements climatiques auront des répercussions importantes sur le secteur forestier au Canada.

Outre les avantages économiques directs découlant de la récolte de bois et de fibres des forêts canadiennes (Ressources naturelles Canada, 2012a), ces dernières représentent une valeur sur le plan récréatif et culturel, et contiennent également des produits forestiers non ligneux tels que des champignons et des baies. Même s'il s'agit d'un aspect difficile à quantifier, les services écosystémiques offerts par les forêts, comme l'air pur et l'eau potable, le stockage de carbone et les éléments nutritifs des sols, revêtent également une valeur sociale et économique.

Les gouvernements provinciaux et territoriaux ont le pouvoir législatif de gérer le territoire et les ressources dans 77 % des forêts



FIGURE 1 : Régions forestières du Canada *(source : Ressources naturelles Canada, 2000).*

canadiennes; chaque province et territoire met en place ses propres politiques, lois et autres questions réglementaires. Le gouvernement fédéral est responsable d'un territoire couvrant 16 % de la forêt et le reste (7 %) est détenu par quelque 450 000 propriétaires privés. On récolte annuellement moins de 0,2 % des forêts canadiennes (Ressources naturelles, 2012b). Le secteur forestier canadien a pris un engagement à l'égard de l'aménagement forestier durable et le Canada est un chef de file mondial en matière de certification forestière; 90 % des forêts gérées sont certifiées en fonction d'une ou de plusieurs normes relatives à l'aménagement forestier durable (Ressources naturelles Canada, 2011b; *voir* l' encadré 1).

La présente section donne un aperçu des principales conclusions liées aux risques que présentent les changements climatiques, aux possibilités et aux mesures d'adaptation qui revêtent de l'importance pour le secteur forestier. Les autres aspects des écosystèmes forestiers du pays sont abordés au 6 – *Biodiversité et aires protégées* du présent rapport.

ENCADRÉ 1

AMÉNAGEMENT FORESTIER DURABLE AU CANADA

L'aménagement forestier durable fait référence à un « aménagement qui maintient et améliore la santé à long terme des écosystèmes forestiers dans l'intérêt de toutes choses vivantes, tout en offrant des possibilités environnementales, économiques, sociales et culturelles aux générations d'aujourd'hui et de demain » (Ressources naturelles Canada, 2012b). Ce genre d'aménagement favorise la gestion responsable des forêts en tant que ressources (p. ex., pour le bois, les services), tout en protégeant leur santé et leur diversité.

Au Canada, le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) a élaboré un cadre national constitué de critères et d'indicateurs dans le but de décrire, de surveiller et de signaler les tendances et les progrès accomplis vers l'aménagement durable des forêts. Cela comprend des mesures ayant trait à la diversité biologique, à l'état et à la productivité des écosystèmes, aux conditions de l'eau et du sol, aux avantages économiques et sociaux, à l'engagement communautaire et aux responsabilités. À l'échelle nationale, le Canada a recours au *Cadre canadien des critères et indicateurs* pour signaler les progrès accomplis vers l'aménagement forestier durable dans le rapport annuel de *l'État des forêts au Canada* (Ressources naturelles Canada, 2012b).

L'aménagement forestier durable est également soutenu par les provinces et les territoires au moyen de politiques et de lois, et par les organismes forestiers par l'intermédiaire de la certification volontaire, par tierce partie. Le Canada est un chef de file en matière de certification volontaire; en décembre 2011, près de 151 millions d'hectares de forêt avaient été certifiés en fonction des trois programmes de certification en matière d'aménagement forestier durable en vigueur au Canada (APFC, 2012).

3.1 RÉPERCUSSIONS OBSERVÉES ET PRÉVUES

Les répercussions des changements climatiques sur les forêts et les industries du secteur forestier ont déjà été remarquées au Canada. Les effets climatiques les plus visibles sont les changements dans les régimes de perturbation telles les incendies et les infestations de ravageurs forestiers, et ceux associés aux phénomènes météorologiques extrêmes telles la sécheresse ainsi que les tempêtes de vent et de verglas (Lemprière *et al.*, 2008; Williamson *et al.*, 2009), qui peuvent avoir des répercussions socio-économiques immédiates. Cependant, des effets subtils sur la composition des essences d'arbres, les composés phénoliques et la productivité sont de plus en plus souvent rapportés (Johnston *et al.*, 2009) et auront une incidence sur les industries du secteur forestier à plus long terme.

INCENDIES

Les incendies constituent des agents naturels de la dynamique forestière; le feu a détruit plus de trois millions d'hectares de terres forestières en 2009 (Ressources naturelles Canada, 2011a). L'incidence, l'étendue et la gravité des incendies de forêt attribuables aux changements climatiques devraient augmenter dans la plupart des régions canadiennes. Des augmentations de l'ordre de 75 % à 140 % du nombre d'incendies sont prévues d'ici la fin du XXIe siècle, mais sujet à des variations régionales importantes (Wotton *et al.*, 2010), tandis que les prévisions relatives à la superficie brûlée dans l'Ouest canadien démontrent une augmentation de trois à cinq fois plus élevée d'ici la fin du XXIe siècle, par rapport à 1991-2000 (Balshi *et al.*, 2009). Les changements climatiques auront également une incidence sur le cycle de la saison des incendies, qui débutera plus tôt et qui sera caractérisé par un pic saisonnier plus tardif des conditions météorologiques propices aux incendies (Le Goff *et al.*, 2009). Des changements dans les régimes d'incendies ont déjà été remarqués; depuis les années 1980, le nombre de gros incendies a augmenté de manière significative dans le nord-ouest (Kasischke et Turetsky, 2006; Girardin, 2007) et dans le nord-est (Le Goff *et al.*, 2007; Ali *et al.*, 2012) du Canada.

ÉPIDÉMIES DE RAVAGEURS ET MALADIES

Les insectes et pathogènes forestiers sont des agents perturbateurs importants qui attaquent des millions d'hectares de forêt au Canada (Ressources naturelles Canada, 2011a). Le climat et les changements climatiques prévus ont une incidence sur la survie et la propagation des ravageurs et des pathogènes, et devraient jouer un rôle dans la modification de leur répartition géographique et leur cycle de vie. Étant donné que la température hivernale est un facteur qui limite la propagation de nombreux ravageurs et pathogènes, la portée et la gravité des maladies et des infestations sont susceptibles d'augmenter à mesure que la température hivernale s'élève (Lemprière *et al.*, 2008; Johnston *et al.*, 2009; Williamson *et al.*, 2009).

L'infestation dévastatrice par le dendroctone du pin ponderosa dans les forêts de l'Ouest canadien a été attribuée dans une grande mesure à une hausse des températures hivernales, à laquelle s'ajoute d'autres facteurs qui y contribuent (*voir* l'étude de cas 1). La livrée des forêts, la tordeuse des bourgeons de l'épinette et le typographe de l'épinette sont trois autres ravageurs qui s'attaquent aux forêts canadiennes à l'heure actuelle et qui continueront vraisemblablement de les endommager à l'avenir (Price *et al.*, en cours de révision). La capacité à prédire les répercussions

des changements climatiques sur les maladies forestières est restreinte en raison des nombreux facteurs qui doivent être pris en considération tels que l'organisme pathogène, la méthode de propagation (p. ex., le vent, les insectes) et les espèces hôtes. Cependant, les pathogènes dont la présence est généralisée à l'heure actuelle continueront d'avoir une incidence sur les forêts canadiennes dans un contexte de réchauffement climatique (Sturrock *et al.*, 2011).

SÉCHERESSE ET AUTRES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

À l'échelle mondiale, la fréquence, la durée et la gravité des périodes de sécheresse et de l'exposition au stress thermique devraient augmenter en raison des changements climatiques (Price *et al.*, *en cours de révision*). Les écosystèmes forestiers semblent déjà montrer des signes d'une hausse de la mortalité des arbres liée à la sécheresse (Allen *et al.*, 2010), aussi bien à l'échelle mondiale que dans les États

ÉTUDE DE CAS 1

L'INFESTATION DE DENDROCTONE DU PIN PONDEROSA

Parmi les effets les plus importants des changements climatiques sur les forêts canadiennes, on peut citer l'infestation de dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*) survenue dans l'ouest du pays. Le dendroctone du pin ponderosa est un insecte indigène des forêts de pins de l'ouest de l'Amérique du Nord, dont la population augmente périodiquement pour créer des infestations importantes. Au Canada, les populations de dendroctone du pin ponderosa ont depuis longtemps été contrôlées par les épisodes de températures hivernales extrêmes (température inférieure à -35 °C pendant plusieurs jours ou semaines), particulièrement au début de l'hiver (BCMFLNRO, 2012), ayant pour résultat des effets modérés sur les forêts de pin de l'Ouest. Ces épisodes froids sont devenus moins fréquents au cours des dernières années et cela a permis aux populations de dendroctones d'augmenter à un rythme sans précédent. L'abondance de pins tordus latifoliés matures faisant suite à des décennies de diminution de la superficie incendiée (liée aux pratiques de lutte contre les incendies et à une réduction de la durée des conditions météorologiques propices aux incendies) peut aussi avoir contribué à l'infestation massive, laquelle a été jugée la plus importante à survenir, en termes de superficie infestée et de gravité, de toutes celles enregistrées jusqu'ici (Kurz *et al.*, 2008; Girardin et Wotton, 2009; BCMFLNRO, 2012).

En 2012, près de 18,1 millions d'hectares de forêts peuplées en grande partie de pins tordus latifoliés matures ont été attaquées par le dendroctone du pin ponderosa et les changements climatiques constituent probablement un facteur contributif clé, en ce qui a trait à l'étendue et à la gravité de l'infestation (BCMFLNRO, 2012). Dans un premier temps, les taux de possibilité annuelle de coupe ont été augmentés dans les régions les plus fortement touchées par l'infestation du dendroctone du pin ponderosa, afin de répondre au problème posé par la récupération des pins morts et, dans un deuxième temps, ils ont été réduits dans quelques unes des zones d'approvisionnement forestier où la perte annuelle accuse un déclin rapide. Au fur et à mesure que les approvisionnements forestiers se mettront à diminuer, le taux de production des forêts de la Colombie-Britannique et du secteur manufacturier devrait suivre cette tendance à la baisse, phénomène qui risque de se traduire par des pertes d'emplois pour des milliers de travailleurs œuvrant, de façon aussi bien directe qu'indirecte, au sein du secteur forestier (p. ex., International Wood Markets Group, 2010).

Le pin tordu latifolié (*Pinus contorta*) est le principal hôte du dendroctone du pin ponderosa, mais ce dernier peut aussi s'attaquer au pin gris (*Pinus banksiana*), dont la population s'étend de l'Alberta à la Nouvelle-Écosse (Burns et Honkala, 1990). On craint que l'insecte se répande sur toute la forêt boréale canadienne si les frontières climatologiques sont repoussées davantage. Or, contrairement au pin tordu latifolié, les populations de pin gris sont dispersées sur l'ensemble du territoire, ce qui pourrait affaiblir la capacité du dendroctone du pin ponderosa de migrer vers de nouveaux peuplements forestiers et, par conséquent, réduire la possibilité d'une infestation massive qui s'étendrait jusque dans l'est du pays (Cullingham *et al.*, 2011). On juge que le pic de l'infestation est passé à l'heure actuelle, même si l'étendue de la zone infestée continue de progresser (BCMFLNRO, 2012). Depuis 2008, l'expansion s'est poursuivie vers le nord et vers l'est dans la forêt boréale (figure 2). En 2011, on a noté la présence du dendroctone du pin ponderosa à 80 km de la frontière du Yukon et signalé des arbres nouvellement attaqués dans le nord de l'Alberta, tout près de la frontière avec la Saskatchewan (Cullingham *et al.*, 2011).

Au cours des dix années qu'a duré l'épidémie, le gouvernement de la Colombie-Britannique et le gouvernement fédéral ont investi des centaines de millions de dollars en vue d'atténuer les effets de l'infestation, de créer des débouchés pour le pin récupéré et d'élaborer des stratégies économiques pour l'avenir (BCMFLNRO, 2012). Au départ, on cherchait surtout à empêcher l'infestation de se répandre et à récolter les peuplements infestés et vulnérables. Alors que l'infestation se poursuivait, les efforts en vue d'utiliser le bois tué par le dendroctone se sont intensifiés (BCMFLNRO, 2012). On cite en exemple l'utilisation, aux fins de revêtement intérieur, du bois teinté bleu par le champignon transmis par le dendroctone (Zaturecky et Chiu, 2005). Le bois récupéré est aussi utilisé en tant que source de bioénergie (BCMFLNRO, 2012).

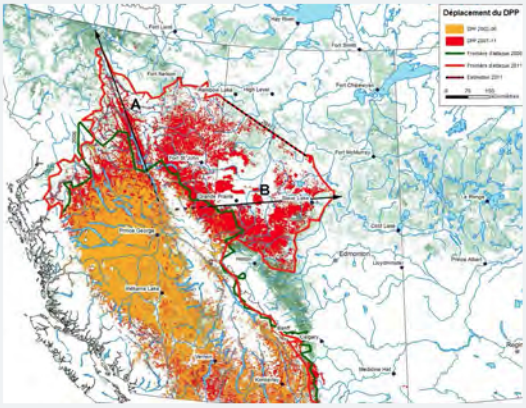


FIGURE 2 : Aires de répartition du dendroctone du pin ponderosa, montrant les changements survenus entre 2002 et 2006 et entre 2007 et 2011, ainsi que la nature des changements *(source : Ressources naturelles Canada, 2012c).*

américains du nord-ouest bordés par le Pacifique (Van Mantgem *et al.*, 2009) et dans les forêts boréales du Canada (Peng *et al.*, 2011). La région des Prairies a connu une sécheresse d'une gravité exceptionnelle en 2001-2002, ce qui aurait causé un dépérissement de la cime et un déclin des populations de peuplier faux-tremble, menant à un taux de mortalité de plus de 20 % supérieur à la moyenne à long terme (Michaelian *et al.*, 2011). On a aussi établi un rapport entre l'humidité disponible et la croissance et la productivité des forêts, puisque le stress lié au manque d'humidité entraîne une diminution de la croissance radiale annuelle dans un grand nombre de régions et sur différentes espèces, notamment l'épinette blanche, l'épinette noire, le peuplier faux-tremble et le pin tordu latifolié (Barber *et al.*, 2000; Chhin *et al.*, 2008; Girardin *et al.*, 2008; Hogg *et al.*, 2008).

Les épisodes de vent extrême devraient augmenter en raison des changements climatiques (p. ex,. Haughian *et al.*, 2012). On note, parmi les exemples d'effets causés par un épisode de vent extrême sur les forêts, les dommages très étendus causés par l'ouragan Juan sur les terres forestières publiques et les petits boisés privés en Nouvelle-Écosse à l'automne 2003 (McGrath et Ellingsen, 2009), ainsi que la destruction de forêts anciennes et de jeunes peuplements forestiers dans les basses-terres continentales de la Colombie-Britannique, laquelle fut causée par une tempête de vent survenue en décembre 2006 qui a touché plus de 40 hectares du parc Stanley, une destination clé pour les activités récréatives en plein-air à Vancouver. Même si les coûts associés à la restauration du parc après la tempête ont dépassé les 10 millions de dollars, ces efforts ont servi à accroître la participation du public et à replanter une forêt plus résiliente (Ville de Vancouver, 2012).

CHANGEMENTS DANS LA COMPOSITION

Le climat influe considérablement sur la répartition des essences. À mesure qu'il change, les enveloppes climatiques des essences d'arbres canadiennes avancent de quelques degrés de latitude vers le nord et s'étendent à de plus hautes altitudes sur les versants (*voir* le chapitre 6 – *Biodiversité et aires protégées*). Bien qu'un degré élevé d'incertitude soit associé aux prévisions relatives aux changements des aires de répartition (McKenney *et al.*, 2011), le rythme du changement au niveau des enveloppes climatiques de la plupart des essences d'arbres nord-américaines pourrait s'avérer plus rapide, par au moins un facteur de dix, que la vitesse de migration potentielle (McKenney *et al.*, 2007; McKenney *et al.*, 2011), soulevant ainsi la possibilité que l'évolution de la niche climatique des espèces ne progresse plus rapidement que leur évolution naturelle. D'autres facteurs de stress locaux, comme la sécheresse, les perturbations et la concurrence avec d'autres espèces, pourraient interagir avec les facteurs climatiques et réduire le potentiel de migration, phénomène qui contribuerait à créer un plus grand écart entre l'évolution de la niche climatique et l'aire de répartition actuelle de l'essence (Mohan *et al.*, 2009).

CHANGEMENTS AU NIVEAU DE LA PRODUCTIVITÉ

Les saisons de croissance se sont allongées au cours des dernières décennies. En effet, on observe que les phénomènes phénologiques printaniers, comme les périodes de débourrement et de désendurcissement des épines, surviennent plus tôt dans l'année. Par exemple, la floraison du peuplier faux-tremble en Alberta a gagné deux semaines entre 1936 et 2006 (Beaubien et Hamann, 2011). Un climat plus chaud et une saison de croissance plus longue peuvent être utiles aux populations de la partie nord de l'étendue des essences, comme le prouvent les populations de peupliers faux-tremble dans l'est du Canada (Lapointe-Garant *et al.*, 2009). Les populations situées plus au sud peuvent connaître une croissance neutre ou réduite dans des conditions de réchauffement climatique (Ma *et al.*, 2012) et peuvent ne connaître une augmentation de la croissance que dans des conditions idéales, ou lorsque les arbres sont jeunes (Girardin *et al.*, 2012). Des saisons de croissance précoces peuvent également hausser le risque d'exposition au gel (Beaubien et Hamann, 2011), limitant ainsi les avantages sur le plan de la productivité. L'augmentation des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère peut également entraîner une hausse modérée de la productivité dans certaines circonstances telles celles qui peuvent se présenter aux endroits où l'eau et les nutriments ne sont pas limitatifs et la concurrence est faible (Soulé et Knapp, 2006; Wang *et al.*, 2006).

RÉPERCUSSIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES

Les effets combinés des changements climatiques sur les forêts se répercuteront sur la qualité et la quantité de l'approvisionnement en bois d'œuvre et auront d'importantes conséquences financières sur les industries du secteur forestier (TRNEE, 2011). Ces effets mettront en évidence de fortes variations régionales, dont les coûts potentiels découleront de la réduction de l'approvisionnement en bois d'œuvre (Ochuodho *et al.*, 2012) et du raccourcissement des saisons de récolte hivernale (lorsque les coûts d'exploitation sont plus faibles et que la perturbation des sols est minimisée; Johnston *et al.*, 2009; Ogden et Innes, 2009). Les conséquences économiques dépassent aussi les effets prévus sur l'approvisionnement en bois d'œuvre, puisque les changements climatiques auront également des répercussions sur les industries qui dépendent des récoltes de bois tels les secteurs manufacturier et de la construction. Dans le rapport rédigé par Lemprière *et al.* (2008), les auteurs résument les effets à court, moyen et long terme des changements climatiques sur la quantité et la qualité de l'approvisionnement en bois d'œuvre au Canada, ainsi qu'au niveau de l'offre et de la demande à l'échelle internationale.

Les incendies de forêt constituent une menace pour la santé, la sûreté et la sécurité humaines (*voir* le chapitre 7 – *Santé humaine*). À titre d'exemple de dommages financiers causés par un incendie de forêt, on estime que l'incendie de Slave Lake, survenu en Alberta en 2011, a entraîné des réclamations de l'ordre de 742 millions de dollars en demandes de règlement (Flat Top Complex Wildfire Review Committee, 2012). L'augmentation prévue du nombre d'incendies liés aux changements climatiques se traduira par des frais supplémentaires au niveau de la protection et de l'évacuation des collectivités. On estime qu'on ne dispose que d'une décennie ou deux avant que l'augmentation de l'activité des incendies ne dépasse la capacité des organismes de gestion des feux à maintenir les niveaux actuels d'efficacité (Flannigan *et al.*, 2009).

Les collectivités forestières dépendent beaucoup des forêts pour leurs emplois, leurs revenus et d'autres biens et services telles les activités récréatives à l'extérieur. Une hausse du nombre d'incendies de forêt, d'infestations de ravageurs et de phénomènes météorologiques extrêmes se traduira par une diminution des peuplements forestiers pouvant être gérés de manière durable. Les coûts associés à la surveillance et à la protection peuvent devenir prohibitifs dans certaines régions et contribuer à la réduction ou à la disparition des économies forestières locales.

Les analyses des effets des changements climatiques sur l'ensemble de l'économie dans le secteur forestier doivent tenir compte des facteurs de stress de nature non climatique tels que la demande des consommateurs, la main d'œuvre, l'offre de capitaux et les marchés pour les intrants et les extrants de production (TRNEE, 2011).

EFFETS SUR LE STOCKAGE DU CARBONE

Les changements climatiques ont aussi des effets sur les services écologiques offerts par la forêt, comme la conservation et l'épuration de l'eau, la biodiversité et le stockage du carbone. L'importance des écosystèmes forestiers dans l'atténuation des effets des changements climatiques grâce au stockage du carbone est de plus en plus reconnue et valorisée (Pan *et al.*, 2011). Les perturbations peuvent avoir d'importantes répercussions sur les stocks et les flux de carbone (Hicke *et al.*, 2012); ainsi, l'intensification prévue de la sécheresse et du nombre d'incendies et de perturbations causées par les ravageurs diminuerait la capacité de stockage de carbone des forêts au Canada (Amiro *et al.*, 2009; Michaelian *et al.*, 2011). Par exemple, les résultats publiés dans le rapport de Kurz *et al.* (2008) permettent de conclure que, d'ici 2020, les arbres tués par le dendroctone du pin ponderosa dans l'Ouest canadien auront libéré près d'un milliard de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui équivaut à cinq années d'émissions provenant du secteur des transports canadien.

3.2 ADAPTATION

Les changements climatiques posent des défis aux gestionnaires forestiers canadiens. Les décisions que ces derniers prennent aujourd'hui se répercuteront sur les forêts pendant plus de 100 ans, étant donné la longue durée de croissance des essences d'arbres. Les arbres peuvent s'adapter à un certain degré de changement dans leur environnement grâce à leur capacité d'adaptation physiologique ou génétique (Aitken *et al.*, 2008), mais l'ampleur des changements climatiques futurs pourrait dépasser la capacité des forêts à s'adapter suffisamment pour maintenir le niveau actuel de biens et de services offerts à la société. Par conséquent, des stratégies d'adaptation forestière seront nécessaires pour maintenir la compétitivité et la durabilité du secteur forestier au Canada. L'industrie forestière canadienne fait face depuis quelque temps à d'importants défis économiques, qui ont entraîné des pertes d'emplois, la fermeture des scieries ainsi qu'un ralentissement général dans le secteur forestier. Des mesures d'adaptation efficaces doivent prendre en considération tous ces facteurs de changement dans le secteur forestier.

Bon nombre d'articles et de rapports (p. ex., Millar *et al.*, 2007; Ogden et Innes, 2007; Bernier et Schoene, 2009; Johnston *et al.*, 2009; Gauthier *et al.*, *en cours de révision*) traitent des options qui s'offrent au secteur forestier en matière d'adaptation et il existe de nombreux exemples en ce qui concerne les mesures d'adaptation qui ont été mises en œuvre (p. ex., *voir* l'étude de cas 2).

La question de l'adaptation du secteur forestier au Canada a retenu l'attention politique lorsque le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF; CCMF, 2008) a établi que les changements climatiques constituaient l'une des deux priorités à l'échelle nationale et a indiqué qu'il était nécessaire de tenir compte des changements climatiques et des éventuelles variations climatiques dans tous les aspects de l'aménagement forestier durable. Le CCMF a ensuite réalisé des études d'évaluation de la vulnérabilité et de la capacité d'adaptation de divers écosystèmes forestiers, des activités d'aménagement forestier et du milieu politique (Johnston et Edwards, sous presse; *voir* l'étude de cas 3).

ÉTUDE DE CAS 2

MIGRATION ASSISTÉE

La migration assistée est définie comme étant le déplacement des espèces par l'humain en raison des changements climatiques (Ste-Marie *et al.*, 2011). Il s'agit d'une option d'adaptation qui est de plus en plus envisagée afin de maintenir la biodiversité, la santé et la productivité des forêts canadiennes dans le contexte des changements climatiques. Cette approche peut être utilisée pour répondre à des objectifs de conservation (p. ex., pour sauver les espèces) et de foresterie (p. ex., pour maintenir la santé et la productivité des peuplements). En raison de l'état des connaissances actuelles et des pratiques exemplaires en place, la migration assistée est plus facilement réalisable dans le cas des principales essences commerciales que dans le cas des espèces préoccupantes du point de vue de la conservation (Pedlar *et al.*, 2012).

De nombreuses autorités ont adopté des directives en matière de transfert de semences qui recommandent l'endroit où les semences provenant de certaines zones géographiques devraient être plantées afin de s'assurer qu'elles s'adapteront à leur nouvel environnement. Certaines autorités canadiennes ont commencé à mettre en œuvre la migration assistée de populations et d'essences d'arbres à petite échelle, en modifiant les directives face aux changements climatiques observés et prévus. Les projets de migration assistée des essences commerciales, auxquels on procède actuellement, prévoient le déplacement des semences dans les limites de leur aire de distribution actuelle, ou légèrement en dehors de celles-ci. Par exemple, en Colombie-Britannique, les zones de transfert de semences de la plupart des essences ont été étendues de 100 à 200 mètres en altitude au-delà de leurs zones actuelles (BCMLFNRO, 2008) et de nouvelles politiques ont été mises en place afin de permettre la plantation du mélèze de l'Ouest à l'extérieur de son aire de distribution actuelle (BCMLFNRO, 2010). Grâce à un système de demande de dérogation, les zones de transfert de semences de la plupart des espèces de conifères ont été étendues de 200 mètres en altitude et de deux degrés en latitude vers le Nord en Alberta (S. Kavalinas, Alberta Environment and Sustainable Resource Development, communication personnelle). Les semences de vergers à graines cultivées dans le sud peuvent représenter jusqu'à 20 % du matériel de reboisement dans les forêts commerciales du nord du Québec (André Deshaies, ministère des Ressources naturelles du Québec, communication personnelle).

ÉTUDE DE CAS 3

ANALYSE DES ÉVALUATIONS DE LA VULNÉRABILITÉ DU SECTEUR FORESTIER

Entre 2008 et 2012, le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) a réalisé une étude sur la vulnérabilité du secteur forestier canadien aux changements climatiques. Un résumé des douze études de cas sur la vulnérabilité menées à l'échelle du pays constituait l'un des éléments de l'analyse (figure 3). Les objectifs de ces études variaient considérablement, qu'il s'agisse de la modélisation biophysique dans l'une ou de l'analyse de politiques, d'évaluations communautaires ou de l'intégration des changements climatiques au processus de planification de l'aménagement forestier dans d'autres. L'importance perçue des changements climatiques par rapport à d'autres enjeux varie également considérablement d'une étude à l'autre: dans certaines, elle importait peu, alors que dans d'autres, elle revêtait une extrême importance.



FIGURE 3 : Sites des études d'évaluation sur la vulnérabilité réalisées par le CCFM. ESRD = Environment and Resource Development (Alberta), ICAR = Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale (Ressources naturelles Canada) *(source: Johnston et Edwards, 2013).*

Outre l'analyse technique, les principaux résultats des évaluations de la vulnérabilité préconisent :

- de sensibiliser davantage les nombreux acteurs concernés au rôle joué par les changements climatiques et de faciliter l'établissement de liens solides entre les praticiens et les modélisateurs;
- de renforcer les capacités en matière d'aménagement forestier et d'accroître le niveau de compréhension au sujet des vulnérabilités afin de jeter les bases des prochains travaux sur l'adaptation car, même si certaines études de cas contenaient des options d'adaptation, on note que, de façon générale, ce concept n'est pas bien compris;
- d'élaborer des approches de modélisation intégrée multi-échelle étayées par les observations des groupes d'intervenants et susceptibles d'accroître le niveau de connaissances scientifiques auxquelles l'aménagement forestier pourra avoir recours à l'avenir;
- de permettre aux participants de mieux comprendre l'incertitude associée aux projections climatiques futures.

L'analyse des études de cas a également permis à Johnston et Edwards (*sous presse*) de cerner les facteurs qui ont permis de mener des évaluations de la vulnérabilité réussies. Ces facteurs, qui peuvent servir dans le cadre d'autres initiatives, sont les suivants :

- des ressources financières et humaines adéquates, y compris des experts et des dirigeants locaux;
- des rapports d'analyses précédentes qui énumèrent, dans une certaine mesure, les effets probables et les préoccupations existantes des décideurs locaux concernant les effets des changements climatiques et les mesures à prendre pour les atténuer;
- des données techniques génériques élaborées (climat, écosystèmes) permettant aux équipes d'évaluation de la vulnérabilité de progresser rapidement;
- la disponibilité de l'expertise dans le domaine des sciences naturelles et des sciences sociales afin d'établir des rapports entre les systèmes biophysiques et humains;
- le choix d'un champion – quelqu'un qui s'investit personnellement dans le projet, souvent le dirigeant de la collectivité locale – dont le rôle consiste à faciliter le dialogue entre scientifiques, intervenants et praticiens;
- des mécanismes qui faciliteront l'intégration des connaissances locales ou traditionnelles à la science;
- un accent initial mis sur les vulnérabilités actuelles, étape qui aide à établir et à combler les lacunes sur le plan des connaissances au début du processus.

OBSTACLES ET DIFFICULTÉS ASSOCIÉS À L'ADAPTATION

Des exemples notoires et à grande échelle des effets des changements climatiques telle l'infestation de dendroctone du pin ponderosa, et des phénomènes météorologiques extrêmes tels les grands incendies de forêt à Kelowna, en Colombie-Britannique, en 2003, et à Slave Lake, en Alberta, en 2011, ont sensibilisé les intervenants forestiers aux questions d'adaptation aux changements climatiques. Le gouvernement et l'industrie ont abandonné la stratégie de « gestion de crise » pour adopter une approche de « gestion adaptative » dans le but d'aborder les risques de façon proactive et de tirer profit du potentiel que présentent les changements climatiques (Johnston et Hesseln, 2012). Or, en l'absence de mesures d'incitation économiques en faveur de l'adaptation, les entreprises auront peut-être de la difficulté à absorber les coûts à court terme, malgré les bénéfices qu'elles risquent de réaliser à long terme (TRNEE, 2012a). Même si les pressions économiques sur le secteur forestier au Canada peuvent limiter la capacité de l'industrie à accorder une attention particulière à l'adaptation en vue de contrer les effets des changements climatiques et à investir dans ce domaine, de nombreuses stratégies de gestion adaptative peuvent également servir à aborder les autres facteurs de stress de nature non climatique et contribuer à renforcer la résilience du système.

D'importantes incertitudes persistent au sujet des conditions climatiques futures (Trenberth, 2010), des effets multiples en interaction des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers complexes et de la réaction de la forêt à ces changements. Le niveau de compréhension scientifique au sujet des répercussions des changements climatiques passées et à venir sur les forêts canadiennes a augmenté de manière substantielle au cours des dix dernières années, mais les données ne sont pas toujours disponibles, accessibles ou applicables aux utilisateurs éventuels (Johnston et Hesseln, 2012). En fait, certains intervenants du secteur forestier au Canada ont souligné que la compréhension des éventuelles options d'adaptation est considérée comme une lacune sur le plan des connaissances et un obstacle à l'action (TRNEE, 2012a). Des réseaux d'intervenants en matière d'adaptation aux changements climatiques telle la Communauté de pratique en adaptation forestière (www.ccadaptation.ca/fr/landing), se sont formés pour relever le défi en partageant les connaissances et les pratiques exemplaires.

La difficulté d'attribuer sans équivoque aux changements climatiques les répercussions remarquées dans des systèmes forestiers qui sont soumis à de nombreux facteurs de stress est parfois perçue comme un obstacle à l'adaptation (Lemprière *et al.*, 2008). Le fait de générer de longues séries temporelles à partir d'un suivi multi-échelle permet de détecter et de quantifier les changements en milieu forestier liés au climat, ce qui facilite la validation des modèles et la prise de décisions en toute connaissance de cause. L'intégration des mesures relevées sur le terrain aux données obtenues par télédétection permet d'élargir l'ampleur et la portée de la capacité du Canada à suivre les changements en milieu forestier. L'intégration des connaissances scientifiques à l'ensemble des disciplines permettra aussi d'en arriver à une compréhension plus intégrée des vulnérabilités de la forêt et du secteur forestier aux changements climatiques.

L'adaptation devrait être considérée comme un élément essentiel de l'aménagement forestier durable étant donné que les changements climatiques rendent problématique la réalisation des objectifs en la matière. Par exemple, les critères et indicateurs en matière d'aménagement forestier durable adoptés par le CCMF (2006) seront peut-être difficiles, voire impossibles, à atteindre parce qu'ils ne tiennent pas compte des effets des changements climatiques. Une analyse de la série de critères et d'indicateurs réalisée par Steenberg *et al.* (2012) propose d'ajouter des indicateurs et de les réexaminer et de les adapter dans le contexte des changements climatiques. Des normes de certification établies pour l'aménagement forestier durable pourraient constituer un instrument pouvant servir à intégrer les changements climatiques à la prise de décisions dans le secteur forestier. Redéfinir l'aménagement forestier durable dans le but d'incorporer les changements climatiques sera sans nul doute un processus complexe, auquel participeront de nombreux intervenants, et nécessitera des analyses de compromis détaillées, afin de préciser la fourchette des valeurs forestières qui seront représentées.

4. EXPLOITATION MINIÈRE

Le secteur minier canadien emploie environ 401 315 personnes dans les secteurs de l'extraction minérale et les secteurs à valeur ajoutée que sont ceux de la fonte, de la transformation et de la fabrication, et son apport au produit intérieur brut du Canada s'est élevé à quelque 60 milliards de dollars en 2012 (Ressources naturelles Canada, 2013a). En 2010, près de 968 établissements miniers, dont 71 mines métallifères et 897 mines non métallifères, étaient exploités en grappes industrielles dans plus de 120 petites et moyennes collectivités canadiennes et dans leurs environs, principalement en Ontario, au Québec et en Colombie-Britannique (figure 4). L'exploitation minière contribue également aux économies des grandes villes. La Bourse de Toronto a traité 83 % des opérations mondiales par actions ordinaires dans le secteur minier au cours des six dernières années. Plusieurs grappes de sociétés d'exploration se sont implantées à Vancouver, alors que les alumineries et les usines de minerai de fer se sont établies à Montréal et les usines d'uranium et de potasse, à Saskatoon (Stothart, 2011).

L'exploitation minière contribue aux économies de toutes les provinces et territoires (tableau 3). Cette contribution économique varie considérablement au fil du temps en fonction du nombre de mines en exploitation et de la valeur du bien produit. Selon l'Association minière du Canada, l'industrie prévoit investir plus de 140 millions de dollars en projets au cours des dix prochaines années (Marshall, 2012). Cette croissance prévue présente des occasions d'intégrer des mesures d'adaptation aux activités d'exploration minière, à la construction des mines et aux activités d'exploitation, de transports et de fermeture.

Les responsables des activités minières au Canada doivent depuis longtemps composer avec la variabilité climatique, mais au cours des dernières années, ils ont dû faire face à une incidence croissante de dangers de nature climatique, dont certains dépendent probablement des changements climatiques (Lemmen *et al.*, 2008a; Pearce *et al.*, 2011; Stratos, 2011; IMG-Golder Corporation, 2012; TRNEE, 2012a). Les changements climatiques posent un risque opérationnel,



FIGURE 4 : Grappes industrielles dans le secteur minier au Canada *(extrait modifié tiré de Stothart, 2011).*

lié à l'image que se fait le public de l'engagement d'une entreprise en faveur des mesures d'atténuation (Pearce *et al.*, 2009). Ils offrent également de nouvelles possibilités dans les domaines de l'exploration et de l'aménagement des mines, qui découlent d'un meilleur accès aux ressources et des nouvelles options de transport (Lemmen *et al.*, 2008a; Prowse *et al.*, 2009; Pearce *et al.*, 2011; TRNEE, 2012a). La mesure selon laquelle le secteur minier est capable de réduire son effet sur le climat, de s'adapter aux changements climatiques et de profiter des occasions qui se présentent aura une incidence sur son succès à long terme, ainsi que des conséquences économiques et environnementales sur les collectivités d'accueil et le pays.

La plupart des études disponibles sur les effets des changements climatiques et l'adaptation dans le secteur minier portent sur les activités entreprises en régions nordiques et des enjeux tels l'intégrité du pergélisol, le réseau de transport hivernal, la gestion de l'eau et la possibilité d'utiliser les voies maritimes de l'Arctique en raison de la fonte de la glace marine. On ne dispose que de peu de données au sujet des effets des changements climatiques et de l'adaptation en ce qui a trait aux activités minières dans le sud du Canada, malgré la concentration de mines situées au sud du 60° parallèle (sur les 196 principales mines productrices qui figurent dans la liste dressée par Ressources naturelles Canada (2012d), seules huit sont situées dans les territoires nordiques). La discussion présentée dans cette section est sujette aux restrictions que lui imposent les limites de l'information disponible.

Province/territoire	Valeur de la production minière par province et par territoire, en 2000 et en 2010 (en millions de $)	
	2000	2010
Terre-Neuve-et-Labrador	967,1	4584,0
Île-du-Prince-Édouard	5,5	3,4
Nouvelle-Écosse	295,2	294,2
Nouveau-Brunswick	772,5	1154,6
Québec	3653,2	6770,5
Ontario	5711,4	7691,7
Manitoba	1268,8	1663,5
Saskatchewan	2282,6	7084,0
Alberta	1064,4	2347,3
Colombie-Britannique	2891,5	7073,8
Yukon	56,2	284,1
Territoires du Nord-Ouest	681,7	2032,7
Nunavut	384,6	305,1
TOTAL	20 034,7	41 288,9

TABLEAU 3 : Valeur (en millions de dollars) de la production minière par province et par territoire, en 2000 et en 2010 *(tiré de Stothart, 2011).*

4.1 EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET OPTIONS D'ADAPTATION

Les changements climatiques ont des conséquences sur toutes les étapes de l'activité minière, y compris la planification, les activités actuelles et futures et les activités post-exploitation. Les études ont permis de relever de nombreux aspects de l'exploitation minière qui sont actuellement touchés par la fluctuation des conditions climatiques, y compris : a) l'infrastructure existante, b) l'infrastructure de transport, c) l'extraction et la transformation et d) les activités quotidiennes.

INFRASTRUCTURE EXISTANTE

La dégradation du pergélisol et l'instabilité du sol qui en découle, les changements touchant le cycle hydrique et les phénomènes météorologiques extrêmes posent des défis lorsqu'il s'agit de concevoir, de construire, d'exploiter et de fermer l'infrastructure de la mine (Instanes *et al.*, 2005; Furgal et Prowse, 2008; Prowse *et al.*, 2009). Auparavant, la conception technique ne tenait pas compte des changements climatiques et la plupart des infrastructures des mines étaient construites pour résister aux normes et conditions climatiques en vigueur au moment de la construction. Les structures érigées avant la fin des années 1990 et certaines construites après cette date (p. ex., routes, pistes d'atterrissage, immeubles, bermes, digues à stériles et bassins de retenue) peuvent être sensibles à l'augmentation de la profondeur de dégel et du tassement dû au dégel au-delà des valeurs du plan d'origine en raison des changements climatiques, ce qui pourrait entraîner une hausse des coûts d'entretien et nécessiter des travaux d'assainissement afin de garantir l'intégrité structurelle (Prowse *et al.*, 2009). La dégradation du pergélisol pourrait aussi compromettre la stabilité et l'efficacité des structures telles que les barrages et la couverture des déchets, soit des problèmes qui peuvent être à l'origine du rejet de contaminants dans l'environnement (Pearce *et al.*, 2011; Stratos, 2011).

L'évolution des phénomènes météorologiques extrêmes a déjà contraint certaines infrastructures à dépasser leurs capacités d'exploitation prévues. Les perturbations du cycle hydrique, en particulier les épisodes de précipitations extrêmes et les changements au niveau de la fonte, ont causé une hausse des débits fluviaux pouvant dépasser la capacité des ouvrages de gestion de l'eau. Par exemple, les pluies torrentielles qui se sont abattues sur le Yukon ont contraint une mine d'or et de cuivre à rejeter, à de nombreuses reprises, de l'eau non traitée dans le réseau hydrographique du fleuve Yukon, violant ainsi les normes du permis d'exploitation de l'eau en vigueur dans ce territoire (Pearce *et al.*, 2011). La stabilité des pentes et l'intégrité des bermes qui ont été construites peuvent également être compromises par un épisode de précipitation extrême (Chiotti et Lavender, 2008). L'érosion des pentes à proximité des barrages ou le ravinement à la base des ouvrages de retenue peuvent survenir, causant de l'instabilité dans la structure du barrage et augmentant le risque de rupture. Des ruptures de digues à stériles, causées par de fortes pluies et des inondations, ont été documentées à l'échelle internationale (CIGB, 2001; WISE, 2006).

Des risques de défaillance structurale causés par les changements climatiques et les phénomènes météorologiques extrêmes ont également été remarqués partout au Canada, et surtout dans le Nord, dans des mines dont l'exploitation était terminée. Des installations de confinement des déchets, construites il y a plusieurs dizaines d'années, n'ont pas été conçues pour résister aux conditions plus chaudes qui prévalent aujourd'hui. La rupture des barrages à noyau gelé des bassins de retenue érigés sur certains sites et la dégradation du pergélisol qui se trouve sous le terril ont déjà causé de l'érosion non prévue et le rejet de contaminants dans l'environnement immédiat (Stratos, 2011). Il est probable que le scénario se répète dans d'autres sites d'exploitation minière au Canada (Pearce *et al.*, 2011).

L'adaptation des infrastructures minières aux changements climatiques nécessite une analyse des caractéristiques techniques, dans le cas des nouvelles mines, et des travaux d'assainissement dans celui des mines existantes, ou celles dont l'exploitation est terminée, en vue d'en garantir l'intégrité structurale. La prise en considération des changements climatiques à l'étape de conception des mines fait ordinairement partie du processus d'évaluation environnementale au Canada et les responsables à l'exploitation disposent de ressources comme le Code de pratiques écologiques pour les mines de métaux (Environnement Canada, 2009) pour les aider à composer avec les changements climatiques (Prowse *et al.*, 2009). Par exemple, le rapport indique que les installations de drainage superficiel doivent être conçues de façon à résister à des conditions de pointe au moins équivalentes à une crue à période de récurrence de 100 ans en vue de tenir compte des augmentations prévues du nombre de phénomènes météorologiques extrêmes causés par les changements climatiques (Environnement Canada, 2009). L'Association canadienne de normalisation a également rédigé un guide technique sur la construction des infrastructures dans les zones de pergélisol (Auld *et al.*, 2010). Ce guide s'applique aux nouveaux projets d'infrastructure et donne des suggestions en vue de déterminer la façon d'évaluer et de tenir compte des effets potentiels des changements climatiques sur le pergélisol et sur les fondations des structures construites dans des zones où celui-ci peut être présent.

Des techniques de conception et de gestion servent à protéger les infrastructures contre les effets du réchauffement du pergélisol, y compris des fondations sur pieux plus profondes, des assises en gravier plus épaisses (pour isoler la surface), des fondations réglables, des systèmes de refroidissement artificiel, des thermosiphons (pour évacuer l'air chaud qui circule autour des fondations et garantir une température du sol plus froide), l'enlèvement de la neige autour des fondations (pour obtenir des températures hivernales au sol plus froides) et le recours à des concepts de couverture de résidus plus résistante (épaisseur de la couverture, utilisation de matériaux géosynthétiques; Pearce *et al.*, 2009; Prowse *et al.*, 2009). Le fait de surveiller le fonctionnement de ces méthodes d'adaptation et de les adapter en conséquence contribue à garantir la durabilité et l'efficacité.

La durée de vie des mines se prolonge bien au-delà de l'arrêt des opérations et les structures laissées sur place après la fermeture devront résister aux changements climatiques futurs. Il est probable que les structures qui ont déjà été abandonnées, y compris les bassins de retenue et les haldes de stériles, n'ont pas été conçues pour résister à l'ensemble des conditions climatiques changeantes et si aucune mesure n'est prise, certains sites pourraient présenter des risques importants pour l'environnement et la santé des collectivités environnantes (Pearce *et al.*, 2011).

INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

Les exploitations minières qui dépendent des infrastructures de transport sensibles au climat, comme les routes d'hiver et le transport maritime et en eau douce, sont particulièrement vulnérables aux tendances au réchauffement signalées à l'échelle du pays et particulièrement dans le Nord (Furgal et Prowse, 2008; Prowse *et al.*, 2009). Les routes saisonnières aménagées sur la glace dans les Territoires du Nord-Ouest ne sont plus aussi fiables que par le passé, en raison des hivers plus doux (Prowse *et al.*, 2009; Stratos, 2009; Pearce *et al.*, 2011; *voir aussi* le chapitre 8 – *Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport*). La route d'hiver entre Tibbitt et Contwoyto située au nord et à l'est de Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest) est la plus longue route d'hiver du Canada et s'étend sur 600 km, dont plus de 80 % (495 km) sur des lacs gelés. Il s'agit de la principale route de ravitaillement pour les mines de diamants Ekati, Diavik, Jericho et Snap Lake, pour la mine d'or Lupin (inactive à l'heure actuelle) et pour plusieurs autres projets d'exploration minière (Prowse

et al., 2009). Au cours des dernières années, la période d'utilisation de la route d'hiver a été écourtée et l'épaisseur de la glace sur laquelle elle est construite a diminué, ce qui limite le poids du chargement pouvant être transporté de manière sécuritaire (Prowse *et al.*, 2009). Les coûts financiers associés au raccourcissement de la saison d'utilisation des routes de glace sont considérables. Par exemple, en 2006, la route a été praticable pendant 42 jours seulement (comparativement à 70 jours pour l'année précédente), contraignant la mine de diamants Diavik à dépenser 11,25 millions de dollars supplémentaires pour transporter 15 millions de litres de carburant par avion (Pearce *et al.*, 2011).

Les exploitants routiers ont adopté des mesures d'adaptation et ont notamment acheté de la nouvelle machinerie amphibie plus légère dans le but de faciliter la construction de la route plus tôt dans la saison. De plus, on a tracé d'autres itinéraires et amélioré l'efficacité opérationnelle en concentrant tous les transports par camion pendant la période hivernale, alors que la glace est à son épaisseur maximale (Pearce *et al.*, 2009). On étudie également des solutions de rechange à la route de glace, notamment la construction d'une route terrestre saisonnière vers les mines de diamants, et le projet d'aménagement routier et portuaire à Bathurst Inlet, qui relierait les sites miniers des Territoires du Nord-Ouest et du Nunavut à la côte continentale nord.

Les entreprises minières estiment que l'évolution des changements climatiques leur offre une occasion en ce qui concerne les changements au niveau de la couverture de glace marine et le transport maritime. Le prolongement de la saison estivale de transport fluvial et l'ouverture de nouvelles routes maritimes dans l'Arctique peuvent contribuer à l'amélioration de la viabilité économique de certaines exploitations minières dans le Nord. Par exemple, la poursuite du réchauffement devrait permettre une plus grande accessibilité au passage du Nord-Ouest et ainsi prolonger la saison de navigation ou, éventuellement, permettre l'ouverture de la voie à longueur d'année (Leong *et al.*, 2005; Prowse *et al.*, 2009). Or, à court terme, les risques posés par la glace demeureront élevés en raison du mouvement plus rapide des banquises dans l'archipel de l'Arctique (Prowse *et al.*, 2009; *voir aussi* le chapitre 2). Les facteurs non climatiques tels les frais d'assurance, la vitesse de navigation réduite et le manque d'infrastructure de soutien, peuvent également limiter l'utilisation du passage du Nord-Ouest comme voie de navigation. D'autres enjeux touchant les transports en particulier se dessineront probablement à mesure que les sites seront aménagés (*voir* l'étude de cas 4).

ÉTUDE DE CAS 4

MINE DE NICKEL-CUIVRE-COBALT DE VOISEY'S BAY À NUNATSIAVUT

La mine de nickel-cuivre-cobalt de Voisey's Bay, appartenant à l'entreprise Vale qui l'exploite, est située à environ 35 km au sud de la collectivité de Nain sur la côte nord du Labrador. La mine est exploitée dans une région subarctique éloignée et aménagée sur des terres qui font l'objet de revendications territoriales par des Innus et les Inuits de Nunatsiavut. Le principal corps minéralisé de la mine contient du nickel, du cuivre et du cobalt et est reconnu comme étant l'un des plus grands gisements de nickel au monde. La mine expédie le concentré minier vers ses installations de transformation à Long Harbour, à Terre-Neuve, pendant la saison des eaux libres, mais aussi pendant la saison de couverture de glace, entre janvier et mars (Vale, 2013).

Dans le cadre de l'évaluation des incidences environnementales (EIE) de la mine, l'Association des Inuits du Labrador et la Nation innue ont soulevé des préoccupations concernant le transport des cargaisons en zone de banquise côtière et le risque de perturbation des activités des gens qui se déplacent vers d'autres collectivités ou les territoires de chasse en passant sur la glace. Une entente a été conclue entre les parties dans le but d'aider à résoudre les problèmes et l'entreprise s'est engagée à ne pas acheminer ses cargaisons pendant la période de prise de glace automnale ou pendant la saison de chasse aux phoques au début du printemps (avril et mai). De plus, la mine attend que la glace initiale atteigne 20 cm d'épaisseur avant le début du brisage des glaces afin d'éviter toute perturbation des trajets empruntés par la faune et les résidents sur la glace de mer (Bell *et al.*, 2008).

Lorsqu'on a réalisé l'EIE de la mine de Voisey's Bay en 1997, les modèles climatiques utilisés prévoyaient des changements climatiques minimes pendant la durée de vie de 25 ans de la mine. L'énoncé des incidences environnementales reconnaissait que des changements aux conditions de la glace et de la mer pourraient se produire pendant la durée de vie de la mine, mais que ces derniers étaient difficiles à prédire (Bell *et al.*, 2008). Au cours de la dernière décennie, la couverture de glace mondiale a disparu à un rythme qui dépasse largement les projections des modèles climatiques (Stroeve *et al.*, 2012). Même si la réduction de la couverture de glace, le retard dans la prise de la glace et le devancement dans la rupture de la glace peuvent faciliter certaines opérations de transport maritime, cela pourrait avoir un effet négatif sur la mine de Voisey's Bay à l'égard de l'entente avec les collectivités locales visant à assurer l'accès aux routes de glace de mer et les territoires de chasse traditionnels. Si la glace de mer prend plus de temps à se former et à atteindre l'épaisseur requise avant le brisage, en vertu de l'entente conclue avec les Inuits et les Innus, la mine devra peut-être interrompre le transport de produits miniers pendant l'hiver (Pearce *et al.*, 2009).

Vale reconnaît la problématique des changements climatiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais la mine de Voisey's Bay n'a établi aucun plan proactif en vue de s'adapter aux éventuels changements climatiques, notamment aux changements dans la dynamique des glaces de mer (CVRD Inco, 2006). Les pratiques de gestion adaptative adoptées par les exploitants de la mine se limitent à des activités de contrôle, d'observation et d'évaluation des risques ayant pour objet de suivre les effets des changements de la glace de mer sur les activités côtières et sociales des collectivités autochtones; ils ne prévoient réagir que lorsque les changements climatiques observés commenceront à avoir un effet mesurable sur les activités de l'entreprise (CVRD Inco, 2006). Cette approche en matière d'adaptation correspond typiquement aux stratégies adoptées par la plupart des sociétés minières au Canada lorsqu'il s'agit de faire face aux changements climatiques et cela a parfois entraîné une charge financière pour les entreprises ou des dommages à l'environnement, ou les deux, tel que décrit ci-dessus. L'enjeu en matière d'adaptation consiste à trouver un juste équilibre entre la cueillette de nouvelles données pour mieux comprendre les effets négatifs probables des changements climatiques et atteindre le meilleur résultat à court terme en fonction de l'état des connaissances actuelles dans ce domaine (Allan et Stankey, 2009).

EXTRACTION ET TRANSFORMATION

Les conditions climatiques se répercutent également sur les activités d'extraction et de transformation de certains minéraux. Les émissions de poussière et les règlements liés à leur contrôle sont particulièrement préoccupants en ce qui concerne les mines de sable, de gravier, de calcaire et de dolomie. Des conditions sèches et chaudes intensifient les épisodes d'émission de poussière et les exploitants miniers doivent mettre en œuvre des mesures de contrôle, comme la vaporisation d'eau et l'entreposage des matières dans des entrepôts couverts. L'augmentation des précipitations associées aux changements climatiques dans certaines régions pourrait être bénéfique pour ces sociétés minières, car cela aiderait à contrôler les émissions de poussière. Par contre, des précipitations trop abondantes peuvent compromettre le séchage des minéraux extraits, ce qui fait appel à une plus grande consommation d'énergie et entraîne des coûts plus élevés (Pearce *et al.*, 2009; *voir* l'étude cas 5).

ACTIVITÉS QUOTIDIENNES

Les activités quotidiennes des sites miniers sont sensibles aux conditions météorologiques extrêmes, y compris les précipitations intenses et les fortes chutes de neige, les inondations, les périodes de sécheresse, le changement des conditions des glaces, les températures extrêmement froides et les incendies de forêt, car elles peuvent réduire la capacité opérationnelle (Pearce *et al.*, 2009; TRNEE, 2012a). Les activités minières sont souvent menées dans des régions disposant de services et d'infrastructures d'accès limités, lesquels sont d'ailleurs sensibles aux changements climatiques. Par exemple, en mai 2012, les activités de plusieurs mines d'or près de Timmins, en Ontario, ont été interrompues en raison des incendies de forêt, qui avaient causé des pannes d'électricité, bloqués l'autoroute menant aux mines et menacés les installations minières comme telles (CBC, 2012). Les mines exploitées en terrain montagneux, en Colombie-Britannique, sont vulnérables aux coulées de boue et de débris causées par les précipitations et les routes utilisées pour le transport peuvent être emportées, particulièrement si les fortes précipitations surviennent pendant la période de dégel printanier. Les activités minières des régions centrales du Canada ont été interrompues par le verglas, les inondations, les températures extrêmement froides et les tempêtes. On prévoit que les changements sur le plan de la fréquence et de l'intensité de ces conditions devraient se poursuivre dans l'avenir, ce qui aura un effet sur les activités minières (Pearce *et al.*, 2009).

ÉTUDE DE CAS 5

MINE DE SULFATE DE SODIUM, À CHAPLIN, EN SASKATCHEWAN

Le sulfate de sodium qui est extrait et vendu est destiné à l'utilisation dans la fabrication de détergents à lessive en poudre, de verres et de textiles, dans la fécule de maïs modifiée, dans les désodorisants à tapis, dans la fabrication de pâte kraft et dans les granulés alimentaires riches en minéraux destinés aux animaux d'élevage. Dans des conditions climatiques idéales, les installations de production de sulfate de sodium utilisent la chaleur du soleil pour éliminer l'eau d'une solution de dérivés sodiques par évaporation, jusqu'à ce qu'ils se déposent par précipitation au fond des réservoirs pour ensuite être récupérés. Ce processus nécessite un approvisionnement en eau suffisant au printemps, des étés secs et chauds, pour optimiser la concentration de la solution de saumure, et des hivers froids, pour faciliter la récupération du sulfate de sodium gisant au fond des réservoirs. Dans ces conditions idéales, les intrants en énergie dans le système sont minimes, ce qui permet de réduire les coûts de production et, ainsi, d'augmenter le degré de compétitivité de la mine. La variabilité des conditions climatiques présente de nombreux défis opérationnels. Par exemple, des précipitations estivales trop abondantes contraignent les mines à utiliser des pompes pour éliminer les surplus d'eau, ce qui augmente les coûts de production. Des hivers plus chauds, pendant lesquels la congélation du sol sous les réservoirs est retardée, limitent le recours à la machinerie lourde et augmentent les coûts de récupération du sulfate de sodium.

La mine, appartenant à la Saskatchewan Mining and Minerals Inc. située à Chaplin, en Saskatchewan, est une petite mine de sulfate de sodium. Son succès est lié aux conditions météorologiques de précipitations et de ruissellement favorables, ainsi qu'à son accès au lac Chaplin, un lac salin de 18 km^2 (figure 5).

Les précipitations locales et le ruissellement printanier sont les deux principales sources d'eau qui alimentent la mine de Chaplin. On a prévu une autre source d'eau pour aider la mine en cas de pénurie. En effet, l'eau peut être détournée de la rivière Wood vers le ruisseau Chaplin, puis vers le lac Chaplin où elle sera puisée par la mine. Ce système de distribution est géré en collaboration avec Canards illimités Canada et profite à la réserve locale de sauvagine. La mine a également installé des réservoirs d'eau qui peuvent servir pendant les années de sécheresse. L'efficience d'utilisation de l'eau a également augmenté au cours des vingt dernières années grâce à l'érection autour du lac Chaplin de petites digues, dont l'objet est de diviser le lac en plus petites sections et d'augmenter le contrôle qu'ont les exploitants miniers sur le niveau de l'eau, leur permettant ainsi d'optimiser les concentrations de saumure pendant l'extraction. Les sections permettent aux exploitants d'ajouter de l'eau là où cela est nécessaire, ce qui permet d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau. En cas de précipitations abondantes, les pompes peuvent servir à éliminer le surplus et contrôler les concentrations de saumure. Ces techniques permettent à la mine d'améliorer ses procédés d'extraction par dissolution et de récupération, malgré les changements et les variations climatiques.



FIGURE 5 : Mine de sulfate de sodium de Chaplin, au sud-ouest de la Saskatchewan *(Photo gracieusement fournie par la Saskatchewan Mining and Minerals Inc).*

4.2 ÉTAT DE L'ADAPTATION AU NIVEAU DE L'INDUSTRIE MINIÈRE CANADIENNE

L'attention accordée aux mesures d'adaptation aux changements climatiques – soit la planification à long terme qui tient compte des effets des changements climatiques aussi bien actuels que prévus – varie considérablement au sein du secteur minier. Le manque évident de planification proactive en matière d'adaptation aux changements climatiques dans le secteur minier semble indiquer que certains intervenants considèrent cette mesure comme une préoccupation mineure par rapport aux enjeux immédiats tels que le respect des exigences réglementaires et des besoins en ressources humaines, et la gestion des fluctuations du marché (Ford *et al.*, 2011). Dans certains cas, le fait que les décideurs des sociétés minières aient une compréhension et des connaissances limitées des changements climatiques actuels et prévus peut constituer un frein aux activités de planification en vue de l'adoption de mesures d'adaptation. En outre, les changements climatiques sont parfois perçus comme un événement qui pourrait se produire au-delà de la durée de vie de la mine et ne présentent, par conséquent, qu'une importance immédiate limitée (Ford *et al.*, 2010).

L'évaluation des incidences environnementales est l'un des mécanismes ayant permis de sensibiliser le secteur minier aux effets des changements climatiques et à l'adaptation à mesure que les sociétés passent de l'étape d'exploration avancée à celle de la production. Ces évaluations se fondent souvent sur des scénarios climatiques pour déterminer les effets potentiels sur les infrastructures minières et l'environnement immédiat. Des stratégies de surveillance et d'adaptation sont définies à ce moment. Cependant, on doit reconnaître que la mesure dans laquelle les stratégies des projets miniers sont mises en œuvre et leurs activités modifiées est restreinte (Bell *et al.*, 2008).

Des mesures comme le renforcement ou le remodelage des infrastructures peuvent s'avérer coûteuses et sont parfois jugées inutiles par les exploitants vu la courte durée de vie de plusieurs mines. De plus, l'incertitude liée aux prévisions de changements climatiques est considérée comme un obstacle lorsqu'il s'agit de prendre des décisions en matière d'investissement concernant l'adaptation (Ford *et al.*, 2010). Malgré tout, des progrès ont été réalisés et certains concepteurs ont inclus les paramètres des changements climatiques à leurs plans de conception (Ford *et al.*, 2011). La planification proactive en matière d'adaptation est toutefois mise en œuvre dans quelques sites d'exploitation minière, principalement dans le nord du pays (Ford *et al.*, 2011).

Bon nombre de facteurs influencent la capacité d'un site minier à s'adapter aux changements climatiques. On compte parmi ces facteurs les données sur les changements climatiques, la réglementation et l'accès à des solutions de nature technique.

Données sur les changements climatiques – Les décideurs responsables de la conception, de la construction, de l'entretien et du déclassement des infrastructures minières doivent mieux comprendre les effets probables des changements climatiques sur les sites miniers et la façon dont les techniques d'ingénierie peuvent servir à gérer ces changements. On craint que les scénarios climatiques actuels ne soient pas suffisamment précis pour appuyer la prise de décisions. Parmi les besoins exprimés, il faut veiller à ce que les données sur le climat soient présentées dans un format pouvant servir immédiatement aux promoteurs et exploitants des mines; il faut également fournir une orientation susceptible d'aider à l'interprétation d'un vaste éventail de scénarios sur les changements climatiques et à leur intégration aux plans d'infrastructure et de fermeture (Ford *et al.*, 2011).

Réglementation – La planification en matière d'adaptation dans le secteur minier semble être en grande partie facultative. Malgré l'attention récemment accordée aux changements climatiques dans le cadre du processus d'évaluation environnementale établi pour de nombreux projets d'aménagement minier, il n'existe aucune exigence générale qui oblige les promoteurs à tenir compte des changements climatiques dans leurs plans d'aménagement ou dans leurs plans de fermeture. La réglementation, élaborée de concert avec les promoteurs, pourrait servir à s'assurer que les connaissances disponibles relatives aux changements climatiques actuels et futurs sont intégrées au processus de planification de la mine (TRNEE, 2012a).

Solutions de nature technique – Dans bien des cas, les technologies et les stratégies d'ingénierie requises pour adapter les activités minières en fonction des changements climatiques existent déjà. Par exemple, les sites qui doivent maintenir la continuité du gel emploient couramment le thermosiphon (Pearce *et al.*, 2011). De la même façon, il est possible de modifier la couverture des résidus miniers, afin de s'assurer que les matières enfouies sous terre demeurent congelées, et de construire le réseau de transport terrestre de manière à perturber le moins possible les couches sous-jacentes de sol gelé. Dans d'autres cas, les bassins de confinement, les bermes et les autres infrastructures de retenue peuvent être solidifiés de manière à résister aux épisodes de précipitations extrêmes plus fréquents qui surviendront au cours de la durée de vie de la mine et au-delà. Il existe des solutions de nature technique susceptibles d'atténuer les effets négatifs des changements climatiques sur les activités minières, cependant elles sont rarement rentables et, jusqu'à présent, il y a peu de mesures incitatives, aussi bien financières que réglementaires, encourageant leur adoption.

5. ÉNERGIE

Le Canada dispose de ressources énergétiques abondantes et variées qui font partie intégrante de son économie. Il détient la troisième réserve de pétrole brut et la quatrième réserve d'uranium en importance dans le monde, et il est le deuxième plus grand producteur d'uranium au monde. En outre, le Canada est le troisième plus grand producteur d'hydroélectricité, le cinquième plus grand producteur de pétrole et de gaz naturel, et le deuxième plus grand exportateur net d'uranium (Ressources naturelles Canada, 2013b). En 2012, le secteur de l'énergie a contribué pour environ 155 milliards de dollars, soit 9 %, au PIB du Canada. Cette même année, les exportations énergétiques, dont 90 % ont été envoyées aux États-Unis, représentaient à elles seules plus de 27 % des exportations totales du Canada (Ressources naturelles Canada, 2013b). La production d'énergie primaire du Canada est dominée par le pétrole brut et le gaz naturel (figure 6). L'Alberta est de loin le plus gros producteur d'énergie primaire au Canada (figure 7).

De nombreux éléments de l'offre, du transport et de la demande d'énergie sont vulnérables aux changements climatiques et seront touchés par divers aspects de ces changements, notamment la hausse des températures, les changements de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes et les changements qui ont une incidence sur la disponibilité de l'eau (figure 8). Cependant, à l'exception du sous-secteur de l'hydroélectricité, l'adaptation aux changements climatiques dans le secteur de l'énergie a fait l'objet d'une attention bien moindre de la part de l'industrie et des chercheurs que les questions portant sur les mesures d'atténuation des gaz à effet de serre (Wilbanks *et al.*, 2007; ICF Marbek, 2012).

5.1 DEMANDE D'ÉNERGIE

Les changements relatifs à la population, à l'activité économique, aux prix de l'énergie et à l'efficacité énergétique sont ceux qui influent principalement sur les tendances à long terme de la demande d'énergie (AIE, 2011a; Ressources naturelles Canada, 2011b). Au Canada et ailleurs dans le monde, les changements climatiques entraîneront une diminution de la consommation d'énergie pour le chauffage en hiver et une augmentation de la demande pour la climatisation en été (lorsque les autres facteurs demeurent constants, p. ex., Zmeureanu et Renaud, 2008 ; Isaac et van Vuuren, 2009 ; Schaeffer *et al.*, 2012). Le résultat annuel net associé à la modification de la demande d'énergie causée par les changements climatiques sera propre à chaque pays et à chaque région (Schaeffer *et al.*, 2012).

La demande réduite en chauffage aura principalement un effet sur les combustibles, comme le gaz naturel et le mazout de chauffage, tandis que la demande accrue en climatisation augmentera la consommation d'électricité, soit la principale source d'énergie pour refroidir une pièce (Wilbanks *et al.*, 2007). Ces effets se feront principalement sentir dans les secteurs résidentiels et commerciaux (Mideksa et Kallbekken, 2010). La capacité de répondre à une charge de pointe plus élevée durant la période estivale, associée à la modification de la demande d'énergie causée par les changements climatiques, représente un défi considérable pour le secteur de l'énergie (ICF Marbek, 2012) et pourrait exiger des investissements importants dans de nouvelles capacités de production (Mills, 2007).

L'Ontario est la seule province où la charge de pointe annuelle actuelle survient en été (NERC, 2012). Alors que de récentes études continuent de démontrer que la demande en électricité en Ontario est vulnérable à la variabilité et aux changements de nature climatique et qu'on observe une tendance indiquant une hausse du nombre de jours de canicule dans plusieurs villes (*voir* le chapitre 7 – *Santé humaine*), l'ampleur des effets sur la demande en énergie peut ne pas être élevée (p. ex., Lin *et al.*, 2011). En outre, la charge de pointe dans cette province a considérablement diminué après avoir atteint des niveaux records entre 2004 et 2006 (IESO, 2009), ce qui semble indiquer que l'Ontario est peut-être moins vulnérable à ce type de changement que l'on ne le croyait auparavant. Même si l'on juge que le réseau électrique de l'Ontario dispose d'une marge de réserve suffisante pour demeurer fiable en cas de problèmes inattendus, y compris les phénomènes météorologiques extrêmes (NERC, 2012), le Commissaire à l'environnement de l'Ontario (2012) a demandé que l'on mène une évaluation approfondie à ce sujet afin de s'assurer de la fiabilité du réseau, malgré les changements climatiques.

L'influence potentielle des changements climatiques sur le commerce de l'électricité entre le Canada et les États-Unis est reconnue (p. ex., Scott et Huang, 2007; Hamlet *et al.*, 2009; Ouranos, 2010), mais il n'existe aucune analyse quantitative à ce sujet. On prévoit que la demande d'électricité en période estivale augmente aux États-Unis en raison des changements climatiques, mais il reste à déterminer si les entreprises canadiennes de services publics seront en mesure de saisir cette occasion d'exporter puisqu'elles feront également face à une demande intérieure plus élevée pendant l'été (Scott et Huang, 2007).

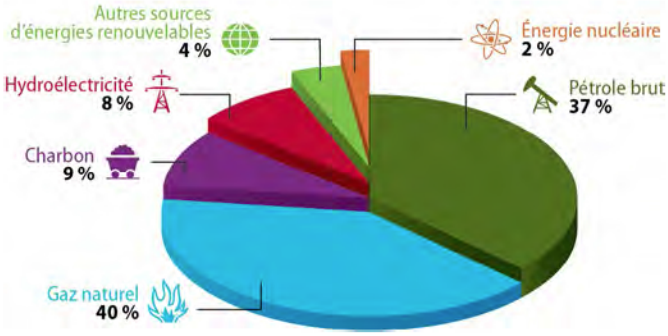


FIGURE 6 : Production d'énergie primaire au Canada. Tous les chiffres renvoient à la production de 2010 *(source : Ressources naturelles Canada, 2012e).*

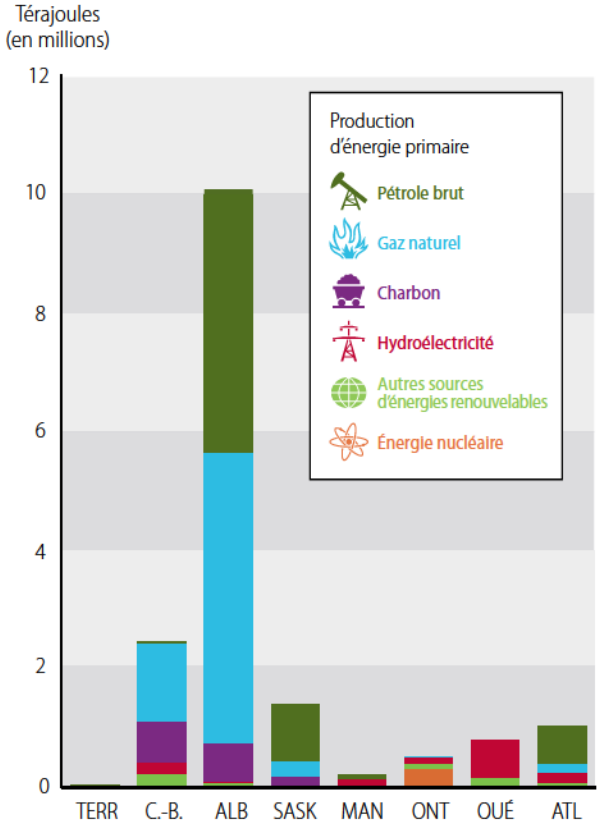


FIGURE 7 : Production d'énergie primaire par province (il convient de remarquer que les chiffres pour les Territoires du Nord-Ouest ont été combinés, tout comme ceux des quatre provinces de l'Atlantique; *données fournies* par Ressources naturelles Canada, 2012e)

ENCADRÉ 2

PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA TERMINOLOGIE DE L'ÉNERGIE

Secteur de l'énergie – industries qui participent à la production, la transformation et le transport d'énergie (Ressources naturelles Canada, 2012e).

Source d'énergie – toute substance qui produit de la chaleur ou de la puissance (*extrait modifié tiré* de Ressources naturelles Canada, 2011b).

Énergie renouvelable – énergie tirée de ressources naturelles pouvant être naturellement reconstituées ou renouvelées au cours de la durée de vie d'un être humain (Ressources naturelles Canada, 2012f).

Énergie non renouvelable – énergie produite à partir de ressources limitées qui finiront par s'appauvrir ou dont l'extraction se fera plus coûteuse ou difficile. Ces ressources comprennent le pétrole brut et des produits pétroliers, le gaz naturel, le charbon et l'uranium (*extrait modifié tiré* de Ressources naturelles Canada, 2012g).

Énergie primaire – énergie qui n'a pas encore été transformée (*extrait modifié tiré* de OCDE, 2012).

Énergie secondaire – énergie produite par la conversion d'énergies primaires, par exemple l'électricité produite à partir du gaz, de l'énergie nucléaire, du charbon ou du pétrole, le mazout et l'essence produits à partir de l'huile minérale.

Production d'énergie primaire – énergie primaire produite dans un pays, y compris celle qui sera exportée (*extrait modifié tiré* de Ressources naturelles Canada, 2011b).

Charge de pointe – charge maximale consommée ou produite par une unité ou un groupe d'unités durant une période donnée (quotidienne, mensuelle ou annuelle). Étant donné que l'électricité ne peut habituellement pas être stockée, une certaine capacité de production doit être en place pour répondre à la demande en période de pointe (*extrait modifié tiré* de ONE, 2004).

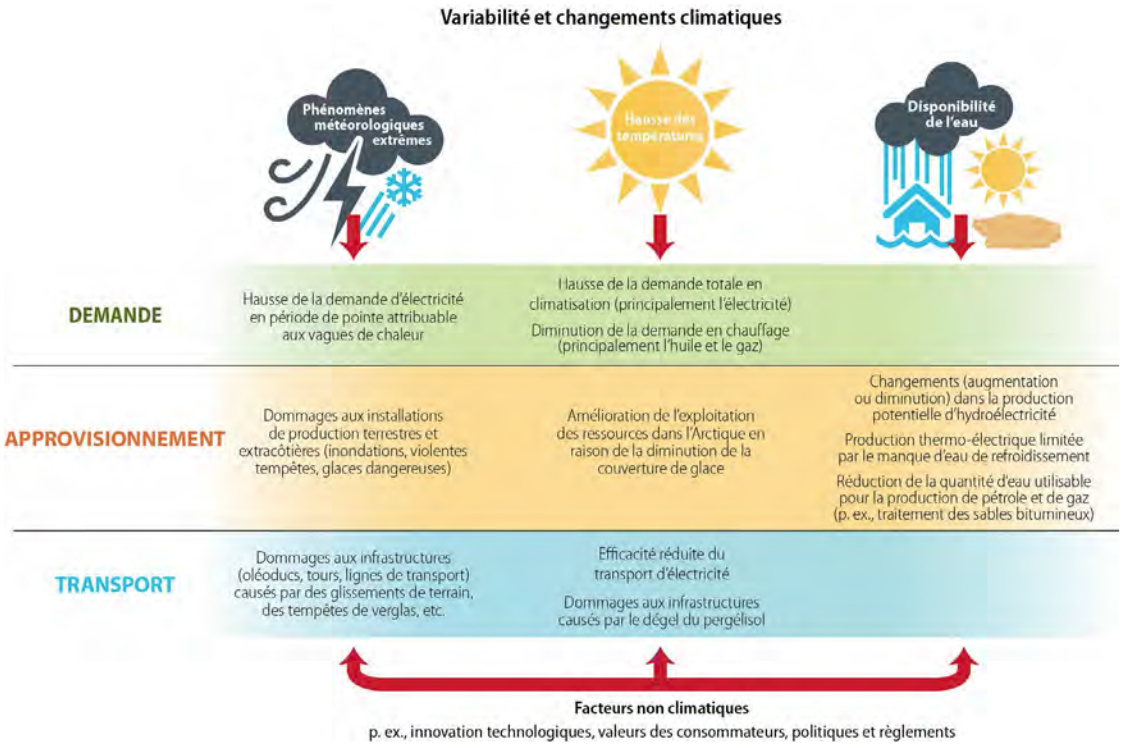


FIGURE 8 : Principaux effets des changements climatiques sur le secteur de l'énergie, en tenant compte de l'importance des facteurs de nature non climatique dans le choix des mesures en matière d'adaptation.

ADAPTATION

Les mesures visant à réduire la consommation d'électricité future comprennent des programmes et des normes, qui favorisent l'efficacité énergétique dans les immeubles, les appareils et l'équipement (Geller *et al.*, 2006), et des pratiques de conservation de l'énergie tels les dispositifs d'ombrage contrôlés par l'utilisateur, l'amélioration de la ventilation naturelle ou l'endurance d'une température plus élevée à l'intérieur pendant l'été (Levine *et al.*, 2007; Gupta et Gregg, 2012). Des augmentations prévues de l'utilisation des appareils de climatisation et de leur pénétration sur le marché en raison des changements climatiques semblent indiquer qu'il serait particulièrement profitable d'en améliorer leur efficacité (Scott *et al.*, 2008). Le concept de réseau intelligent, dont l'objet consiste à accroître la coordination des réseaux électriques afin de répondre aux changements de l'offre et de la demande, peut également représenter une mesure d'adaptation importante, puisqu'elle maximise la fiabilité et la stabilité du réseau (Newsham *et al.*, 2011; Lilley *et al.*, 2012). La mise en place d'un réseau intelligent à grande échelle offre la possibilité de maintenir la charge de pointe actuelle en Amérique du Nord jusqu'en 2050 (AIE, 2011b). Des mesures d'aménagement urbain qui atténuent les effets des îlots thermiques peuvent également aider à réduire la demande en climatisation (Smith et Levermore, 2008; Xu *et al.*, 2012). Toutes ces mesures offrent des avantages sur le plan de l'adaptation et certaines peuvent contribuer à atteindre d'autres objectifs stratégiques tels que la compétitivité économique, la sécurité en matière d'énergie, la santé et le bien-être, ou être déclenchées par ces facteurs (p. ex., Levine *et al.*, 2007; Sathaye *et al.*, 2007; Ürge-Vorsatz et Tirado Herrero, 2012).

5.2 SOURCES D'ÉNERGIE

L'approvisionnement du Canada en énergie provient de sources renouvelables et non renouvelables. La plupart des sources d'énergie renouvelable (p. ex., hydroélectricité, énergie éolienne et solaire, et biomasse) sont intrinsèquement sensibles aux variations et aux changements de nature climatique, tandis que les sources d'énergie non renouvelables (p. ex., pétrole, gaz naturel, uranium et charbon) sont, de par leur nature, moins vulnérables. Or, les changements climatiques ont un effet sur l'approvisionnement en énergie dérivée de toutes les sources lorsqu'on considère l'ensemble du processus, des étapes de l'exploration à celles de la mise en valeur et de la distribution. Augmenter la diversité des sources d'énergie, en utilisant différentes sources d'énergie renouvelable et non renouvelable et de nombreuses sources du même type d'énergie, peut améliorer la résistance de l'approvisionnement énergétique.

5.2.1 ÉNERGIE RENOUVELABLE

Les sources d'énergie renouvelables fournissent environ 12 % de l'approvisionnement total en énergie primaire au Canada, l'hydroélectricité étant de loin la source d'énergie renouvelable la plus importante (Ressources naturelles Canada, 2012e).

HYDROÉLECTRICITÉ

À l'heure actuelle, l'hydroélectricité représente 59 % de la production d'électricité au Canada (Statistique Canada, 2013). Plus de 90 % de la production totale d'électricité au Québec, en Colombie-Britannique, au Manitoba et à Terre-Neuve-et-Labrador provient des centrales hydroélectriques. L'Ontario, l'Alberta et le Nouveau-Brunswick produisent aussi d'importantes quantités d'hydroélectricité, alors que le Yukon et les Territoires du Nord-Ouest en dépendent pour répondre à la demande locale. La majeure partie de l'hydroélectricité produite au Canada provient de grandes centrales à réservoir (figure 9), alors que la capacité supplémentaire est fournie par de petites centrales au fil de l'eau. Les marchés transfrontaliers de l'électricité, tant interprovinciaux qu'internationaux (États-Unis) sont vastes. La disponibilité de sources abondantes d'énergie hydroélectrique permet au Canada d'appuyer les industries énergivores, comme les alumineries (*voir* l'étude de cas 6).

À ce jour, la plupart des recherches canadiennes portant sur les changements climatiques et l'hydroélectricité ont porté sur les conséquences hydrologiques des changements climatiques telle

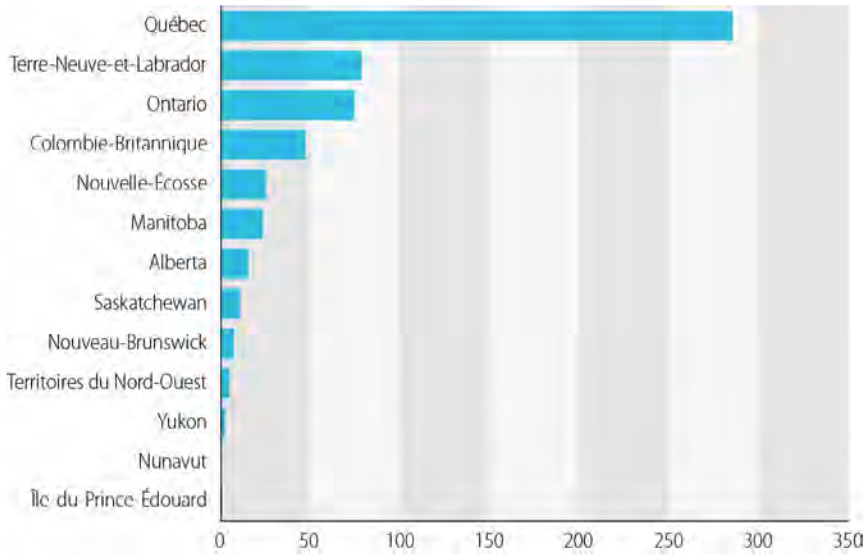


FIGURE 9 : Grands barrages (supérieurs à 15 m) conçus pour alimenter les réservoirs hydroélectriques au Canada *(source : Global Forest Watch, 2012)*.

la modification de la périodicité et de l'ampleur des débits d'eau. Les projections climatiques et les modèles hydrologiques indiquent une diminution probable des débits d'été, une augmentation des débits d'hiver, une diminution des niveaux de l'eau au printemps et un changement de la périodicité des débits de pointe dans la plupart des bassins hydrographiques au Canada, causés en grande partie par une augmentation de la fréquence des pluies hivernales et une réduction de la quantité de neige (p. ex., Fortin *et al.*, 2007; Boyer *et al.*, 2010; Rodenhuis *et al.*, 2011; Kienzle *et al.*, 2012). L'ampleur des changements prévus varie considérablement d'une région à l'autre, de même qu'au sein d'un bassin hydrographique. Dans certaines régions, comme dans le nord du Québec, l'augmentation du ruissellement annuel moyen (figure 10) pourrait présenter des avantages aux centrales de production hydroélectrique établies. Cependant, une plus grande variabilité hydrologique associée aux changements climatiques augmentera probablement le risque de débordements (débit non productif), surtout en hiver et au printemps pendant la fonte des neiges, dont les incidences les plus importantes se feront sentir au niveau des centrales au fil de l'eau (p. ex., Minville *et al.*, 2010b).

D'importantes différences se produiront dans les bassins hydrographiques où l'on produit de grandes quantités d'électricité (*voir* le tableau 4). Même dans les scénarios où l'on projette une augmentation des précipitations moyennes annuelles, une hausse de l'évaporation et de l'évapotranspiration peut contribuer à réduire les niveaux d'eau et nuire à la production d'hydroélectricité (p. ex., Buttle *et al.*, 2004). Une augmentation des pluies hivernales pourrait être source de problèmes dans les bassins dont la capacité de stockage du réservoir est limitée (p. ex., Fortin *et al.*, 2007; Shrestha *et al.*, 2012). Dans les rivières alimentées par les glaciers, des changements au niveau du régime d'écoulement auront une incidence sur les débits à la fin de l'été et à l'automne. Par exemple, l'étendue du glacier dans le bassin du fleuve Columbia, en Colombie-Britannique, devrait être réduite de 40 % d'ici 2060 (Jost *et al.*, 2012). Dans le nord du Canada, l'intégration des modèles sur le pergélisol et des modèles hydrologiques s'impose si l'on veut accroître le niveau de compréhension au sujet des répercussions possibles sur la production d'hydroélectricité dans cette région (Goulding, 2011).

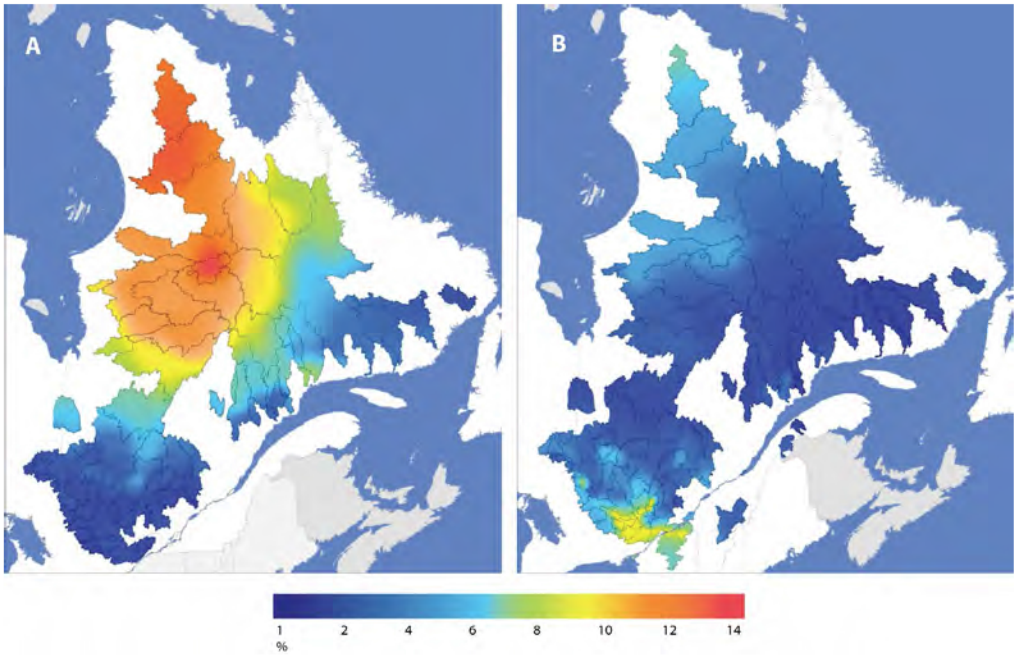


FIGURE 10 : Ruissellement annuel dans les bassins hydrologiques du Québec: **a)** augmentation moyenne entre 2040 et 2070 comparativement au taux de ruissellement enregistré entre 1961 et 1990; **b)** écart-type pour le changement au niveau du ruissellement. L'augmentation moyenne est statistiquement significative lorsqu'elle dépasse les incertitudes liées aux projections, représentées par l'écart-type (*tiré de* Desrochers *et al.*, 2009)

Province	Bassin fluvial	Importance	Méthode – observations / modèles/ hypothèses	Tendances climatiques et projections	Principales références
Colombie-Britannique	Cours supérieur du fleuve Columbia	• 12 centrales hydroélectriques • Les barrages de Mica et de Revelstoke produisent 25 % des besoins de la C.-B. en hydroélectricité	• Période de référence 1961–1990 • Période ultérieure 2041–2070 • Scénarios : A1B, A2, B1 • 8 modèles climatiques mondiaux	• Augmentation générale du débit sauf à la fin de l'été et à l'automne • Débit de pointe un mois plus tôt (en juin plutôt qu'en juillet)	Zweirs *et al.*, (2011); Shrestha *et al.*, (2011)
Colombie-Britannique	Cours supérieur de la rivière de la Paix	• 2 centrales • La centrale G.M. Shrum (barrage W.A.C. Bennett) et le barrage de Peace Canyon produisent 29 % des besoins de la C.-B. en hydroélectricité		• Jusqu'à 12 % d'augmentation du débit annuel, plus forte hausse en hiver • Diminution des débits à la fin de l'été et à l'automne • Les inondations printanières ne surviennent pas beaucoup plus tôt	Zweirs *et al.*, (2011); Shrestha *et al.*, (2011)
Colombie-Britannique	Fleuve Fraser	• 63 % de la population de la C.-B. vivent à proximité • Deux tributaires importants pour la production d'hydroélectricité, plusieurs centrales plus petites		• Augmentation du débit annuel total • Diminution du débit annuel maximum • Inondations printanières qui surviennent plus tôt	Shrestha *et al.*, (2012)
Colombie-Britannique	Rivière Campbell	• Barrage Strathcona – plus grande centrale de l'île de Vancouver		• Débit moyen constant • Augmentation du débit hivernal, réduction des débits au printemps et à l'été	Zweirs *et al.*, (2011)
Alberta	Rivière Cline	• Tributaire qui fournit 40 % du débit de la rivière Saskatchewan nord • En amont du barrage Bighorn, TransAlta est la centrale hydroélectrique la plus productive	• Période de référence 1961–1990 • Périodes ultérieures 2010–2039, 2040–2069 et 2070–2099 • Scénarios : A1B, A2, B1 • 5 modèles climatiques mondiaux	• Diminution des débits annuels – 25 % d'ici 2020, 30 % d'ici 2080 • Les débits de pointe surviendront un mois plus tôt d'ici 2050	Kienzle *et al.*, (2012)
Manitoba	Winnipeg	• Influence directement ou indirectement la production de 4600 MW	• Période d'observation de l'écoulement fluvial 1924-2003 • 9 stations de jaugeage	• Tendance historique (80 ans) d'augmentation des débits à l'été et à l'automne	St. George (2007)
Ontario	Nipigon, Abitibi, Matagami	• Considérés comme étant des bassins prioritaires par la Ontario Power Generation	• Période de référence 1961-1990 • Période ultérieure 2041-2070 • 24 modèles climatiques régionaux. • 4 modèles climatiques mondiaux • Scénarios A2 et A1B	• Diminution du débit à l'été (de juin à octobre) et augmentation du débit en hiver (de décembre à mars)	Music et Sykes (2011)
Québec	Au nord du 49e parallèle	• La plupart des grandes centrales hydroélectriques de la province se trouvent dans cette région	• Période de référence 1961–1990 • Période ultérieure 2041–2070 • 2 modèles climatiques régionaux • 14 modèles climatiques mondiaux	• Augmentation statistiquement significative du ruissellement moyen annuel entre 2040 et 2070 (voir la figure 10)	Desrochers *et al.*, (2009)

TABLEAU 4 : Conclusions tirées d'études récentes relatives aux effets hydrologiques sur les bassins fluviaux d'importance pour la production hydroélectrique au Canada.

Bien que les conclusions des études résumées dans le tableau 4 montrent qu'il n'y aura aucun changement ou augmentation du débit annuel total, il est néanmoins essentiel d'adapter les activités hydroélectriques aux changements climatiques (*voir* l'étude de cas 6). Même si une augmentation du débit pourrait s'avérer être bénéfique, cela peut aussi causer des inondations si les réservoirs ne sont pas gérés adéquatement. Plus important encore, les effets climatiques prévus entraînent presque toujours des changements considérables dans la répartition du débit en cours d'année, ce qui constitue un défi pour la plupart des activités de gestion des barrages et des réservoirs les plus récents. Par exemple, les réservoirs sont maintenus au niveau le plus bas pendant l'hiver afin d'entreposer l'eau de fonte au printemps. En raison de l'augmentation des débits d'hiver et du fait que les débits printaniers surviennent plus tôt et sont moins élevés, une nouvelle stratégie pourrait recommander d'entreposer de l'eau pendant tout l'hiver, afin d'atténuer les effets des débits réduits en été.

Les récentes recherches vont au-delà des analyses hydrologiques pour devenir des analyses multicritères qui tiennent compte des aspects économiques, politiques, sociaux et environnementaux, afin d'analyser les mesures d'adaptation potentielles ainsi que les coûts et les avantages connexes (Webster *et al.*, 2008). Dans quelques études publiées récemment (p. ex., Raje et Mujumdar, 2010; Soito et Freitas, 2011; Georgakakos *et al.*, 2012), on examine comment les stratégies d'adaptation mises en place dans l'industrie hydroélectrique peuvent intégrer les perspectives des multiples utilisateurs des ressources en eau et l'évolution des demandes en ressources. La gestion adaptative est un puissant moyen de faire face aux conflits liés à l'eau et peut offrir un rendement plus fiable que les approches de gestion traditionnelle tout en atténuant de manière significative les effets négatifs liés aux changements climatiques (Georgakakos *et al.*, 2012). Cette approche peut comprendre une analyse de risques et la réoptimisation des règlements applicables aux activités du réservoir afin d'être en mesure de tenir compte de la variabilité et de l'incertitude des prévisions relatives aux intrants hydrologiques (Georgakakos *et al.*, 2012; *voir* l'étude de cas 6).

Les méthodes d'adaptation applicables à la production hydroélectrique peuvent comporter des approches structurelles et non structurelles. Les approches structurelles consistent en des modifications physiques qui sont apportées aux infrastructures et aux biens dans le but d'atténuer leur vulnérabilité aux conditions climatiques, alors que les approches non structurelles (ou souples) comportent des modifications apportées au fonctionnement du système énergétique. On compte parmi les mesures structurelles le renforcement de la capacité des centrales actuelles et la révision des critères de conception des nouvelles centrales. L'augmentation de la capacité actuelle des centrales devrait permettre une réduction des débits non productifs. Cependant, cette approche peut s'avérer coûteuse à mettre en œuvre, voire même impossible sur le plan technique, dans les centrales actuelles qui n'ont pas été conçues en fonction d'une augmentation éventuelle de leur capacité. Les coûts de construction et d'entretien, ainsi que les avantages qui découlent d'une hausse de la production hydroélectrique, doivent être pris en considération au moment où il s'agit d'établir les avantages que peut présenter l'adoption d'approches structurelles (Webster *et al.*, 2008; Beauchamp, 2010).

Le recours aux méthodes de gestion des ressources en vue de s'adapter aux changements hydrologiques, de même que les réformes stratégiques ou réglementaires, constituent des exemples d'approches non structurelles. Des études en cours révèlent qu'en tenant compte de la variabilité saisonnière des débits et de l'incertitude des projections hydrologiques, on pourrait élaborer des mécanismes de gestion susceptibles d'accroître la production hydroélectrique (Haguma, 2012). Par exemple, Côté *et al.* (2011) ont démontré que l'application de scénarios climatiques variés permettait d'accroître l'efficacité des centrales, comparativement aux méthodes classiques qui se fondent uniquement sur les conditions climatiques actuelles (habituellement recommandées et utilisées pour établir un règlement concernant la gestion des réseaux hydroélectriques). Les mesures d'adaptation non structurelles englobent aussi la protection ou le rétablissement des régulateurs de débit naturel telles les zones humides, dont le rôle consiste à offrir un pouvoir tampon pendant les périodes de faibles débits et de pointe (p. ex., Jones *et al.*, 2012).

AUTRES SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

Les sources d'énergie renouvelable de remplacement (non hydroélectriques) comptent pour près de 4 % de la production d'énergie primaire du Canada. La source principale provient du bois et des déchets de bois et, dans une moindre mesure, du biogaz, du vent, des gaz dégagés par les résidus urbains et les sites d'enfouissement, des déchets industriels et autres, ainsi que de sources solaires et marémotrices. Peu d'études canadiennes examinent les effets des changements climatiques sur ces sources d'énergie (voir Yao *et al.*, 2012, pour une analyse des effets des changements climatiques projetés sur la production éolienne en Ontario).

Les recherches menées à l'extérieur du Canada se sont plutôt axées sur les effets des phénomènes météorologiques extrêmes, y compris le vent et les précipitations, sur la production d'énergie renouvelable de remplacement (Wilbanks *et al.*, 2007; Ebinger et Vergara, 2011; McColl *et al.*, 2012). Par exemple, s'il advient que la vitesse des vents dépasse les valeurs de conception maximales des turbines, l'équipement risque d'être endommagé ou encore, il faudra peut-être interrompre les activités, ce qui provoquera une baisse au niveau de l'efficacité de la capacité de production (Ebinger et Vergara, 2011; McColl *et al.*, 2012). Une hausse des températures moyennes de l'air au-delà d'un certain seuil a un effet négatif sur le vent (baisse de la densité de l'air) et sur la production d'énergie solaire (diminution de l'efficacité des panneaux; Ebinger et Vergara, 2011), mais l'ampleur de ces effets n'est pas connue. Les changements survenant au niveau de la nébulosité et des régimes éoliens auront également une incidence, négative ou positive selon l'évolution des changements, sur la production d'énergie solaire et éolienne. L'évaluation des répercussions des changements climatiques sur la production d'énergie à partir du vent, du soleil et de la biomasse au Canada exige des recherches complémentaires.

5.2.2 ÉNERGIE NON RENOUVELABLE

PÉTROLE ET GAZ

L'industrie pétrolière et gazière exploite ses installations partout au Canada. Le caractère isolé de la plupart de ses activités, y compris les sites situés en milieu nordique et extracôtier, présente des défis pour la chaîne de valeur du secteur. Les documents d'origine canadienne portant sur les effets des changements climatiques sur ce secteur mettent à la fois l'accent sur les risques qu'ils posent

ÉTUDE DE CAS 6

FAIRE FACE AUX EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES GRÂCE À LA GESTION ADAPTATIVE : PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA

Dans leurs rapports, Minville *et al.* (2008, 2009, 2010b et 2012) ont entrepris une analyse exhaustive de la production hydroélectrique sur la rivière Péribonka, dans le centre-sud du Québec. Le bassin hydrographique couvre 27 000 km² et le ruissellement est régi par la fonte des neiges; la fonte printanière produit 43 % du volume de ruissellement annuel. Les installations hydroélectriques actuelles comprennent deux réservoirs (lac Manouane et Passes-Dangereuses) qui permettent d'entreposer de l'eau et d'alimenter les centrales hydroélectriques (figure 11). L'électricité ainsi produite sert à combler les besoins des alumineries de la Rio Tinto Alcan.



FIGURE 11 : Bassin hydrographique et système hydrologique de la rivière Péribonka *(source : Minville et al., 2010a)*.

L'analyse des répercussions des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin hydrographique de la rivière Péribonka s'est faite à l'aide de prévisions de températures et de précipitations élaborées à partir des données provenant de cinq modèles climatiques mondiaux et de trois scénarios d'émissions réduits à l'échelle du bassin, ainsi que du modèle régional canadien du climat (MRCC; Caya et Laprise, 1999), le but étant de reproduire les régimes hydrologiques en fonction des conditions climatiques actuelles et projetées. Les résultats révèlent une crue printanière hâtive, une augmentation des débits d'hiver et une diminution des débits en été et à l'automne en raison des changements climatiques. Ces changements sont accentués au fil du temps et varient entre les sous-bassins du nord et du sud (figure 12). L'incertitude pesant sur ces prévisions est en grande partie liée aux changements dans la couverture nivale, qui sont effectivement plus importants pendant les inondations hivernales et printanières.

L'analyse prévoyait également l'élaboration de politiques de gestion optimales applicables aux réservoirs du réseau en stimulant et en évaluant son rendement en fonction des conditions climatiques actuelles et projetées. Les résultats de la modélisation indiquent des niveaux d'eau plus élevés au printemps dans le lac Manouane pour toutes les périodes qui ont été comparées à la période de référence (figure 13). On observe aussi une baisse du niveau d'eau estival du lac Manouane d'ici 2070-2099, étant donné la diminution du débit entrant et la nécessité de maintenir le réservoir de Passes-Dangereuses à son niveau le plus élevé afin de maximiser la production hydroélectrique. Le comportement du réservoir de Passes-Dangereuses est semblable à celui du lac Manouane, sauf que le changement en période de décrue est plus marqué dans le réservoir, en raison du fait que les inondations printanières surviennent plus tôt.

Étude de cas 6 suite à la page suivante

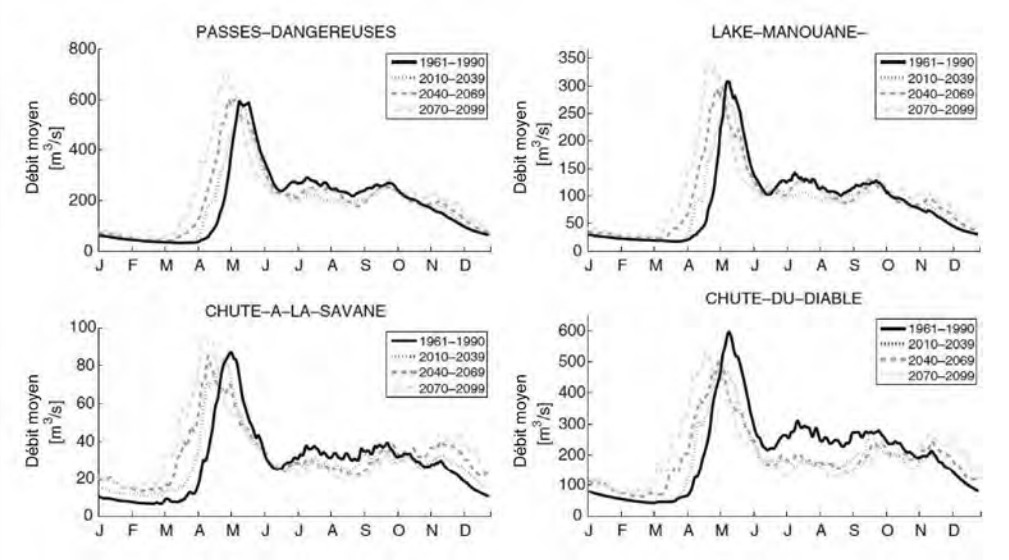


FIGURE 12 : Hydrogrammes annuels moyens des sous-bassins de la rivière Péribonka pour les périodes 2010–2039, 2040–2069 et 2070–2099, comparés aux hydrogrammes de la période de référence 1961–1990, reproduits à l'aide des projections du modèle régional canadien du climat tenant compte des émissions de gaz à effet de serre du scénario SRES A2 *(tiré de Minville et al., 2009)*.

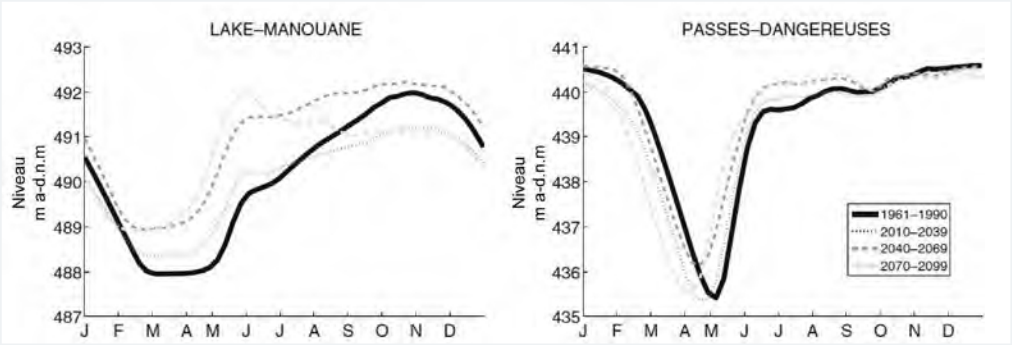


FIGURE 13 : Niveaux du réservoir pendant les périodes 2010–2039, 2040–2069 et 2070–2099, comparés aux niveaux de la période de référence 1961–1990 *(tiré de Minville et al., 2009)*.

Toutes les prévisions climatiques font état d'une éventuelle augmentation du ruissellement annuel, ce qui signifie que la production hydroélectrique devrait augmenter. À la centrale de Chute-des-Passes, cette augmentation pourrait aller de 1 % à 15 % au cours de la période s'étendant de 2040 à 2069, selon le scénario appliqué et en supposant une gestion optimale. Par contre, si les politiques de gestion actuelles ne changent pas, la production hydroélectrique diminuerait de 1 % à 14 %, étant donné l'incapacité à entreposer l'eau produite par la fonte précoce des neiges et l'écoulement non productif qu'elle entraîne. En adoptant des pratiques de gestion adaptative et des approches d'adaptation non structurelles, notamment la mise à jour régulière des politiques de gestion, les producteurs devraient être en mesure de tirer parti des répercussions des changements climatiques sur les régimes hydrologiques.

pour les activités en amont et les possibilités qu'ils représentent pour ces dernières (p. ex., exploration, extraction et production), et mettent particulièrement l'accent sur la situation dans le Nord (p. ex., Furgal et Prowse, 2008). Parmi les risques relevés, on souligne le raccourcissement de la période pendant laquelle il est possible d'accomplir les activités d'exploration qui dépendent du gel du sol et le transport de matériel par routes d'hiver. Les risques à plus long terme des répercussions des changements climatiques sur les projets en milieu nordique sont liés aux conséquences de la dégradation du pergélisol sur la stabilité de l'infrastructure (p. ex., effondrement du sol qui a des conséquences sur les routes d'accès, les immeubles et les oléoducs) et sur la gestion des déchets de forage (qui sont couramment stockés dans le sol gelé en permanence afin de prévenir la mobilisation des contaminants; Furgal et Prowse, 2008). Les risques auxquels les installations de production extracôtières devront faire face sont liés à la hausse de l'activité des tempêtes (y compris les ouragans dans l'océan Atlantique), aux changements au chapitre des risques que présente la glace (icebergs et glace de mer pluriannuelle; p. ex., Stantec Consulting Ltd., 2012) et aux incidences potentielles sur l'environnement et sur la santé humaine que représentent les déversements de pétrole (p. ex., ONE, 2011).

L'industrie pétrolière et gazière a régulièrement recours à des moyens concrets pour aborder la question des risques climatiques, mais ceux-ci sont rarement documentés dans des sources de données disponibles au public. Les preuves, lorsqu'elles sont disponibles, indiquent que, de manière générale, l'industrie croit que le secteur est en bonne position pour s'adapter aux changements climatiques, surtout de manière opportune (TRNEE, 2012a, *voir aussi* l'étude de cas 7).

Les recherches menées au cours des cinq dernières années démontrent que l'effet des changements climatiques sur les ressources hydriques aura de graves incidences sur le secteur pétrolier et gazier (p. ex., Projet de recherche sur les politiques, 2009). Bon nombre d'activités menées en amont et médianes (comme la transformation, la valorisation, le stockage et le transport) associées à la production de pétrole, de gaz et de charbon nécessitent de grandes quantités d'eau et, contrairement à la production de thermoélectricité, elles comprennent presque exclusivement des utilisations liées à la consommation (Ressources naturelles Canada, 2010). Les effets régionaux se feront surtout sentir dans les zones fortement soumises au stress hydrique tel le sud-ouest des Prairies (p. ex., Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). Récemment, l'attention a porté sur l'utilisation des ressources hydriques aux fins d'exploitation des sables bitumineux et de fracturation hydraulique.

Même si 75 % à 90 % de l'eau utilisée dans l'exploitation des sables bitumineux est recyclée, le reste est puisé à même les eaux de surface et souterraines. En ce qui a trait aux effets des changements climatiques, l'attention s'est portée sur la capacité de la rivière Athabasca, en Alberta, à fournir de l'eau pour accroître les activités d'exploitation des sables bitumineux, tout en maintenant un débit suffisant en aval pour éviter des répercussions sur l'écosystème. L'analyse de la variabilité des données historiques des débits et des tendances a permis de conclure que des répercussions à court terme sur l'écosystème auraient eu lieu dans des conditions historiques de faible débit et qu'un plan de gestion s'impose afin d'éviter les effets à long terme prévus par les scénarios de changements climatiques (Bruce, 2006; Schindler *et al.*, 2007). Un comité d'experts de la Société royale du Canada (SRC, 2010) a conclu que les inquiétudes au sujet des prélèvements d'eau pendant les périodes à faible débit pourraient être atténuées en aménageant un réservoir hors cours d'eau supplémentaire qui permettrait de stocker l'eau captée pendant les débits de pointe printaniers. Dans son rapport, le comité indique « qu'une diminution substantielle du débit dans la rivière Athabasca découlant des changements climatiques entraînerait fort probablement la mise en œuvre de cette option (réservoir hors cours d'eau supplémentaire) [traduction] » (SRC, 2010, p. 284). Une analyse détaillée des répercussions des changements climatiques projetées sur les débits de la rivière Athabasca, menée dans le cadre d'une étude sur les prélèvements d'eau réalisée par un comité multilatéral (Ohlson *et al.*, 2010; *voir aussi* Lebel *et al.*, 2009), a permis de conclure que les incertitudes et les lacunes considérables qui subsistent au niveau de l'état des connaissances à ce sujet, et bien d'autres d'ailleurs, mettaient en lumière l'importance d'adopter des approches de gestion adaptative et variable.

Pour s'adapter aux risques liés à la disponibilité de l'eau, l'industrie des sables bitumineux mise sur les innovations technologiques et souligne les gains importants réalisés en matière d'utilisation efficace de l'eau au cours des dix dernières années (CAPP, 2012). Bien que le réservoir hors cours d'eau demeure une possibilité sur le plan de l'adaptation, des changements fondamentaux apportés aux méthodes employées pour séparer le bitume grâce à des moyens permettant de réduire considérablement la consommation d'eau sont également à l'étude (CAPP, 2012). Du point de vue réglementaire, le Water Management Framework for the Lower Athabasca River (cadre de gestion du cours inférieur de la rivière Athabasca), présenté par le gouvernement de l'Alberta en 2007 pour limiter, contrôler et régler les prélèvements d'eau hebdomadaires dans la rivière, fournit un mécanisme qui protège l'intégrité du milieu dans les conditions climatiques aussi bien actuelles que futures (ESRD, 2013).

PRODUCTION D'ÉNERGIE (À PARTIR DE SOURCES NON RENOUVELABLES)

L'énergie nucléaire représente 15 % et les centrales thermiques alimentées au charbon produisent 13 % de la production d'électricité au Canada (Statistique Canada, 2013). Les effets des changements climatiques les plus préoccupants qui toucheraient la production d'électricité à partir de sources non renouvelables sont liés aux répercussions possibles des phénomènes météorologiques extrêmes sur les infrastructures et à celles sur la disponibilité et la température des eaux de refroidissement (p. ex., Wilbanks *et al.*, 2008; Rübbelke et Vögele, 2011). Même si les données exhaustives sur les installations canadiennes sont publiquement disponibles en consultant les observations des audiences réglementaires, elles n'ont pas été largement diffusées dans les articles scientifiques. La discussion suivante s'appuie en grande partie sur les analyses menées en Europe et aux États-Unis.

La discussion sur les risques liés aux infrastructures des centrales porte surtout sur les tempêtes intenses et les épisodes de précipitations extrêmes, phénomènes pouvant soit causer des inondations ou rendre les routes impraticables, soit entraîner une diminution au niveau de la production, une interruption des activités ou une hausse des coûts associés au drainage et au nettoyage (Wilbanks *et al.*, 2007; Ebinger et Vergara, 2011). Les centrales thermiques et nucléaires font également face à la possibilité d'avoir à réduire leur production ou même d'interrompre complètement leurs activités si les niveaux d'eau atteignent un niveau extrêmement bas (McColl *et al.*, 2012). Une augmentation de la température de l'eau diminue l'efficacité du refroidissement dans les centrales (Harrison *et al.*, 2009), entraînant une hausse proportionnelle de la demande en eau pour les procédés de refroidissement. Les recherches menées en Europe ont permis de documenter l'incapacité de répondre aux besoins des centrales thermiques en matière de refroidissement dans des conditions de températures élevées de l'eau pendant les vagues de chaleur estivale (McColl *et al.*, 2012). En outre, la température des eaux de refroidissement rejetées par les centrales pourrait augmenter, au risque de dépasser les seuils réglementaires établis dans le but de protéger les services écosystémiques. Les infractions aux règlements et à la sécurité

ÉTUDE DE CAS 7

ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE SECTEUR PÉTROLIER ET GAZIER

Le Carbon Disclosure Project (CDP, soit le projet de divulgation du carbone) est un effort déployé à l'échelle internationale dans le but d'assurer le suivi des progrès des entreprises au niveau de la gestion des risques et des occasions liés aux changements climatiques. Reposant sur les réponses données volontairement à une enquête annuelle ciblant les entreprises les plus importantes en fonction de leur capitalisation boursière, le CDP dispose d'une base de données exhaustive dont les réponses fournies par les entreprises remontent à 2003. Le projet met principalement l'accent sur l'atténuation, mais il pose aussi des questions relatives à l'adaptation. De récents rapports font état d'un changement dans la façon dont les industries canadiennes perçoivent les répercussions matérielles du changement climatique. Par exemple, on note que les occasions sont plus nombreuses que les risques découlant des changements climatiques dans les rapports du CDP sur le Canada parus entre 2008 et 2010 (CDP, 2010). Il est également évident que les secteurs ont une perception très différente en ce qui concerne les risques et les possibilités. De tous les secteurs représentés dans le CDP, les entreprises du secteur de l'énergie étaient probablement les moins susceptibles de signaler les occasions découlant des changements climatiques et se plaçaient au deuxième rang des entreprises les moins susceptibles de déclarer leur exposition aux risques matériels, selon l'analyse des réponses présentées dans les rapports publiés entre 2003 et 2010 (TRNEE, 2012b).

L'enquête de 2010 comprenait des questions sur les risques actuels ou prévus associés aux répercussions matérielles des changements climatiques, la chronologie de ces risques, les conséquences financières possibles et les mesures envisagées ou mises en œuvre pour gérer ces risques. Des exemples de mesures d'adaptation dégagées par les entreprises du pétrole et du gaz canadiennes en vue d'atténuer les risques climatiques actuels et à venir sont présentés dans le tableau 5.

Politique, programmes et normes d'exploitation internes
• Normes d'ingénierie et de construction qui garantissent le fonctionnement des installations dans des conditions extrêmes, y compris les changements liés à la température et au climat
• Processus d'approbation des capitalisations caractérisé par une évaluation de projet qui tient compte des risques techniques, environnementaux et opérationnels; le recensement et le partage des principales découvertes issues des projets d'immobilisations précédents; l'intégration de ces découvertes aux plans de gestion des risques opérationnels
• Programmes encourageant l'intégrité du système et l'entretien préventif continu pour chaque aspect du système gazier
• Plan de continuité des activités et de mesures d'urgence conçus dans le but d'assurer l'approvisionnement continu du carburant de transport
• Programme d'assurance qui couvre aussi bien les dommages matériels que l'interruption des activités et la responsabilité envers les tiers, et qui sert également à gérer les risques commerciaux découlant des dangers liés aux changements climatiques
Mesures pour renforcer la résilience
• Conception et utilisation d'assises en bois, afin que les producteurs puissent forer en saison chaude dans les fondrières de mousse et les zones humides tout en minimisant les perturbations sur le plan environnemental
• Interconnexion du système permettant de rediriger le gaz d'une usine à l'autre en cas de panne, minimisant du coup les pertes de revenus pour l'entreprise et la perte de production pour les consommateurs
• Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans la conception et l'exploitation des installations existantes et nouvelles, notamment la réutilisation et le recyclage accrus de l'eau, la réévaluation des allocations de permis d'exploitation en eau douce qui rapportent à l'État et une collaboration avec l'industrie ayant pour objet de réduire les répercussions au niveau des ressources hydriques locales
Participation des intervenants
• Stratégie de l'eau qui nécessite que les acteurs s'investissent dans l'élaboration des politiques et des règlements et qu'ils collaborent avec les intervenants en ce qui touche les questions hydrologiques particulières à un site comme moyen d'atténuer les effets possibles des changements climatiques

TABLEAU 5 : Exemples choisis de mesures adoptées en vue de gérer les effets matériels des changements climatiques dégagées par les entreprises du pétrole et du gaz canadiennes dans leurs réponses au questionnaire de 2010 du Carbon Disclosure Project *(source : CDP, 2010)*.

Le nombre limité de participants à l'enquête du CDP empêche toute généralisation à l'échelle du secteur, mais chaque réponse peut fournir des éclaircissements au sujet de la perception des entreprises du pétrole et du gaz par rapport aux risques et à l'urgence de s'adapter. Par exemple, dans sa réponse à l'enquête du CDP de 2012, la société Encana a cité les risques relatifs à la disponibilité de l'eau liés aux changements des précipitations et aux périodes de sécheresse, ainsi que les effets des phénomènes météorologiques extrêmes sur les activités d'exploration et de production. L'entreprise a jugé que les risques étaient difficiles à quantifier, que la chronologie et l'ampleur des effets n'étaient pas connues, et que la probabilité d'avoir à tenir compte de ces effets était peu vraisemblable. Dans les observations complémentaires, l'entreprise souligne qu'elle poursuit ses activités dans des milieux extrêmes variés en Amérique du Nord, que ses installations sont conçues et bâties de façon à pouvoir fonctionner dans diverses conditions météorologiques et qu'elle procède à un processus de rétrospective et d'apprentissage annuel qui lui permet de communiquer les mesures prises en vue d'atténuer les effets négatifs sur un site à l'ensemble des installations. En ce qui a trait aux risques liés à la disponibilité de l'eau, l'entreprise est d'avis que, du moment que ceux-ci sont gérés, ils auraient un effet négligeable sur les activités d'exploration et de production.

pourraient entraîner l'interruption des activités. Il se peut que de tels risques ne s'appliquent pas au Canada où les centrales nucléaires actuelles sont refroidies par de très grandes masses d'eau (lac Huron, lac Ontario, océan Atlantique). De toute façon, cela ne change en rien le fait que les répercussions des changements climatiques sont un facteur dont il faut tenir compte lorsqu'il s'agit d'identifier l'emplacement de futures centrales.

Les mesures mises en œuvre dans le but de s'adapter à la hausse des températures de l'eau dépendront en grande partie de la technologie de refroidissement actuellement déployée. Le système à eau de refroidissement non recyclée est le type de système le plus courant au Canada (Ressources naturelles Canada, 2010) et comporte une fonction de prélèvement et de rejet continu d'eau de refroidissement. Le déplacement de la prise d'eau vers une partie plus profonde (et plus froide) du lac compte parmi les options qui permettraient de diminuer la quantité d'eau utilisée dans les systèmes à eau de refroidissement non recyclée des installations riveraines. Lorsque les installations sont érigées sur des lacs peu profonds, comme c'est le cas dans la région des Prairies, les options pour faire face aux changements climatiques et aux périodes de sécheresse sont moins nombreuses. De nouvelles technologies servant à réduire la consommation d'eau, améliorer la réutilisation de l'eau et élaborer de nouvelles techniques de refroidissement à sec sont autant de possibilités novatrices qui seront en partie régies par la nécessité de s'adapter aux effets des changements climatiques (ICF Marbek, 2012).

5.3 TRANSPORT DE L'ÉNERGIE

L'infrastructure du transport de l'énergie représente un investissement important, durable et vulnérable aux conditions climatiques pour le secteur de l'électricité et le secteur pétrolier et gazier. Le réseau de transport de l'électricité couvre 140 000 km au Canada, et près de 60 % du total national est exploité au Québec, en Ontario et en Alberta. L'infrastructure fournit des interconnexions entre les marchés de l'énergie des autres provinces et aux États-Unis (ICF Marbek, 2012). Au total, plus de 825 000 km d'oléoducs de livraison et de transport achemine le pétrole brut, le gaz naturel et les produits pétroliers au Canada (CEPA, 2012). De grands projets de construction d'oléoducs ont été proposés en vue d'améliorer l'accès aux marchés canadiens et américains et de prendre de l'expansion sur les marchés asiatiques. Le réseau de distribution du pétrole, du gaz et du charbon comprend aussi le transport routier, ferroviaire, par barge et par navire-citerne.

Les conditions météorologiques violentes sont la principale cause d'interruption dans l'approvisionnement en électricité. La tempête de verglas qui a frappé l'est du Canada en 1998, dont le coût des dommages avait été estimé à plus de 5 milliards de dollars, fournit un exemple extrême de la vulnérabilité de l'infrastructure de transport de l'électricité. Les températures extrêmes peuvent avoir une incidence sur le rendement d'une grande partie de l'infrastructure, y compris le transport d'électricité (efficacité réduite et affaissement accru des câbles), les oléoducs (efficacité réduite des compresseurs et des ventilateurs de refroidissement) et les chemins de fer (déformation par la chaleur) qui jouent un rôle de premier plan dans le transport du charbon (ICF Marbek, 2012). Les dangers naturels liés au climat présentent également des risques pour le transport de l'énergie. Par exemple, les pluies diluviennes peuvent causer des inondations et des glissements de terrain pouvant interrompre le transport routier et ferroviaire. Le dégel du pergélisol peut provoquer l'affaissement en surface et la déstabilisation des pentes, et ainsi causer une déformation ou la rupture des oléoducs. Des solutions techniques existent pour atténuer la plupart des risques décrits ci-dessus.

6. SYNTHÈSE

Le secteur des ressources naturelles gère systématiquement les risques climatiques. S'adapter à la réalité des changements climatiques sert l'intérêt des entreprises du secteur des ressources naturelles et des collectivités au sein desquelles elles sont exploitées. À l'instar d'autres secteurs, le gouvernement, l'industrie et les organisations non gouvernementales ont tous un rôle à jouer en vue d'assurer l'adaptation dans le secteur des ressources naturelles. Étant donné que les administrations provinciales exercent un pouvoir législatif sur les ressources naturelles relevant de leurs compétences (BCP, 2010), diverses approches et divers niveaux d'activités sont mis en œuvre à l'échelle du pays. Les processus intergouvernementaux offrent un mécanisme grâce auquel il est possible de partager les expériences, les outils et la mise au point des pratiques exemplaires en matière d'adaptation telles que le démontrent les récentes activités du Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF, 2013a–d). Le gouvernement fédéral est responsable des questions pangouvernementales, y compris le commerce international, et joue un rôle important dans la recherche et le développement. Les associations industrielles participent de plus en plus à des activité de sensibilisation aux effets des changements climatiques et à la valeur de l'adaptation. Dans les cas où l'on observe un lien étroit entre la variabilité et les changements de nature climatique et la production de ressources, comme c'est le cas dans le secteur de l'hydroélectricité, il existe de nombreux exemples où l'industrie joue un rôle de premier plan dans l'analyse des effets et le financement de recherches connexes.

Les répercussions biophysiques de premier ordre des changements climatiques sur les activités d'exploration des ressources, l'infrastructure matérielle et les réseaux de transports – y compris les effets liés aux phénomènes météorologiques extrêmes, les changements hydrologiques régionaux, la dégradation du pergélisol, l'élévation du niveau de la mer et autres – sont assez bien comprises en ce qui touche de nombreux aspects liés aux ressources naturelles et n'ont pas évolué de manière significative au cours des cinq dernières années. Les connaissances ont surtout été mises en pratique dans le secteur de la foresterie et dans celui de l'hydroélectricité. D'importantes lacunes persistent au niveau de la recherche sur les impacts biophysiques, y compris les mécanismes qui régissent les changements s'opérant au niveau du régime des vents et de la nébulosité, et les effets possibles de ces changements sur la production d'électricité d'origine éolienne et solaire, les conséquences de la diminution de la disponibilité de l'eau sur les activités pétrolières et gazières et les effets des climats émergents sur les écosystèmes forestiers. Peu d'études exhaustives des répercussions qui s'exercent en aval, y compris l'analyse économique relative au commerce international et à la concurrence sur le marché mondial, ont été réalisées. Cependant, de nouvelles idées ont vu le jour concernant les mesures à prendre pour faire face aux

effets des changements climatiques dans le cadre du processus de planification des activités. Le rapport de Gauthier *et al.* (en cours de révision) présente au secteur forestier quatre grands principes en matière d'adaptation qui peuvent tout aussi bien s'appliquer aux autres secteurs des ressources naturelles. Ces principes sont les suivants:

1. Intégrer efficacement les risques liés aux changements climatiques dans la planification et les activités. Les approches de la gestion du risque exigent l'abandon des cibles de production optimales pour se concentrer plutôt sur l'obtention du meilleur résultat réalisable en fonction d'une gamme de conditions.
2. Intégrer des options dites « sans regret » qui offrent des avantages en fonction d'une gamme d'avenirs potentiels.
3. Adopter un cadre de gestion adaptative. Étant donné l'incertitude liée aux changements climatiques, les mécanismes de gestion doivent démontrer suffisamment de souplesse pour permettre la mise à l'essai d'options alternatives et l'intégration des leçons apprises grâce à ces activités.
4. Assurer un suivi dans le but de cerner les changements liés au climat et les éventuels écarts par rapport aux objectifs de gestion.

De nombreux cadres en matière d'adaptation ont été définis; or, il existe peu d'exemples de leur mise en œuvre ou de documents portant sur les mesures qui ont été adoptées. L'adaptation aux changements en cours dans le secteur des ressources naturelles a essentiellement pris la forme d'interventions ponctuelles et réactives aux phénomènes climatiques. On compte parmi les exemples de telles interventions, le transport par avion de matériel jusqu'aux mines exploitées en milieu nordique lors du raccourcissement de la saison des routes de glace causé par une hausse des températures, la transformation des activités de récolte du bois pour palier les conditions du sol non gelé et l'exploitation d'un nombre croissant de coupes de récupération. Les exemples de planification proactive de l'adaptation aux éventuels changements climatiques sont plus rares. Les études de cas compilées par les membres de la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE, 2012a) font état des activités d'adaptation aux changements climatiques de certaines sociétés d'exploitation de ressources (J.D. Irving et Tolko Industries dans le secteur forestier, Rio Tinto Alcan dans le secteur minier et Entergy Corporation, BC Hydro et Hydro-Québec dans le secteur de l'électricité). Ces exemples prouvent que les mesures d'adaptation ont fait leur entrée dans la culture de l'industrie des ressources naturelles, comme c'est le cas dans les autres secteurs de l'économie canadienne.

On note qu'il existe un certain nombre d'obstacles et d'instruments d'habilitation en matière d'adaptation dans les secteurs des ressources naturelles. Les derniers changements d'importance à survenir au Canada sont principalement liés aux moteurs économiques à court terme, comme le rendement économique mondial, le prix des produits de base et des questions relatives au commerce international. Afin de demeurer concurrentiels sur les marchés continentaux et mondiaux, les investissements dans la viabilité à long terme se classent parfois parmi les priorités de faible importance. Toutefois, le fait qu'il y ait des changements rapides qui s'opèrent au sein des secteurs des ressources naturelles, particulièrement dans le contexte du développement économique nord-américain, offre aussi des possibilités en matière d'adaptation du moment que les changements climatiques fassent partie intégrante d'un processus élargi de prise de décisions.

Le niveau de connaissances limité des secteurs des ressources naturelles au sujet de la portée potentielle, de l'ampleur et de la pertinence fonctionnelle des répercussions des changements climatiques, ainsi que les incertitudes concernant les prévisions relatives à la nature précise de ses changements, font partie des raisons qui ont été invoquées pour justifier les progrès limités en matière d'adaptation (TRNEE, 2012b). De plus, les entreprises ont une résilience comparativement élevée à de nombreux changements climatiques projetés, étant donné que la plupart d'entre elles exploitent leurs installations dans divers milieux soumis à des conditions extrêmes. Malgré tout, l'évaluation exhaustive des risques peut permettre de repérer les nouvelles vulnérabilités, y compris celles liées aux perturbations dans les infrastructures publiques.

Les processus que l'on présente comme nouveaux instruments d'habilitation en matière d'adaptation dans les secteurs des ressources naturelles comprennent les évaluations environnementales, la divulgation publique des risques et la présentation de rapports concernant l'aménagement forestier durable. La dernière mesure fait partie des exigences établies par la loi (mise à jour en 2012 dans le cas des compétences fédérales) pour tous les grands projets de développement qui ont comme objectif de réduire les incidences possibles de ces projets sur l'environnement avant leur mise en chantier et de s'assurer que les mesures d'atténuation des risques sont en place une fois que le projet est amorcé. De telles évaluations prennent systématiquement en considération les effets des changements climatiques sur le projet proposé, par le biais de l'orientation et des études de cas fournies par le comité fédéral-provincial-territorial de la *Convention sur le changement climatique et l'évaluation environnementale* (2003). La divulgation publique de l'information, comme dans le cadre du Carbon Disclosure Project (projet de divulgation du carbone; *voir* l'étude de cas 7), sert à renseigner les investisseurs sur la façon dont les sociétés cotées en bourse évaluent et gèrent le risque matériel lié aux changements climatiques (CDP, 2010). Même si l'analyse des données divulguées par la US Securities and Exchange Commission démontre que la qualité des données divulguées concernant le risque climatique est habituellement inadéquate et ne permet pas aux investisseurs d'évaluer précisément le niveau de risque et le rendement éventuels (Ceres, 2012), elle met en évidence l'utilité de ce processus favorisant l'adaptation qui encourage à la fois les investisseurs et les organismes de réglementation à insister pour qu'on apporte des améliorations quant à la qualité de la divulgation.

Dans un grand nombre de cas, il existe des solutions d'ingénierie et de planification visant à aider les entreprises du secteur des ressources naturelles et les collectivités locales à se préparer et à s'adapter aux changements climatiques. La possibilité d'élaborer des stratégies d'adaptation efficaces dans le secteur des ressources naturelles au Canada est énorme et le niveau de collaboration qui existe entre les entreprises, les organismes de réglementation, les scientifiques et autres intervenants afin de définir des stratégies d'adaptation pratiques qui pourront être intégrées à la planification et aux activités contribuera grandement à la probabilité de réussite. Les gestionnaires du secteur des ressources naturelles au Canada auront la possibilité de partager leur expérience au chapitre de l'adaptation aux changements climatiques avec des planificateurs et des gestionnaires d'autres secteurs, aussi bien au Canada qu'à l'échelle internationale.

RÉFÉRENCES

AIE (Agence internationale de l'énergie). *World Energy Outlook 2011*, Paris, 2011a.

AIE (Agence internationale de l'énergie). *Impact of Smart Grid Technologies on Peak Load to 2050*, Paris, 2011b.

Aitken, S.N., S. Yeaman, J.A. Holliday, T. Wang et S. Curtis-McLane. « Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcomes for tree populations », *Evolutionary Applications*, vol. 1, nº 1, 2008, pp. 95–111.

Ali, A.A., O. Blarquez, C. Heĺy, F. Tinquaut, A. El Guellab, V. Valsecchi, A. Terrier, L. Bremond, A. Genries, S. Gauthier et Y. Bergeron. « Control of the multimillennial wildfire size in boreal North America by spring climatic conditions », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, nº 51, 2012, pp. 20966-20970.

Allan, C. et S.G. Stankey. *Adaptive Environmental Management: a Practitioner's Guide, Springer*, 2009, 352 p.

Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier et N. Cobb. « A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests », *Forest Ecology and Management*, vol. 259, nº 4, 2010, pp. 660-684.

Amiro, B.D., A. Cantin, M.D. Flannigan et W.J. De Groot. « Future emissions from Canadian boreal forest fires », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 39, nº 2, 2009, pp. 383-395.

APFC (Association des produits forestiers du Canada). *Certification Canada*, 2012, <http://www.certificationcanada.org/francais/certification/>.

Auld, H., N. Comer et S. Fernandez. Technical Guide – *Infrastructure in permafrost: A guideline for climate change adaptation*, Canadian Standards Association (CSA) Special Publication, 2010.

Balshi, M.S., A.D. McGuire, P. Duffy, M.D. Flannigan, J. Walsh et J.M. Melillo. « Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a multivariate adaptive regression splines (MARS) approach », *Global Change Biology*, vol. 15, 2009, pp. 578-600.

Barber, V.A., G.P. Juday et B.P. Finney. « Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress », *Nature*, vol. 405, nº 6787, 2000, pp. 668-673.

BCMFLNRO (BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resources Operations). *Climate based upward elevation changes*, 2008, <http://www.for.gov.bc.ca/code/cfstandards/amendmentNov08.htm>.

BCMFLNRO (BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resources Operations). *Assisted range and population expansion of western larch for use as a climate change adaptation strategy in British Columbia*, 2010, <http://www.for.gov.bc.ca/code/cfstandards/amendmentJun10.htm>.

BCMFLNRO (BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations). A history of the battle against the mountain pine beetle, 2012.

BCP (Bureau du Conseil privé). Le partage constitutionnel des pouvoirs législatifs, 2010, <http://www.pco-bcp.gc.ca/aia/index.asp?lang=fra&page=federal&sub=legis&doc=legis-fra.htm>.

Beaubien, E. et A. Hamann. « Spring flowering response to climate change between 1936 and 2006 in Alberta, Canada », *Bioscience*, vol. 61, no 7, 2011, pp. 514-524.

Beauchamp, J. *Estimation d'une PMP et d'une CMP d'un bassin versant septentrional, en contexte de changements climatiques*, École de technologie supérieure, Montréal, 2010.

Bell, T., J.D. Jacobs, A. Munier, P. Leblanc et A. Trant. *Climate change and renewable resources in Labrador: looking toward 2050*, comptes rendus et rapport d'une conférence tenue du 11 au 13 mars, à North West River (Labrador), Labrador Highlands Research Group, Memorial University of Newfoundland, St. John's, 95 p. et CD-ROM, 31 mars, 2008.

Bernier, P. et Schoene, D. « Adapting forests and their management to climate change: an overview », *Unasylva*, vol. 60, nº 231-232, 2009, pp. 5-11.

Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier et A.G. Roy. « Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries », *Journal of Hydrology*, vol. 384, 2010, pp. 65-83.

Bruce, J.P. « Oil and water – will they mix in a changing climate? The Athabasca River story », dans *Implications of a 2°C Global Temperature Rise on Canada's Water Resources: Athabasca River and Oil Sands Development, Great Lakes and Hydropower Production*, T. Tin (éd.), rapport rédigé pour le Sage Centre, 2006, pp. 12-34, <http://www.tidescanada.org/cms/File/sagereport_nov0106.pdf>.

Burns, R.M. et B.H. Honkala. *Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods*, Agriculture handbook 654, Department of Agriculture, Forest Service, Washington (DC), 1990.

Buttle, J., T. Muir et J. Frain. « Economic impacts of climate change on the Canadian Great Lakes hydro-electric power producers: a supply analysis », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 92, 2004, pp. 89-110.

CAPP (Association canadienne des producteurs pétroliers). *Sables bitumineux maintenant : utilisation de l'eau, 2012*, <http://www.sablesbitumineuxmaintenant.ca/topics/WaterUse/Pages/Default.aspx>.

Caya, D. et R. Laprise. « A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: the Canadian RCM », *Monthly Weather Review*, vol. 127, nº 3, 1999, pp. 341-362.

CBC (Canadian Broadcasting Corporation). « Forest fire smoke blankets Timmins, Ontario », CBC News, 24 mai 2012.

CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Cadre des critères et indicateurs du CCMF 2005*, Conseil canadien des ministres des forêts, Ottawa, 2006, 1 p., <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/32561.pdf>.

CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Une vision pour les forêts du Canada : 2008 et au-delà*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa (Ontario), 2008.

CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : préparer l'avenir*. Les changements climatiques, 2013a, <http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp>.

CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : une approche systématique d'exploration de l'état de préparation organisationnelle*, 2013b, <http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp>.

CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : cadre d'évaluation de la vulnérabilité et d'intégration des mesures d'adaptation dans le processus décisionnel*, 2013c, <http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp>.

CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : emploi de scénarios dans l'évaluation de la vulnérabilité*, 2013d <http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp>.

CDP (Carbon Disclosure Project). *Rapport du Carbon Disclosure Project 2010 : Canada 200*, 2010, <https://www.cdproject.net/CDPResults/CDP-2010-Canada-Report-french.pdf>.

CEPA (Association canadienne de pipelines d'énergie). *About pipelines 2012 – our energy connections*, 2012, <http://www.cepa.com/wp-content/uploads/2012/12/CEPA_Factbook-Dec-4.pdf>.

CEPA (Association canadienne de pipelines d'énergie). *About pipelines 2012 – our energy connections*, 2012, <http://www.cepa.com/wp-content/uploads/2012/12/CEPA_Factbook-Dec-4.pdf>.

Ceres. *Sustainable extraction? An analysis of SEC disclosure by major oil and gas companies on climate risk and deepwater drilling risk*, Ceres Inc., Boston, Massachusetts, 2012, 42 p.

Chhin, S., E.H. Hogg, V.J. Lieffers et S. Huang. « Potential effects of climate change on the growth of lodgepole pine across diameter size classes and ecological regions », *Forest Ecology and Management*, vol. 256, nº 10, 2008, pp. 1692-1703.

Chiotti, Q. et B. Lavender. « Ontario », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 227-274.

CIGB (Commission internationale des grands barrages). *Tailings dams: risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences*, Bulletin 121, ICOLD Committee on Tailings Dams and Waste Lagoons, 2001, 144 p, <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/2891-TailingsDams.pdf>.

Comité fédéral-provincial-territorial sur le changement climatique et l'évaluation environnementale. *Intégration des considérations relatives au changement climatique et l'évaluation environnementale: Guide général des praticiens*, 2003, <http://www.ceaa-acee.gc.ca/Content/A/4/1/A41F45C5-1A79-44FA-9091-D251EEE18322.pdf> .

Commissaire à l'environnement de l'Ontario. *Prêt pour un changement? Évaluation de la stratégie ontarienne d'adaptation au changement climatique*, Commissaire à l'environnement de l'Ontario, Toronto (Ontario), 2012.

Côté, P., D. Haguma, R. Leconte et S. Krau. « Stochastic optimisation of hydro-Quebec hydropower installations: A statistical comparison between SDP and SSDP methods », *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 38, nº 12, 2011, pp. 1427-1434.

Cullingham, C.I., J.E.K. Cooke, S. Dang, C.S. Davis, B.J. Cooke et D.W. Coltman. « Mountain pine beetle host-range expansion threatens the boreal forest », *Molecular Ecology*, vol. 20, nº 10, 2011, pp. 2157-2171.

CVRD Inco. *Toward sustainability*, 2006, 66 p., <http://nickel.vale.com/sustainability/pdf/Toward_Sustainability_20007.pdf>. Desrochers, G., R. Roy, L. Roy, G. Pasher, F. Guay et D. Tapsoba. *Comparing methods to investigate the impacts of climate change*, présentation faite à la 2009 AWRA Spring Specialty Conference: Managing Water Resources Development in a Changing Climate, Anchorage, Alaska, 2009, 22 p.

Easterling, W.E., P.K. Aggarwal, P. Batima, K.M. Brander, L. Erda, S.M. Howden, A. Kirilenko, J. Morton, J.-F. Soussana, J. Schmidhuber et F.N. Tubiello. « Food, fibre and forest products », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 273-313.

Ebinger, J. et W. Vergara. *Climate impacts of energy systems: key issues for energy sector adaptation*, Banque mondiale, Washington (DC), 2011, 178 p.

Environnement Canada. *Code de pratiques écologiques pour les mines de métaux*, Ottawa (Ontario), 2009, 108 p., <http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/codes/mm/mm-fra.pdf>.

Environnement Canada. *Withdrawal uses, thermal power generation*, 2012, <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=En&n=851B096C-1#TPG>.

ESRD (Alberta Environment and Sustainable Resource Development). *Athabasca River conditions and use*, Alberta Environment and Sustainable Resource Development, 2013, <http://www.environment.alberta.ca/apps/OSEM/>.

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

Fischlin, A., G.F. Midgley, J.T. Price, R. Leemans, B. Gopal, C. Turley, M.D.A. Rounsevell, O.P. Dube, J. Tarazona et A.A. Velichko. « Ecosystems, their properties, goods, and services », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 211-272.

Flannigan, M., B. Stocks, M. Turetsky et M. Wotton. « Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest », *Global Change Biology*, vol. 15, nº 3, 2009, pp. 549-560.

Flat Top Complex Wildfire Review Committee. *Flat top complex: final report from the Flat Top Complex Wildfire Review Committee*, Alberta Ministry of Environment and Sustainable Resource Development, Edmonton (Alberta), 2012.

Ford, J.D., T. Pearce, J. Prno, F. Duerden, L. Berrang Ford, M. Beaumier et T. Smith. « Perceptions of climate change risks in primary resource use industries: a survey of the Canadian mining sector », *Regional Environmental Change*, vol. 10, no 1, 2010, pp. 65-81.

Ford, J.D., T. Pearce, J. Prno, F. Duerden, L.B. Ford, T.R. Smith et M. Beaumier. « Canary in a coal mine: perceptions of climate change risks and response options among Canadian mine operations », *Climatic Change*, vol. 109, no 3-4, 2011, pp. 399-415.

Fortin, L.G., R. Turcotte, S. Pugin, J.-F. Cyr et J.-F. Picard. « Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer au sud du Québec », *Revue Canadienne de Génie Civil*, vol. 34, 2007, pp. 934-945.

Furgal, C. et T.D. Prowse. « Nord du Canada », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 57-118.

Gauthier, S., P. Bernier, P.J. Burton, K. Isaac, N. Isabel, T. Williamson, H. Le Goff. « Adaptation in the managed Canadian boreal forest », *Environmental Reviews*, en révision.

Geller, H., P. Harrington, A.H. Rosenfeld, S. Tanishima et F. Unander. « Polices for increasing energy efficiency: thirty years of experience in OECD countries », *Energy Policy*, vol. 34, no 5, 2006, pp. 556-573.

Georgakakos, A.P., H. Yao, M. Kistenmacher, K.P. Georgakakos, N.E. Graham, F.-Y. Cheng, C. Spencer et E. Shamir. « Value of adaptive water resources management in northern California under climatic variability and change: reservoir management », *Journal of Hydrology*, vol. 412-413, 2012, pp. 34-46.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changements climatiques 2007 : les éléments scientifiques*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.

Girardin, M.P. « Interannual to decadal changes in area burned in Canada from 1781 to 1982 and the relationship to northern hemisphere land temperatures », *Global Ecology and Biogeography*, vol. 16, nº 5, 2007, pp. 557-566.

Girardin, M.P. et B.M. Wotton. « Summer moisture and wildfire risks across Canada », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, 2009, pp. 517-533.

Girardin, M.P., F. Raulier, P.Y. Bernier et J.C. Tardif. « Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: a comparison of empirical, process-based and hybrid modelling approaches », *Ecological Modelling*, vol. 213, nº 2, 2008, pp. 209-228.

Girardin, M.P., X.J. Guo, P.Y. Bernier, F. Raulier et S. Gauthier. « Changes in growth of pristine boreal North American forests from 1950 to 2005 driven by landscape demographics and species traits », *Biogeosciences*, vol. 9, 2012, pp. 2523-2536.

Global Forest Watch. *Hydropower developments in Canada: number, size and jurisdictional and ecological distribution*, 2012, <http://www.globalforestwatch.ca/pubs/2012Energy/02Hydro/Hydro1_Number_Size_Distribution.pdf>.

Goulding, H.E.A. *Yukon water: a summary of climate change vulnerabilities*, Environnement Yukon, gouvernement du Yukon, Canada, 2011.

Gupta, R. et M. Gregg. « Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate », *Building and Environment*, vol. 55, 2012, pp. 20-42.

Haguma, D. *Gestion des ressources hydriques adaptée aux changements climatiques pour la production optimale d'hydroélectricité. Étude de cas: bassin versant de la rivière Manicouagan*, thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 2012, 237 p.

Hamlet, A.F., S.Y. Lee, K.E.B. Mickelson et M.M. Elsner. « Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State », chapitre 4 dans *The Washington Climate Change Impacts Assessment: Evaluating Washington's Future in a Changing Climate*, Climate Impacts Group, University of Washington, Seattle, 2009.

Harrison, G.P., L.C. Cradden, A. Zacheshigriva, S. Nairn et J.P. Chick. *Sensitivity of thermal power generation to climate change*, UK Met Office, 2009, 2 p.

Haughian, S.R., P.J. Burton, S.W. Taylor et C.L. Curry. « Expected effects of climate change on forest disturbance regimes in British Columbia », *BC Journal of Ecosystems and Management*, vol. 13, nº 1, 2012, pp. 16-39.

Hicke, J.A., C.D. Allen, A.R. Desai, M.C. Dietze, R.J. Hall, E.H.T. Hogg, D.M. Kashian, D. Moore, K.F. Raffa, R.N. Sturrock et J. Vogelmann. « Effects of biotic disturbances on forest carbon cycling in the United States and Canada », *Global Change Biology*, vol. 18, nº 1, 2012, pp. 7-34.

Hogg, E.H., J.P. Brandt et M. Michaelian. « Impacts of a regional drought on productivity, dieback and biomass of western Canadian aspen forests », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 38, nº 6, 2008, pp. 1373-1384.

ICF Marbek. *Adaptation to a changing climate in the energy sector,* rapport remis à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 2012, 88 p.

IESO (Independent Electricity System Operator). The Ontario reliability outlook, Toronto, 2009, <http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/marketReports/ORO_Report-Dec2009.pdf>.

IMG-Golder Corporation. *Vulnerability assessment of the mining sector to climate change, Nunavut Regional adaptation Collaborative*, 2012, 98 p.

Instanes, A., O.A. Anisimov, L. Brigham, D. Goering, L. Khrustalev, B. Ladanyi et J.O. Larsen. « Infrastructure: buildings, support systems and industrial facilities », chapitre 16 dans *Arctic Climate Impact Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2005.

International Wood Markets Group. *BC Interior Mountain Pine Beetle Report*, 2010, 154 p.

Isaac, M. et D.P. van Vuuren. « Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change », *Energy Policy*, vol. 37, nº 2, 2009, pp. 507-521.

Johnston, M. et H. Hesseln. « Climate change adaptive capacity of the Canadian forest sector », *Forest Policy and Economics*, vol. 24, 2012, pp. 29-34.

Johnston, M., M. Campagna, P. Gray, H. Kope, J. Loo, A.M. Ogden, G.A. O'Neill, D. Price et T. Williamson. *Vulnérabilité des arbres du Canada aux changements climatiques et propositions de mesures visant leur adaptation : un aperçu destiné aux décideurs et aux intervenants du monde forestier*, Conseil canadien des ministres des forêts, Ottawa (Ontario), 2009.

Johnston, M.H. et J.E. Edwards. *Adapting sustainable forest management to climate change: an analysis of Canadian case studies*, Conseil canadien des ministres des forêts, Ottawa (Ontario), sous presse.

Jones, H.P., D.G. Hole et E.S. Zavaleta. « Harnessing nature to help people adapt to climate change », *Nature Climate Change*, vol. 2, 2012, pp. 504-509.

Jost, G., R.D. Moore, B. Menounos et R. Wheate. « Quantifying the contribution of glacier runoff to streamflow in the upper Columbia river basin, Canada », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, nº 3, 2012, pp. 849-860.

Kasischke, E.S. et M.R. Turetsky. « Recent changes in the fire regime across the North American boreal region – spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska », *Geophysical Research Letters*, vol. 33, nº 9, 2006.

Kienzle, S.W., M.W. Nemeth, J.M. Byrne et R.J. MacDonald. « Simulating the hydrological impacts of climate change in the upper north Saskatchewan river basin, Alberta, Canada », *Journal of Hydrology*, vol. 412-413, 2012, pp. 76-89.

Klein, R.J.T., S. Huq, F. Denton, T.E. Downing, R.G. Richels, J.B. Robinson et F.L. Toth. « Inter-relationships between adaptation and mitigation », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability,* contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 745-777.

Kurz, W.A., C.C. Dymond, G. Stinson, G.J. Rampley, E.T. Neilson, A.L. Carroll, T. Ebata et L. Safranyik. « Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change », *Nature*, vol. 452, 2008, pp. 987-990.

Lapointe-Garant, M., J. Huang, G. Gea-Izquierdo, F. Raulier, P. Bernier et F. Berninger. « Use of tree rings to study the effect of climate change on trembling aspen in Québec », Global Change Biology, vol. 16, nº 7, pp.2039-2051.

Le Goff, H., M.D. Flannigan et Y. Bergeron. « Potential changes in monthly fire risk in the eastern Canadian boreal forest under future climate change », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 39, nº 12, 2009, pp. 2369-2380.

Le Goff, H., M.D. Flannigan, Y. Bergeron et M.P. Girardin. « Historical fire regime shifts related to climate teleconnections in the Waswanipi area, central Quebec, Canada », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 16, nº 5, 2007, pp. 607-618.

Lebel, M., E. Kerkhoven, R. Bothe, J. Hornung et D. Ohlson. *Climate change sensitivity analysis*, rapport rédigé pour la Phase 2 Framework Committee, Volume 2, Technical Annex, Cumulative Environmental Management Association, 2009, <http://cemaonline.ca/index.php/administration/cat_view/2-communications/44-p2wmf>.

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

Lemmen, D., F. Warren et J. Lacroix. « Synthèse », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008b, pp. 1-20.

Lemprière, T.C., P.Y. Bernier, A.L. Carroll, M.D. Flannigan, R.P. Gilsenan, D.W. McKenney, E.H. Hogg, J.H. Pedlar et D. Blain. *L'importance d'adapter le secteur forestier aux changements climatiques*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta), Rapport d'information NOR-X-416F, 2008, 88 p.

Leong, H. « Marine systems », chapitre 9 dans *Arctic Climate Impact Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2005.

Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling et H. Yoshino. « Residential and commercial buildings », dans *Climate Change 2007: Mitigation*, contribution du Groupe de travail III au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave et L.A. Meyer (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.

Lilley, W., J. Hayward et L. Reedman. « Chapter 7 – realizing the potential of renewable and distributed generation », dans *Smart Grid*, F.P. Sioshansi (éd.), Academic Press, Boston, 2012, pp. 161-183.

Lin, Q.G., G.H. Huang et B. Bass. « Impacts from climate change and adaptation responses on energy economy and greenhouse gas emissions in the Toronto-Niagara region, Canada », *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 33, nº 17, 2011, pp. 1581-1597.

Ma, Z., C. Peng, Q. Zhu, H. Chen, G. Yu, W. Li, X. Zhou, W. Wang et W. Zhang. « Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, 2012, pp. 2423-2427.

Marshall, B. *Facts and figures of the Canadian mining industry*, Mining Association of Canada, <http://www.mining.ca/www/media lib/MAC Documents/Publications/2013/Facts%20and%20Figures/FactsandFigures2012Eng.pdf>.

McColl, L., A. Angelini et R. Betts. *Climate Change Risk Assessment for the Energy Sector,* UK Climate Change Risk Assessment, 2012, 134 p., <http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=10074_CCRAfortheEnergySector16July2012.pdf>.

McGrath, T. et J. Ellingsen. *The effects of hurricane Juan on managed stands commercially thinned in central Nova Scotia*, Forest Research Report FOR 2009-4 No. 89, ministère des Ressources naturelles de la Nouvelle-Écosse, Halifax, Nouvelle-Écosse, 2009.

McKenney, D.W., J.H. Pedlar, R.B. Rood et D. Price. « Revisiting projected shifts in the climate envelopes of North American trees using updated general circulation models », *Global Change Biology*, vol. 17, 2011, pp. 2720-2730.

McKenney, D.W., J.H. Pedlar, K. Lawrence, K. Campbell et M.F. Hutchinson. « Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees », *Bioscience*, vol. 57, nº 11, 2007, pp. 939-948.

Michaelian, M., E.H. Hogg, R.J. Hall et E. Arsenault. « Massive mortality of aspen following severe drought along the southern edge of the Canadian boreal forest », *Global Change Biology*, vol. 17, nº 6, 2011, pp. 2084-2094.

Mideksa, T.K. et S. Kallbekken. « The impact of climate change on the electricity market: a review », *Energy Policy*, vol. 38, nº 7, 2010, pp. 3579-3585.

Millar, C.I., N.L. Stephenson et S.L. Stephens. « Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty », *Ecological Applications*, vol. 17, no 8, 2007, pp. 2145-2151.

Mills, E. « Synergisms between climate change mitigation and adaptation: an insurance perspective », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 12, nº 5, 2007, pp. 809-842.

Minville, M., F. Brissette et R. Leconte. « Impacts and uncertainty of climate change on water resource management of the Peribonka River System (Canada) », *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 136, nº 3, 2010a, pp. 376-385.

Minville, M., F. Brissette et R. Leconte. « Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a Nordic watershed », *Journal of Hydrology*, vol. 358, nº 1-2, 2008, pp. 70-83.

Minville, M., F. Brissette, S. Krau et R. Leconte. « Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower », *Water Resources Management*, vol. 23, nº 14, 2009, pp. 2965-2986.

Minville, M., F. Brissette, S. Krau et R. Leconte. « Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower », *Water Resources Management*, vol. 23, nº 14, 2012, pp. 2965-2986.

Minville, M., S. Krau, F. Brissette et R. Leconte. « Behaviour and performance of a water resource system in Québec (Canada) under adapted operating policies in a climate change context », *Water Resources Management*, vol. 24, nº 7, 2010b, pp. 1333-1352.

Mohan, J.E., R.M. Cox et L.R. Iverson. « Composition and carbon dynamics of forests in northeastern North America in a future, warmer world », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 39, nº 2, 2009, pp. 213-230.

Music, B. et C. Sykes. *CRCM diagnostics for future water resources in OPG priority watersheds*, Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, 2011.

NERC (North American Electric Reliability Corporation). *Long term reliability assessment,* Atlanta, 2012, <http://www.nerc.com/files/2012_LTRA_FINAL.pdf>.

Newsham, G.R., B.J. Birt et I.H. Rowlands. « A comparison of four methods to evaluate the effect of a utility residential air-conditioner load control program on peak electricity use », *Energy Policy*, vol. 39, nº 10, 2011, pp. 6376-6389.

OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques). *Glossary of statistical terms*, Organisation de coopération et de développement économiques, 2012, <http://stats.oecd.org/glossary/>.

Ochuodho, T., V. Lantz, P. Loyd-Smith et P. Benitez. « Regional economic impacts of climate change and adaptation in Canadian forests: a CGE modeling analysis », *Forest Policy and Economics*, vol. 25, 2012, pp. 100-112.

Ogden, A.E. et J. Innes. « Incorporating climate change adaptation considerations into forest management planning in the boreal forest », *International Forestry Review*, vol. 9, nº 3, 2007, pp. 713-733.

Ogden, A.E. et J.L. Innes. « Application of structured decision making to an assessment of climate change vulnerabilities and adaptation options for sustainable forest management », *Ecology and Society*, vol. 14, nº 1, 2009.

Ohlson, D., G. Long et T. Hatfield. *Phase 2 Framework Committee report*, Cumulative Environmental Management Association, 2010, <http://cemaonline.ca/index.php/administration/cat_view/2-communications/44-p2wmf>.

ONE (Office national de l'énergie). *Aperçu des cadres de gestion de la fiabilité du service d'électricité au Canada*, Calgary, 2004.

ONE (Office national de l'énergie). *Revue des forages extracôtiers dans l'Arctique canadien*, Calgary, 2011, 54 p., <http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rthnb/pplctnsbfrthnb/rctcffshrdrllngrvw/fnlrprt2011/fnlrprt2011-fra.html>.

Ouranos. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Ouranos, Montréal, 2010.

Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch et H. Hayes. « A large and persistent carbon sink in the world's forests », *Science*, vol. 333, nº 6045, 2011, pp. 988-993.

Pearce, T., J. Ford, J. Prno, F. Duerden, L. Berrang-Ford, T. Smith et M. Marshall. *Climate change impacts and adaptations in the Canadian mining sector*, 2009.

Pearce, T.D., J.D. Ford, J. Prno, F. Duerden, J. Pittman, M. Beaumier et B. Smit. « Climate change and mining in Canada », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 16, nº 3, 2011, pp. 347-368.

Pedlar, J.H., McKenney, D.W., I. Aubin, T. Beardmore, J. Beaulieu, L. Iverson, G.A. O'Neill, R.S. Winder et C. Ste-Marie. « Placing forestry in the assisted migration debate », *Bioscience*, vol. 62, nº 10, 2012, pp. 835-842.

Peng, C., Z. Ma, X. Lei, O. Zhu, H. Chen, W. Wang, S. Liu, W. Li, X. Fang et X. Zhou. « A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests », *Nature Climate Change*, vol. 1, nº 9, 2011, pp. 467-471.

Price, D.T., R.I. Alfaro, K.J. Brown, M. Flannigan, R.A. Fleming, E.H. Hogg, M.P. Girardin, T. Lakusta, M. Johnston, J. Pedlar, D.W. Mckenney, T. Stratton R. Sturrock, I. Thompson, J.A. Trofymow et L.A. Venier. « Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems », *Environmental Reviews*, en révision.

Projet de recherche sur les politiques. *Adaptation aux changements climatiques dans le secteur canadien de l'énergie : rapport d'atelier*, Projet de recherche sur les politiques, 2009, 25 p., <http://www.horizons.gc.ca/sites/default/files/Publication-alt-format/2009-0004-fra.pdf>.

Prowse, T.D., C. Furgal, R. Chouinard, H. Melling, D. Milburn et S.L. Smith. « Implications of climate change for economic development in Northern Canada: energy, resource, and transportation sectors », *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 38, nº 5, 2009, pp. 272-281.

Raje, D. et P.P. Mujumdar. « Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change », *Advances in Water Resources*, vol. 33, nº 3, 2010, pp. 312-326.

Ressources naturelles Canada. *Régions forestières du Canada*, Ressources naturelles Canada, 2000, <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/25628.pdf>.

Ressources naturelles Canada. *Toutes les communautés dépendantes des ressources*, 2001, Ressources naturelles Canada, Atlas du Canada, 2009, <http://geogratis.gc.ca/api/fr/nrcan-rncan/ess-sst/d2f00430-8893-11e0-a7f4-6cf049291510.html>.

Ressources naturelles Canada. *Eau douce : le rôle et la contribution de Ressources naturelles Canada*, Ressources naturelles Canada, 2010, <http://www.rncan.gc.ca/developpement-durable/eau-douce/2603>.

Ressources naturelles Canada. *L'état des forêts au Canada : rapport annuel 2011*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa, 2011a.

Ressources naturelles Canada. *Évolution de l'efficacité énergétique au Canada*, de 1990 à 2009, Ressources naturelles Canada, 15e éd, 2011b.

Ressources naturelles Canada. *Définir l'opportunité : évaluation de l'impact économique des secteurs de l'énergie et des mines au Canada*, conférence des ministres de l'Énergie et des Mines, septembre 2012, Charlottetown, Î.-P.-É., 2012a, 23 p., <http://www.scics.gc.ca/francais/conferences.asp?a=viewdocument&id=1907>.

Ressources naturelles Canada. L'*état des forêts au Canada, Rapport annuel 2012*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Administration centrale, Ottawa, 2012b, 52 p., <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=34056>.

Ressources naturelles Canada. *La menace que présente le dendroctone du pin ponderosa sur la forêt boréale canadienne*, Ressources naturelles Canada, 2012c, <http://scf.rncan.gc.ca/pages/49?lang=fr_CA>.

Ressources naturelles Canada. *Principales régions minières du Canada*, Carte 900A de la Commission géologique du Canada, 61e éd., 2011, Secteur des minéraux et des métaux et Office national de l'énergie, échelle 1/6 000 000, 2012d.

Ressources naturelles Canada. *Énergie*, Ressources naturelles Canada, 2012e, <http://www.rncan.gc.ca/statistiques-faits/energie/894>.

Ressources naturelles Canada. *À propos de l'énergie renouvelable*, Ressources naturelles Canada, 2012f, <http://www.rncan.gc.ca/energie/renouvelable/1616>.

Ressources naturelles Canada. *L'Atlas du Canada – Énergie*, Ressources naturelles Canada, 2012g, <http://atlas.gc.ca/site/francais/maps/energy.html>.

Ressources naturelles Canada. *Key facts and figures of Canada's Natural Resources Sector*, concentrateur de données de Ressources naturelles Canada, 2013a.

Ressources naturelles Canada. *Cahier d'information – les marchés de l'énergie*, 2013-2014, Ressources naturelles Canada, 2013b, <http://publications.gc.ca/site/fra/449640/publication.html>.

Rodenhuis, D., B. Music, M. Braun et D. Caya. *Climate diagnostics of future water resources in BC watersheds*, Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, 2011, 74 p.

Rübbelke, D. et S. Vögele. *Distributional consequences of climate change impacts on the power sector: who gains and who loses?*, CEPS Document de travail no. 349, Centre pour l'étude des politiques publiques européennes, 2011, 18 p.

Sathaye, J., A. Najam, C. Cocklin, T. Heller, F. Lecocq, J. Llanes-Regueiro, J. Pan, G. Petschel-Held, S. Rayner, J. Robinson, R. Schaeffer, Y. Sokona, R. Swart et H. Winkler. « Sustainable development and mitigation », dans *Climate Change 2007: Mitigation*, contribution du Groupe de travail III au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.

Sauchyn, D. et S. Kulshreshtha. « Prairies », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 275-328.

Schaeffer, R., A.S. Szklo, A.F. Pereira de Lucena, B.S. Moreira Cesar Borba, L.P. Pupo Nogueira, F.P. Fleming, A. Trocolli, M. Harrison et M.S. Boulahya. « Energy sector vulnerability to climate change: a review », *Energy*, vol. 38, nº 1, 2012, pp. 1-12.

Schindler, D.W., W.F. Donahue et J.P. Thompson. « Future water flows and human withdrawals in the Athabasca River », dans *Running Out of Steam? Oil Sands Development and Water Use in the Athabasca River-Watershed: Science and Market Based Solutions*, University of Alberta Environmental Research and Studies Centre et University of Toronto Munk Centre for International Studies, 2007.

Scott, M.J. et Y.J. Huang. « Effects of climate change on energy use in the United States », dans *Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States*, 2007.

Scott, M.J., J.A. Dirks et K.A. Cort. « The value of energy efficiency programs for US residential and commercial buildings in a warmer world », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 13, nº 4, 2008, pp. 307-339.

Shrestha, R.R., A.J. Berland, M.A. Schnorbus et A.T. Werner. *Climate change impacts on hydro-climatic regimes in the Peace and Columbia watersheds*, British Columbia, Canada, University of Victoria, Victoria, Colombie-Britannique, 2011.

Shrestha, R.R., M.A. Schnorbus, A.T. Werner et A.J. Berland. « Modelling spatial and temporal variability of hydrologic impacts of climate change in the Fraser River basin, British Columbia, Canada », *Hydrological Processes*, vol. 26, nº 12, 2012, pp. 1840-1860.

Smith, C. et G. Levermore. « Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world », Energy Policy, vol. 36, nº 12, 2008, pp. 4558-4562.

Soito, J.L.S. et M.A.V. Freitas. « Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: vVulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, nº 6, 2011, pp. 3165-3177.

Soulé, P.T. et P.A. Knapp. « Radial growth rate increases in naturally occurring ponderosa pine trees: a late-20th century CO_2 fertilization effect? », *The New Phytologist*, vol. 171, 2006, pp. 379-390.

SRC (Société royale du Canada). *Environmental and health impacts of Canada's oil sands industry*, Groupe d'experts de la Société royale du Canada, Ottawa (Ontario), 2010, 440 p.

St. George, S.S. « Streamflow in the Winnipeg River basin, Canada: trends, extremes and climate linkages », *Journal of Hydrology*, vol. 332, 2007, pp. 396-411.

Stantec Consulting Ltd. *Preliminary assessment report, Canadian Beaufort Sea region*, rapport rédigé pour Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, Ottawa (Ontario), 2012.

Statistique Canada. Énergie électrique produite à partir de combustibles, CANSIM Tableau 128-0014, 2013, <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/pick-choisir?id=1280014&p2=33&retrLang=fra&lang=fra>.

Steenberg, R.N., P. Duinker, L. Van Damme et K. Zielke. Indicators of sustainable forest management in a changing climate, Conseil canadien des ministres des forêts, Groupe de travail sur les changements climatiques, Groupe chargé de l'analyse technique, 2012.

Ste-Marie, C., E.A. Nelson, A. Dabros et M.E. Bonneau. « Assisted migration: introduction to a multifaceted concept », *Forestry Chronicle*, vol. 87, nº 6, 2011, pp. 724-730.

Stothart, P. *Faits et chiffres 2011 : L'industrie minière canadienne*, Association minière du Canada (AMC), 2011.

Stratos. *Climate change impacts on mining operations and infrastructure*, rapport rédigé pour le Centre for Excellence in Mining Innovation, 2009, <http://www.miningexcellence.ca>.

Stratos. *Climate change and acid rock drainage – risks for the Canadian mining sector*, No. 1.61.7, 2011.

Stroeve, J.C., V. Kattsov, A. Barrett, M. Serreze, T. Pavlova, M. Holland et W.N. Meier. « Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations », *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L16502, 2012, 7 p.

Sturrock, R.N., S.J. Frankel, A.V. Brown, P.E. Hennon, J.T. Kliejunas, K.J. Lewis, J.J. Worrall et A.J. Woods. « Climate change and forest diseases », *Plant Pathology*, vol. 60, nº 1, 2011, pp. 133-149.

Trenberth, K. « More knowledge, less certainty », *Nature Reports Climate Change*, vol. 4, 2010, pp. 20-21.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Le prix à payer : répercussions économiques du changement climatique pour le Canada*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2011, 172 p., <http://www.aqve.com/sites/default/files/documents/trn_prospritr_climatique_canada.pdf>.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique (études de cas)*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2012a.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique (rapport conseil)*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2012b.

Ürge-Vorsatz, D. et S. Tirado Herrero. « Building synergies between climate change mitigation and energy poverty alleviation », *Energy Policy*, vol. 49, 2012, pp. 83-90.

Vale. *Voisey's Bay development*, 2013, <http://www.vbnc.com>.

Van Mantgem, P.J., N.L. Stephenson, J.C. Byrne, L.D. Daniels, J.F. Franklin, P.Z. Fulé, M.E. Harmon, A.J. Larson, J.M. Smith, A.H. Taylor et T.T. Veblen. « Widespread increase of tree mortality rates in the western United States », *Science*, vol. 323, nº 5913, 2009, pp. 521-524.

Ville de Vancouver. *Stanley Park restoration*, Ville de Vancouver 2012, <http://vancouver.ca/parks-recreation-culture/stanley-park-restoration.aspx>.

Wang, G.G., S. Chhin et W.L. Bauerle. « Effect of natural atmospheric CO_2 fertilization suggested by open-grown white spruce in a dry environment », *Global Change Biology*, vol. 12, 2006, pp. 601-610.

Webster, A., F. Gagnon-Lebrun, C. DesJarlais, J. Nolet, C. Sauvé et S. Uhde. *L'évaluation des avantages et des coûts de l'adaptation aux changements climatiques*, Ouranos, 2008.

Wilbanks, T.J., P. Romero Lankao, M. Bao, F. Berkhout, S. Cairncross, J.-P. Ceron, M. Kapshe, R. Muir-Wood et R. Zapata-Marti. « Industry, settlement and society », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 357-390.

Wilbanks, T.J., V. Bhatt, D.E. Bilello, S.R. Bull, J. Ekmann, W.C. Horak, Y.J. Huang, M.D. Levine, M.J. Sale, D.K. Schmalzer et M.J. Scott. *Effects of climate change on energy production and use in the United States*, rapport rédigé par le U.S. Climate Change Science Program (CCSP) et le Subcommittee on Global Change Research, Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington (DC), États-Unis, 2008.

Williamson, T.B., S.J. Colombo, P.N. Duinker, P.A. Gray, R.J. Hennessey, D. Houle, M. Johnston, A.E. Ogden et D.L. Spittlehouse. *Les changements climatiques et les forêts du Canada : des impacts à l'adaptation*, Réseau de gestion durable des forêts et Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta), 2009.

WISE (World Information Service on Energy) Uranium Project. *Chronology of major tailings dam failures*, World Information Service on Energy, 2006, <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>.

Wotton, B.M., C.A. Nock et M.D. Flannigan. « Forest fire occurrence and climate change in Canada », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 19, 2010, pp. 253-271.

Xu, T., J. Sathaye, H. Akbari, V. Garg, et S. Tetali. « Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions », *Building and Environment*, vol. 48, nº 1, 2012, pp. 1-6.

Yao, Y., G.H. Huang et Q. Lin. « Climate change impacts on Ontario wind power resource », *Environmental Systems Research*, 2012, 1:2, <http://www.environmentalsystemsresearch.com/content/1/1/2>.

Zaturecky, I. et I. Chiu. *Alternative wood products from blue-stained mountain pine beetle lumber: non-structural laminated products*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria, Colombie-Britannique. Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper 2005-07, 2005, 20 p.

Zmeureanu, R. et G. Renaud. « Estimation of potential impact of climate change on the heating energy use of existing houses », *Energy Policy*, vol. 36, nº 1, 2008, pp. 303-310.

Zwiers, F.W., M.A. Schnorbus et G.D. Maruszeczka. *Hydrologic impacts of climate change on BC water resources*, Pacific Climate Impacts Consortium et University of Victoria, 2011.

CHAPITRE 4 : **LA PRODUCTION ALIMENTAIRE**

Principaux auteurs :

Ian D. Campbell et **Dolores G. Durant** *(Agriculture et Agroalimentaire Canada)*, **Karen L. Hunter** et **Kim D. Hyatt** *(Pêches et Océans Canada)*

Collaborateurs :

Darren Cook et **Darrell R. Corkal** *(Agriculture et Agroalimentaire Canada)*, **Harry (Polo) Diaz** *(Université de Regina)*, **Allan Howard** *(Agriculture et Agroalimentaire Canada)*, **Margot Hurlbert** *(Université de Regina)*, **Ahmed Khan** et **Kristen Lowitt** *(Université Memorial)*, **Gregory P. Marchildon** *(Johnson-Shoyama Graduate School of Public Policy)*, **David J. Sauchyn** *(Collectif des Prairies pour la recherche en adaptation)*

Citation recommandée :

Campbell, I.D., D.G. Durant, K.L. Hunter et K.D. Hyatt. « Production alimentaire », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 99-134.

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions 101

1. Introduction 102

2. Agriculture 104
- 2.1 Introduction 104
- 2.2 Contexte et tendences économiques 104
- 2.3 Principales conclusions tirées des évaluations précédentes 106
- 2.4 Risques, possibilités et mesures d'adaptation 107
- 2.5 Résumé 114

3. Pêches 116
- 3.1 Introduction 116
- 3.2 Approvisionnement alimentaire aquatique du Canada 118
- 3.3 Principales conclusions tirées des évaluations précédentes 120
- 3.4 Effets des changements climatiques sur les systèmes aquatiques et sur les pêches 120
- 3.5 Répercussions des changements climatiques sur les systèmes alimentaires aquatiques 123
- 3.6 Mesures d'adaptation 126
- 3.7 Résumé 127

4. Conclusions et prochaines étapes 129

Références 130

PRINCIPALES CONCLUSIONS

Les changements climatiques présentent divers risques et possibilités pour les producteurs alimentaires canadiens, et ils représenteront un défi pour l'industrie de l'approvisionnement alimentaire, surtout à court terme. On note ce qui suit au nombre des principales conclusions :

- Les répercussions des changements climatiques varient grandement parmi les secteurs examinés (agriculture, pêches et approvisionnement alimentaire non commercial), mais des défis communs se sont révélés, notamment les menaces pour l'approvisionnement alimentaire découlant des pertes accrues causées par les ravageurs envahissants et les maladies, ainsi que les risques pour les systèmes de transport dont dépendent les secteurs.

- Selon les perspectives nettes à moyen terme, on prévoit une légère augmentation probable de la production alimentaire agricole. Des saisons de croissance plus longues et plus chaudes permettraient de cultiver à de plus hautes latitudes des cultures de plus grande valeur et exigeant des températures plus élevées (où les conditions du sol le permettent), d'allonger les saisons d'alimentation à l'extérieur du bétail et d'étendre la production du sirop d'érable vers le nord. Cependant, il est probable que de nouvelles espèces de ravageurs et de nouvelles maladies feront leur apparition et que des épidémies plus importantes des ravageurs actuels se produiront, à savoir la croissance accrue des mauvaises herbes, et autres défis qui pourraient avoir des répercussions négatives sur la production et nécessiterait des mesures d'adaptation opportunes (p. ex., augmentation des économies en eau et modifications des pratiques de gestion des cultures).

- Les collectivités nordiques et éloignées remarqueront probablement d'importants changements dans leur environnement – certains allégeront les préoccupations relatives à la sécurité alimentaire, alors que d'autres pourraient aggraver la diminution des stocks d'aliments prélevés dans la nature et les difficultés à approvisionner les secteurs isolés.

- On prévoit que le Canada demeurera un exportateur net d'aliments d'origine marine dans l'ensemble et que la biomasse totale de production provenant de la pêche sauvage de capture au Canada augmentera en raison de changements dans la répartition des espèces de poisson provoqués par le climat. Les répercussions régionales attribuables aux espèces envahissantes, les changements physiques de l'habitat et les réponses de la société aux changements dans la disponibilité et l'accessibilité des ressources alimentaires aquatiques détermineront peu à peu les modèles d'utilisation futurs et les répercussions économiques globales.

- L'aquaculture présente de meilleures possibilités d'adaptation aux changements climatiques que les autres types de pêche, ce qui la rend moins vulnérable et en meilleure posture que la pêche de capture, particulièrement la pêche de subsistance, pour tirer profit des occasions qui se présentent.

1. INTRODUCTION

La production alimentaire est un moteur économique important au Canada, le secteur agricole ayant représenté 98 milliards de dollars du PIB en 2009 (AAC, 2011) et les exportations de produits de la pêche ayant été évaluées à plus de 4,1 milliards de dollars en 2012 (MPO, 2013a). De plus, on ne pourrait trop insister sur l'importance d'un accès fiable à des aliments sains et abordables pour les Canadiens. Bien que plusieurs facteurs touchent la production alimentaire, notamment les progrès technologiques, les forces du marché, ainsi que la demande et les préférences en matière d'aliments (p. ex., pour des produits biologiques), le climat est également un élément essentiel à prendre en considération. La production alimentaire, sur la terre comme dans l'eau, est intrinsèquement liée au climat.

Le système alimentaire du Canada est aussi varié que sa géographie. Les aliments sont produits et distribués par l'entremise d'une industrie des produits agricoles et des pêches, ainsi qu'au moyen d'importantes chaînes de production d'aliments prélevés dans la nature, qui comprennent des éléments non commerciaux, notamment la pêche, la chasse, le jardinage et la récolte. Les systèmes alimentaires dépendent des mesures prises au moyen de mécanismes sociaux pour gérer les changements environnementaux qui touchent la production et la sécurité alimentaires (Godfray *et al.*, 2010; Ziervogel et Ericksen, 2010; Perry *et al.*, 2010, 2012). Le présent chapitre est axé sur le volet « production alimentaire » du système alimentaire du Canada.

La production alimentaire provenant de l'agriculture dépend principalement de pratiques de culture et de récolte intensives dans des endroits relativement fixes, où des cultures cultivées de façon sélective représentent la majeure partie de la nourriture produite, ce qui rend la production fortement dépendante des conditions du marché. En revanche, les pêches reposent principalement sur des systèmes de capture sauvage hautement mobiles et sont assujetties aux conditions environnementales qui ont une incidence sur la répartition et l'abondance des produits. L'aquaculture, dont l'importance augmente au Canada, constitue toutefois un système de production d'aliments d'origine marine qui permet des calendriers de production plus prévisibles. Pour ces différents contributeurs aux systèmes alimentaires, les répercussions et les défis liés au climat changeant varient (figure 1).

Le présent chapitre aborde les conséquences des changements climatiques pour la production alimentaire provenant de l'agriculture, des pêches et d'autres sources non commerciales (notamment la chasse et la récolte). Il s'intéresse particulièrement aux répercussions observées et possibles. Les mesures d'adaptation sont abordées, et des détails supplémentaires sont fournis au moyen d'études de cas qui soulignent les défis et les risques pour la production alimentaire associés aux changements climatiques au Canada.



FIGURE 1 : Un résumé des répercussions possibles des changements climatiques sur la production alimentaire au Canada. **1)** La productivité des cultures dépend grandement et directement de la chaleur, de la lumière et de l'eau présentes selon la saison. L'emplacement des diverses cultures changera également. **2)** Les pollinisateurs profiteront d'hivers plus courts et moins rudes, mais pourraient être touchés par une augmentation de l'activité des ravageurs et des maladies, une modification des sources alimentaires et un changement du moment des différentes floraisons. **3)** La production animale sera touchée par des changements dans la production des cultures, la disponibilité de l'eau et les exigences en matière de chauffage et de refroidissement. **4)** Les modifications de l'approvisionnement en eau et des précipitations auront des répercussions sur les exploitations agricoles (p. ex., besoin de drainage ou d'irrigation). La qualité de l'eau sera également touchée (p. ex., augmentation du rejet de contaminants dans les voies navigables en raison de fortes précipitations). **5)** Le traitement des aliments pourrait être compliqué par la réduction ou la variabilité de l'approvisionnement en eau. Pour stocker la nourriture et les aliments du bétail, il faudra composer avec la chaleur accrue et, à certains endroits, une augmentation de la capacité de stockage pourrait être nécessaire afin de s'adapter à des interruptions du transport plus fréquentes et plus longues. **6)** Les stocks de poisson connaîtront des changements liés à la température et à la chimie de l'eau, à l'approvisionnement alimentaire, à la prolifération des algues, au ruissellement et aux courants océaniques. Les écosystèmes des lacs et des océans seront probablement réorganisés, ce qui aura des répercussions sur tous les types de pêche. **7)** Les ravageurs, les maladies et les espèces envahissantes pourraient devenir plus virulents et variés. **8)** Les collectivités nordiques pourraient être en mesure d'accroître la production alimentaire locale, grâce à des mesures d'adaptation (p. ex., serres, plantes de grande culture et fourrages résistants au froid). L'accès aux aliments prélevés dans la nature sera touché, puisque la végétation est directement touchée par les changements climatiques, et la répartition des espèces sera modifiée en raison du réchauffement. La diminution de la glace de mer pourrait prolonger la saison de navigation, ce qui permettra de transporter davantage de marchandises vers les ports côtiers nordiques. **9)** Le commerce international sera touché par les changements dans la géographie de la production alimentaire mondiale, en raison de l'expédition, par certains pays, de nouveaux types de biens et de l'ouverture éventuelle du passage du Nord-Ouest.

2. AGRICULTURE

2.1 INTRODUCTION

Le Canada, qui compte environ 650 000 km^2 en superficie agricole (~7,2 % de la superficie totale du Canada, figure 2; Statistique Canada, 2012), était au cinquième rang des pays exportateurs d'aliments agricoles en 2010 (AAC, 2011) et produit 70 % des aliments achetés dans les magasins canadiens (Statistique Canada, 2009a). Le Canada se démarque par la grande diversité de ses paysages agricoles, qui permettent de cultiver une grande variété de plantes et d'élever un cheptel diversifié. La capacité d'une région à soutenir l'agriculture dépend de plusieurs facteurs, notamment la composition du sol, la disponibilité de l'eau et des terres, la température, les pollinisateurs, l'ensoleillement et la couverture neigeuse.

Le climat a une incidence sur la productivité des cultures, la production animale, la viralité des ravageurs et des maladies, la santé des pollinisateurs, ainsi que la disponibilité et la qualité de l'eau. Les changements climatiques entraîneront des modifications des activités humaines (p. ex., systèmes de culture, utilisation de l'irrigation) et mèneront à des réactions de la flore et de la faune (p. ex., déplacement vers le nord). Les plantes, les animaux et les humains doivent s'adapter aux conditions en évolution. Cette portion du chapitre décrit les conclusions des recherches récentes sur les répercussions des changements climatiques et les mesures d'adaptation dans les secteurs agricole et agroalimentaire canadiens.

2.2 CONTEXTE ET TENDANCES ÉCONOMIQUES

En 2009, le système agricole et agroalimentaire représentait 8,2 % du PIB du Canada (AAC, 2011). L'agriculture primaire et la transformation des aliments jouent un rôle particulièrement important dans l'économie de certaines provinces telles la Saskatchewan et l'Île-du-Prince-Édouard (Î.-P.-É.), où elles constituent, respectivement, 12,8 et 10 % du PIB provincial (figure 3). Ensemble, l'Ontario, le Québec et l'Alberta comptent, quant à eux, pour 70 % du PIB canadien total dans le secteur de l'agriculture et de la transformation des aliments (figure 4; AAC, 2012e). Ce secteur emploie plus de 2 millions de personnes et est le principal employeur à l'Î.-P.-É. et en Saskatchewan (AAC, 2011).

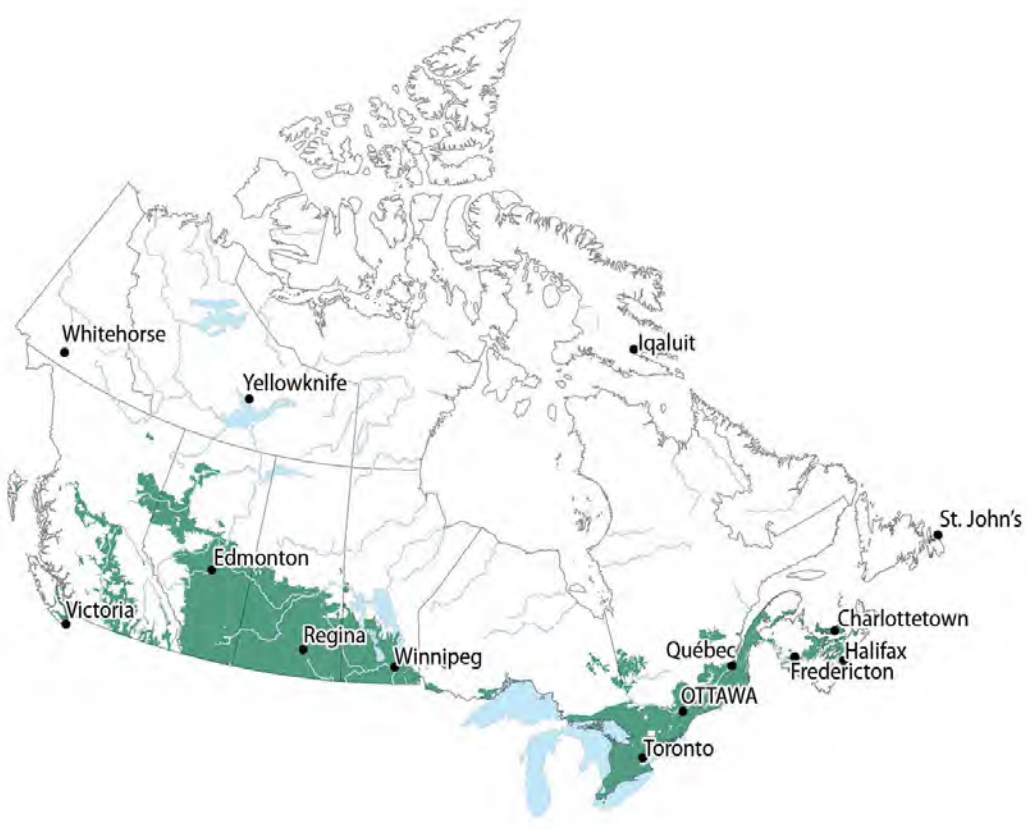


FIGURE 2 : Carte indiquant l'étendue de l'agriculture au Canada (AAC, 2013).

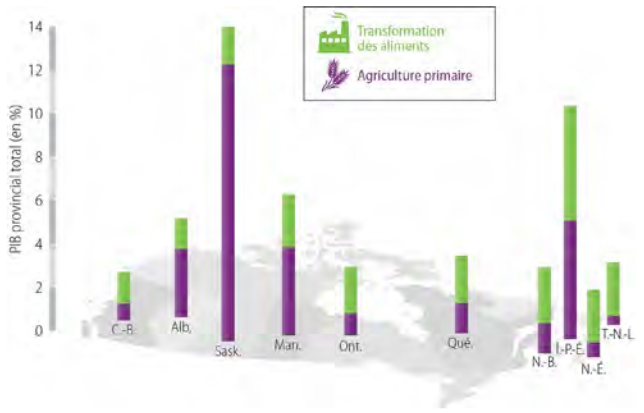


FIGURE 3 : Contribution de la transformation des aliments et de l'agriculture primaire au PIB des provinces en 2011 *(extrait modifié tiré de AAC, 2012e, tableau B1.5)*. Les données de 2011 sont préliminaires. Exclut le traitement des boissons et du tabac.

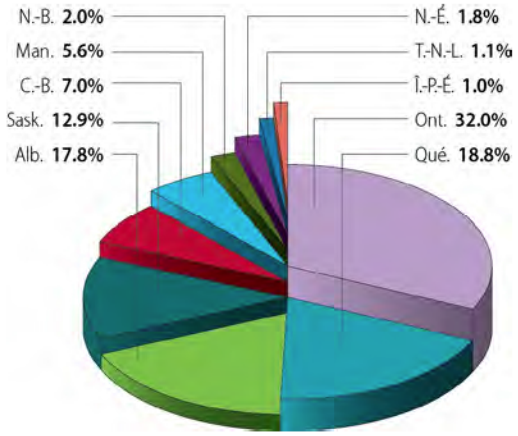


FIGURE 4 : Répartition de la contribution du secteur de la transformation des aliments et de l'agriculture primaire au PIB agricole canadien *(extrait modifié tiré de AAC, 2012e, tableau B1.6)*.

Au cours des 70 dernières années, des regroupements ont eu lieu dans le secteur, qui comptait 732 800 exploitations agricoles en 1941, et 205 700, en 2011. Bien qu'environ 62 % des exploitations aient un revenu brut inférieur à 100 000 $, le nombre d'exploitations ayant des recettes brutes supérieures à 500 000 $ est passé de 19 817 en 2006 à 23 579 en 2011 (Statistique Canada, 2012). Les exploitations agricoles dont les revenus dépassent 1 000 000 $ représentaient 20 % des recettes de fonctionnement totales en 1994, et sont passées à 50 % en 2009 (AAC, 2011). Au même moment, la dette des exploitations s'est accrue de façon constante (Syndicat national des cultivateurs, 2011). Les données semblent indiquer que les cultivateurs continuent d'investir dans leurs terres et leur équipement en plus d'assumer des frais plus importants liés à leurs prêts d'exploitation et aux agrofournisseurs (Syndicat national des cultivateurs, 2011). L'âge moyen des cultivateurs a également augmenté (Statistique Canada, 2012).

Les types de biens produits dans l'ensemble du Canada dépendent de plusieurs facteurs édaphiques (p. ex., sols, topographie), climatiques (p. ex., durée de la saison sans gel, précipitations), socioéconomiques (p. ex., préférences des consommateurs, environnements réglementaires) et historiques (*voir*, par exemple, Clark, 2010). La figure 5 présente la répartition des biens parmi les exploitations, alors que la figure 6 illustre la répartition régionale. En 2011, les cultures les plus importantes par superficie totale de plantes de grande culture étaient le canola et le blé de printemps, représentant respectivement ~22,5 % et ~20 % de la superficie totale des exploitations (Statistique Canada, 2012). En 2011, les exploitations basées sur la culture représentaient 58,4 % des exploitations et celles basées sur le bétail, 41,6 % (Statistique Canada, 2012).

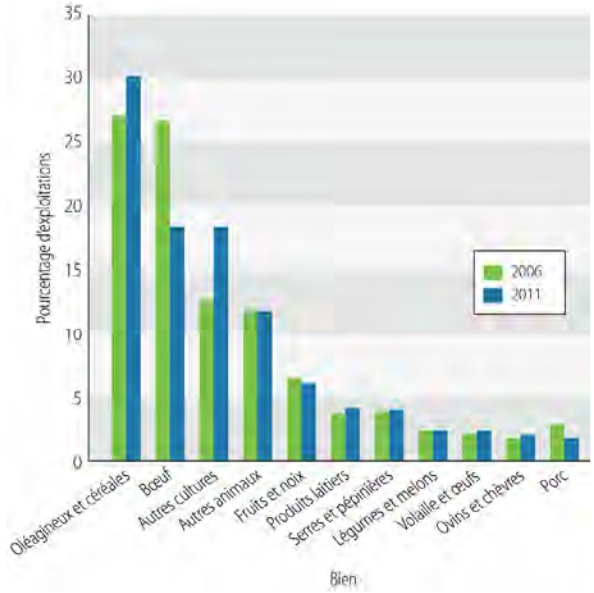


FIGURE 5 : Pourcentage d'exploitations par bien en 2006 et en 2011 *(extrait modifié tiré de Statistique Canada, 2012)*.

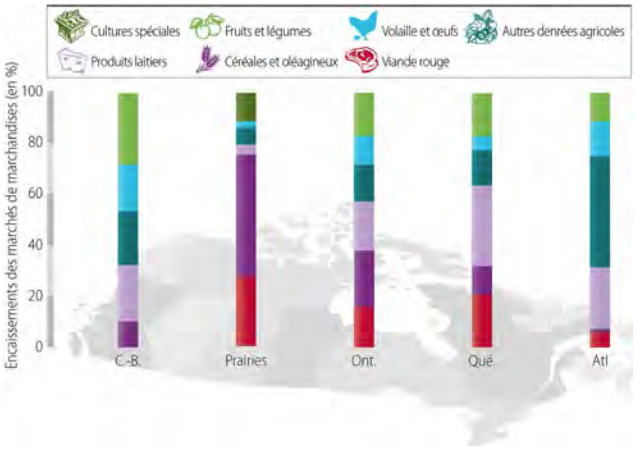


FIGURE 6 : Encaissements des marchés de marchandises par région en 2009 *(extrait modifié tiré de AAC, 2011, tableau C4.6)*.

On remarque également une sensibilisation accrue à l'importance d'une exploitation agricole durable. Les exploitations comptant un plan environnemental de la ferme établi sont passées de 13 % en 2001 à 35 % en 2011 (AAC, 2014). L'agriculture sans travail du sol, qui peut améliorer la santé du sol en réduisant le compactage et en augmentant le stockage du carbone, ainsi que l'infiltration de l'eau et des nutriments, est passée de 10 % des terres cultivées en 1991 à près de 50 % en 2006 (AAC, 2011). La qualité de l'eau est mieux protégée, grâce à une utilisation accrue des zones tampons riveraines, au drainage contrôlé au moyen de tuyaux et à un contrôle de l'accès du bétail aux eaux de surface naturelles (AAC, 2011). Les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'agriculture ont diminué de 2,6 % entre 1990 et 2007, principalement en raison de changements dans l'utilisation des terres (AAC, 2011). Les technologies et les processus nouveaux ou modifiés permettent la création de machinerie et de pratiques plus efficaces, qui visent à réduire les coûts d'exploitation et les répercussions des activités sur le paysage.

Le secteur du bétail a connu une tendance à la baisse en ce qui a trait au nombre d'animaux (p. ex., porcs et bovins de boucherie) en raison de plusieurs facteurs, notamment les restrictions à l'exportation des bovins, le prix élevé des produits d'alimentation animale et la force du dollar canadien qui nuit à l'exportation du porc (AAC, 2013). Le nombre de bovins laitiers est passé de près de 1 800 000 en 1981 à 961 726 en 2011. La production laitière est tout de même demeurée stable, à environ 7,5 millions de kilolitres (Statistique Canada, 2012), grâce aux gains en efficience (AAC, 2013) découlant de l'adoption de la zoogénétique, la gestion des produits d'alimentation animale, et autres pratiques (AAC, 2011).

2.3 PRINCIPALES CONCLUSIONS TIRÉES DES ÉVALUATIONS PRÉCÉDENTES

L'agriculture a été abordée dans la plupart des chapitres consacrés aux régions du document intitulé *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (Lemmen *et al.*, 2008), généralement dans des sections autonomes décrivant une vaste gamme de répercussions (positives et négatives), donnant des exemples d'initiatives courantes en matière d'adaptation et examinant les solutions possibles en matière d'adaptation. Ces chapitres ont démontré que des changements au niveau de la température et des précipitations auront des effets importants sur l'agriculture au Canada, en intensifiant les risques actuels et en créant de nouveaux défis et de nouvelles possibilités. Même si l'ensemble du Canada sera touché, les répercussions ne seront pas uniformes dans les différents paysages agricoles, qui ont été répartis en quatre régions : 1) est et centre du Canada; 2) nord du Canada; 3) Prairies; 4) Colombie-Britannique.

EST ET CENTRE DU CANADA

(tiré de Bourque et Simonet, 2008; Chiotti et Lavender, 2008; Vasseur et Catto, 2008)

Le ruissellement printanier accru représentera un défi important pour cette région et soulève des préoccupations en ce qui concerne les inondations (augmentation possible des pertes de nutriments et de la pollution des eaux de surface), qui pourraient nuire aux semailles du printemps et à d'autres activités dans les champs. L'augmentation des précipitations printanières et l'intensification des tempêtes auront également une incidence sur le stockage du fumier, augmenteront le ruissellement du fumier du bétail et des nutriments présents dans le sol des champs vers les zones riveraines, et accroîtront l'érosion du sol. La révision des pratiques de gestion et, dans certains cas, la construction de structures de rétention du ruissellement (y compris l'implantation de zones humides) pourraient faire partie des mesures d'adaptation.

On prévoit que l'augmentation des températures estivales prolongera la saison de croissance et permettra à certaines cultures d'être cultivées à de plus hautes latitudes, ce qui sera avantageux pour certaines cultures, mais nuisibles pour d'autres. L'évaporation accrue pourrait provoquer un stress hydrique et réduire la productivité. Une diminution de la disponibilité de l'eau pourrait être en partie contrebalancée par une amélioration de l'utilisation améliorée de l'eau par les cultures dans des conditions où les concentrations de CO_2 seraient plus élevées. Un risque accru de mortalité hivernale des bourgeons (surtout les arbres fruitiers et les vignes), et la possibilité de gelées tardives meurtrières et plus variables, pourraient causer d'importantes pertes de cultures, tout comme le pourrait l'accroissement possible des ravageurs, des maladies et des mauvaises herbes agricoles.

Les producteurs de bétail peuvent s'attendre à ce que leurs besoins en chauffage diminuent et leurs besoins en climatisation augmentent, alors que des vagues de chaleur plus nombreuses exigeront des mesures d'adaptation comme l'ajout d'arbres d'ombrage dans les pâturages. Bien que des vagues de chaleur accompagnées de sécheresse puissent diminuer la prise de poids des animaux, réduire la production laitière et abaisser les taux de conception, des conditions plus chaudes et plus humides peuvent aussi avoir des conséquences négatives pour la santé animale, en raison du nombre accru de tiques, de moustiques, de parasites et de bactéries. La production de bétail pourrait cependant bénéficier des hivers plus doux, puisqu'il sera possible d'engraisser plus longtemps les animaux à l'extérieur.

COLLECTIVITÉS NORDIQUES ET ÉLOIGNÉES

(tiré de Furgal et Prowse, 2008)

Les changements climatiques ont une incidence sur la disponibilité et la qualité des aliments sauvages, comme les baies, le riz sauvage et le gibier, qui sont tous des éléments clés des systèmes alimentaires provenant de la nature. Un raccourcissement de la saison d'utilisation des routes de glace (une façon plus économique d'envoyer de gros articles en vrac à certaines collectivités nordiques) aura des répercussions sur l'envoi de nourriture dans le nord. Un recul de la couverture de glace de mer mènera à une saison de transport maritime plus longue, dont tireront avantage les collectivités côtières disposant d'installations portuaires, même s'il faut tenir compte des effets des tempêtes plus fortes et de l'état changeant des glaces.

PRAIRIES

(tiré de Sauchyn et Kulshreshtha, 2008)

Les enjeux relatifs à l'eau sont les plus préoccupants pour les Prairies. La diminution des pluies estivales a des répercussions sur la qualité et la disponibilité de l'eau souterraine. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, de la demande pour des cultures de grande valeur et de l'utilisation des terres à des fins non agricole (p. ex., extraction de pétrole, de gaz et de potasse), ainsi que le besoin de maintenir le débit des rivières pour le bienfait des écosystèmes aquatiques, pourraient limiter la capacité à étendre l'agriculture irriguée et l'élevage. Des crues printanières plus importantes pourraient augmenter la perte de nutriments et la prolifération d'algues dans les bassins hydrographiques.

Bien qu'un climat plus doux prolongera sans doute la saison de croissance, il diminuera aussi la couverture neigeuse pendant l'hiver, réduisant ainsi la protection du sol contre l'érosion par les vents hivernaux. Une augmentation des ravageurs et des maladies est aussi possible sous un climat plus doux, puisque les organismes du sud se déplaceront vers le nord et que les organismes nordiques seront moins touchés par les mortalités hivernales. Des politiques et des plans intégrés visant une gestion holistique de l'eau à l'échelle des régions et des bassins hydrographiques (p. ex., récupérer les surplus d'eau pour les utiliser pendant les sécheresses) pourraient devoir être révisés ou élaborés.

COLOMBIE-BRITANNIQUE

(tiré de Walker et Sydneysmith, 2008)

Une diminution des débits des cours d'eau pendant l'été, une recharge réduite des eaux souterraines et une augmentation de la demande en eau provenant d'autres secteurs présenteront des défis pour la gestion des ressources hydriques destinées à l'agriculture. L'agriculture dans la vallée de l'Okanagan dépend déjà grandement de l'irrigation et une hausse des températures associée à une prolongation des saisons de croissance signifiera une demande en eau accrue pour les cultures à laquelle les infrastructures existantes ne seront peut-être pas en mesure de répondre. Dans les régions côtières, l'élévation du niveau de la mer pourrait mener à une intrusion d'eau salée dans les aquifères, ainsi qu'à l'inondation de terres agricoles le long des côtes, ce qui provoquerait une perte de terres agricoles et une diminution de la qualité de l'eau potable et d'irrigation.

Une chaleur accrue pourrait signifier un risque plus élevé de ravageurs, d'incendies et de sécheresses estivales, dont les répercussions pourraient se faire sentir au niveau des vignobles et des vergers fragiles, en plus de toucher l'agrotourisme. Les changements climatiques permettraient la culture de céréales et de pommes de terre, en plus du maïs et des tomates, à l'intérieur des terres et vers le nord, jusqu'à Prince George. Les mesures d'adaptation utilisées actuellement telles que les souffleuses à air chaud permettant d'atténuer les gelées tardives dans les vergers et les vignobles, le refroidissement par évaporation de l'eau d'irrigation visant à réduire le stress thermique des cultures, les permis d'utilisation des eaux afin de réduire le gaspillage et les processus de gestion des ravageurs, devront être modifiées pour composer avec l'évolution des conditions.

2.4 RISQUES, POSSIBILITÉS ET MESURES D'ADAPTATION

La présente section aborde les nombreux risques et possibilités pour le secteur agricole canadien associés aux changements climatiques, en particulier les nouvelles constatations.

2.4.1 APTITUDE DES TERRES À ENGENDRER DES RÉCOLTES

Le *Système de classification des terres selon leurs aptitudes pour les cultures* (SCTAC) évalue les caractéristiques du climat, du sol et du paysage d'un secteur, afin d'établir une cote pour la production d'une culture en particulier (AAC, 2012a). Le classement définitif d'une terre, en ce qui concerne l'aptitude à la culture, est fondé sur le facteur le plus limitant (climat, sol ou paysage). L'aptitude est exprimée à l'aide d'un système de cotation de 1 à 7, la classe 1 signifiant qu'il n'existe pas de limitations importantes qui nuisent à la production d'une culture en particulier, et la classe 7 signifiant qu'une terre est inadaptée à l'agriculture (Groupe de travail sur les interprétations agronomiques, 1995). Le tableau 1 décrit la gravité des limitations liées à chaque classe d'aptitude et regroupement de classes, aux fins d'évaluation des différences possibles en fonction du climat, du sol ou du paysage.

Classe d'aptitude	Description	Regroupements des classes d'aptitude
Classe 1	Dans cette classe, les terres ne présentent aucune limitation importante pour la production des cultures données	Limitations inexistantes à modérées
Classe 2	Dans cette classe, les terres présentent de légères limitations qui peuvent restreindre la croissance des cultures données ou nécessiter des pratiques de gestion modifiées	
Classe 3	Dans cette classe, les terres présentent des limitations modérées qui restreignent la croissance des cultures données ou qui nécessitent des pratiques de gestion spéciales	
Classe 4	Dans cette classe, les terres présentent de graves limitations qui restreignent la croissance des cultures données ou qui nécessitent des pratiques de gestion spéciales, ou les deux. Cette classe est marginale pour ce qui est de la production durable des cultures données	Limitations graves
Classe 5	Dans cette classe, les terres présentent de très graves limitations quant à la production durable des cultures données. On ne recommande pas la culture annuelle à l'aide des pratiques agricoles habituelles	
Classe 6	Dans cette classe, les terres présentent des limitations extrêmement graves quant à la production durable des cultures données. On ne recommande pas la culture annuelle, même de façon occasionnelle	Inadapté
Classe 7	Dans cette classe, les terres sont inadaptées à la production des cultures données	

TABLEAU 1 : Classes d'aptitude des terres à la culture de petites céréales semées au printemps (AAC, 2012a).

Hewitt *et al.* (2008) ont utilisé le SCTAC pour présenter l'aptitude actuelle (1971-2000) et prévue (2010-2039, selon les scénarios A2 et A1B du SRES) des terres agricoles à la culture de petites céréales semées au printemps dans les Praires canadiennes (figure 7). Les modifications importantes des cotes du SCTAC enregistrées entre 1971-2000 et 2010-2039 ont ensuite été calculées, puis cartographiées pour les régions agricoles actuelles (2011) de l'ouest et de l'est du Canada (figures 8 et 9, respectivement), en fonction de l'hypothèse selon laquelle le climat aurait été le seul facteur qui ait évolué au fil du temps.

L'analyse semble indiquer que la plus importante amélioration possible pour la culture de petites céréales semées au printemps se situe dans l'ouest de l'Alberta et dans le nord-est de la Colombie-Britannique, où 5,3 % des terres indiquées pourraient connaître une amélioration. Seule une très petite proportion des terres (0,4 %) ont démontré une diminution de leur potentiel, principalement dans l'est des Prairies et le sud de l'Ontario.

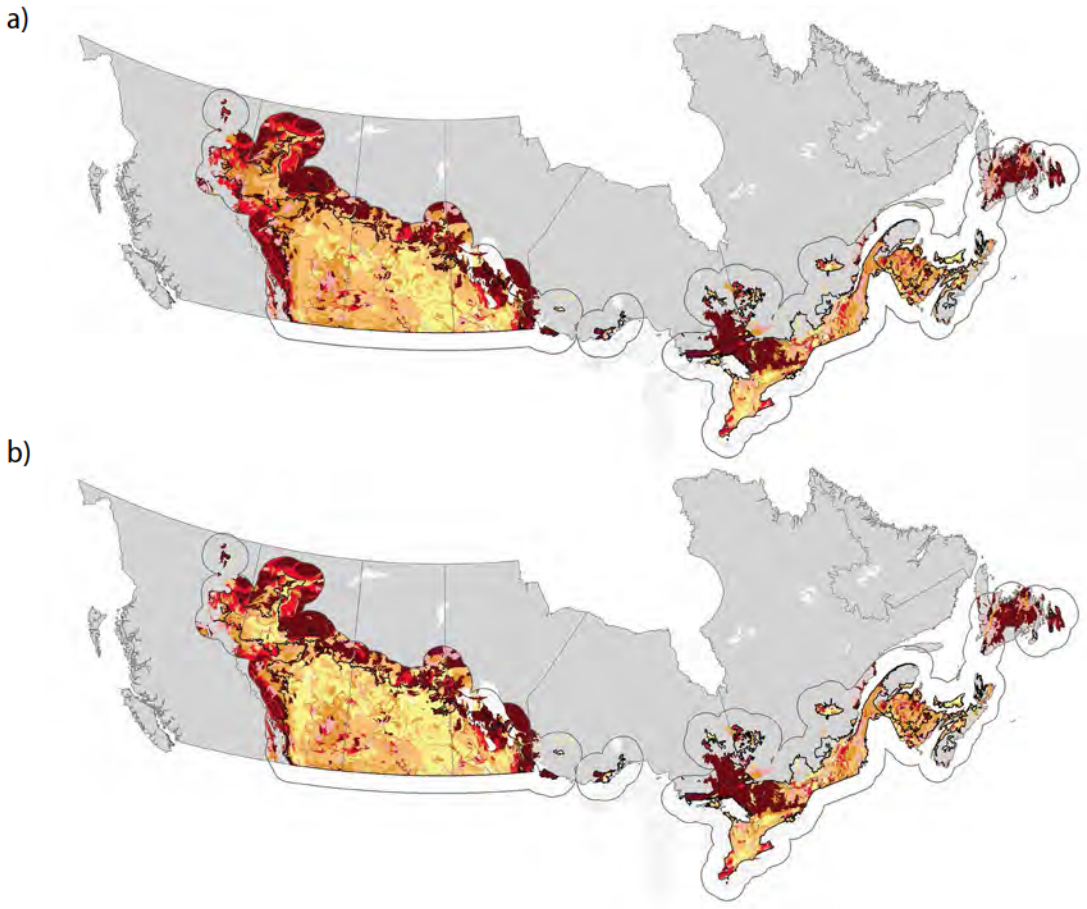


FIGURE 7 (a, b) : Carte de l'aptitude des terres à la culture de petites céréales semées au printemps fondée sur les données climatiques pour **a)** 1971-2000 et **b)** scénario de l'aptitude prévue des terres fondé sur des données climatiques modélisées pour 2010-2039, tel que préparé par AAC (2012a) à l'aide de la méthode présentée dans Hewitt *et al.* (2008) et de données spatiales mises à jour tirées de Pédo-paysages du Canada (Schut *et al.*, 2011). Remarque : les secteurs du sud et du centre de la Colombie-Britannique ne font pas partie des figures parce que les données climatiques modélisées étaient trop imprécises pour représenter adéquatement le climat dans les vallées où une production agricole pourrait avoir lieu.

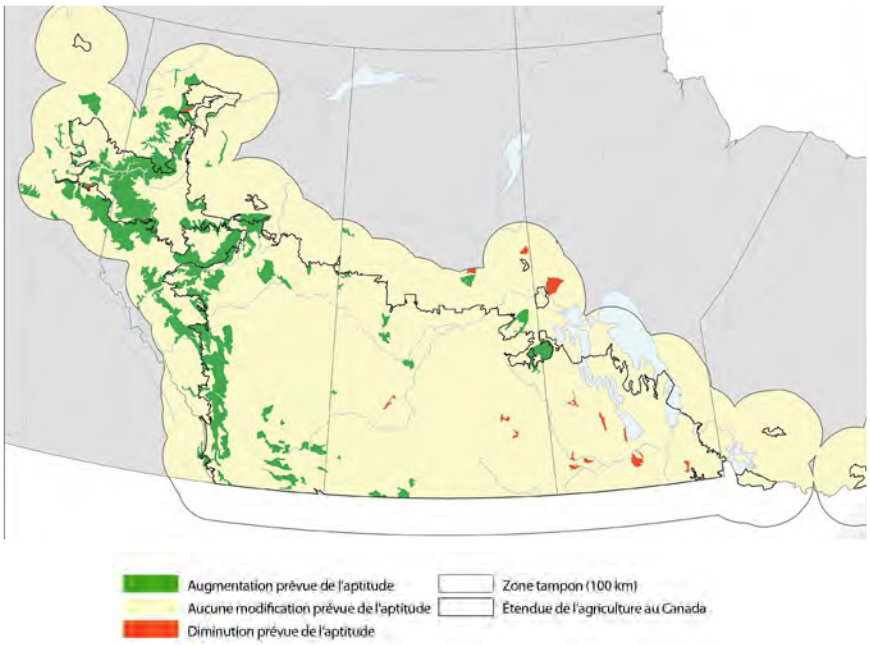


FIGURE 8 : Carte de l'ouest du Canada indiquant les améliorations et les déclins importants prévus de l'aptitude des terres à la culture de petites céréales semées au printemps (AAC, 2012a).

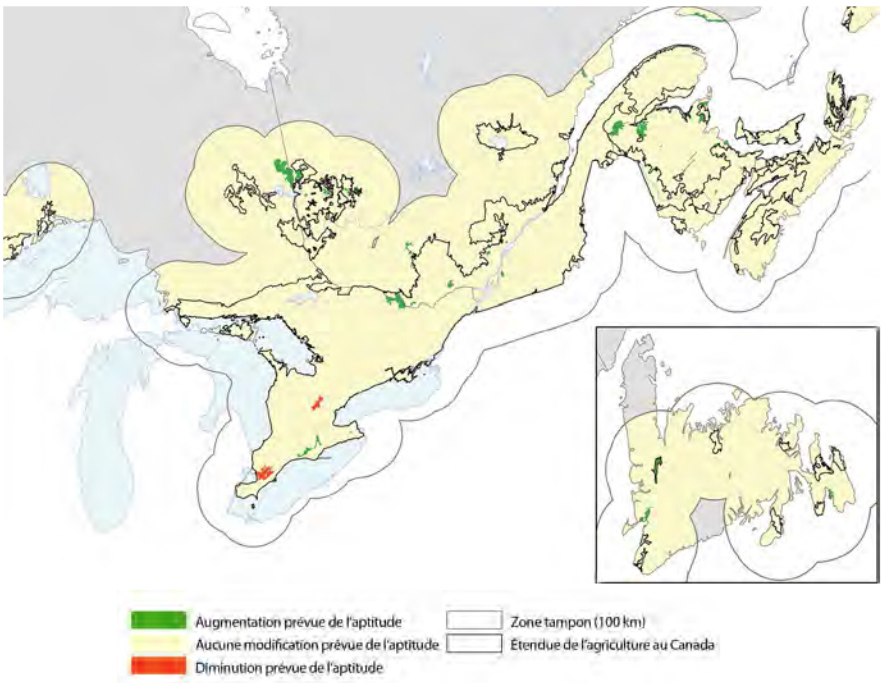


FIGURE 9 : Carte de l'est du Canada indiquant les améliorations et les déclins importants prévus de l'aptitude des terres à la culture de petites céréales semées au printemps (AAC, 2012a).

La modélisation appuie d'autres analyses, indiquant une augmentation probable du potentiel des terres pour la culture de petites céréales semées au printemps dans certains secteurs plus septentrionaux et dans des secteurs principalement dédiés au foin et au fourrage. Elle indique également que le potentiel pour la culture de petites céréales semées au printemps dans les régions sèches pourrait demeurer le même ou augmenter légèrement, à condition que les cultivateurs sèment plus tôt pour réduire l'exposition aux conditions plus sèches de la fin de l'été (AAC, 2012a).

2.4.2 CULTURES/SYSTÈMES DE CULTURE

Une analyse documentaire réalisée par Kulshreshtha *et al.* (2010) a révélé des incertitudes au niveau des prévisions de récoltes qui laisseraient entendre que la productivité des cultures pourrait augmenter ou diminuer dans un climat changeant. Une partie de ces incertitudes a été attribuée aux études qui ne tiennent pas compte des répercussions indirectes des changements climatiques sur les ravageurs, les maladies et les mauvaises herbes, ainsi que d'autres facteurs ayant une incidence sur la production des cultures tels les sols (Wheaton et Kulshreshtha, 2009). Les incertitudes dans les prévisions de récoltes comprennent des lacunes au niveau de l'état actuel des connaissances au sujet de la variabilité du climat, notamment en ce qui a trait aux interactions entre diverses téléconnexions comme l'oscillation australe El Niño (ENSO), l'oscillation décennale du Pacifique (ODP) et l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (OMA), et à la façon dont ces interactions pourraient se trouver touchées par les futurs changements climatiques (Reuten *et al.*, 2012; *voir également* l'encadré 1).

Bien que la production de nouvelles cultures soit faisable sur le plan agronomique, des incertitudes persistent quant à la capacité des cultivateurs à adapter leurs activités en temps opportun, en raison de facteurs comme les contraintes budgétaires (Kulshreshtha *et al.*, 2010), l'incertitude face aux programmes et aux politiques du gouvernement (Pittman *et al.*, 2011) et la plus grande variabilité du climat (*voir* l'encadré 1). Les cultivateurs devront aussi équilibrer les changements qui s'opèrent au niveau de plusieurs variables. Par exemple, la température et les précipitations au début de juillet sont des éléments cruciaux pour la récolte du canola : des températures maximales plus élevées ont des répercussions négatives sur la récolte, et des précipitations plus importantes que la moyenne ont une incidence positive sur la récolte (Kutcher *et al.*, 2010).

Les scénarios climatiques futurs pour les Prairies canadiennes pourraient encourager une utilisation accrue des légumineuses en rotation, y compris une utilisation plus grande des légumineuses semées à l'automne (Cutforth *et al.*, 2007). Par exemple, les cultivars de pois chiches et de lentilles sont adaptés aux conditions climatiques extrêmes de gel et de sécheresse, puisqu'ils ont besoin d'un stress physiologique (p. ex., une sécheresse) pour terminer leur floraison et lancer la grenaison (Saskatchewan Pulse Growers, 2000). En raison de saisons de croissance plus chaudes et plus longues, la production de soya pourrait se déplacer vers le nord, en Saskatchewan et dans d'autres secteurs de la région des Prairies (Kulshreshtha, 2011), et les conditions dans les Prairies pourraient devenir mieux adaptées à la production du maïs. Le sorgho pourrait s'avérer une culture appropriée aux nouvelles conditions climatiques, puisqu'il produit un système racinaire élaboré au début de son développement et ferme rapidement son stomate en situation de carence en eau (Almaraz *et al.*, 2009). Les pratiques d'adaptation qui protègent les cultures des dommages causés par les vents et des importantes pertes par évaporation, soit en laissant le chaume sur pied, soit en réduisant le travail du sol, deviendront des outils encore plus importants pour la gestion des cultures des prairies (Cutforth *et al.*, 2007).

En Colombie-Britannique, les tendances saisonnières et spatiales prévues indiquent une augmentation des précipitations et du réchauffement (*voir* Zwiers *et al.*, 2011; Crawford et McNair, 2012; chapitre 2 – *Un aperçu des changements climatiques au Canada*), qui offriraient plus de possibilités de récoltes et des avantages en ce qui concerne les pâturages et l'élevage de bétail. Des étés plus chauds et plus secs pourraient toutefois augmenter les risques de sécheresse, et des automnes plus humides pourraient poser un risque accru pour l'abondance des récoltes. L'augmentation prévue des degrés-jours de croissance dans les vallées entourant Prince George d'ici les années 2050 rendrait le climat favorable à la culture du canola et d'autres cultures qui, pour le moment, ne peuvent pas être cultivés dans ce secteur (Picketts *et al.*, 2009).

ENCADRÉ 1

VARIABILITÉ DU CLIMAT – UN DÉFI IMPORTANT POUR LES PRODUCTEURS

L'exploitation agricole, en tant qu'activité annuelle, dépend grandement des conditions climatiques saisonnières, mais en tant qu'industrie et entreprise, elle dépend davantage de la prévisibilité des conditions saisonnières d'une année à l'autre. Un cultivateur qui connaît la gamme des conditions climatiques qu'il rencontrera au cours d'un certain nombre d'années peut choisir des cultures et des pratiques et investir dans des infrastructures qui lui permettront de tirer profit de ces conditions. Les pertes agricoles sont causées par l'imprévisibilité des conditions. Notre compréhension incomplète de la variabilité du climat actuel mine donc grandement notre capacité à évaluer l'agroclimat en fonction de divers scénarios de changements climatiques (Reuten *et al.*, 2012), tout comme la probabilité que le climat futur sera non seulement plus chaud, mais aussi plus variable. Des avancées récentes améliorant l'état des connaissances au sujet des tendances cycliques multidécennales qui caractérisent les relations entre la pression atmosphérique et les courants océaniques telles l'oscillation décennale du Pacifique (ODP), l'oscillation nord-atlantique (ONA), l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (OMA) et l'oscillation australe sous-décennale El Niño (ENSO), ont permis d'élucider une partie de la variabilité du climat sévissant dans les régions agricoles canadiennes (Perez-Valdivia *et al.*, 2012; Reuten *et al.*, 2012). Afin de mieux prévoir la variabilité future des conditions agroclimatiques, cependant, il est nécessaire de mieux comprendre la façon dont les changements climatiques interagiront avec ces téléconnexions à court et à long cycles, et la mesure dans laquelle cela se produira.

Au cours des trois dernières décennies, on a noté dans la région québécoise de la Montérégie une tendance générale vers une augmentation de la température. Le changement le plus important de la saison de croissance s'est produit en septembre, alors que les températures moyennes ont augmenté de 0,8 °C (Almaraz *et al.*, 2008). Une saison de croissance plus chaude et plus longue sera bénéfique pour le maïs, le soya et la production de fourrage (Ouranos, 2010). La culture du maïs et du soya pourrait s'étendre à de nouvelles régions disposant du sol et de la topographie qui conviennent, comme le Saguenay–Lac-Saint-Jean, l'Abitibi et le Bas-Saint-Laurent–Gaspésie (Ouranos, 2010). La production de sirop d'érable dans la région sera également touchée (*voir* l'étude de cas 1).

2.4.3 RAVAGEURS, MALADIES ET ESPÈCES EXOTIQUES ENVAHISSANTES

Plusieurs ravageurs et maladies agricoles sont sensibles au climat, et l'on prévoit que les changements climatiques modifieront la fréquence, la gravité et la répartition des épidémies (Aurambout *et al.*, 2006; Gagnon *et al.*, 2011, 2013; Luck *et al.*, 2014). Il est difficile de prévoir les répercussions sur la production alimentaire, en partie parce que l'écologie climatique propre à plusieurs de ces ravageurs et maladies est mal comprise, et aussi parce que la gravité des pertes dues à ces ravageurs et maladies dépendra non seulement de leur écologie, mais aussi des décisions de gestion concernant, notamment, le contrôle des ravageurs et des maladies, et les pratiques agricoles propres aux cultures (Luck *et al.*, 2014).

ÉTUDE DE CAS 1

LE SIROP D'ÉRABLE ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le sirop d'érable est un produit canadien par excellence – grâce au réchauffement climatique. Il y a un siècle, environ 80 % de la production mondiale de sirop d'érable provenaient des États-Unis et 20 %, du Canada. Aujourd'hui, environ 85 % de la production mondiale de sirop d'érable provient du Canada (AAC, 2007), et le Québec représentait 90 % (7,7 millions de gallons) de la production canadienne en 2011 (Statistique Canada, 2011).

Les essences arboricoles du nord des États-Unis, comme l'érable à sucre, remontent vers le nord à un rythme de près de 100 km par siècle, et ce mouvement a gagné en importance depuis 1971 (Woodall *et al.*, 2009). Les prévisions de déplacement de l'érable à sucre jusqu'en 2100 au Québec (Duchesne *et al.*, 2009) et en Ontario (Lamhonwah *et al.*, 2011) indiquent un déplacement continu vers le nord, bien que le mouvement vers le nord de l'Ontario accusera un ralentissement, en raison des sols plus pauvres du Bouclier canadien (Lamhonwah *et al.*, 2011). Plusieurs États américains ont indiqué que les saisons de collecte de l'eau d'érable débutent et se terminent plus tôt, que les températures peuvent être trop élevées pour obtenir une production optimale, et que l'eau d'érable est de moindre qualité et contient moins de sucre (USDA, 2012).



FIGURE 10 : La collecte de l'eau d'érable se déplace vers le nord à mesure que les températures se réchauffent. *(Photo © 2007, Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire).*

Les températures optimales pour la saison des sucres sont de -5 °C la nuit et de 5 °C le jour, ce qui permet à la sève de couler en quantités commercialement rentables (AAC, 2007; figure 10). Comme cette fourchette de températures se retrouve maintenant plus au nord, le Canada a récupéré la plus grande part de l'industrie. Comme les jours d'écoulement de sève débuteront plus tôt, sur une période pouvant atteindre jusqu'à 30 jours d'ici 2100 (Skiner *et al.*, 2010), il faudra modifier la date à laquelle les érables sont entaillés, en supposant que les arbres puissent s'adapter à un écoulement hâtif (Duchesne *et al.*, 2009). Les mesures d'adaptation prévues pourraient comprendre l'investissement dans de nouveaux systèmes de collecte plus efficaces, qui permettent d'accroître la récolte, et l'augmentation des quotas afin de permettre d'accroître le nombre d'entailles en vue de compenser les manques à gagner (Duchesne *et al.*, 2009).

Parmi les mesures d'adaptation, on retrouve la détection précoce des ravageurs pour mieux cibler les dates d'intervention, la création de cultivars et d'outils de gestion intégrée des ravageurs adaptés aux nouvelles conditions climatiques, et la mise en place d'un réseau de détection des nouveaux ravageurs (Comité de suivi et de concertation de la stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture, 2011; Gagnon *et al.*, 2013). Il est probable que les nouvelles espèces exotiques envahissantes présentent de plus grands risques pour l'agriculture, puisque des recherches continues et des mécanismes sont en place dont la tâche consiste à gérer les maladies et les ravageurs déjà présents. Plusieurs des nouveaux ravageurs et maladies, qui pourraient faire leur entrée au Canada en raison des changements climatiques, sont toutefois déjà présents ailleurs (particulièrement aux États-Unis) et il pourrait être possible de tirer profit des connaissances acquises et d'adapter les processus de contrôle existants à ces endroits en vue de les utiliser au Canada (*voir*, par exemple, l'étude de cas 2).

On a estimé les répartitions possibles de certaines espèces de ravageurs et maladies sensibles au climat qui touchent l'agriculture (p. ex., Baker *et al.*, 2000; Aurambout *et al.*, 2009), principalement en ce qui concerne les espèces exotiques envahissantes, dont la présence peut avoir des répercussions sur le commerce international en raison des dispositions sanitaires et phytosanitaires de l'Organisation mondiale du commerce (OMC). Plusieurs pays, dont le Canada, évaluent la façon dont les politiques en matière de biosécurité pourraient devoir être adaptées aux changements climatiques et étudient les répercussions de ces changements sur les espèces exotiques envahissantes (Luck *et al.*, 2014). Le processus d'évaluation des risques que présentent les ravageurs tel qu'il est actuellement mis en pratique, comprend la cartographie de la répartition connue d'un organisme en fonction de paramètres climatiques fondamentaux, qui servent alors à prévoir la répartition possible au cas où cet organisme viendrait à s'établir dans un nouveau pays. Le Canada et plusieurs autres pays se servent de scénarios de changements climatiques pour étudier la répartition future possible des mauvaises herbes et des ravageurs (Luck *et al.*, 2014).

Au Canada, l'introduction d'espèces exotiques envahissantes augmentera en raison de la mondialisation du commerce liée aux changements climatiques et à d'autres facteurs économiques et politiques (GIEC, 2007). D'éventuels changements aux routes commerciales tels que l'ouverture du passage du Nord-Ouest, pourraient aussi modifier les risques d'introductions (Luck *et al.*, 2014).

Des incertitudes persistent au niveau des répercussions d'une augmentation du CO_2 atmosphérique sur les parasites des plantes et les maladies. Dans certains cas, l'activité des ravageurs pourrait s'accroître ou les plantes hôtes pourraient devenir moins résistantes, alors que dans d'autres cas, les plantes hôtes pourraient devenir plus résistantes aux ravageurs et aux pathogènes (p. ex., Chakraborty et Datta, 2003; Fuhrer, 2003; Chakraborty, 2005; Coll et Hughes, 2008).

ÉTUDE DE CAS 2

FIÈVRE CATARRHALE DU MOUTON – MESURES D'ADAPTATION DU SECTEUR PRIVÉ ET DU GOUVERNEMENT À LA PROPAGATION D'UNE MALADIE ANIMALE CAUSÉE PAR D'ÉVENTUELS CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La fièvre catarrhale du mouton est une maladie virale qui touche les ruminants et qui est parfois mortelle pour le mouton, mais rarement pour les autres animaux. Elle ne se transmet pas à l'humain. Elle est transmise par plusieurs espèces de mouches piqueuses et peut provoquer la fermeture des marchés d'exportation. On ne croit pas que la maladie ait déjà été introduite au Canada et il semblerait que les quelques cas relevés au Canada étaient dus à des mites importées accidentellement des États-Unis (Lysyk et Danyk, 2007).

En Amérique du Nord, la fièvre catarrhale du mouton est principalement transmise par une espèce de moucherons présente en Colombie-Britannique, mais pas dans les autres provinces pour l'instant. L'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA), l'organisme gouvernemental responsable de la surveillance de ces maladies animales, a défini cinq régions écologiques au Canada en vue d'un contrôle préventif de la fièvre catarrhale, dans l'espoir que, si des cas de fièvre apparaissent dans l'une de ces régions, nos partenaires commerciaux admettront que tous les ruminants n'y ont pas nécessairement été exposés, et que le commerce des animaux et des produits provenant d'autres régions sera épargné (ACIA, 2011).

Une autre mesure d'adaptation préventive à l'égard de l'extirpation éventuelle de la fièvre catarrhale du mouton a été mise en œuvre par la Fédération canadienne du mouton : l'assurance contre la fièvre catarrhale. Le programme d'assurance volontaire offrira une compensation aux producteurs ovins, en cas de mortalité d'animaux, d'interruption des activités ou d'autres pertes indirectes liées au diagnostic de la fièvre catarrhale du mouton chez l'un de leurs animaux (http://www.cansheep.ca/cms/fr/programs/bluetongueprogram/bluetongueprogram.aspx).

Le présent exemple souligne plusieurs aspects des mesures d'adaptation aux changements climatiques qui s'appliquent à l'agriculture au Canada, ce qui inclut la réaction proactive d'un organisme gouvernemental et la réaction préventive de l'industrie.

2.4.4 QUESTIONS RELATIVES AUX ANIMAUX

La gestion du bétail devra s'ajuster aux températures plus élevées, aux variations dans les précipitations et aux mesures d'adaptation dans le secteur des cultures (Pullar *et al.*, 2011). Les éleveurs de bétail sont tout à fait conscients de la nécessité d'accroître l'efficacité de leurs activités et de réduire leur empreinte environnementale. Par exemple, des aliments pour animaux de plus grande qualité permettent de réduire les émissions (moins de gaz et de fumier), d'accroître la productivité (davantage de petits, de lait et d'œufs) et d'améliorer la santé des animaux (moins vulnérables face au stress; Pullar *et al.*, 2011).

Dans l'industrie laitière, d'énormes progrès ont été accomplis en améliorant l'efficacité des activités. Le nombre de fermes laitières a diminué d'environ 47 %, alors que la production laitière est demeurée stable (la production laitière par vache a augmenté de 48 % entre 1981 et 2011; Statistique Canada, 2012). Bien que l'augmentation de la productivité soit principalement imputable à la sélection génétique (Oltenacu et Broom, 2010), la capacité du secteur à demeurer rentable avec la moitié du nombre de bêtes semble indiquer une forte capacité d'adaptation chez les éleveurs, qui seront sans doute en mesure d'adapter les infrastructures de leurs exploitations aux nouvelles conditions climatiques.

En raison du prolongement probable de la saison de croissance des cultures, McCartney *et al.* (2009) se sont penchés sur la possibilité d'utiliser, au Canada, des cultures poussant pendant l'été et récoltées tardivement afin de nourrir le bétail. Ils ont déterminé que, bien qu'il soit possible d'utiliser les résidus du maïs, du sorgho, du millet, du colza et du navet, ainsi que d'autres cultures racines, plusieurs questions pourraient poser problème, dont la santé des plantes, les pesticides ayant été utilisés sur les cultures, les toxines dans les sols en raison des sécheresses ou des inondations, et la valeur nutritive des tiges (McCartney *et al.*, 2009). En outre, des températures annuelles plus élevées permettraient aux producteurs de cultiver des vivaces et des cultures annuelles hivernales, qui sont pour le moment inadaptées. Les céréales annuelles sont plus flexibles que les vivaces en ce qui concerne les dates de plantation. Si elles sont plantées plus tard, elles atteignent un pic de récolte plus tard dans la saison et peuvent ainsi servir de supplément aux pâturages d'hiver (McCartney *et al.*, 2008).

Les provinces procèdent actuellement à la mise en œuvre de stratégies en matière d'adaptation aux changements climatiques qui exigent que les producteurs, tout comme les gouvernements, tiennent compte des répercussions des changements climatiques sur le bétail. Par exemple, le gouvernement de l'Ontario a conclu un partenariat officiel avec le laboratoire en santé animale de l'Université de Guelph en vue de soutenir la détection et la surveillance des maladies animales, notamment celles qui apparaissent et évoluent en raison des changements climatiques (MEO, 2011).

Le rapport intitulé *Climate change adaptation risk and opportunity assessment* réalisé par la Colombie-Britannique (Colombie-Britannique, 2012) décrit les répercussions possibles des changements climatiques sur le bétail, notamment les modifications de la gestion du pâturage du bétail en raison d'une humidité du sol trop faible ou trop élevée, la perte ou le déménagement du bétail à la suite d'inondations ou d'autres événements extrêmes, une qualité et une quantité d'eau réduites pour le bétail pendant les périodes sèches, des hivers plus doux qui permettraient une diversification du bétail, une meilleure résistance aux maladies et aux ravageurs, des coûts énergétiques accrus en raison de besoins en climatisation plus élevés, des coûts immobiliers accrus en raison d'une forte pression exercée sur la valeur des terres découlant de l'augmentation de la population dans le sud de la Colombie-Britannique, et des pannes de courant causées par une augmentation de la fréquence des tempêtes et des blizzards qui perturbent les activités (Colombie-Britannique, 2012). Les travaux réalisés à ce jour comprennent une série de rapports régionaux soulignant les mesures à prendre, ainsi que les outils d'aide à la prise de décisions tels les nouveaux calculateurs d'irrigation (IIABC, 2009).

Dans un climat plus chaud, on prévoit une augmentation de la productivité des pâturages non seulement en raison des périodes de croissance prolongées et plus chaudes, mais également à cause de l'enrichissement en CO_2 du milieu. La réaction des cultures de fourrage aux changements climatiques est propre à chaque espèce et les interactions entre la concentration atmosphérique en CO_2, la température et les espèces sont complexes (Bertrand *et al.*, 2012). En plus de toucher les récoltes, les conditions climatiques à venir auront probablement des répercussions sur la valeur nutritive des fourrages (Bertrand *et al.*, 2012). La productivité accrue des pâturages signifierait une augmentation de la capacité de charge des pâturages et une diminution des coûts par animal (Kulshreshtha, 2011). La gestion des pâturages et des aliments pour animaux, ainsi que l'utilisation de l'agroforesterie (bandes boisées) ont été recommandées en tant que mesures d'adaptation possibles aux changements climatiques pour les élevages de bétail (Climate Change Connection, 2009).

2.4.5 QUESTIONS RELATIVES AUX EXPORTATIONS ET AU MARCHÉ MONDIAL

Les répercussions des changements climatiques varieront dans l'ensemble du Canada et dans le monde. Les risques pour certains constitueront des possibilités pour d'autres. Une hausse des prix de la nourriture encouragera de plus grands investissements afin de produire davantage d'aliments; cette démarche pourrait mener à la création d'un plus grand nombre d'industries dérivées telles des entreprises semencières locales (FAO, 2009), et possiblement à un développement de l'aquaculture. Des prix plus élevés signifient toutefois un choix moins important et un accès réduit pour les personnes à faible revenu. Dans le commerce international, le secteur agroalimentaire (sans les produits de la mer) représentait plus de 36 milliards de dollars des exportations canadiennes réalisées en 2011, soit plus de 8 % des exportations totales de marchandises du Canada (AAC, 2012b). Ensemble, le blé, le canola, l'huile de canola et le porc comptaient pour plus de 14 milliards de dollars en exportations (AAC, 2012c). Le secteur agroalimentaire a fourni plus de 9 milliards de dollars à la balance commerciale du Canada (AAC, 2012b). Bien qu'une hausse des températures et de la concentration en CO_2 entraînera probablement une augmentation de la productivité, des incertitudes persistent au niveau des répercussions de facteurs négatifs tels que la diminution de la disponibilité de l'eau, les mauvaises herbes, les ravageurs, les maladies, les espèces envahissantes et les événements météorologiques extrême. De plus, les conséquences des changements climatiques sont également floues pour plusieurs de nos compétiteurs et partenaires commerciaux. Le GIEC estime que la plupart des pays en développement deviendront de plus en plus dépendants des importations d'aliments (GIEC, 2007). Étant donné que le Canada est l'un des plus importants exportateurs nets de produits agricoles (OMC, 2000), cela représente probablement davantage de possibilités pour les exportateurs canadiens.

Les changements climatiques se répercuteront aussi d'autres façons sur le commerce international des denrées alimentaires. L'ouverture éventuelle du passage du Nord-Ouest pourrait réduire grandement le temps de navigation entre les pays de l'Atlantique Nord et du Pacifique Nord, et augmenter le commerce des produits frais dans l'hémisphère nord (Luck *et al.*, 2014). Des modifications de l'emplacement de la production et de la consommation des aliments toucheront aussi le commerce international, tout comme les risques liés à l'introduction d'espèces exotiques envahissantes (*voir* la section 2.4.3).

2.4.6 MESURES D'ADAPTATION DES INSTITUTIONS

Les pratiques agricoles sont sujettes à une adaptation constante en vue de pallier la variabilité du climat. Des mesures d'adaptation agricoles ont été mises en place avec succès par le passé, grâce aux efforts de collaboration de nombreuses institutions (*voir* l'étude de cas 3; Marchildon *et al.*, 2008, Diaz *et al.*, 2009; Hurlbert *et al.*, 2009a; Wheaton et Kulshreshtha, 2010; Corkal *et al.*, 2011). Pour réussir, les futures mesures d'adaptation dans le secteur de l'agriculture devront avoir recours à des approches multidisciplinaires et interdisciplinaires semblables et exigeront la participation active d'intervenants et d'institutions pouvant aider à coordonner les actions (p. ex., organismes frontaliers; Diaz et Rojas, 2006; Batie, 2008; Marchildon *et al.*, 2008; Hurlbert *et al.*, 2009b).

Les ententes institutionnelles, faisant collaborer tous les ordres de gouvernement avec des cultivateurs, des éleveurs et d'autres intervenants locaux, et s'appuyant sur des méthodes de planification multidisciplinaires et participatives en vue de parvenir à une intégration des connaissances locales et scientifiques, peuvent aider à faire face aux risques climatiques actuels et futurs (Nelson *et al.*, 2008; Hurlbert *et al.*, 2009a, b; Corkal *et al.*, 2011). Une telle gouvernance adaptée peut favoriser la création de nouvelles technologies et stratégies, ainsi qu'encourager la collaboration, en plus de mettre à l'essai des solutions à des problèmes locaux, à condition que les institutions, les agriculteurs et les collectivités locales démontrent un degré de flexibilité suffisant pour leur permettre d'apporter les modifications nécessaires à la définition et à la résolution conjointe d'un problème commun (Nelson *et al.*, 2008; Hurlbert *et al.*, 2009a, b).

Les institutions universitaires et gouvernementales entreprennent des recherches en vue de mieux comprendre la variabilité du climat et les risques relatifs à l'agriculture. Cela comprend des études qui établissent des liens entre les connaissances scientifiques et locales et qui appuient la prise de décisions en matière de gestion de l'eau (Marchildon, 2009b; Sauchyn *et al.*, 2010). À leur tour, les groupes de gestion des bassins hydrographiques encouragent l'adoption des pratiques de gestion améliorées, comme une meilleure gestion des récoltes et de l'eau, y compris l'irrigation (Diaz *et al.*, 2009).

À l'échelle internationale, le Canada prend part à l'Alliance mondiale de recherche sur les gaz à effet de serre en agriculture, un effort multinational visant à stimuler les recherches dans le domaine des gaz à effet de serre et de l'agriculture, et à en communiquer les résultats, en mettant l'accent sur les technologies et les pratiques qui mènent à une diminution des émissions de gaz à effet de serre, tout en augmentant la résilience climatique et la rentabilité (Shafer *et al.*, 2011).

Parmi les exemples de politiques et de règlements du gouvernement fédéral susceptibles d'accroître la résilience climatique dans le secteur agricole, on retrouve la disposition permettant le report de l'impôt pour les éleveurs, mesure à laquelle on fait appel dans les secteurs touchés par des sécheresses ou des inondations où les agriculteurs ont dû vendre au moins 15 % de leurs cheptel reproducteur. Un certain pourcentage des revenus tirés de la vente peut être reporté à la prochaine année d'imposition et peut servir à compenser partiellement le coût de remplacement du bétail (ARC, 2011). Le cadre stratégique *Cultivons l'avenir 2* (http://www.agr.gc.ca/fra/a-propos-de-nous/initiatives-ministerielles-importantes/cultivons-l-avenir-2/?id=1294780620963) comprend des outils et des programmes de gestion des risques de l'entreprise, ainsi que trois nouveaux programmes à frais partagés visant à accroître la durabilité économique du secteur agricole. Ces programmes, aussi bien de nature régionale que dirigés par l'industrie, sont conçus de façon à répondre aux besoins du secteur par le biais de la recherche, du développement et du transfert de connaissances et de technologies dans l'espoir de garantir la mise en place de solutions novatrices pour les agriculteurs dans des conditions environnementales et de marché en évolution.

2.5 RÉSUMÉ

Les secteurs agricole, agroalimentaire et de la transformation agroalimentaire seront touchés par les changements climatiques de différentes façons, et une vaste gamme de méthodes d'adaptation s'imposera. De la recherche et du développement novateurs, des politiques nouvelles ou mises à jour, ainsi qu'une gestion adaptative des ressources agricoles, faciliteraient la promotion d'un secteur économiquement durable à l'avenir.

ÉTUDE DE CAS 3

UN EXEMPLE TIRÉ DU PASSÉ DE LA CAPACITÉ DES INSTITUTIONS À S'ADAPTER DANS LE SECTEUR AGRICOLE : LES PRAIRIES

Dans son rapport de 1860, le capitaine John Palliser a cartographié ce que l'on appelle maintenant le « triangle de Palliser » après avoir observé les Prairies pendant une longue période de sécheresse (Encyclopedia of Saskatchewan, 2007; Axelson *et al.*, 2009). La population du triangle de Palliser a augmenté rapidement au début des années 1900 pendant une période humide, tel que déduit à partir des données indirectes fournies par les anneaux de croissance des arbres s'échelonnant sur les 1000 dernières années (Sauchyn *et al.*, 2011). Les premiers colons européens ne comprenaient pas les caractéristiques naturelles de la région des Prairies et étaient mal préparés aux risques climatiques, notamment les températures extrêmes, les vents violents, les sécheresses et les inondations dans cette région (Gray, 1996; Marchildon *et al.*, 2008; Toth *et al.*, 2009).

Des sécheresses pluriannuelles survenues entre 1914 et 1917, ainsi que dans les années 1920 et 1930 (figure 11), ont dévasté la population et l'écologie de la région, le secteur agricole et des collectivités rurales, ainsi que l'économie fédérale et provinciale. Pendant la crise des années 1930, de grandes bandes de terres ont été perdues en raison de l'érosion éolienne. Un dépeuplement des secteurs les plus touchés s'est produit lorsque des fermiers ont réalisé qu'ils ne pouvaient plus survivre sur leurs terres et ont abandonné leur ferme.



FIGURE 11 : L'amoncellement du sol le long des clôtures correspondant à la perte de la couche arable dans les champs des Prairies *(La photo est tirée de la collection de Bibliothèque et Archives Canada R194-117-1-E PA-139647).*

Les administrations locales, provinciales et fédérales ont dû faire face à une crise sociale, économique et écologique d'envergure nationale (Gray, 1996; Marchildon *et al.*, 2008; Marchildon, 2009a, b; Toth *et al.*, 2009). Les citoyens et les gouvernements ont dû mettre en place de nouvelles ententes institutionnelles en vue de mieux comprendre le problème, de rechercher des solutions en matière de viabilité économique agricole, ainsi que d'améliorer la résilience des collectivités rurales et la capacité régionale à assurer la conservation des sols, la gestion de l'eau et les pratiques agricoles durables.

En 1935 (juste après les pires années de sécheresse), le gouvernement fédéral a adopté la *Loi sur le rétablissement agricole des Prairies*, puis a créé l'Administration du rétablissement agricole des Prairies, dont le mandat consistait à « veiller au rétablissement agricole des terres touchées par la sécheresse et l'érosion dans les provinces du Manitoba, de la Saskatchewan et de l'Alberta, et d'élaborer et de promouvoir (...) des pratiques saines, ainsi que des mesures de plantation d'arbres, d'approvisionnement en eau, d'utilisation des terres et d'établissement agricole qui favorisent une plus grande sécurité économique » (Marchildon, 2009a; Justice Canada, 2012). Les fermiers et l'industrie agricole ont collaboré afin d'élaborer de nouveaux outils agricoles novateurs. Des recherches sur la conception de l'équipement et les méthodes agricoles ont été entreprises par l'organisme Fermes expérimentales fédérales d'Agriculture Canada, des universités et le secteur industriel. Des cultures tolérantes à la sécheresse et de nouvelles pratiques agricoles ont fait l'objet de recherches et ont été mises à l'essai sur le terrain. La province de l'Alberta a créé *l'Alberta Special Areas Board* (conseil des zones spéciales de l'Alberta), dont la fonction consiste à administrer les terres dans une région appelée la « zone aride de l'Alberta », une région particulièrement sensible au climat (Gray, 1996; Marchildon *et al.*, 2008).

Des années 1930 aux années 1980, les institutions et les fermiers ont travaillé dur en vue d'accroître la résilience agricole. On a cessé la production sur les terres agricoles vulnérables en y implantant un couvert herbacé permanent ou en les convertissant en pâturages communautaires gérés par le gouvernement. Les méthodes de labour ont été modifiées afin de réduire la perturbation des sols, dans le but de conserver la terre et son humidité. Ces méthodes de « labour minimal » et d'« ensemencement direct » exigeaient la conception de nouveaux équipements, qui ont été élaborés et peaufinés par le secteur de l'industrie et des universitaires. Cette mesure d'adaptation est désormais pratique courante à l'échelle de la planète. D'importants efforts institutionnels ont été déployés en vue d'améliorer l'approvisionnement en eau, grâce à la construction de barrages, de réservoirs, de vastes projets d'irrigation et de systèmes de distribution d'eau (Gray, 1996; Bruneau *et al.*, 2009). Les gouvernements fédéral et provinciaux de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Manitoba ont mis sur pied la Commission des eaux des provinces des Prairies, dont la tâche consiste à administrer et surveiller les eaux interprovinciales (Hurlbert *et al.*, 2009a).

Ces efforts institutionnels collaboratifs sont un exemple des « mesures d'adaptation institutionnelles » qui ont non seulement constitué une réaction à une situation donnée, mais ont aussi permis de prévoir les changements et d'élaborer des solutions pour l'avenir. Aujourd'hui, les provinces des Prairies, jadis considérées comme inappropriées à l'agriculture par Palliser, produisent l'essentiel des sept milliards de dollars provenant de la culture céréalière du Canada (Environnement Canada, 2004; Corkal et Adkins, 2008).

3. PÊCHES

3.1 INTRODUCTION

Les pêches contribuent grandement à la production alimentaire, un secteur qui sera de plus en plus touché par les changements climatiques (Barange et Perry, 2009; Rice et Garcia, 2011). Statistique Canada (2009b) indique qu'en moyenne, chaque Canadien consomme à tous les ans 8 kg de poisson (poids comestible) provenant des détaillants, ce qui représente environ 2,2 % des dépenses alimentaires nationales (Statistique Canada, 2001). Les tendances alimentaires au Canada semble indiquer que l'on connaît une augmentation constante de la demande de poisson et de mollusques et crustacés depuis le milieu des années 1990, et l'on prévoit que cette augmentation atteindra plus de 30 % d'ici 2020 (AAC, 2012d). L'évolution des goûts, une alimentation saine, la disponibilité des produits de la pêche d'élevage et l'apparition de nouvelles espèces au comptoir de la poissonnerie sont considérées comme des changements importants liés aux tendances alimentaires (Statistique Canada, 2005).

Les pêches canadiennes reflètent une diversité d'interactions, propres au secteur, entre le climat, l'hydrologie, l'océanographie, les communautés d'espèces, l'infrastructure des pêches et l'historique d'utilisation des ressources (figure 12). Les répercussions des changements climatiques sur les espèces et les écosystèmes auront un effet en cascade sur les pêches et les systèmes humains interreliés (c.-à-d. systèmes alimentaires, culturels et sociaux) qui dépendent d'un approvisionnement alimentaire aquatique. Le degré d'incidence dépendra de l'importance des changements climatiques locaux, de la vulnérabilité du poisson et des pêches, ainsi que des mesures d'adaptation.

La présente section aborde les effets du climat sur les systèmes actuels et futurs de production alimentaire aquatique dans quatre écorégions principales (figure 13, *voir* l'encadré 2). Les répercussions des changements climatiques sur les éléments terrestres du système alimentaire aquatique (c.-à-d. transport, transformation, commercialisation) sont traitées dans une étude de cas détaillée provenant de l'écorégion de l'Atlantique (*voir* l'étude de cas 5). Les effets cumulatifs de nombreux facteurs de stress sur les pêches (c.-à-d. climat et pêches; *voir* Frank *et al.*, 2005; Planque *et al.*, 2010), l'exploitation des ressources non renouvelables, les changements culturels et sociaux (*voir* Meltofte, 2013) et les contaminants (*voir* le chapitre 7 – *Santé humaine*) ne sont pas étudiés dans le présent chapitre.

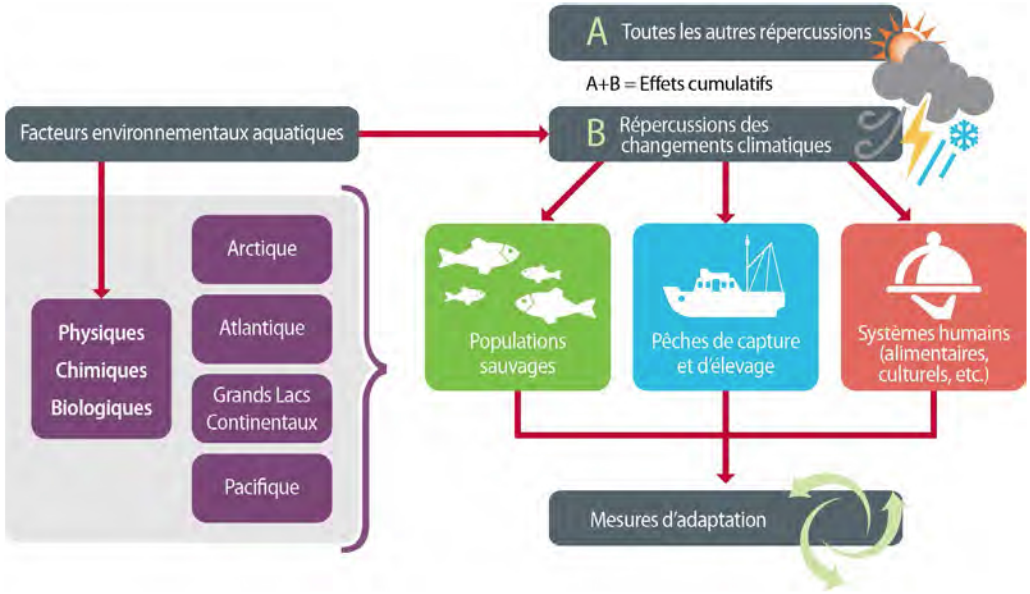


FIGURE 12 : Évolution des répercussions des changements climatiques sur la production alimentaire aquatique dans les écorégions aquatiques du Canada.

ENCADRÉ 2

ÉCORÉGIONS AQUATIQUES DU CANADA

ATLANTIQUE – L'écorégion de l'Atlantique est caractérisée par des hivers froids, une topographie au relief modéré, un vaste plateau continental et des apports en eau douce. Le forçage atmosphérique a des répercussions sur le mélange constant des eaux chaudes et australes du Gulf Stream avec les apports saisonniers d'eau douce et froide, ainsi qu'avec la glace de mer, qui proviennent respectivement du courant subpolaire du Labrador et du débit sortant du golfe du Saint-Laurent (Loder *et al.*, 1998; MPO, 2012a). Les températures près de la surface sont sensibles aux variations saisonnières causées par l'ensoleillement, la température atmosphérique, l'écoulement d'eau douce et les systèmes de courants forts. Les variations multidécennales persistantes du climat océanique de la région sont causées, notamment, par l'oscillation nord-atlantique et l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (Reid et Valdés, 2011). Les eaux marines font preuve d'une production secondaire très élevée, dont bénéficient d'importantes entreprises de pêche commerciale de capture (Shackell et Loder, 2012). Les répercussions des activités de pêche (Planque *et al.*, 2010) et une phase froide de l'état océanique (Drinkwater, 2009) ont eu une incidence négative sur d'importantes populations de poissons de fond.

ARCTIQUE – Cette région se définit principalement comme étant dominée de longue date par la glace, mais connaissant une évolution rapide (Carmack *et al.*, 2012); elle comprend beaucoup d'habitats aquatiques au sein desquels évolue un ensemble d'espèces résidentes (p. ex., omble chevalier, morse) et de grands migrateurs (p. ex., baleine boréale, oiseaux de mer) adaptés au froid et atteignant la maturité assez tard. Les écosystèmes aquatiques connaissent de très fortes variations saisonnières, en ce qui a trait à l'ensoleillement, à la température et aux apports en eau douce. La couverture de glace est une caractéristique physique importante qui a des répercussions sur l'échange de chaleur et la pénétration de la lumière. De façon générale, les secteurs couverts constamment par une glace pluriannuelle ne sont pas productifs. Les secteurs d'eau libre au milieu de la glace de mer (polynies), qui réapparaissent selon la saison, offrent toutefois un habitat essentiel à divers organismes (p. ex., algues sous la glace, morue arctique, phoque) et sont souvent décrits comme des secteurs de productivité accrue (MPO, 2012b). La glace est un important agent structurant qui a une incidence à la fois sur les écosystèmes (p. ex., migration des mammifères, emplacement de la nourriture) et les systèmes humains connexes (p. ex., déplacements saisonniers et accès aux ressources naturelles). Le récent état des glaces estivales instables, la fonte de la glace et l'apport modifié en eau douce entraînent des modifications importantes des écosystèmes aquatiques de l'Arctique (Meltofte, 2013).

GRANDS LACS CONTINENTAUX – Cette écorégion forme le plus grand système d'eau douce de la planète et contient 84 % de l'eau douce de surface de l'Amérique du Nord. Les écosystèmes qui s'y trouvent résultent de systèmes climatiques qui produisent des étés chauds et des hivers froids, au cours desquels la plupart des rivières et des lacs sont plus ou moins bloqués par les glaces. Les différences dans les taux de précipitation mènent à des régimes, annuels à décennaux, d'inondations ou de sécheresses. Ces sécheresses, jumelées à de fortes variations saisonnières, ont une grande influence sur le débit des rivières, l'élévation du niveau des lacs, le cycle des éléments nutritifs et la production biologique. Les activités associées à plus d'un siècle de croissance rapide de la population humaine ont contribué à la création de conditions propices à l'invasion d'au moins 162 espèces exotiques aquatiques (Mandrak et Cudmore, 2010) liée à plusieurs changements négatifs, qui se sont produits au chapitre des pêches et des écosystèmes de cette écorégion, ainsi qu'à la création de quelques nouvelles pêches (p. ex., saumon quinnat, éperlan). Des exercices de modélisation semblent indiquer que les répercussions des changements climatiques dans cette écorégion provoqueront des changements dans les régimes thermiques aquatiques susceptibles d'avoir des effets négatifs sur les espèces d'eau froide et tempérée.

PACIFIQUE – L'écorégion du Pacifique est caractérisée par un climat tempéré, un relief montagneux, un plateau continental étroit, de nombreuses rivières, d'importantes précipitations annuelles et une zone de transition marine régie variablement par des conditions associées à un système marin subtropical ou subarctique (Thomson, 1981). Les courants océaniques et le débit des principales rivières ont une grande incidence sur la circulation, l'apport en éléments nutritifs et la production primaire des écosystèmes marins côtiers du Pacifique. La variabilité des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des écosystèmes de la côte du Pacifique s'accroît lorsque des événements d'oscillation australe El Niño se produisent, de même que lors des écarts décennaux entre les périodes chaudes et froides de l'oscillation décennale du Pacifique (Mantua *et al.*, 1997). Les réactions biologiques à la variabilité climatique passée ont fourni la plupart des renseignements ayant contribué à une meilleure compréhension des répercussions probables des changements climatiques sur le biote dans cette région (Powell et Xu, 2011).



FIGURE 13 : Carte indiquant les écorégions aquatiques du Canada

3.2 APPROVISIONNEMENT ALIMENTAIRE AQUATIQUE DU CANADA

L'accès aux ressources alimentaires aquatiques s'effectue par l'entremise de quatre chaînes d'approvisionnement principales : la pêche commerciale de capture, la pêche d'élevage, la pêche de subsistance et la pêche récréative. La pêche commerciale de capture est liée à la capture du biote sauvage, la pêche d'élevage désigne des aliments produits dans des installations aquacoles, la pêche de subsistance est constituée principalement par les pêches autochtones, en plus d'un élément de la pêche de subsistance qui chevauche la pêche récréative canadienne plus vaste (p. ex., pêche vivrière à Terre-Neuve-et-Labrador), et la pêche récréative a trait à la capture du biote sauvage par des personnes ou des pourvoyeurs disposant d'un permis.

Les produits de la pêche commerciale de capture et de la pêche d'élevage sont parmi les biens alimentaires produits par le Canada dont la valeur est la plus élevée. Ensemble, les pêcheurs, les entreprises de transformation, les distributeurs et les commerçants au détail composent l'industrie canadienne des « produits de la mer », qui offre un vaste éventail de produits de la pêche aux marchés locaux, régionaux, nationaux et mondiaux (figure 14). Environ 85 % de la pêche commerciale du Canada est distribuée dans plus de 130 pays dans le cadre d'exportations (AAC, 2012d). La pêche commerciale de capture régie par Pêches et Océans Canada (MPO) demeure une ressource de propriété commune, bien que des mécanismes limités fondés sur les droits s'appliquent à plusieurs pêches. La pêche de subsistance et la pêche récréative relèvent de la compétence fédérale, qui peut être déléguée d'une telle façon que les organismes de réglementation varient grandement d'un bout à l'autre du pays. En comparaison, la pêche d'élevage repose sur des investissements privés. La pêche d'élevage peut faire l'objet d'un permis ou être réglementée par le MPO ou des organismes provinciaux sur des terres publiques ou privées. La surveillance de toutes les activités faisant suite à la pêche et liées aux produits de la pêche commerciale de capture et de la pêche d'élevage relève de l'Agence canadienne d'inspection des aliments et d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

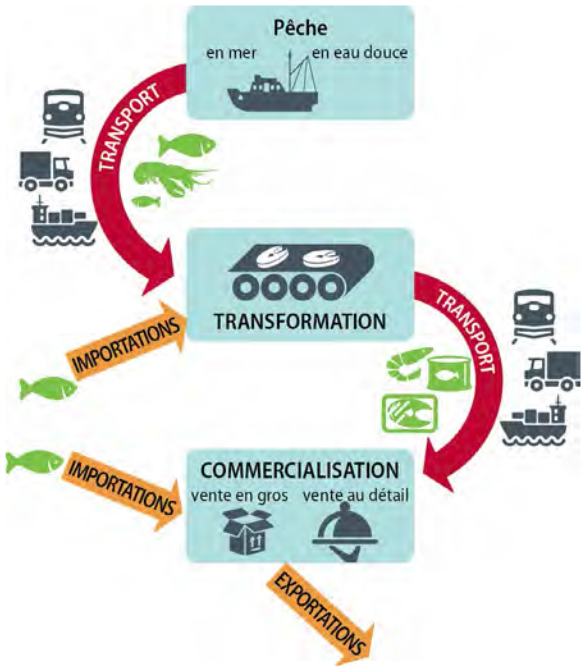


FIGURE 14 : Diagramme reflétant la « chaîne du poisson » – intégrant des éléments du système alimentaire de la pêche, de l'océan à l'assiette.

Une estimation de la quantité et de la valeur de la pêche commerciale de capture, de la pêche d'élevage, de la pêche récréative et de la pêche de subsistance pour chaque écorégion aquatique est donnée dans la figure 15. Bien que la composition des pêches ait varié de façon importante au fil du temps, la valeur du total des prises non transformées de la pêche de capture au Canada est demeurée assez constante (MPO, 2011). Les espèces qui contribuent au rendement et à la valeur de la pêche commerciale de capture varient toutefois grandement selon les régions (tableau 2).

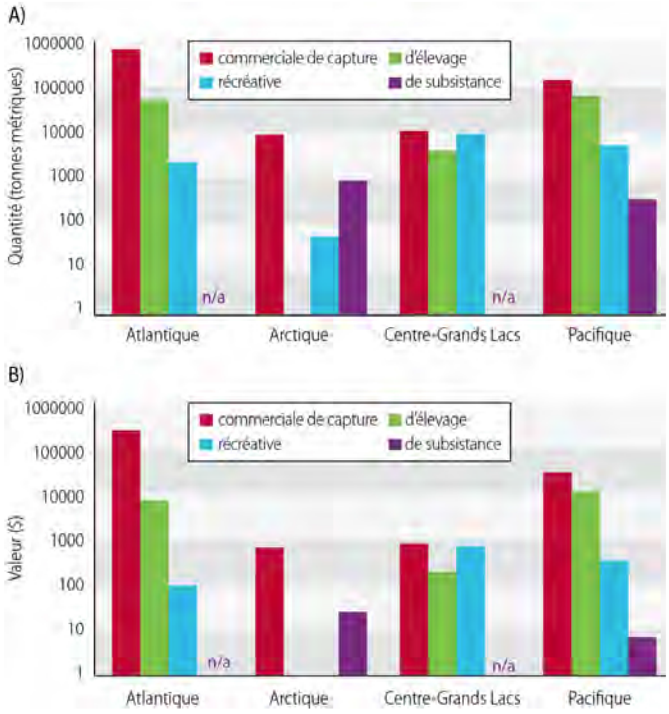


FIGURE 15 : Estimation (échelle logarithmique) de **a)** la quantité et **b)** la valeur de la pêche commerciale de capture, de la pêche d'élevage, de la pêche récréative et de la pêche de subsistance dans les écorégions aquatiques canadiennes (Atlantique, Arctique, Grands Lacs continentaux et Pacifique). L'estimation est fournie selon une échelle logarithmique, en raison du fait que les contributions de la pêche récréative et de la pêche de subsistance n'apparaîtraient pas si elles étaient regroupées de façon linéaire par rapport à la pêche commerciale de capture et à la pêche d'élevage. *(sources : Les données sur la pêche commerciale de capture (tonnes métriques; 2000-2010) ont été fournies par la Direction générale des statistiques sur les pêches du MPO. Les données sur la pêche récréative (nombre de poissons) proviennent du MPO (2012c). Les quantités pour la pêche de subsistance (nombre de poissons ou de tonnes métriques) proviennent des données sur les prises de la pêche à des fins alimentaires, sociales et rituelles de la région du Pacifique du MPO, Robards et Reeves (2011) et de Zeller et al. (2011). Les quantités de mammifères marins récoltés sont estimées à partir du poids moyen du phoque annelé (~60 kg). Le nombre de poissons a été converti en poids à l'aide d'un facteur de conversion (Usher, 2000). La valeur a été estimée pour toutes les pêches en appliquant un coût moyen de remplacement des protéines de 11,2 $/kg provenant de deux sources : Government of Nunavut et Nunavut Tunngavik Incorporated, 2005, et G.S.Gislason and Associates Ltd. et Outcrop Ltd., 2002).*

Écorégion	Pêche de capture commerciale[1]	Pêche d'élevage[1]	Pêche récréative[2]	Pourcentage moyen (+/- écart type) de la population qui prend part à la pêche récréative[3]	Pêche de subsistance[4]
Atlantique	Homard, crevettes, crabe	Saumon de l'Atlantique, moules, huîtres	Omble de fontaine, morue du Nord, maquereau	8 +/- 4,2	Morue de l'Atlantique, homard
Arctique	Flétan noir, crevettes, grand corégone, omble chevalier	n.d.	Grand brochet, ombre arctique	10 +/- 829	Omble chevalier, grand corégone, mammifères marins
Grands Lacs continentaux	Perchaude, doré jaune, grand corégone	Truite arc-en-ciel	Doré jaune, perchaude	8 +/- 1,4	Grand corégone, esturgeon jaune
Pacifique	Flétan du Pacifique, saumon du Pacifique, crabe, palourdes	Saumon de l'Atlantique, palourdes, huîtres	Saumon du Pacifique, truite	9	Saumon du Pacifique

TABLEAU 2 : Espèces importantes sur le plan commercial ou culturel pêchées dans les écorégions et pourcentage de la population qui prend part à la pêche récréative par écorégion. *(sources : [1]Direction générale des statistiques sur les pêches du MPO; [2]MPO, 2012c; [3]Statistique Canada, 2009a. L'Atlantique est la moyenne de Terre-Neuve-et-Labrador, de l'Île-du-Prince-Édouard, du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse; l'Arctique est la moyenne des Territoires du Nord-Ouest, du Yukon et du Nunavut; les Grands Lacs continentaux sont représentés par l'Ontario; et le Pacifique, par la Colombie-Britannique. [4]Atlantique : Lowitt (2011); Arctique : Zeller et al. (2011), Robards et Reeves (2011); Grands Lacs continentaux : Kerr (2010); Pacifique : données du MPO sur les prises de pêche à des fins alimentaires, sociales et rituelles de la région du Pacifique).*

La pêche d'élevage n'est apparue que récemment au Canada en tant qu'important fournisseur de produits alimentaires. La production de la pêche d'élevage a augmenté de plus de 130 % depuis environ 1995 (Statistique Canada, 2009a) et était évaluée à près de 846 millions de dollars en 2011 (MPO, 2013b). En 2011, le saumon (principalement le saumon de l'Atlantique) représentait environ 72 % de la valeur totale du poisson d'élevage, alors que les mollusques et crustacés et la truite représentaient la plus grande partie de la valeur restante (MPO, 2013b). Bien qu'elles soient importantes dans les écorégions du Pacifique et de l'Atlantique, les contributions de la pêche d'élevage sont à peu près inexistantes dans l'Arctique et ne comptent que pour très peu dans l'écorégion des Grands Lacs continentaux.

La croissance de la pêche d'élevage est attribuable à plusieurs facteurs, notamment :

- une variabilité annuelle plus faible du ratio des coûts par rapport à la production et une certitude accrue de la disponibilité, à longueur d'année, des produits sur les marchés en comparaison à la pêche sauvage de capture;
- la capacité à donner suite à une demande future accrue des marchés pour des produits de grande valeur; et
- un contrôle accru des activités, en raison de la nature privée (plutôt que commune) de la ressource (MPO, 2003).

À l'échelle mondiale, on prévoit que l'élevage d'aliments aquatiques continuera d'augmenter, en raison d'une demande accrue et de méthodes de production améliorées, et pourrait bientôt dépasser la consommation mondiale de produits provenant de la pêche commerciale de capture (figure 16; OCDE-FAO, 2011).

La pêche de subsistance, plus souvent effectuée par les peuples autochtones du Canada, représente un système économique fondé sur des réseaux culturels et sociaux qui appuient la répartition des biens et des aliments aux fins de leur consommation par les pêcheurs, leur famille et la communauté (Berkes, 1988). La pêche de subsistance se déroule dans les quatre écorégions. Cette pêche contribue directement à la sécurité alimentaire, en fournissant du poisson à des fins de consommation, ou indirectement, en générant des revenus pour l'achat d'autres aliments (p. ex., la chasse de l'ours polaire; *voir* l'encadré 3 et le chapitre 7 – *Santé humaine*).

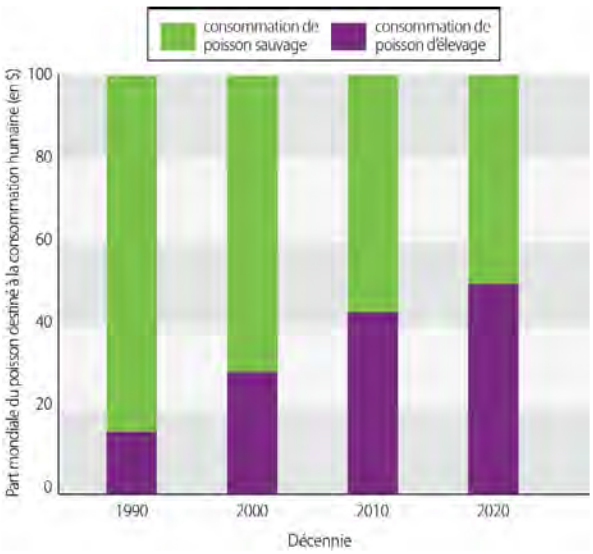


FIGURE 16 : Part mondiale du poisson destiné à la consommation humaine provenant de la capture et de l'aquaculture par décennie *(extrait modifié tiré de OCDE-FAO, 2011).*

Une estimation récente de la consommation de mammifères marins a placé le taux de capture dans l'Arctique canadien parmi les plus élevés au monde (plus de 1000 animaux par année), et plus de 20 espèces font l'objet de capture (Robards et Reeves, 2011). La valeur des captures, incluant plusieurs espèces de poissons et de mammifères marins dans les Territoires du Nord-Ouest et le Nunavut, était de 3,4 millions de dollars, selon un coût de remplacement de 20 $ par kg (G.S. Gislason and Associates Ltd et Outcrop Ltd., 2002). Dans le document intitulé *Nunavut fisheries strategy* (La Stratégie des pêches du Nunavut) publié en 2005, les auteurs ont estimé le coût de remplacement de l'omble chevalier à 2,30 $ par kg. Nous avons utilisé la moyenne de ces estimations pour représenter la valeur comparative de la pêche de subsistance et de la pêche récréative pour l'ensemble des écorégions. Les valeurs des pêches indiquées ici ne comprennent aucune évaluation culturelle ou de marché supplémentaire.

La pêche récréative est considérée comme un sport par plusieurs participants, qui conservent une partie de leurs prises aux fins de consommation. On estime que les prises conservées aux fins de consommation directe par des pêcheurs résidents étaient d'environ 57 millions de poissons (MPO, 2012c). Ces pêches génèrent aussi des recettes pour les industries connexes (camps de pêche, guides, distributeurs d'équipement, etc.; Kerr *et al.*, 2009) et sont précieuses d'un point de vue culturel et social. La pêche récréative connaît une popularité variable d'une région à l'autre et représente des dépenses annuelles de 7 à 8 milliards de dollars au Canada (MRNO, 2013b).

3.3 PRINCIPALES CONCLUSIONS TIRÉES DES ÉVALUATIONS PRÉCÉDENTES

Dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (Lemmen *et al.*, 2008), les auteurs concluent que les changements climatiques auront d'importantes répercussions sur l'intégrité future des écosystèmes marins et d'eau douce au pays. Selon ces conclusions :

- On prévoit que les ensembles d'espèces seront de nature plus australes, en raison des répercussions du changement de la température sur l'abondance et le rythme des principaux événements du cycle biologique.
- L'augmentation de la température aura des répercussions sur les limites de l'aire de répartition des espèces et pourrait provoquer leur disparition ou leur expansion.
- D'importants changements dans les systèmes hydrologiques du nord, notamment une diminution du pergélisol, une réduction de la durée de la glace de mer et une modification de l'épaisseur de la couverture neigeuse, auront une incidence sur la répartition et l'abondance du poisson et des mammifères marins dans l'Arctique et l'Atlantique.
- L'augmentation de l'intensité des tempêtes et des conditions météorologiques imprévisibles auront une incidence sur l'érosion côtière et le flux de sédiments, modifiant ainsi la quête de nourriture et les frayères près de la côte pour les animaux aquatiques.
- La variation de la répartition et de l'abondance des espèces pourrait encourager les pêcheurs de certains secteurs à entreprendre des activités à plus haut risque à une plus grande distance de la côte.

On prévoit que les réactions du poisson et les répercussions sur les pêches varieront en raison de différences dans l'échelle géographique et les limites physiques qui définissent les écosystèmes marins et d'eau douce. Par exemple, alors que le poisson d'eau douce connaîtra peu de changements à court terme, en raison de la fragmentation topographique des systèmes aquatiques à petite et à grande échelles, les pêches en mer du Canada ont déjà fait preuve de plusieurs changements à court terme dans la répartition et l'abondance des espèces, résultant des variations du climat océanique. En outre, des données tirées des écosystèmes de l'Arctique démontrent que des modifications du rythme et de la réussite des événements du cycle biologique (p. ex., migration, croissance, reproduction, etc.) des espèces indigènes de poisson et de mammifères marins – qui ont des liens solides avec les systèmes alimentaires régionaux et la sécurité alimentaire – sont déjà survenues en raison des changements climatiques.

Les régimes de réglementation imposent d'importantes restrictions à la pêche commerciale de capture dans toutes les régions du Canada, ce qui diminue la possibilité de s'adapter rapidement soit en pêchant de nouvelles espèces, soit en modifiant l'emplacement ou le moment de la pêche, ou encore, les méthodes de capture. De façon générale, la capacité d'adaptation du secteur dépend de l'adaptation de la gouvernance aux changements des ressources. Compte tenu des prévisions sur la modification de la disponibilité des ressources pour diverses pêches commerciales de capture, les mesures d'adaptation suggérées sont axées sur l'élaboration de stratégies visant à déterminer de nouvelles possibilités pour la pêche de capture, ou encore, à accélérer l'élaboration de possibilités pour la pêche d'élevage qui offrent un meilleur contrôle des résultats en matière de production. Des modifications à la conception et à la gestion des pêches ont été proposées comme moyens d'accroître la résilience des systèmes sociaux, économiques et dépendants des pêches aux changements climatiques.

3.4 EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES SYSTÈMES AQUATIQUES ET SUR LES PÊCHES

3.4.1. RÉPERCUSSIONS SUR LES ÉCOSYSTÈMES

Un grand nombre d'observations empiriques, ainsi qu'une modélisation des répercussions d'ordre climatique sur les écosystèmes marins (Beaugrand *et al.*, 2002; 2008; Brander, 2007; Cheung *et al.*, 2009; 2010; Blanchard *et al.*, 2012) et d'eau douce (Chu *et al.*, 2008; Minns, 2009; Sharma *et al.*, 2007; 2009) semblent indiquer que les changements dans la biodiversité et le biote, qui contribuent aux pêches à l'échelle régionale, peuvent être importants. La preuve de l'incidence des changements climatiques sur les écosystèmes aquatiques varie cependant et dépend des régions (Burrows *et al.*, 2011).

Les changements climatiques et socioéconomiques dans l'écorégion de l'Arctique canadien semblent présenter un taux sans précédent d'interconnexion (Carmack *et al.*, 2012; Wang et Overland, 2012). La perte de glace de mer dans l'Arctique aura des répercussions profondes sur l'état des habitats, la répartition des espèces et l'expansion des aires de répartition (p. ex., espèces envahissantes ou

colonisatrices) liées à la structure des écosystèmes et aux changements s'opérant au niveau de la productivité (Behrenfeld *et al.*, 2006; Grebmeier *et al.*, 2006; Meltofte, 2013).

Dans l'écorégion des Grands Lacs continentaux, des observations à l'échelle décennale d'hivers courts, de températures plus élevées dans les rivières et les lacs, de chutes de pluie et de neige plus intenses et d'une diminution de la couverture de glace sur les lacs (Environnement Canada et EPA, 2009) confirment l'existence d'un climat en évolution. Les changements climatiques semblent désavantageux pour les espèces d'eau froide de cette écorégion, mais avantageux pour les espèces d'eau chaude situées à la limite nord de leur aire de répartition, ainsi que pour les espèces exotiques déjà en place ou nouvellement arrivées. Ainsi, il est probable que l'instabilité importante de la composition des espèces dans cette écorégion se poursuivra et pourrait même s'accélérer, en raison des changements climatiques, ce qui aurait une incidence sur les écosystèmes, le poisson, les pêches et l'économie (MPO, 2012a, b; 2013c, d; Meltofte, 2013). Bien que certaines modifications causées par le climat dans les écorégions de l'Arctique et des Grands Lacs continentaux créent des possibilités pour de nouvelles pêches commerciales de capture (MacNeil *et al.*, 2010), elles menacent également la sécurité des biens alimentaires provenant de la pêche de subsistance pratiquée depuis des millénaires par les peuples autochtones (Meltofte, 2013).

En comparaison, dans les écorégions du Pacifique et de l'Atlantique, les changements dans l'état des écosystèmes marins et les captures des pêches associés à la variation du climat océanique se sont manifestés à une échelle suffisamment importante pour nuire à l'obtention de preuves claires des répercussions à long terme des changements climatiques, par rapport aux répercussions de la variation climatique (MPO, 2012a; MPO, 2013d). Par la suite, dans les écorégions de l'Atlantique et du Pacifique du Canada, les réactions du poisson et des pêches aux changements climatiques sont généralement prévues à partir de modèles conceptuels ou de simulations des conséquences de modifications persistantes de l'état, et étayées par les réactions aux variations historiques des conditions climatiques observées pendant de plus courts intervalles (Overland *et al.*, 2010).

3.4.2 RÉPERCUSSIONS SUR LE BIOTE AQUATIQUE

Les répercussions sur les écosystèmes régionaux, les pêches et les systèmes alimentaires connexes découlent de processus généraux qui comprennent : 1) des modifications de la production des écosystèmes résultant des répercussions descendantes (pêche par les humains) ou ascendantes (axées sur les prédateurs ou les nutriments) sur les réseaux trophiques (Pace *et al.*, 1999; Ware et Thomson, 2005; Frank *et al.*, 2006; Hoekman, 2010), 2) des perturbations des événements du cycle biologique provoquant un changement au niveau de la productivité ou de la répartition des principaux taxons contribuant directement aux pêches (Chavez *et al.*, 2003; Martins *et al.*, 2011) et 3) des modifications permanentes de la présence ou de l'absence d'une espèce (Perry *et al.*, 2005) liées à des changements dans les aires de répartition (c.-à-d. expansion/contraction) des espèces indigènes et exotiques envahissantes (Hellmann *et al.*, 2008; Minns, 2009).

EFFETS EN CASCADE DES MODIFICATIONS DE LA PRODUCTION DES ÉCOSYSTÈMES

L'approvisionnement des pêches provenant d'un écosystème donné est régi naturellement par le climat aquatique et les interactions entre les espèces au sein de réseaux trophiques complexes. Les modifications de ces interactions peuvent avoir une incidence sur la production des pêches (Ware et Thomson, 2005; Grebmeier *et al.*, 2006; Mandrak et Cudmore, 2010; Shackell *et al.*, 2012) et fournir une base pour les prévisions des futures modifications de la production.

Les écosystèmes aquatiques dans les zones de hautes latitudes semblent plus fortement influencés par les variations et les changements climatiques que par tout autre facteur (Meltofte, 2013). L'apport en eau douce et la chaleur des masses d'eaux marines de l'Arctique se sont accrus depuis les années 1970 et sont liés à une augmentation deux fois plus élevée de la température de l'eau provenant de l'Atlantique (Proshutinsky *et al.*, 2009), à une diminution de la salinité de la surface des océans (Polyakov *et al.*, 2008), et à une modification de la quantité et de la durée de la glace de mer estivale (Deser *et al.*, 2000; Niemi *et al.*, 2010; *voir* également le chapitre 2). Ces changements physiques favorisent une saison de croissance plus longue et une tendance observée de productivité accrue du plancton dans les eaux arctiques (Niemi *et al.*, 2010; Meltofte, 2013). Dans l'ouest de l'Arctique, le fait de passer de conditions arctiques à subarctiques a déjà provoqué un déplacement vers le nord de l'écosystème marin dominé par les poissons pélagiques, plus productif, qui se limitait auparavant au sud-est de la mer de Béring, et le déplacement de populations de mammifères marins et de poissons benthiques (Grebmeier *et al.*, 2006).

PERTURBATIONS DES ÉVÉNEMENTS DU CYCLE BIOLOGIQUE

Les changements climatiques pourraient avoir des répercussions biophysiques à la base des écosystèmes aquatiques ou agir de façon plus précise en exerçant une influence directe sur les principaux événements ou les principales étapes du cycle biologique d'espèces particulières, qui sont le soutien principal des pêches dans les écorégions du Canada (*voir* l'étude de cas 4). Les études de modélisation indiquent généralement que, dans un climat plus doux, les centres géographiques de production ou de capture des espèces de poisson importantes sur le plan commercial se déplaceraient vers le nord ou vers les côtes, offrant ainsi un accès potentiellement plus important à plusieurs espèces (p. ex., thon, maquereau) dans les eaux canadiennes (Ainsworth *et al.*, 2011).

CHANGEMENTS DANS LES AIRES DE RÉPARTITION ET INVASIONS

On observe déjà des changements dans les aires de répartition des espèces aquatiques de l'Arctique liés à des modifications de la circulation des masses d'eau dans les océans Pacifique et Atlantique (MPO, 2012a). Dans les systèmes d'eau douce situés au sud, des modèles se penchant sur l'expansion des aires de répartition d'importantes espèces pêchées semblent indiquer des résultats variables, qui sont fonction de la préférence thermique des espèces (tableau 3). Il est probable que les pertes de production causées par le climat d'espèces d'eau froide, comme le doré jaune et le touladi, qui contribuent actuellement aux principales pêches commerciales et récréatives, jumelées aux invasions ou à la production accrue d'espèces d'eau chaude de moindre valeur, comme la carpe et le poisson-chat, provoqueront plusieurs modifications des pêches de l'écorégion des Grands Lacs continentaux et des systèmes de gestion connexes (p. ex., contrôle de la lamproie).

ÉTUDE DE CAS 4

LE SAUMON DU PACIFIQUE ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Dans l'écorégion du Pacifique, des changements à l'échelle décennale dans la quantité de saumons du Pacifique disponibles reposant sur une modification du régime climatique (Mantua *et al.*, 1997; Beamish *et al.*, 1999; figure 17), sur les négociations de traités avec les Premières Nations (Brown, 2005) et sur l'apparition de l'aquaculture en tant qu'importante source d'approvisionnement (Robson, 2006), ont considérablement altéré la structure et la sécurité économique de la pêche commerciale de capture, en général, et de la pêche du saumon, en particulier (Meggs, 1991; Glavin, 1996; Brown, 2005). À partir des années 2000, une diminution spectaculaire des stocks disponibles pour les pêches, particulièrement les pêches axées sur les principales espèces de saumon, a été accompagnée d'une augmentation des tensions interculturelles (Harris, 2001), d'une instabilité dans les collectivités locales et d'une réorganisation des flottilles de pêche et des infrastructures de transformation du poisson à l'échelle de la côte (Glavin, 1996; Brown, 2005).

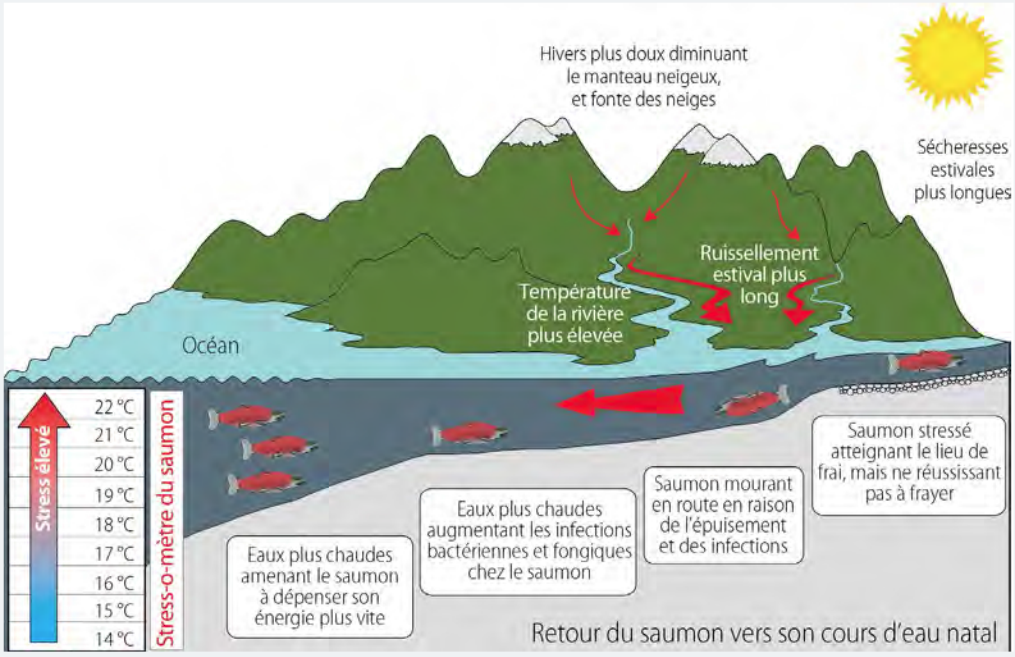


FIGURE 17 : L'incidence des changements climatiques sur les plans d'eau se répercute sur le saumon du Pacifique adulte durant son retour vers son cours d'eau natal *(source : RNCan, 2009)*.

En raison de l'importance régionale, culturelle et économique du saumon du Pacifique, ces espèces ont fait l'objet de recherches continues portant sur les liens entre les changements climatiques et les modifications au niveau de la production et des captures (p. ex., Beamish et Bouillon, 1993; Mantua *et al.*, 1997; Finney *et al.*, 2002; Irvine et Fukuwaka, 2011; Rogers et Schindler, 2011). Le saumon rouge, en particulier, a été le sujet de plusieurs examens importants découlant en partie de l'enquête publique (Commission Cohen, 2010 à 2012) menée à la suite de l'atteinte des écarts minimum record (2009) et maximum record (2010) de retours et de prises de poissons dans le fleuve Fraser. Les rapports techniques de l'enquête Cohen (Hinch et Martins, 2011; McKinnell *et al.*, 2011) permettent de conclure avec une certitude raisonnable que les tendances récentes en matière de changements climatiques dans les habitats dulcicoles du fleuve Fraser mènent à une diminution de la production, en raison de facteurs qui influent sur la réussite de la migration et du frai des adultes (p. ex., Cooke *et al.*, 2004; Crossin *et al.*, 2008), ainsi que sur la production de jeunes en eau douce (Peterman et Dorner, 2011). À l'opposé, bien qu'il existe de solides preuves d'une vaste diminution régionale de la production de saumon rouge du centre au sud de la côte de la Colombie-Britannique (Hyatt *et al.*, 2008) liée à des changements dans les systèmes marins (Peterman et Dorner, 2012), la tendance ne peut pas être clairement attribuée aux changements climatiques à long terme, plutôt qu'aux variations à plus court terme ayant été observées dans le passé dans ce secteur.

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par McDaniels *et al.* (2010) en ce qui concerne la vulnérabilité accrue de la réussite de la migration, du frai et de l'incubation du saumon face aux répercussions des changements climatiques déjà observables en eau douce. De plus, les effets des changements climatiques à plus long terme, tant dans les environnements marins qu'en eau douce, s'accumuleront au fil de toutes les étapes du cycle biologique du saumon et produiront des résultats négatifs pour les populations les plus australes exposées à des environnements de plus en plus défavorables, tout en ayant des résultats neutres ou positifs en ce qui concerne les populations boréales (Healey, 2011).

On dispose de peu de renseignements sur les espèces exotiques envahissantes (EEE) et les changements climatiques dans les systèmes aquatiques du Canada (*révisés par* Smith *et al.*, 2012). De façon générale, cependant, les réactions aux variations et aux changements climatiques diffèrent entre les systèmes marins et d'eau douce, en raison de différences au niveau des restrictions à la dispersion des espèces (Reist *et al.*, 2006), jumelées aux répercussions des espèces envahissantes sur les espèces indigènes, qui sont déjà soumises à un stress (Pimentel *et al.*, 2005). Dans l'ensemble, il est probable que les changements climatiques aggraveront les répercussions des espèces aquatiques envahissantes sur les pêches (Rahel et Olden, 2008), surtout dans les écorégions des Grands Lacs continentaux (USGS, 2012) et de l'Arctique (Cheung *et al.*, 2009; Meltofte, 2013).

3.5 RÉPERCUSSIONS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES SYSTÈMES ALIMENTAIRES AQUATIQUES

3.5.1 RÉPERCUSSIONS SUR LA PÊCHE DE CAPTURE (COMMERCIALE ET RÉCRÉATIVE)

Notre compréhension de l'incidence des variations et des changements climatiques sur le poisson et les pêches se limite souvent aux prévisions modélisées pour les écosystèmes marins et d'eau douce (*voir* le tableau 3), qui ne reflètent pas les répercussions et les interactions cumulées du climat sur les captures (avec quelques exceptions, p. ex., *voir* Crain *et al.*, 2008; Halpern *et al.*, 2008; Ainsworth *et al.*, 2011). Les modèles démontrent toutefois que les modifications de la biodiversité à l'échelle régionale seront probablement importantes (Cheung *et al.*, 2009, 2010; Polovina *et al.*, 2011; Meltofte, 2013; *voir aussi* le chapitre 6 – *Biodiversité et aires protégées*). Bien que les répercussions sur la biodiversité ne mèneront pas nécessairement à une biomasse plus faible ou à une diminution des espèces dans les prises régionales totales, on prévoit que les captures propres aux espèces et la composition actuelle des ensembles changeront rapidement (Overland *et al.*, 2010; Burrows *et al.*, 2011), ce qui causera une redistribution spatiale de l'ensemble des prises possibles des eaux australes jusqu'aux eaux plus boréales, et pourrait modifier les principales pêches dans les régions canadiennes de l'Atlantique et du Pacifique (Cheung *et al.*, 2009, 2010; Polovina *et al.*, 2011).

Dans l'écorégion des Grands Lacs continentaux, il est possible que l'incidence cumulative des espèces exotiques envahissantes (Mandrak et Cudmore, 2010), des changements climatiques, de la croissance de la population humaine régionale et des initiatives éventuelles en matière de gestion fasse augmenter le record, à l'échelle centennale, de croissance-décroissance de production observée pour les pêches commerciales et récréatives (Pimentel *et al.*, 2005; Environnement Canada et EPA, 2009; MRNO, 2013a). Bien que les principales pêches commerciales et récréatives n'aient jamais été présentes dans l'Arctique canadien, l'expansion d'ensembles entièrement nouveaux d'espèces subarctiques à la suite du réchauffement est en cours (p. ex., saumon; Nielsen *et al.*, *sous presse*). Ainsi, de grands changements touchant les écosystèmes, les poissons et les pêches de l'Arctique semblent inévitables, et il est également probable que la production brute provenant de tout ensemble d'espèces qui pourrait faire son apparition contribuera à l'augmentation des captures des pêches en mer (Reist *et al.*, 2006). Ces ressources contribueront à l'approvisionnement alimentaire nordique et gagneront probablement en importance dans le cadre d'une gestion préventive (Stram et Evans, 2010; Meltofte, 2013), à mesure que les infrastructures requises (c.-à-d. des ports pour petits bateaux) seront mises en place.

Type d'espèces	Résultat du scénario	Références
Espèce d'eau froide : touladi	Diminution possible de 30 % à 40 % des habitats adaptés au touladi en Ontario d'ici la fin du siècle	Minns, 2009
Espèce d'eau froide : cisco	Le réchauffement pourrait faire disparaître entre 25 % et 75 % des populations de cisco	Sharma *et al.*, 2011
Espèce d'eau froide : doré jaune	Le réchauffement pourrait accroître l'habitat disponible, ce qui pourrait entraîner un déplacement vers le nord de l'emplacement de la pêche au doré jaune	Hunt et Moore, 2006
Ensemble d'espèces d'eau froide	L'aire de répartition des espèces d'eau froide pourrait être réduite à moins de 67 % des sites au sein des 43 bassins hydrographiques étudiés d'ici 2025 (pire scénario), et les répercussions les plus importantes toucheront les bassins hydrographiques les plus au sud; le réchauffement est un plus grand facteur de risque qu'un prédateur envahissant (éperlan) en ce qui concerne la disparition des habitats dans les lacs d'eau froide	Chu *et al.*, 2008 Sharma *et al.*, 2011
Espèce d'eau chaude : achigan à petite bouche	L'habitat adapté à l'achigan à petite bouche pourrait s'étendre pour inclure la majorité des lacs du Canada d'ici 2011	Sharma *et al.*, 2007
Interactions entre les invasions d'espèces	Une étendue vers le nord de l'habitat adapté à l'achigan à petite bouche pourrait faire passer à 1612 le nombre de lacs comptant des populations de truite vulnérables (augmentation de 20 %) d'ici 2050	Sharma *et al.*, 2009

TABLEAU 3 : Résultats pour les espèces de poisson d'eau douce, en fonction de divers scénarios de changements climatiques *(voir aussi Dove-Thomson et al., 2011)*.

Le réchauffement de l'Arctique aura également une incidence sur les habitats dulcicoles (Minns, 2009; Sharma *et al.*, 2009), en raison de la modification de l'état des glaces des rivières et des lacs (Prowse et Brown, 2010), ce qui pourrait provoquer des pertes de production d'espèces de salmonidés emblématiques attribuables à leur dépendance à des régimes naturels de glaces hivernales (p. ex., Linnansaari et Cunjak, 2010). Les espèces arctiques endémiques normalement isolées (p. ex., ombles de fontaine, baleines, morses, ours polaires) et les pêches sont menacées de déclin de population, en raison d'un ensemble de facteurs prévus, soit les changements climatiques, les invasions d'espèces aquatiques et d'autres facteurs anthropiques (Meltofte, 2013).

Des évaluations récentes (MPO, 2012a, b, 2013c, d) semblent indiquer qu'il est peu probable que des changements draconiens se produisent dans les captures et la valeur des pêches des écorégions canadiennes au cours des dix prochaines années. Les observations ci-dessus laissent entendre que, à plus long terme, les captures des pêches regroupées du Canada augmenteront, mais que les résultats d'une réorganisation complexe des écosystèmes et des espèces dicteront la valeur économique globale, laquelle demeure très incertaine. Enfin, toute modification mentionnée précédemment des prises de la pêche commerciale de capture et des chaînes d'approvisionnement connexes pourrait influer sur les profils de répartition ultérieurs parmi les nations (Allison *et al.*, 2009). De tels changements à l'échelle nationale ou mondiale pourraient se traduire par une modification du prix et de la valeur des pêches canadiennes et avoir une incidence sur les revenus bruts et nets provenant de la pêche et de la transformation du poisson. Des modifications des coûts opérationnels associés à plusieurs liens dans la chaîne alimentaire des pêches pourraient exiger un agrandissement ou une diminution de la taille de la flotte pour des pays comme le Canada (Sumaila *et al.*, 2011). Dans les zones de haute latitude, où les captures n'existent pas à l'heure actuelle, il existe toutefois une possibilité de gain financier pour les premiers participants se prévalant d'un accès à de nouvelles pêches (Arnason, 2007).

3.5.2 RÉPERCUSSIONS SUR LA PÊCHE D'ÉLEVAGE

Les changements climatiques risquent de toucher l'intégrité des infrastructures aquacoles (p. ex., parcs en filet, écloseries), les caractéristiques de l'habitat physique et les espèces produites. Par exemple, les lieux et les pratiques de production présenteront des sensibilités différentes à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation de la gravité ou de la fréquence des tempêtes (Moore *et al.*, 2008). De façon générale, tant du point de vue de la production que de celui des infrastructures, les menaces pesant sur l'aquaculture de poissons de mer semblent moindres que celles auxquelles font face les mollusques et crustacés. Contrairement à ces derniers, le poisson d'élevage ne dépend pas de sources de nourriture produites dans l'environnement d'élevage et n'accumule pas de biotoxines ou de coliformes. Le rendement du poisson, ainsi que des mollusques et crustacés, peut cependant être touché par des changements dans la température océanique, l'oxygène dissous, la salinité, l'acidité (*voir* le chapitre 2 – *Un aperçu des changements climatiques au Canada*) et la prolifération d'algues toxiques, ce qui peut mener à une perte de productivité ou à une mortalité directe (Moore *et al.*, 2008). Bien que la production de poisson d'élevage dépende actuellement de la capture de poisson-fourrage sauvage, utilisé pour produire de la farine de poisson, des analyses fondées sur des modèles indiquent que la perte de sources de farine de poisson causée par le climat est une situation qui peut être remédiée par la mise en marché de substituts novateurs de la farine de poisson (Merino *et al.*, 2010). La gouvernance et le coût dicté par la demande d'autres sources de farine de poisson joueront des rôles clés dans la production future du poisson de mer d'élevage (Merino *et al.*, 2012). Dans l'ensemble, malgré plusieurs risques possibles, l'industrie aquacole devrait être en mesure de s'adapter aux conditions changeantes, en ayant recours soit à des avancées technologiques, soit à des déménagements.

3.5.3 RÉPERCUSSIONS SUR LA PÊCHE DE SUBSISTANCE

Les aliments traditionnels fournis par l'environnement naturel demeurent un élément d'importance fondamentale pour la santé des Autochtones (Hansen *et al.*, 2008; Wheeler *et al.*, 2010). Les changements climatiques causeront probablement des changements rapides dans les habitudes migratoires, les aires de répartition et la productivité des animaux, ce qui pourrait compromettre l'accès à un approvisionnement alimentaire fiable (*voir* l'encadré 3 et le chapitre 7 – *Santé humaine*). Ces répercussions risquent de rendre plus aigu le sentiment d'insécurité alimentaire, en ce qui a trait à la pêche de subsistance traditionnelle, dans certaines régions. Cela se fera particulièrement sentir dans les situations où d'autres facteurs imposent des limites à la pêche de subsistance, comme les politiques en matière de quotas de pêche dans le Pacifique (Harris, 2001), et dans les endroits où la variabilité et le changement du climat ont déjà eu des répercussions (p. ex., dans l'Arctique; Lemmen *et al.*, 2008).

ENCADRÉ 3

APPROVISIONNEMENT ALIMENTAIRE NON COMMERCIAL

Des températures plus élevées et un changement dans les précipitations touchent déjà les collectivités et les environnements ruraux et éloignés (Lemmen *et al.*, 2008; A Northern Vision, 2011). Les principaux événements du cycle biologique des mammifères marins adaptés au froid se trouvant en haut des chaînes alimentaires arctiques, et dont l'importance au niveau des chaînes d'approvisionnement régionales est reconnue, semblent maintenant de plus en plus vulnérables aux répercussions des changements climatiques et à l'augmentation possible de l'activité humaine dans le Nord (Niemi *et al.*, 2010; Meltofte, 2013). Au sujet des répercussions observées, dont la pertinence en matière de systèmes alimentaires et de sécurité est reconnue, les auteurs de Lemmen *et al.* (2008) et A Northern Vision (2011) ont noté que :

- Les routes de glace hivernales connaissent des saisons plus courtes, leur entretien coûte plus cher et elles doivent être remplacées par des solutions plus coûteuses de transport des aliments.
- Le pergélisol se dégrade, ce qui touche l'intégrité des infrastructures de livraison des aliments.
- La glace de mer dans l'Arctique s'amincit et menace les mammifères océaniques et la chasse, tandis qu'on prévoit une augmentation possible de la navigation, du tourisme, de l'exploitation des ressources et des activités industrielles.
- Les habitudes migratoires de la faune évoluent et modifient ainsi la disponibilité des aliments traditionnels (*voir* le chapitre 6 – *Biodiversité et aires protégées*).
- La variabilité météorologique et les conditions extrêmes augmentent et apportent des modifications au niveau de la chasse et des routes de transport, et contribuent ainsi à accroître les dangers liés au fait de se trouver dans la nature ou sur l'eau.
- Les sources alimentaires traditionnelles sont plus difficiles à trouver, puisque les espèces se déplacent ou disparaissent de la région.
- Les forêts sont plus vulnérables aux ravageurs et aux feux de forêt, ce qui se répercute sur les écosystèmes des sources alimentaires traditionnelles (*voir* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*).
- L'érosion de la ligne de côte et les ondes de tempête endommagent les infrastructures et les routes d'approvisionnement.
- Un accès portuaire accru, en raison d'une diminution de la glace de mer, pourrait modifier les styles de vie traditionnels, en raison de l'arrivée de nouveaux ravageurs, de nouvelles maladies et d'aliments moins sains.
- À court terme, la fonte des glaciers provoquera des inondations et leur disparition pourrait, à long terme, mener à des sécheresses.

Les effets continus des changements climatiques pourraient rendre les collectivités nordiques et éloignées du Canada plus vulnérables aux problèmes de sécurité alimentaire. Les terres d'origine, la culture, le savoir traditionnel et les terrains de chasse des peuples autochtones nordiques pourraient être directement touchés. Par ailleurs, bon nombre de ces communautés dépendent des aliments prélevés dans la nature tels la viande sauvage, le poisson, les oiseaux, les baies et d'autres plantes, lesquels sont tous sensibles au changement du climat. Par exemple, les caribous de la toundra du nord du Canada se déplacent sur de grandes distances entre les terrains hivernaux, les terrains de mise bas et les secteurs où ils sont à l'abri des insectes, et ils refont ce trajet chaque année. Les caribous font maintenant face à une neige plus profonde et plus lourde et semblent s'éloigner des terrains de chasse traditionnels. Les changements climatiques pourraient également entraîner une diminution ou une perte de zones humides, comme les marécages et les marais, qui sont des zones importantes pour la nidification et l'alimentation de nombreux oiseaux migrateurs, et pourrait diminuer le nombre d'oiseaux (Meakin et Kurvits, 2009; *voir aussi* le chapitre 6 – *Biodiversité et aires protégées*).

Les répercussions sur la chaîne alimentaire marine de l'Arctique dépendront des emplacements. Si des températures plus chaudes touchent une partie de la chaîne, elles pourraient avoir des répercussions sur tout l'écosystème marin. Par exemple, comme la glace de mer fond plus tôt au printemps et que les limites de la banquise s'éloignent de la terre, les ours polaires ont plus de difficulté à atteindre les phoques nécessaires à leur survie et les chasseurs ont besoin de plus de ressources pour parvenir à des terrains de chasse plus éloignés (Ford, 2009).

Bien que les sols et les conditions climatiques nordiques soient grandement inadaptés à la production agricole, certaines zones présentent une capacité agricole modérée. Une saison de croissance plus longue permettrait la culture d'une plus vaste diversité de cultures et des récoltes plus importantes; les tendances futures en matière de précipitations pourraient toutefois restreindre ce potentiel (Ogden et Johnson, 2002). En outre, une saison de croissance plus longue pourrait provoquer un déplacement vers le nord d'aliments végétaux comestibles, d'animaux qui consomment ces aliments et de leurs prédateurs. Bien que cela puisse accroître l'accès aux aliments prélevés dans la nature, une modification des biomes pourrait aussi occasionner l'apparition ou le renforcement de nouvelles maladies et de nouveaux ravageurs touchant les humains, la flore et la faune (A Northern Vision, 2011).

La planification en vue des changements climatiques est un exercice important qui tire profit d'activités de planification à grande échelle, comme *La Stratégie d'adaptation panterritoriale : agir ensemble pour s'adapter au changement climatique dans le Nord canadien* (A Northern Vision, 2011), qui propose une approche prônant la mise en œuvre de mesures de nature collaborative dans les trois territoires, tout en appuyant des initiatives propres à un territoire afin de répondre à des défis particuliers. On souhaite, par exemple, remplacer les aliments « du commerce » pauvres en nutriments et à haute teneur en sucre et en gras, qui contribuent à l'augmentation des taux d'obésité et de diabète, par des aliments traditionnels et prélevés dans la nature (Kuhnlein et Receveur, 2007). On envisage également d'examiner d'autres sources, comme les serres et l'agriculture, afin de compléter l'approvisionnement alimentaire (A Northern Vision, 2011).

3.6 MESURES D'ADAPTATION

3.6.1 VULNÉRABILITÉ ET ADAPTABILITÉ DES COMMUNAUTÉS DE PÊCHEURS

On prévoit que les changements climatiques continus provoqueront des changements dans la structure et la productivité de l'écosystème aquatique, ce qui causera des modifications dans la quantité, la qualité et la composition des espèces de poisson entrant dans les chaînes d'approvisionnement alimentaire des quatre principales écorégions de pêche du Canada. Selon la résilience des chaînes d'approvisionnement régionales, diverses mesures d'adaptation seront requises en vue de réduire la vulnérabilité et maximiser les possibilités. Lorsqu'on le compare aux pays en développement qui dépendent grandement du poisson pour l'alimentation locale, le Canada démontre une faible vulnérabilité aux répercussions des changements climatiques sur sa chaîne d'approvisionnement provenant des pêches regroupées (Allison *et al.*, 2009). Les statistiques compilées dissimulent souvent, cependant, des différences à plus petite échelle quant à la vulnérabilité du système alimentaire ou aux niveaux de résilience associés à l'ensemble des pêches culturellement ou économiquement importantes. Dans une chaîne d'approvisionnement disposant d'une faible capacité d'adaptation, les conséquences socioculturelles, surtout en matière de sécurité alimentaire des plus vulnérables, peuvent provenir de petites perturbations (Thompson et Scoones, 2009). En comparaison, la perturbation des chaînes d'approvisionnement plus résilientes pourrait créer des possibilités, des innovations et de nouvelles voies de développement (Thompson et Scoones, 2009). On peut étudier les réactions historiques des pêches et des communautés de pêcheurs aux variations dans l'approvisionnement pour préciser les origines et la nature de la vulnérabilité ou de la résilience dont font preuve la pêche de subsistance, la pêche sauvage de capture et la pêche d'élevage.

3.6.2 PÊCHE DE SUBSISTANCE

La pêche de subsistance, surtout celle pratiquée par les peuples autochtones dans les collectivités éloignées des écorégions canadiennes de l'Arctique et du Pacifique, joue un rôle d'une importance majeure pour la culture locale. Depuis plus d'un siècle, elle se trouve au centre des conflits interculturels sur les pêches qui surviennent en Colombie-Britannique (*voir* Harris, 2001, 2008). De même, le droit de pêcher des espèces traditionnelles pour répondre aux besoins alimentaires, sociétaux et culturels est un élément clé des traités modernes conclus entre le gouvernement du Canada et des groupes autochtones répartis du Yukon à l'est de l'Arctique (*voir* Harris et Millerd, 2010, en révision). Ainsi, pour les peuples autochtones canadiens, il est extrêmement important de maintenir la sécurité de l'approvisionnement relatif à la pêche des espèces traditionnelles. Puisqu'il est probable que des changements causés par le climat entraîneront des modifications au niveau de la prise et de la composition des espèces hors de leur aire de répartition historique (*voir* la section 3.4) dans les écosystèmes marins et d'eau douce, il semble que la pêche de subsistance traditionnelle pratiquée à des emplacements ou à des moments fixes se retrouvera ainsi très vulnérable. Sa capacité d'adaptation pourrait être insuffisante pour maintenir la pêche habituelle dans les cas où les espèces visées seraient beaucoup moins nombreuses ou éliminées par les changements climatiques. Cela s'applique particulièrement dans le cas des espèces anadromes et des eaux intérieures.

3.6.3 PÊCHE COMMERCIALE DE CAPTURE

La pêche commerciale de capture et les communautés qui en dépendent dans les écorégions canadiennes de l'Atlantique, du Pacifique et des Grands Lacs continentaux ont toutes récemment connu des changements à l'échelle décennale en matière de répartition, d'abondance et de capture des espèces historiquement dominantes exploitées par les pêches. Bien que ces changements ne puissent être imputés uniquement aux changements climatiques, ils fournissent des renseignements utiles sur la vulnérabilité relative et la capacité d'adaptation des communautés dépendant de la pêche lorsqu'elles sont soumises à un stress. En ce qui concerne les communautés présentant un haut degré de dépendance économique à la pêche, les changements les plus significatifs se sont produits dans l'Atlantique (*voir* l'étude de cas 5), bien qu'ils aient tout de même été importants dans les écorégions du Pacifique et des Grands Lacs continentaux. Les coûts et les avantages de ces changements ont été répartis de façon inégale et le rétablissement économique des communautés semble être étroitement lié à leur bien-être économique initial (Murray *et al.*, 2005).

Des régimes climatiques variables conjugués à des vagues continues d'invasions d'espèces exotiques ont également eu de graves répercussions sur la pêche récréative et la pêche commerciale de capture dans l'écorégion canadienne des Grands Lacs continentaux. Bien que ces changements aient été accompagnés d'importantes pertes économiques (Pimentel *et al.*, 2005), les deux types de pêche de cette écorégion semblent s'être au moins partiellement adaptés à la diminution des prises d'espèces indigènes (p. ex., touladi, corégone) grâce à une pêche accrue d'espèces exotiques (p. ex., éperlan, saumon du Pacifique). De plus, la dépendance relativement faible aux pêches de la plupart des collectivités locales de cette région, afin d'assurer la sécurité de leur système alimentaire, indique que ces dernières sont moins vulnérables aux répercussions du climat sur les chaînes d'approvisionnement de la pêche.

3.6.4 PÊCHE D'ÉLEVAGE

L'absence relative de contrôle sur la base de la production naturelle qui soutient la pêche « sauvage », par rapport à des niveaux accrus de contrôle associés à une pêche d'élevage intensive, est susceptible de prendre de plus en plus d'importance, en raison des changements climatiques futurs. L'utilisation d'extrapolations des changements climatiques aux fins d'ajustement du moment de la production, de l'emplacement des opérations ou du choix des espèces d'élevage, offre un avantage à la pêche d'élevage qui n'est pas facilement réalisable pour d'autres chaînes d'approvisionnement

(Barange et Perry, 2009). Ainsi, bien que la pêche d'élevage connaisse tout de même des problèmes (p. ex., *voir* CCRHP, 2003; Robson, 2006), elle présente clairement une vulnérabilité moindre et une plus grande capacité d'adaptation aux changements des conditions environnementales, notamment les futurs changements climatiques, que la pêche de subsistance ou la pêche commerciale de capture. La survie de tous les types de pêche nécessitera malgré tout la mise en place de mécanismes institutionnels adéquats pour faire face aux répercussions des changements climatiques.

3.6.5 MESURES D'ADAPTATION DES INSTITUTIONS

Les changements technologiques, comportementaux et culturels à divers niveaux de la chaîne d'approvisionnement alimentaire des pêches sont des mesures d'adaptation aux répercussions des variations et des changements climatiques (*voir* l'étude de cas 5). Tous ces changements comportent toutefois une interaction et une interdépendance avec les cadres réglementaires et stratégiques de Pêches et Océans Canada (MPO) ou de ses délégués (c.-à-d. organismes provinciaux, conseils de gestion des ressources). Il existe plusieurs grandes catégories d'activités qui, ensemble, peuvent être considérées comme comprenant un type d'infrastructure institutionnelle « souple » sur lequel les changements climatiques auront une incidence et duquel proviendront des mesures d'adaptation générales (tableau 4).

La section sur les pêches du présent chapitre était principalement axée sur les variations causées par le climat en matière de production alimentaire et sur les conséquences pour les prises, en tant que fondement de tous les éléments suivants du système alimentaire des pêches (p. ex., transformation, distribution, échange et commercialisation, consommation). Bien que cette orientation ait nuit à l'évaluation des changements climatiques et des mesures d'adaptation pour l'ensemble des chaînes d'approvisionnement alimentaire aquatiques, il est néanmoins important de reconnaître l'importance de ces changements. Ainsi, suit une étude de cas sur les interactions entre les changements dans les systèmes naturels et humains liés à la production et à l'utilisation de la morue du Nord, afin d'illustrer d'importantes interactions documentées entre plusieurs éléments d'une chaîne d'approvisionnement alimentaire régionale (*voir* l'étude de cas 5).

3.7 RÉSUMÉ

La réaction du poisson telle que mesurée en fonction des tendances historiques liées aux répercussions de la variation du climat sur la pêche commerciale de capture, semble indiquer que les systèmes alimentaires de la pêche du Canada, dans l'ensemble, font preuve d'une vulnérabilité modérée et d'une grande capacité d'adaptation aux changements climatiques. À l'avenir, cette pêche continuera probablement de capturer une diversité d'espèces qui approvisionnent les chaînes alimentaires à l'échelle locale et mondiale. Cette situation dissimule toutefois la gamme de vulnérabilités démontrées par la pêche de subsistance traditionnelle rurale (grande vulnérabilité), la pêche récréative et la pêche commerciale de capture à petite échelle (vulnérabilité modérée), et la pêche d'élevage (faible vulnérabilité) face aux risques posés par les changements climatiques.

Élément de l'infrastructure institutionnelle	Mesure d'adaptation générale
Délivrance de permis	Moment, emplacement et quantité pêchée indiqués sur le permis qui varient afin de conserver des pêches durables
Gestion des pêches	Investissements variés dans la surveillance et l'évaluation de l'état des stocks et des conditions environnementales en vue de garantir une gestion efficace des pêches actuelles
Recherche sur les pêches et gestion de l'habitat	Investissements variés dans les nouvelles activités scientifiques dans le but de soutenir les systèmes actuels et nouveaux de gestion de la pêche de capture et de la pêche d'élevage
Conservation des espèces en péril	Réglementation des systèmes de gestion des pêches et de l'habitat afin de contrôler les risques de disparition des espèces en voie de disparition
Négociation et maintien des traités	Modification des nouvelles dispositions ou des dispositions actuelles des traités pour s'adapter aux répercussions des changements climatiques, lorsque les risques liés aux changements climatiques le justifient

TABLEAU 4 : Principales mesures d'adaptation institutionnelles par élément d'infrastructure institutionnelle.

ÉTUDE DE CAS 5

CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX ET ÉCOSYSTÉMIQUES ET RÉPERCUSSIONS SUR LES CHAÎNES D'APPROVISIONNEMENT EN PRODUITS DE LA MER DU NORD DU GOLFE, ET HABITUDES ALIMENTAIRES À TERRE-NEUVE-ET-LABRADOR

Pendant près de trois siècles, la pêche de la morue était le soutien principal des collectivités côtières de Terre-Neuve-et-Labrador (T.-N.-L.). Depuis le tout début, la morue (figure 18) était un aliment essentiel et un important produit d'exportation pour l'économie de l'est du Canada. Les habitudes alimentaires traditionnelles terre-neuviennes ont évolué rapidement avec l'arrivée des biens et services modernes à la suite de l'entrée de la province dans la Confédération canadienne, à la fin des années 1940, et de l'élargissement de sa compétence touchant les ressources marines dans la zone économique exclusive, dans les années 1970. La production de produits de la mer transformés est passée de la production traditionnelle à petite échelle dans les années 1950 à la production industrielle dans les années 1980 (Sinclair, 1985; Wright, 2001). Au début des années 1990, plusieurs stocks de morue des T.-N.-L. ont fait l'objet d'un moratoire, en raison d'un grave déclin des ressources causé à la fois par la surpêche et les changements environnementaux (Hutchings et Myers, 1994; Rice *et al.*, 2003). La pêche de la morue dans le nord du golfe fait l'objet d'une étude de cas visant à explorer les liens possibles entre les changements environnementaux et écosystémiques et la production de produits de la mer, la sécurité alimentaire et les habitudes alimentaires. Le stock de morue du nord du golfe migre dans les eaux du golfe du Saint-Laurent baignant les côtes de Terre-Neuve-et-Labrador et du Québec.

Les pêches « possibles » et « réalisées » sont le produit d'une chaîne comportant trois étapes : 1) écosystèmes marins, 2) activités de pêche et 3) activités suivant la pêche (transformation, commercialisation et consommation). Les possibilités qu'offre la chaîne relative au poisson peuvent servir d'occasions pour améliorer les liens institutionnels en matière de conservation de la biodiversité, de durabilité des ressources et du bien-être de la communauté ainsi que, en raison des changements climatiques à venir, de capacité d'adaptation nécessaire pour gérer ces répercussions.



FIGURE 18 : Un pêcheur qui filète une morue à Terre-Neuve.

Écosystèmes marins

À l'instar des importants stocks de poisson de mer, la morue du nord du golfe effectue de considérables migrations afin de se reproduire et de se nourrir; ces migrations sont liées aux habitats essentiels, aux changements de température et à la disponibilité des aliments (Yvelin *et al.*, 2005). La géographie et les complexités biophysiques de la région, caractérisée par la présence de systèmes de fjords arctiques, signifient que tout léger changement environnemental causé par la température, le ruissellement, les masses d'eau ou les courants océaniques se répercute sur la couche intermédiaire froide et la température de la surface de la mer, ayant ainsi des répercussions sur la production de zooplancton, la dispersion des larves et la biomasse du stock (Frechet, 1990; Quinjon et Snelgrove, 2005; Galbraith, 2006; Galbraith *et al.*, 2012). On a trouvé que des températures plus froides et des changements dans les conditions océanographiques avaient eu des répercussions sur le taux de reproduction des populations de morue, répercussions d'ailleurs responsables du déclin des populations vers le milieu des années 1980 (MPO, 2010). Une incidence semblable de la température a été associée aux déclins des années 2003 et 2008 dans les pêches du nord du golfe (MPO, 2010). Une modification de la circulation océanique entre les années 1930 et 1980 a aggravé l'hypoxie découverte dans les chenaux profonds (Gilbert *et al.*, 2005), au point où les eaux estuariennes les plus profondes sont devenues pratiquement inutilisables pour la morue (Plante *et al.*, 1998). Cette situation semble avoir contribué à une réduction du taux de productivité du stock de morue dans le nord du golfe (Chabot, 2004). Le taux de mortalité de la morue était également élevé, en raison de la prédation par les phoques et de l'exploitation intense pratiquée par les pêches (MPO, 2010). Ces changements à l'étape préalable à la capture ont touché la structure et la fonction de l'écosystème et les relations prédateur-proie, en plus d'avoir des répercussions sur l'allocation des quotas de prises pour la pêche commerciale et la pêche récréative à des fins alimentaires de la morue.

Activités de pêche

En plus de la variabilité du climat, l'effondrement du stock a été attribué à plusieurs facteurs, notamment des stratégies de gestion inefficaces, la pêche illégale et non déclarée, qui se répercute sur l'évaluation du stock, et la surpêche étrangère (Bavington, 2010). La biomasse du stock reproducteur a chuté graduellement de sommets historiques de 378 000 tonnes au milieu des années 1980 jusqu'à 9000 tonnes en 1993, suscitant ainsi le recours à un moratoire complet sur la pêche commerciale de 1994 à 1996 et en 2003 (MPO, 2010). Par conséquent, les activités de toutes les flottilles de pêche étrangères et de la plupart des flottilles nationales ont été suspendues, et les prises totales en 2010 se situaient à tout juste 2 % des niveaux historiques.

L'effondrement de la pêche de la morue a aussi mené à la mise en place de nouvelles règles concernant l'accès et la répartition des produits de la mer locaux, comme le démontre la *Loi de 1997 sur la professionnalisation*. Les limites imposées à la pêche de subsistance de la morue ont compromis l'accès et le choix des communautés au type de protéines consommées. Ces modifications des politiques ont soulevé des préoccupations quant à la sécurité alimentaire et à la viabilité des collectivités dépendant de la pêche (Lowitt, 2011).

Vingt ans après le moratoire, le stock de morue ne s'est pas régénéré (Khan, 2011). La pêche commerciale et la pêche à des fins alimentaires disposent de petits quotas. Certains ménages ont accès à la morue et à d'autres produits de la mer grâce à la pêche récréative. Pour la région dans son ensemble,

Étude de cas 5 suite à la page suivante

environ 161 tonnes de morue ont été capturées en 2006 dans le cadre de la pêche récréative à des fins alimentaires, par rapport à 1742 tonnes pour la pêche commerciale de capture (MPO, 2007, 2010). Alors que la pêche sauvage a décliné et est demeurée en état d'effondrement, l'aquaculture a augmenté de 150 % depuis le moratoire (MPO, 2011). Pendant la même période, on a remarqué des modifications dans la structure de l'écosystème et les espèces ciblées, qui sont passées du poisson de fond à la pêche coquillière, encore plus lucrative (Savenkoff *et al.*, 2007). Dans l'ensemble, en 2010, la pêche coquillière représentait 60 % des quantités totales débarquées et 84 % de la valeur au débarquement de toutes les pêches de capture à Terre-Neuve-et-Labrador (Ministère des Pêches et de l'Aquaculture, 2011). On a toutefois rapporté récemment que des eaux plus chaudes avaient une incidence sur la mue des mollusques et crustacés tel le crabe (MPO, 2008; Vasseur et Catto, 2008). De telles répercussions de la variabilité du climat sur les ressources de crabe ont mené à des mesures de gestion qui restreignent la pêche à certaines grilles géographiques, afin de protéger les espèces à « carapace molle ». Ces mesures de gestion ont des conséquences sur les stratégies de pêche et les revenus provenant des activités de la pêche coquillière, surtout si ces conditions perdurent (Schrank, 2005; MPO, 2008).

Activités suivant la pêche (transformation, commercialisation et consommation)

Les réseaux de transformation et de distribution ont aussi été transformés à la suite de l'effondrement, afin de répondre aux besoins des consommateurs et de maintenir la certification. Les canaux de commercialisation et de distribution des produits de la mer sont passés d'un marché majoritairement américain dans la période précédant l'effondrement à de nouveaux marchés mondiaux à la suite de l'effondrement. Ces modifications au sein de la chaîne d'approvisionnement alimentaire des pêches, à diverses échelles spatiales, ont provoqué une transformation sociale et économique considérable dans les régions côtières quant aux possibilités de survie des communautés, aux moyens de subsistance, ainsi qu'à l'accès aux produits de la mer locaux (Ommer *et al.*, 2007).

L'effet en cascade des changements dans les écosystèmes marins qui touchent les moyens de subsistance et la sécurité alimentaire se manifeste clairement dans toute la chaîne d'approvisionnement alimentaire de la pêche, de « l'océan à l'assiette ». Les conclusions de deux études récentes révèlent que la consommation de produits de la mer diminue à Terre-Neuve (Solberg *et al.*, 2007; Lowitt, 2011). Les études démontrent que la consommation de crevettes s'est accrue, et il pourrait s'agir de l'une des mesures d'adaptation appliquées par les ménages locaux à leur régime alimentaire à la suite du changement dans la structure de l'écosystème. Étant donné sa prédominance dans les habitudes alimentaires traditionnelles, la morue demeure toutefois de loin le type de produit de la mer le plus consommé. Dans l'étude de 2011, 81 % des ménages ont dit manger de la morue « souvent » par rapport à 31 % pour les crevettes, 27 % pour le homard et 17 % pour le crabe (Lowitt, 2011).

Une diminution de la consommation de produits de la mer pourrait être la conséquence de quotas commerciaux plus bas et d'une baisse des activités de pêche récréative et de subsistance, jumelés à des règlements plus sévères concernant l'accès aux produits de la mer locaux, le tout pouvant contribuer à une réduction de la quantité de poisson débarqué mis à la disposition des populations locales aux fins de consommation. Selon une étude provinciale, le taux de participation à la pêche récréative à des fins alimentaires se situe également parmi les plus faibles (MPO, 2007), ce qui reflète les changements environnementaux et les répercussions sur les stocks de morue. Par ailleurs, dans le cas de plusieurs espèces, les saisons de pêche raccourcies font que l'achat de produits de la mer locaux n'est possible que pendant un plus petit nombre de mois au cours de l'année.

Mécanismes d'adaptation et interventions des institutions

Les changements qui se sont opérés au niveau des écosystèmes, les pêches ciblées et les interventions des institutions ont eu des répercussions sur la sécurité alimentaire des collectivités côtières pour qui les produits de la mer sont, depuis toujours, un élément important de leur régime alimentaire. Les gestionnaires des systèmes alimentaires s'intéressent de plus en plus à d'autres secteurs stratégiques – notamment la santé et l'environnement – en vue d'en améliorer la capacité à s'adapter aux défis liés à l'environnement et aux ressources (MacRae, 2011).

La capacité d'adaptation des communautés aux changements environnementaux et écosystémiques, notamment les changements dans les systèmes alimentaires, peut être améliorée grâce à des ententes de gouvernance multipartites qui mettent l'accent sur l'autonomisation des collectivités et la responsabilité partagée. Une meilleure compréhension des interactions entre les facteurs sociaux et économiques et la variabilité du climat et les changements écosystémiques permettra d'apporter des améliorations aux institutions et à la capacité de gouvernance adaptative, de façon à ce qu'elles soient plus en mesure de faire face aux conséquences de la variabilité et des changement climatiques.

4. CONCLUSIONS ET PROCHAINES ÉTAPES

La production d'aliments couvre une vaste gamme d'activités comprenant l'agriculture, la pêche et l'approvisionnement alimentaire non commercial. Alors que d'autres études continueront d'améliorer le processus décisionnel en matière d'adaptation, les mesures d'adaptation continueront de progresser afin d'accroître la résilience à la variabilité des conditions météorologiques, à court terme, et du climat, à long terme. La capacité du secteur alimentaire à augmenter sa valeur de marché dépendra de sa capacité à s'adapter aux nouvelles conditions engendrées par les changements climatiques et les conditions géopolitiques en évolution. Un environnement complexe, caractérisé par une rapide évolution, requiert un secteur alimentaire flexible et adaptable. L'adaptabilité des secteurs abordés dans le présent chapitre est manifeste et confirmée par des exemples d'adaptation antérieure (p. ex., sécheresse dans les Prairies, déclin de la morue dans le Canada atlantique), d'initiatives actuelles (p. ex., modification des types de cultures, pêche de nouvelles espèces) et de planification (p. ex., assurance contre les pertes lors des épidémies de fièvre catarrhale du mouton, Stratégie d'adaptation panterritoriale).

RÉFÉRENCES

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). *Les produits canadiens de l'érable – situation et tendances en 2006-2007*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2007.

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). *Vue d'ensemble du système agricole et agroalimentaire canadien 2011*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, publication 11279F, 2011.

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). *Scénario de changement climatique* (cartes), Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2012a, <www.agr.gc.ca/ccscenarios>.

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). Service *d'exportation agroalimentaire* (fiches de renseignements), Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2012b, <http://www.ats-sea.agr.gc.ca/stats/4679-fra.htm>.

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). *Service d'exportation agroalimentaire, faits saillants sur le commerce canadien*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2012c, <http://www.ats-sea.agr.gc.ca/stats/6044-fra.htm>.

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). *Poissons et fruits de mer – survol de l'industrie*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2012d, <http://www.ats-sea.agr.gc.ca/sea-mer/ind-fra.htm>.

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). *Vue d'ensemble du système agricole et agroalimentaire canadien 2012*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, publication 11660F, 2012e.

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). *Indicateurs agroenvironnementaux*, Agriculture et Agroalimentaire Canada 2013, <http://atlas.agr.gc.ca/agmaf/index_eng.html#context=aei-iae_fr.xml&extent=-2844971.487858,-396180.6385393,3372733.487858,3565952.6385393&layers=place37M,place25M,place15M,place5M,place1M,place500K,place250-K;rivers25M,rivers15M,rivers5M,rivers1M,rivers500K,lakes37M,lakes 25M,lakes15M,lakes 5M,lakes1M,lakes500K,Roads25M,Roads15M,Roads5M,Roads1M,Roads500K,ferry500K,bndy5-37M,bndy1M,BndyLn1-5M;slc30AgExtents;>.

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). Rapport ministériel sur le rendement 2012-2013, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2014, <http://www.agr.gc.ca/fra/rapport-ministeriel-sur-le-rendement-2012-2013/?id=1380233567058>.

ACIA (Agence canadienne d'inspection des aliments). *Fiche de renseignements – Fièvre catarrhale du mouton*, Agence canadienne d'inspection des aliments, 2011, <http://www.inspection.gc.ca/animaux/animaux-terrestres/maladies/declaration-obligatoire/fievre-catarrhale-du-mouton/fiche-de-renseignements/fra/1306116803992/1306121522520>.

Ainsworth, C.H., J.F. Samhouri, D.S. Busch, W.W.L. Cheung, J. Dunne et T.A. Okey. « Potential impacts of climate change on Northeast Pacific marine foodwebs and fisheries », *ICES Journal of Marine Science*, vol. 68, nº 6, 2011, pp. 1217-1229.

Allison, E.H., A.L. Perry, M.-C. Badjeck, W.N Adger, K. Brown, D. Conway, A.S. Halls, G.M. Pilling, J.D. Reynolds, N.L. Andrew et N.K. Dulvy. « Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries », *Fish and Fisheries*, vol. 10, nº 2, 2009, pp.173-196.

Almaraz, J.J., F. Mabood, X. Zhou, E.G. Gregorich et D.L. Smith. « Climate change, weather variability and corn yield at a higher latitude locale: southwestern Quebec », *Climatic Change*, vol. 88, 2008, pp. 187-197.

Almaraz, J.J., F. Mabood, X. Zhou, I. Strachan, B. Me et D.L. Smith. « Performance of agricultural systems under contrasting growing season conditions in south-western Quebec », *Journal of Agronomy and Crop Science*, vol. 195, 2009, pp. 319-327.

A Northern Vision (2011): Pan-Territorial adaptation strategy: moving forward on climate change adaptation in Canada's North, <www.anorthernvision.ca/strategy>.

ARC (Agence du revenu du Canada). *Agence du revenu du Canada, guide T4003, Revenus d'agriculture*, Agence du revenu du Canada, 2011, <http://www.cra-arc.gc.ca/tx/bsnss/sgmnts/frmng/menu-fra.html>.

Arnason, R. « Climate change and fisheries: assessing the economic impact in Iceland and Greenland », *Natural Resource Modeling*, vol. 20, nº 2, 2007, pp. 163-197.

Aurambout, J.P., F. Constable, K. Finlay, J. Luck et V. Sposito. *The impacts of climate change on plant biosecurity*, Victorian Government Department of Primary Industries, Landscape Systems Science and Primary Industries Research, Victoria, 2006, 42 p.

Aurambout, J.P., K. Finlay, J. Luck et G. Beattie. « A concept model to estimate the potential of the Asiatic citrus psyllid (*Diaphorina citri Kuwayama*) in Australia under climate change – a means for assessing biosecurity risk », *Ecological Modelling*, vol. 220, 2009, pp. 2512-2524.

Axelson, J.N., D.J. Sauchyn et J. Barichivich. « New reconstructions of streamflow variability in the South Saskatchewan River Basin from a network of tree ring chronologies, Alberta, Canada », *Water Resources Research*, vol. 45, WO9422, 2009, 10 p.

Baker, R., C. Sansford, C. Jarvis, R. Cannon, A. MacLeod et K. Walters. « The role of climatic mapping in predicting the potential geographical distribution of non-indigenous pests under current and future climates », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 82, 2000, pp. 57-71.

Barange, M. et R.I. Perry. « Physical and ecological impacts of climate change relevant to marine and inland capture fisheries and aquaculture », dans *Climate change implications for fisheries and aquaculture: overview of current scientific knowledge*, K. Cochrane, C. De Young, D. Soto et T. Bahri (éd.), FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, nº 530, Rome, FAO, 2009, 212 p.

Batie, S.S. « Wicked problems and applied economics », *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 90, nº 5, 2008, pp. 1176-1191.

Bavington, D. *Managed annihilation: an unnatural history of the Newfoundland cod collapse*, UBC Press, Vancouver, 2010.

Beamish, R.J. et D.R. Bouillon. « Pacific salmon production trends in relation to climate », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 50, nº 5, 1993, pp. 1002-1016.

Beamish, R.J., D.J. Noakes, G.A. McFarlane, L. Klyashtorin, V.V. Ivanov et V. Kurashov. « The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 56, nº 3, 1999, pp. 516-526.

Beaugrand, G., M. Edwards, K. Brander, C. Luczak et F. Ibanez. « Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic », *Ecology Letters*, vol. 11, 2008, pp. 1157-1168.

Beaugrand, G., P.C. Reid, F. Ibanez, J.A. Lindley et M. Edwards. « Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate », *Science*, vol. 296, nº 5573, 2002, pp. 1692-1694.

Behrenfeld, M.J., R.T. O'Malley, D.A. Siegel, C.R. McClain, J.L. Sarmiento, G.C. Feldman, A.J. Milligan, P.G. Falkowski, R.M. Letelier et E.S. Boss. « Climate-driven trends in contemporary ocean productivity », Nature, vol. 444, nº 7120, 2006, pp. 752-755.

Berkes, F. « Subsistence fishing in Canada: a note on terminology », *ARCTIC*, vol. 41, 1988, pp. 319-320.

Bertrand, A., J. Bourassa, G. Bélanger, D. Mongrain, G. Tremblay et Y. Castonguay. « Les hausses de températures et du CO_2 affecteront-ils la productivité des plantes fourragères? », dans *Demi-journée d'Information Scientifique sur les Fourrages*, Victoriaville (Québec), 2012, <www.agrireseau.qc.ca/Plantes-Fourrageres/documents/Demi%20journee%202012%20compte-rendu.pdf>.

Blanchard, J.L., S. Jennings, R. Holmes, J. Harle, G. Merino, J.I. Allen, J. Holt, N.K. Dulvy et M. Barange. « Potential consequences of climate change for primary production and fish production in large marine ecosystems », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 367, nº 1605, 2012, pp. 2979-2989.

Bourque, A. et G. Simonet. « Québec », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 171-226.

Brander, K.M. « Global fish production and climate change », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 104, nº 50, 2007, pp. 19709-19714.

Brown, D. *Salmon wars: the battle for the west coast salmon fishery*, Harbour Publishing, Madeira Park (Colombie-Britannique), 2005, 408 p.

Bruneau, J., R. Darrell, E.P. Corkal, B. Toth et G. Van der Kamp. « Human activities and water use in the South Saskatchewan River basin », *Prairie Forum*, vol. 34, nº 1, 2009, pp. 129-152.

Burrows, M.T., D.S. Schoeman, L.B. Buckley, P. Moore, E.S. Poloczanska, K.M. Brander, C. Brown, J.F. Bruno, C.M. Duarte, B.S. Halpern, J. Holding, C.V. Kappel, W. Kiessling, M.I. O'Connor, J.M. Pandolfi, C. Parmesan, F.B. Schwing, W.J. Sydeman et A.J. Richardson. « The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems », *Science*, vol. 334, nº 6056, 2011, pp. 652-655.

Carmack, E., F. McLaughlin, G. Whiteman et T. Homer-Dixon. « Detecting and coping with disruptive shocks in Arctic marine systems: a resilience approach to place and people », *Ambio*, vol. 41, nº 1, 2012, pp. 56-65.

CCRHP (Conseil pour la conservation des ressources halieutiques du Pacifique). *Advisory: wild salmon and aquaculture in British Columbia*, Conseil pour la conservation des ressources halieutiques du Pacifique, Vancouver (Colombie-Britannique), 2003.

Chabot, D. « Chronic non-lethal levels of hypoxia limit distribution and growth of Atlantic cod (Gadus morhua) in the northern Gulf of St. Lawrence, Canada », dans *Proceedings of the 7th International Symposium on Fish Physiology, Toxicology and Water Quality*, G.L. Rupp et M.D. White (éd.), U.S. Environmental Protection Agency, Ecosystems Research Division, Athens, Géorgie, États-Unis, 600/R-04/049, 2004, pp. 183-205.

Chakraborty, S. « Potential impact of climate change on plant-pathogen interactions », *Australasian Plant Pathology*, vol. 34, 2005, pp. 443-448.

Chakraborty, S. et S. Datta. « How will plant pathogens adapt to host plant resistance at elevated CO_2 under a changing climate? », *New Pathologist*, vol. 159, 2003, pp. 733-742.

Chavez, F.P., J. Ryan, S.E. Lluch-Cota et M. Niquen. « From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean », *Science*, vol. 299, nº 5604, 2003, pp. 217-221.

Cheung, W.W.L., V.W.Y. Lam, J.L. Sarmiento, K. Kearney, R. Watson et D. Pauly. « Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios », *Fish and Fisheries*, vol. 10, nº 3, 2009, pp. 235-251.

Cheung, W.W.L., V.W.Y. Lam, J.L. Sarmiento, K. Kearney, R. Watson, D. Zeller et D. Pauly. « Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change », *Global Change Biology*, vol. 16, nº 1, 2010, pp. 24-35.

Chiotti, Q. et B. Lavender. « Ontario », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 227-274.

Chu, C., N.E. Jones, N.E. Mandrak, A.R. Piggott et C.K. Minns. « The influence of air temperature, groundwater discharge, and climate change on the thermal diversity of stream fishes in southern Ontario watersheds », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 65, nº 2, 2008, pp. 297-308.

Clark, J. *The ordinary people of Essex: environment, culture, and economy on the frontier of Upper Canada*, McGill-Queen's University Press, 2010, 738 p.

Climate Change Connection. *A guide to creating climate-friendly farms in Manitoba – livestock edition*, Climate Change Connection, Winnipeg (Manitoba), 2009, 20 p.

Coll, M. et L. Hughes. « Effects of elevated CO_2 on an insect omnivore: a test for nutritional effects mediated by host plants and prey », Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 123, 2008, pp. 271-279.

Colombie-Britannique. *BC agriculture climate change adaptation risk and opportunity assessment provincial report*, 2012, <www.bcagclimateaction.ca/document-library/>.

Comité de suivi et de concertation de la stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture. *Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021*, 2011, 23 p. <www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Strategie_phytosanitaire.pdf>.

Cooke, S.J., S.G. Hinch, A.P. Farrell, M.F. Lapointe, S.R.M. Jones, J.S. Macdonald, D.A. Patterson, M.C. Healey et G. Van Der Kraak. « Abnormal migration timing and high en route mortality of sockeye salmon in the Fraser River, British Columbia », *Fisheries*, vol. 29, nº 2, 2004, pp. 22-33.

Corkal, D. et P.E. Adkins. « Canadian agriculture and water », dans *Proceedings of the 13th IWRA World Water Congress*, Montpellier, France, 2008.

Corkal, D., H. Diaz et D. Sauchyn. « Changing roles in Canadian water management: a case study of agriculture and water in Canada's South Saskatchewan River Basin », *International Journal of Water Resources Development*, vol. 27, nº 4, 2011, pp. 647-664.

Crawford, E. et E. McNair. BC *Agriculture Climate Change Adaptation Risk + Opportunity Assessment – Provincial Report*, British Columbia Agriculture and Food Climate Action Initiative, 2012, pp. 26-28, <www.BCAgClimateAction.ca>.

Crain, C.M., K. Kroeker et B.S. Halpern. « Interactive and cumulative effects of multiple human stressors in marine systems », *Ecology Letters*, vol. 11, 2008, pp. 1304-1315.

Crossin, G.T., S.G. Hinch, S.J. Cooke, D.W. Welch, D.A. Patterson, S.R.M. Jones, A.G. Lotto, R.A. Leggatt, M.T. Mathes, J.M. Shrimpton, G. Van Der Kraak et A.P. Farrell. « Exposure to high temperature influences the behaviour, physiology, and survival of sockeye salmon during spawning migration », *Revue canadienne de zoologie*, vol. 86, 2008, pp. 127-140.

Cutforth, H.W., S.M. McGinn, K.E. McPhee et P.R. Miller. « Adaptation of pulse crops to the changing climate of the Northern Great Plains », *Agronomy Journal*, vol. 99, 2007, pp. 1684-1699.

Deser, C., J.E. Walsh et M.S. Timlin. « Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends », *Journal of Climate*, vol. 13, 2000, pp. 617-633.

Diaz, H. et A. Rojas. *Methodological framework for the assessment of governance institutions*, IACC project, 2006, <www.parc.ca/mcri/iacc033.php>.

Diaz, H. et IACC Canadian research team. *Institutional adaptations to climate change (IACC), integration report: the case of the South Saskatchewan River Basin*, IACC project, Canadian Plains Research Center, University of Regina, 2009, 36 p., <www.parc.ca/mcri/int01.php>.

Drinkwater, K. « Comparison of the response of Atlantic cod (Gadus morhua) in the high-latitude regions of the North Atlantic during the warm periods of the 1920s-1960s and the 1990s-2000s », *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, vol. 56, nº 21-22, 2009, pp. 2087-2096.

Duchesne L., D. Houle, M.A. Côté et T. Logan. « Modelling the effect of climate on maple syrup production in Québec Canada », *Forest Ecology and Management*, vol. 258, 2009, pp. 2683-2689.

Encyclopedia of Saskatchewan. *Canadian Plains Research Center*, Regina, 2007, <http://esask.uregina.ca/entry/palliser_triangle.html>.

Environnement Canada. *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada*, Environnement Canada, Burlington, 2004, 148 p.

Environnement Canada et EPA (United States Environmental Protection Agency). *État des Grands Lacs 2009*, United States Environmental Protection Agency, 905-R-09-031, En161-3/1-2009F, 2009, <http://binational.net/solec/sogl2009/SOGL_2009_fr.pdf>.

FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). *Seed security for food security in the light of climate change and soaring food prices: challenges and opportunities*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Committee on Agriculture Twenty-first Session, avril 2009, Rome, 2009, pp. 22-25.

Finney, B.P., I. Gregory-Eaves, M.S.V. Douglas et J.P. Smol. « Fisheries productivity in the northeastern Pacific Ocean over the past 2,200 years », *Nature*, vol. 416, nº 6882, 2002, pp. 729-733.

Ford, J.D. « Dangerous climate change and the importance of adaptation for the Arctic's Inuit population », *Environmental Research Letters*, vol. 4, 2009.

Frank, K.T., B. Petrie, J.S. Choi et W.C. Leggett. « Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem », *Science*, vol. 308, nº 5728, 2005, pp. 1621-1623.

Frank, K.T., B. Petrie, N.L. Shackell et J.S. Choi. « Reconciling differences in trophic control in mid-latitude marine ecosystems », *Ecology Letters*, vol. 9, nº 10, 2006, pp. 1096-1105.

Frechet, A. « Catchability variations of cod in the marginal ice zone », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 47, 1990, pp. 1678-1683.

Fuhrer, J. « Agroecosystem response to combinations of elevated CO_2, ozone, and global climate change », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 97, 2003, pp. 1-20.

Furgal, C. et T.D. Prowse. « Nord du Canada », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 57-118.

Gagnon, A.E., M. Roy et A. Roy. *Document synthèse : impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures*, 2011, 80 p.

Gagnon, A.E., G. Arsenault-Labrecque, G. Bourgeois, L. Bourdages, P. Grenier et M. Roy. *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*, 2013, 156 p.

Galbraith, P.S. « Winter water masses in the Gulf of St. Lawrence », *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, C06022, 2006.

Galbraith P.S., J. Chassé, D. Gilbert, P. Larouche, D. Brickman, B. Pettigrew, L. Devine, A. Gosselin, R.G. Pettipas et C. Lafleur. *Conditions océanographiques physiques dans le golfe du Saint-Laurent en 2011*, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2012/023, 2012, 85 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Quatrième rapport d'évaluation : Changement climatique, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007.

Gilbert D., B. Sundby, C. Gobeil, A. Mucci et G. Tremblay. « A seventy-two year record of diminishing deep-water oxygen in the St. Lawrence estuary: the northwest Atlantic connection », *Limnology and Oceanography*, vol. 50, 2005, pp. 1654-1666.

Glavin, T. *Dead reckoning: confronting the crisis in Pacific fisheries*, Douglas and McIntyre, Vancouver (Colombie-Britannique), 1996, 181 p.

Godfray, H.C.J., I.R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J.F. Muir, N. Nisbett, D. Lawrence, J. Pretty, S. Robinson, C. Toulmin et R. Whiteley. « The future of the global food system », *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, vol. 365, nº 1554, 2010, pp. 2769-2777.

Government of Nunavut et Nunavut Tunngavik Incorporated. Nunavut Fisheries Strategy, 2005, 50 p.

Gray, J.H. *Men against the desert*, Fifth House Ltd, Calgary, 1996, 263 p.

Grebmeier, J.M., J.E. Overland, S.E. Moore, E.V. Farley, E.C. Carmack, L.W. Cooper, K.E. Frey, J.H. Helle, F.A. McLaughlin et S.L. McNutt. « A major ecosystem shift in the northern Bering Sea », *Science*, vol. 311, nº 5766, 2006, pp. 1461-1464.

Groupe de travail sur les interprétations agronomiques. *Système de classification des terres selon leurs aptitudes pour les cultures, 1. La production des céréales de printemps*, W.W. Pettapiece (éd.), Bulletin technique 1995-6F, Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, 2 cartes, 1995, 109 p.

G.S. Gislason and Associates Ltd. et Outcrop Ltd. *The marine-related economy of NWT and Nunavut*, rapport rédigé pour Pêches et Océans Canada, Winnipeg, janvier 2002, 2002.

Halpern, B.S., S. Walbridge, K.A. Selkoe, C.V. Kappel, F. Micheli, C. D'Agrosa, J.F. Bruno, K.S. Casey, C. Ebert, H.E. Fox, R. Fujita, D. Heinemann, H.S. Lenihan, E.M. Madin, M.T. Perry, E.R. Selig, M. Spalding, R. Steneck et R. Watson. « A global map of human impact on marine ecosystems », *Science*, vol. 319, 2008, pp. 948-952.

Hansen, J.C., B. Deutch et J.Ø. Odland. « Dietary transition and contaminants in the Arctic: emphasis on Greenland », *Circumpolar Health Supplements*, supplément nº 2, 2008.

Harris, D.C. *Fish, law and colonialism: the legal capture of salmon in British Columbia*, University of Toronto Press, Toronto (Ontario), 2001, 306 p.

Harris, D.C. *Landing native fisheries: Indian reserves and fishing rights in British Columbia*, 1849-1925, University of British Columbia Press, Vancouver (Colombie-Britannique), 2008, 266 p.

Hellmann J.J., J.E. Byers, B.G. Bierwagen et J.S. Dukes. « Five potential consequences of climate change for invasive species », *Conservation Biology*, vol. 22, 2008, pp. 534-543.

Hewitt, J., K. Chen, T. Brierley et H. Hill. *Assessment of climate change impacts on climate and land suitability ratings for spring seeded small grains on the Canadian Prairies*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Administration du rétablissement agricole des Prairies, Regina (Saskatchewan), 2008.

Hinch, S.G. et E.G. Martins. *Examen des effets potentiels des changements climatiques sur la survie des saumons rouges du fleuve Fraser et analyse des tendances interannuelles de la mortalité en cours de migration et avant la fraye*, Commission d'enquête Cohen sur les déclins des populations de saumon rouge du fleuve Fraser, rapport technique 9, 2011, <http://www.cohencommission.ca/fr/pdf/TR/Project9-Report.pdf>.

Hoekman, D. « Turning up the heat: temperature influences the relative importance of top-down and bottom-up effects », *Ecology*, vol. 91, nº 10, 2010, pp. 2819-2825.

Hunt, L.M. et J. Moore. *The potential impacts of climate change on recreational fishing in Northern Ontario*, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Climate Change Research Report CCRR-04, 2006.

Hurlbert, M., D.R. Corkal et H. Diaz. « Government and civil society: adaptive water management in the South Saskatchewan River Basin », *Prairie Forum*, vol. 34, nº 1, 2009a, pp. 181-210.

Hurlbert, M., D.R. Corkal, H. Diaz et J. Warren. « Climate change and water governance in Saskatchewan, Canada », *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, vol. 1, nº 2, 2009b, pp. 118-132.

Hutchings, J.A. et R.A. Myers. « What can be learned from the collapse of a renewable resource? Atlantic cod, *Gadus Morhua*, of Newfoundland and Labrador », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 51, 1994, pp. 2126-2146.

Hyatt, K.D., K.L. Hunter et D.P. Rankin. *Indice des stocks du saumon rouge – aperçu régional des tendances et retours pour 2006, État de l'océan Pacifique 2006*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Avis scientifique 2007/019, 2008.

IIABC (Irrigation Industry Association of BC). *Irrigation Industry Association of British Columbia, landscape irrigation scheduling calculators*, Irrigation Industry Association of BC, 2009, <http://landscape-calculator.irrigationbc.com>.

Irvine, J.R. et M.A. Fukuwaka. « Pacific salmon abundance trends and climate change », ICES *Journal of Marine Science*, vol. 68, nº 6, 2011, pp. 1122-1130.

Justice Canada. *Loi sur le rétablissement agricole des Prairies*, L.R.C. (1985), ch. P-17, Justice Canada, 2012, <http://laws-lois.justice.gc.ca>.

Kerr, L.A., W.J. Connelly, E.J. Martino, A.C. Peer, R.J. Woodland et D.H. Secor. « Climate change in the U.S. Atlantic affecting recreational fisheries », *Reviews in Fisheries Science*, vol. 17, nº 2, 2009, pp. 267-289.

Kerr, S.J. *Fish and fisheries management in Ontario: a chronology of events*, Direction de la biodiversité, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Peterborough (Ontario), 2010, 80 p. + annexes.

Khan, A.S. *Is rebuilding collapsed fisheries a wicked problem? Lessons from a fish chain analysis of Northern Gulf cod fisheries*, thèse de doctorat, Memorial University of Newfoundland, St John's (Terre-Neuve-et-Labrador), 2011.

Kuhnlein, H. et O. Receveur. « Local cultural animal food contributes high levels of nutrients for Arctic Canadian indigenous adults and children », *Journal of Nutrition*, vol. 137, 2007, pp. 1110-1114.

Kulshreshtha, S.N. « Climate change, prairie agriculture, and prairie economy: the new normal », *Revue canadienne d'agroéconomie*, vol. 59, 2011, pp. 19-44.

Kulshreshtha, S.N., E. Wheaton et A. Amiraslany. *A literature survey of the potential socio-economic impacts of climate change on Canadian crop production*, rapport rédigé pour Agriculture et Agroalimentaire Canada, Department of Bioresource Policy, Business and Economics, University of Saskatchewan, Saskatoon (Saskatchewan), mars 2010, 2010.

Kutcher, H.R., J.S. Warland et S.A. Brandt. « Temperature and precipitation effects on canola yields in Saskatchewan, Canada », *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 150, 2010, pp. 161-165.

Lamhonwah, D., B. Murphy et L. Brown. *A GIS-based approach to projecting responses of sugar maples to climate change in Ontario, Canada: final results*, conférence annuelle de l'Association canadienne des géographes, University of Calgary, Alberta, 2 juin, 2011.

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

Linnansaari, T. et R.A. Cunjak. « Patterns in apparent survival of Atlantic salmon (Salmo salar) parr in relation to variable ice conditions throughout winter », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 67, nº 11, 2010, pp. 1744-1754.

Loder, J.W., B. Petrie et G. Gawarkiewicz. « The coastal ocean off northeastern North America: a large-scale view », chapitre 5 dans *The Global Coastal Ocean: Regional Studies and Synthesis, The Sea*, vol. 11, A.R. Robinson et K.H. Brink (éd.), John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 105-133.

Lowitt, K. *Examining the foundation for stronger fisheries-tourism synergies and increased local seafood consumption in the Bonne Bay region of Newfoundland*, Community-University Research for Recovery Alliance, Memorial University et Rural Secretariat, St John's (Terre-Neuve-et-Labrador), 2011.

Luck, J., I.D. Campbell, R. Magarey, S. Isard, J.-P. Aurambout et K. Finlay. « Chapter 21: climate change and plant biosecurity: implications for policy. P. 655-691 », dans *The Handbook of Plant Biosecurity*, G. Gordh et S. McKirdy (éd.), Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2014.

Lysyk, T.J. et T. Danyk. « Effect of temperature on life history parameters of adult Culicoides sonorensis (Diptera: Ceratopogonidae) in relation to geographic origin and vectorial capacity for bluetongue virus », *Journal of Medical Entomology*, vol. 44, nº 5, 2007, pp. 741-751.

MacNeil, M.A., N.A.J. Graham, J.E. Cinner, N.K. Dulvy, P.A. Loring, S. Jennings, N.V.C. Polunin, A.T. Fisk et T.R. McClanahan. « Transitional states in marine fisheries: adapting to predicted global change », *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, vol. 365, nº 1558, 2010, pp. 3753-3763.

MacRae, R. « A joined up food policy for Canada », *Journal of Hunger and Environmental Nutrition*, vol. 6, 2011, pp. 424-457.

Mandrak, N.E. et B. Cudmore. « The fall of native fishes and the rise of non-native fishes in the Great Lakes Basin », *Aquatic Ecosystem Health & Management*, vol. 13, nº 3, 2010, pp. 255-268.

Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace et R.C. Francis. « A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, nº 6, 1997, pp. 1069-1079.

Marchildon, G.P. « The Prairie Farm Rehabilitation Administration: climate crisis and federal-provincial relations during the Great Depression », *The Canadian Historical Review*, vol. 90, nº 2, 2009a, pp. 275-301.

Marchildon, G.P. (éd.) *A dry oasis, institutional adaptation to climate on the Canadian Plains*, CPRC Press, Regina, 2009b, 319 p.

Marchildon, G.P., S. Kulshreshtha, E. Wheaton et D. Sauchyn. « Drought and institutional adaptation in the Great Plains of Alberta and Saskatchewan, 1914-1939 », *Natural Hazards*, vol. 45, 2008, pp. 391-411.

Martins, E.G., S.G. Hinch, D.A. Patterson, M.J. Hague, S.J. Cooke, K.M. Miller, M.F. Lapointe, K.K. English et A.P. Farrell. « Effects of river temperature and climate warming on stock-specific survival of adult migrating Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) », *Global Change Biology*, vol. 17, 2011, pp. 99-114.

McCartney, D., J. Fraser et A. Ohama. « Annual cool season crops for grazing by beef cattle. A Canadian review », *Revue canadienne de science animale*, vol. 88, 2008, pp. 517-533.

McCartney, D., J. Fraser et A. Ohama. « Potential of warm-season annual forages and Brassica crops for grazing: a Canadian review », *Revue canadienne de science animale*, vol. 89, 2009, pp. 431-440.

McDaniels, T., S. Wilmot, M. Healey et S. Hinch. « Vulnerability of Fraser River sockeye salmon to climate change: a life-cycle perspective using expert judgments », *Journal of Environmental Management*, vol. 91, 2010, pp. 2771-2780.

McKinnell, S.M., E. Curchitser, C. Groot, M. Kaeriyama et K.W. Myers. The decline of Fraser River sockeye salmon *Oncorhynchus nerka* (Steller, 1743) in relation to marine ecology, PICES Advisory Report, Commission Cohen, Rapport technique, vol. 4, 2011, 195 p., Vancouver (Colombie-Britannique).

Meakin, S. et T. Kurvits. *Assessing the impacts of climate change on food security in the Canadian Arctic*, rapport rédigé pour Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 2009, <www.grida.no/files/publications/foodsec_updt_LA_lo.pdf>.

Meggs, G. Salmon: *the decline of the British Columbia fishery*, Douglas and McIntyre, Vancouver (Colombie-Britannique), 1991, 265 p.

Meltofte, H. (éd.), Conservation de la flore et de la faune arctiques, Akureyri, 2013.

MEO (ministère de l'Environnement). *Faire face au changement climatique : Stratégie d'adaptation et plan d'action de l'Ontario 2011-2014*, ministère de l'Environnement, 2011, <http://www.ene.gov.on.ca/environment/fr/resources/STDPROD_081667.html>.

Merino, G., M. Barange, J.L. Blanchard, J. Harle, R. Holmes, I. Allen, E.H. Allison, M.C. Badjeck, N.K. Dulvy, J. Holt, S. Jennings, C. Mullon et L.D. Rodwell. « Can marine fisheries and aquaculture meet fish demand from a growing human population in a changing climate? », *Global Environmental Change*, vol. 22, 2012, pp. 795-806.

Merino, G., M. Barange, C. Mullon et L. Rodwell. « Impacts of global environmental change and aquaculture expansion on marine ecosystems », *Global Environmental Change – Human and Policy Dimensions*, vol. 20, nº 4, 2010, pp. 586-596.

Ministère des Pêches et de l'Aquaculture. *Seafood industry year in review 2010*, ministère des Pêches et de l'Aquaculture de Terre-Neuve-et-Labrador, 2011, <www.fishaq.gov.nl.ca/publications/yir_2010.pdf>.

Minns, C.K. « The potential future impact of climate warming and other human activities on the productive capacity of Canada's lake fisheries: a meta-model », *Aquatic Ecosystems Health and Management*, vol. 12, 2009, pp. 152-167.

Moore, S.K., V.L. Trainer, N.J. Mantua, M.S. Parker, E.A. Laws, L.C. Backer et L.E. Fleming. « Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health », *Environmental Health*, vol. 7, supplément nº 2, S4, 2008.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Concrétiser la vision : rapport du Commissaire au développement de l'aquaculture*, Pêches et Océans Canada, Ottawa (Ontario), 2003.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Enquête de 2007 sur la pêche récréative de la morue à Terre-Neuve-et-Labrador*, Pêches et Océans Canada, 2007, <http://www.dfo-mpo.gc.ca/stats/rec/can/NLCod2007/toc-fra.htm>.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Évaluation du crabe des neiges de Terre-Neuve et du Labrador*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Avis scientifique 2008/009, 2008.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Évaluation du stock de morue du nord du golfe du Saint-Laurent (3Pn, 4RS) en 2009*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Avis scientifique 2010/011, 2010.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Statistiques des pêches canadiennes 2008*, Pêches et Océans Canada, 2011.

MPO (Pêches et Océans Canada). *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 de l'Atlantique*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Réponse des Sciences 2012/044, 2012a.

MPO (Pêches et Océans Canada). *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 de l'Arctique*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Réponse des Sciences 2012/042, 2012b.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Enquête sur la pêche récréative au Canada 2010*, Pêches et Océans Canada, no Fs42-1/2010F, 2012c.

MPO (Pêches et Océans Canada). 2013a, <http://www.dfo-mpo.gc.ca/stats/trade-commerce/can/export/xprv12-fra.htm>.

MPO (Pêches et Océans Canada). 2013b, <http://www.dfo-mpo.gc.ca/stats/aqua/aqua11-fra.htm>.

MPO (Pêches et Océans Canada). *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*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Réponse des Sciences 2013/011, 2013c.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Évaluation fondée sur les risques des impacts et des menaces que les changements climatiques présentent pour les infrastructures et les systèmes biologiques qui relèvent du mandat de Pêches et Océans Canada – Grand Bassin Aquatique du Pacifique*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Réponse des Sciences 2013/016, 2013d.

MRNO (ministère des Richesses naturelles de l'Ontario). *Ressources halieutiques des Grands Lacs*, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2013a, <http://www.mnr.gov.on.ca/fr/Business/GreatLakes/2ColumnSubPage/STEL02_176592.html>.

MRNO (ministère des Richesses naturelles de l'Ontario). *Pourquoi nous avons besoin de nos Grands Lacs*, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2013b, <http://www.ene.gov.on.ca/environment/fr/subject/great_lakes/STDPROD_096916.html>.

Murray, G., D. Bavington et B. Neis. « Local ecological knowledge, science, participation and fisheries governance in Newfoundland and Labrador: a complex, contested and changing relationship », dans *Participation in Fisheries Governance*, T.S. Gray (éd.), *Methods and Technologies in Fish Biology and Fisheries*, vol. 4, 2005, pp. 269-290.

Nelson, R., M. Howden et M. Stafford Smith. « Using adaptive governance to rethink the way science supports Australian drought policy », *Environmental Science and Policy*, vol. 11, 2008, pp. 588-601.

Nielsen, J.L., G.T. Ruggerone et C.E. Zimmerman. « Adaptive strategies and life history characteristics in a warming climate: Salmon in the Arctic? », *Environmental Biology of Fishes*, sous presse.

Niemi, A., J. Paulic et D. Cobb. *Rapport de l'état des écosystèmes et des tendances : écozones marines de l'Arctique*, Secrétariat canadien de consultation scientifique du MPO, Document de recherche 2010/066, 2010, viii + 66 p.

OCDE-FAO (Organisation de coopération et de développement économiques-Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). *Perspectives agricoles 2011*, Secrétariats de l'OCDE et de la FAO, 2011, <http://dx.doi.org/10.1787/888932438000>.

Ogden, A. et P. Johnson. Adaptation aux incidences du changement climatique dans le Nord canadien, Northern Climate Exchange Occasional Paper Series 3, séance d'information préparée à l'intention du Comité sénatorial permanent de l'agriculture et des forêts, 2002.

Oltenacu, P.A. et D.M. Broom. « The impact of genetic selection for increased milk yield on the welfare of dairy cows », *Animal Welfare*, vol. 19, 2010, pp. 39-49.

OMC (Organisation mondiale du commerce). *Statistiques du commerce international 2000*, Organisation mondiale du commerce, 2000, <http://www.wto.org/french/res_f/statis_f/tradebysector_f.htm>.

Ommer, E.R. et The Coasts under Stress Research Project Team. *Coasts under stress: restructuring and social-ecological health*, McGill-Queens University Press, Kingston, 2007.

Ouranos. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, C. DesJarlais, M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve (éd.), Montréal, 2010, 128 p.

Overland, J.E., J. Alheit, A. Bakun, J.W. Hurrell, D.L. Mackas et A.J. Miller. « Climate controls on marine ecosystems and fish populations », *Journal of Marine Systems*, vol. 79, nº 3-4, 2010, pp. 305-315.

Pace, M.L., J.J. Cole, S.R. Carpenter et J.F. Kitchell. « Trophic cascades revealed in diverse ecosystems », *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 14, nº 12, 1999, pp. 483-488.

Perez-Valdivia, C., D. Sauchyn et J. Vanstone. « Groundwater levels and teleconnection patterns in the Canadian Prairies », *Water Resources Research*, vol. 48, W07516, 2012.

Perry, A.L., P.J. Low, J.R. Ellis et J.D. Reynolds. « Climate change and distribution shifts in marine fishes », *Science*, vol. 308, nº 5730, 2005, pp. 1912-1915.

Perry, R.I., M. Barange et R.E. Ommer. « Global changes in marine systems: a social-ecological approach », *Progress in Oceanography*, vol. 87, nº 1-4, 2010, pp. 331-337.

Perry, R.I., A. Bundy et E.E. Hofmann. « From biogeochemical processes to sustainable human livelihoods: the challenges of understanding and managing changing marine social-ecological systems », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 4, nº 3, 2012, pp. 253-257.

Peterman, R.M. et B. Dorner. *Fraser River sockeye production dynamics*, Commission Cohen, Rapport technique, vol. 10, 134 p., Vancouver (Colombie-Britannique), 2011.

Peterman, R.M. et B. Dorner. « A widespread decrease in productivity of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) populations in western North America », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 69, 2012, pp. 1255-1260.

Picketts, I.M., A.T. Werner et T.Q. Murdock. *Climate change in Prince George: summary of past trends and future projections*, Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, Victoria (Colombie-Britannique), 2009, 48 p.

Pimentel, D., R. Zuniga et D. Morrison. « Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States », *Ecological Economics*, vol. 52, nº 3, 2005, pp. 273-288.

Pittman, J., V. Wittrock, S. Kulshreshtha et E. Wheaton. « Vulnerability to climate change in rural Saskatchewan: case study of the Rural Municipality of Rudy No. 284 », *Journal of Rural Studies*, vol. 27, 2011, pp. 83-94.

Planque, B., J.M. Fromentin, P. Cury, K.F. Drinkwater, S. Jennings, R.I. Perry et S. Kifani. « How does fishing alter marine populations and ecosystems sensitivity to climate? », *Journal of Marine Systems*, vol. 79, 2010, pp. 403-417.

Plante, S., D. Chabot et J.D. Dutil. « Hypoxia tolerance in Atlantic cod », *Journal of Fish Biology*, vol. 53, 1998, pp. 1342-1356.

Polovina, J.J., J.P. Dunne, P.A. Woodworth et E.A. Howell. « Projected expansion of the subtropical biome and contraction of the temperate and equatorial upwelling biomes in the North Pacific under global warming », *ICES Journal of Marine Science*, vol. 68, nº 6, 2011, pp. 986-995.

Polyakov, I.V., V.A. Alexeev, G.I. Belchansky, I.A. Dmitrenko, V.V. Ivanov, S.A. Kirillov, A.A. Korablev, M. Steele, L.A. Timokhov et I. Yashayaev. « Arctic Ocean freshwater changes over the past 100 years and their causes », *Journal of Climate*, vol. 21, 2008, pp. 364-384.

Powell, A.M. Jr. et J. Xu. « Abrupt climate regime shifts, their potential forcing and fisheries impacts », *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 1, 2011, pp. 33-47.

Proshutinsky, A., R. Krishfield, M.L. Timmermans, J. Toole, E. Carmack, F. McLaughlin, W.J. Williams, S. Zimmermann, M. Itoh et K. Shimada. « Beaufort Gyre freshwater reservoir: state and variability from observations », *Journal of Geophysical Research*, vol. 114, C00A10, 2009.

Prowse, T.D. et K. Brown. « Hydro-ecological effects of changing Arctic river and lake ice covers: a review », *Hydrology Research*, vol. 41, nº 6, 2010, pp. 454-461.

Pullar, D., N. Allen et M. Sloyan. « Challenges and opportunities for sustainable livestock production in the UK », *Nutrition Bulletin*, vol. 36, 2011, pp. 432-437.

Quinjon, P.A. et P. Snelgrove. « Differential regulatory roles of crustacean predators in a sub-arctic, soft sediment systems », *Marine Ecology Progress Series*, vol. 285, 2005, pp. 137-149.

Rahel, F.J. et J.D. Olden. « Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species », *Conservation Biology*, vol. 22, nº 3, 2008, pp. 521-533.

Reid, P.C. et L. Valdés. « ICES status report on climate change in the North Atlantic », CIEM, *Rapport des Recherches Collectives*, nº 310, 2011, 262 p.

Reist, J.D., F.J. Wrona, T.D. Prowse, M. Power, J.B. Dempson, R.J. Beamish, J.R. King, T.J. Carmichael et C.D. Sawatzky. « General effects of climate change on Arctic fishes and fish populations », *Ambio*, vol. 35, nº 7, 2006, pp. 370-380.

Reuten, C., A. Saprynka, J. Lundgren, T. Cavanaugh et J.W. Boulton. *Physical and socioeconomic impacts of global atmospheric processes to Canadian agriculture, Literature Survey*, RDWI #1201017, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale des sciences et de la technologie, Regina (Saskatchewan), mars, 2012.

Rice, J.C. et S.M. Garcia. « Fisheries, food security, climate change, and biodiversity: characteristics of the sector and perspectives on emerging issues », *Ices Journal of Marine Science*, vol. 68, nº 6, 2011, pp. 1343-1353.

Rice, J.C., P.A. Shelton, D. Rivard, G.A. Chouinard et A. Frechet. *Recovering Canadian Atlantic cod stocks: the shape of things to come?, The scope and effectiveness of stock recovery plans in fishery management*, CM 2003/U:06, CIEM, Copenhague, 2003.

RNCan (Ressources naturelles Canada). *Le saumon dans l'eau chaude*, Ressources naturelles Canada, 2009, <http://www.rncan.gc.ca/environnement/ressources/publications/impacts-adaptation/affiche/c-b/10526>.

Robards, M.D. et R.R. Reeves. « The global extent and character of marine mammal consumption by humans: 1970-2009 », *Biological Conservation*, vol. 144, 2011, pp. 2770-2786.

Robson, P.A. *Salmon farming: the whole story, Heritage House Publishing*, Surrey (Colombie-Britannique), 2006, 271 p.

Rogers, L.A. et D.E. Schindler. « Scale and the detection of climatic influences on the productivity of salmon populations », *Global Change Biology*, vol. 17, nº 8, 2011, pp. 2546-2558.

Saskatchewan Pulse Growers. Pulse Production Manual, 2e éd., 186 p., Saskatchewan Pulse Growers, Saskatoon, 2000.

Sauchyn, D. et S. Kulshreshtha. « Prairies », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 275-328.

Sauchyn, D., H. Diaz et S. Kulshreshtha (éd.) *The new normal: the Canadian Prairies in a changing climate*, CPRC Press, Regina, 2010, 380 p.

Sauchyn, D., J. Vanstone et C. Perez-Valdivia. « Modes and forcing of hydroclimatic variability in the upper north Saskatchewan River Basin since 1063 », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 36, nº 3, 2011, pp. 205-218.

Savenkoff, C., M. Castonguay, D. Chabot, M. Hammill, H. Bourdages et L. Morissette. « Changes in the Northern Gulf of St. Lawrence ecosystem estimated by inverse modelling: evidence of a fishery induced regime shift », *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 73, nº 3-4, 2007, pp. 711-724.

Schrank, W.E. « The Newfoundland fishery: ten years after the moratorium », *Marine Policy*, vol. 29, 2005, pp. 407-420.

Schut, P., S. Smith, W. Fraser, X. Geng et D. Kroetsch. « Soil landscapes of Canada: building a national framework for environmental information », *Geomatica*, vol. 65, nº 3, 2011, pp. 293-309.

Shackell, N.L., A. Bundy, J.A. Nye et J.S. Link. « Common large-scale responses to climate and fishing across Northwest Atlantic ecosystems », *ICES Journal of Marine Science*, vol. 69, 2012, pp. 151-162.

Shackell, N. et J. Loder (éd.) *State of the Scotian Shelf report*, 2012, <http://coinatlantic.ca/index.php/state-of-the-scotian-shelf>.

Shafer, S.R., C.L. Walthall, A.J. Franzluebbers, M. Scholten, J. Meijs, H. Clark, A. Reisinger, K. Yagi, A. Roel, B. Slattery, I.D. Campbell, B.G. McConkey, D.A. Angers, J.-F. Soussana et G. Richard. « Emergence of the global research alliance on agricultural greenhouse gases », *Carbon Management*, vol. 2, nº 3, 2011, pp. 209-214.

Sharma, S., D.A. Jackson et C.K. Minns. « Will northern fish populations be in hot water because of climate change? », *Global Change Biology*, vol. 13, 2007, pp. 2052-2064.

Sharma, S., D.A. Jackson et C.K. Minns. « Quantifying the potential effects of climate change and the invasion of smallmouth bass on native lake trout populations across Canadian lakes », *Ecography*, vol. 32, nº 3, 2009, pp. 517-525.

Sharma, S., P. Legendre, M. De Caceres et D. Boisclair. « The role of environmental and spatial processes in structuring native and non-native fish communities across thousands of lakes », *Ecography*, vol. 34, nº 5, 2011, pp. 762-771.

Skiner, C.B., A.T. DeGaetano et B.F. Chabot. « Implications of twenty-first century climate change on Northeastern United States maple syrup production: impacts and adaptations », *Climate Change*, vol. 100, 2010, pp. 685-702.

Smith, A.L., N. Hewitt, N. Klenk, D.R. Bazely, N. Yan, S. Wood, I. Henriques, J.I. MacLellan et C. Lipsig-Mumme. « Effects of climate change on the distribution of invasive alien species in Canada: a knowledge synthesis of range change projections in a warming world », *Dossiers environnement*, vol. 20, nº 1, 2012, pp. 1-16.

Sinclair, P. *From traps to draggers: domestic commodity production in Northwest Newfoundland*, 1850-1982, ISER Books, St John's (Terre-Neuve-et-Labrador), 1985.

Solberg, S., P. Canning et S. Buehler. « Changing patterns of household food consumption in rural communities of Atlantic Canada », dans *Resetting the kitchen table*, C. Parrish, N. Turner et S. Solberg (éd.), Nova Science Publishers, New York, New York, 2007, pp. 161-175.

Statistique Canada. *Dépenses alimentaires au Canada 2001*, Bulletin de service de Statistique Canada, no 62-554-XIF au catalogue, 2001.

Statistique Canada. Canada food stats, *Canadian food trends to 2020: a long range consumer outlook*, rapport rédigé pour Agriculture et Agroalimentaire Canada par Serecon Management Consulting Inc, 2005.

Statistique Canada. *L'activité humaine et l'environnement : statistiques annuelles*, Statistique Canada, nº 16-201-X au catalogue, 2009a.

Statistique Canada. *Statistiques sur les aliments 2009*, Bulletin de service de Statistique Canada, nº 21-020-X au catalogue, 2009b.

Statistique Canada. *Production et valeur du miel et des produits de l'érable 2011*, Bulletin de service de Statistique Canada, nº 23-221-X au catalogue, 2011.

Statistique Canada. *Un portrait de l'agriculture canadienne*, Statistique Canada, 2012, <http://www.statcan.gc.ca/pub/95-640-x/2012002/02-fra.htm>.

Stram, D.L. et D.C.K. Evans. « Fishery management responses to climate change in the North Pacific », *ICES Journal of Marine Science*, vol. 66, 2010, pp. 1633-1639.

Stratégie d'adaptation panterritoriale. *Stratégie d'adaptation panterritoriale : agir ensemble pour s'adapter au changement climatique dans le Nord canadien, Stratégie d'adaptation panterritoriale, 2011*, <http://www.anorthernvision.ca/fr/strategy/>.

Sumaila, U.R., W.W.L. Cheung, V.W.Y. Lam, D. Pauly et S. Herrick. « Climate change impacts on the biophysics and economics of world fisheries », *Nature Climate Change*, vol. 1, nº 9, 2011, pp. 449-456.

Syndicat national des cultivateurs. *The state of Canadian agriculture by the numbers*, Syndicat national des cultivateurs, avril 2011, 2011, <www.nfu.ca/policy/nfu-briefs-2011>.

Thompson, J. et I. Scoones. « Addressing the dynamics of agri-food systems: an emerging agenda for social science research », *Environmental Science & Policy*, vol. 12, nº 4, 2009, pp. 386-397.

Thomson, R.E. *Oceanography of the British Columbia coast*, Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, vol. 56, 1981, 291 p.

Toth, B., D.R. Corkal, D. Sauchyn, G. Van der Kamp et E. Pietroniro. « The natural characteristics of the South Saskatchewan River Basin: climate, geography and hydrology », *Prairie Forum*, vol. 34, nº 1, 2009, pp. 95-127.

USDA (U.S. Department of Agriculture). *Maple Syrup 2012*, United States Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, New England Field Office, 2012.

USGS (U.S. Geological Survey). *Sea lamprey fact sheet 2012*, Great Lakes Science Center, Invasive Species Program, 2012, <http://nas.er.usgs.gov/queries/factsheet.aspx?SpeciesID=836>.

Usher, P.J. *Standard edible weights of harvested species in the Inuvialuit settlement region*, Ottawa, 2000.

Vasseur, L. et N. Catto. « Canada atlantique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.L. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 119-170.

Walker, I. et R. Sydneysmith. « Colombie-Britannique », *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.L. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 329-386.

Wang, M.Y. et J.E. Overland. « A sea ice free summer Arctic within 30 years: an update from CMIP5 models », *Geophysical Research Letters*, vol. 39, 2012, 6 p.

Ware, D.M. et R.E. Thomson. « Bottom-up ecosystem trophic dynamics determine fish production in the northeast Pacific », *Science*, vol. 308, nº 5726, 2005, pp. 1280-1284.

Wheaton, E. et S. Kulshreshtha. *The new normal: the Canadian Prairies in a changing climate*, D. Sauchyn, H. Diaz et S. Kulshresththa (éd.), University of Regina, CPRC Press, pp. 124-125, 2009, 378 p.

Wheaton, E. et S. Kulshreshtha. « Agriculture », dans *The New Normal: the Canadian Prairies in a Changing Climate*, pp. 117-139, CPRC Press, Regina, 2010, 380 p.

Wheeler, P., V. Ford, K. Klokov et E. Syroechkovskiy. « Changes in harvest », dans *Arctic Biodiversity Trends 2010, Selected Indicators of Change*, 2010, pp. 92-95, Secrétariat international de la CFFA, Akureyri.

Woodall, C.M., C.M. Oswalt, J.A. Westfall, C.H. Perry, Nelson, M.D. et A.O. Finley. « An indicator of tree migration in forests of the eastern United States », *Forest Ecology and Management*, vol. 257, 2009, pp. 1434-1444.

Wright, M. *A fishery for modern times*, Oxford University Press, Don Mills (Ontario), 2001.

Yvelin, J.F., A. Fréchet et J.C. Brêthes. *Parcours migratoires et structure du stock de la morue du nord du golfe du Saint-Laurent* (3Pn, 4RS), Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2005/055, 2005, 50 p.

Ziervogel, G. et P.J. Ericksen. « Adapting to climate change to sustain food security », *WIREs Climate Change*, vol. 1, 2010, pp. 525-540.

Zeller, D.S., E. Booth, W. Pakhomov et D.P. Swartz. « Arctic fisheries catches in Russia, USA, and Canada: baselines for neglected ecosystems », *Polar Biology*, vol. 34, 2011, pp. 955-973.

Zwiers, F.W., M.A. Schnorbus et G.D. Maruszeczka. *Hydrologic impacts of climate change on BC water resources*, Summary Report for the Campbell, Columbia and Peace River Watersheds, Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, Victoria (Colombie-Britannique), 2011, 17 p.

CHAPITRE 5 : **INDUSTRIE**

Principaux auteurs :

Paul Kovacs et **Jason Thistlethwaite** *(Institut de prévention des sinistres catastrophiques)*

Collaborateurs :

Daniel Scott *(Université de Waterloo)*, **Bob Oliver** *(Pollution Probe)*

Citation recommandée :

Kovacs, P. et J. Thistlethwaite. « Industrie », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernment du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 135-158.

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions 137

1. Introduction 138

2. Contexte économique 138
   - 2.1 Assurance 138
   - 2.2 Tourisme 139
   - 2.3 Construction résidentielle 139
   - 2.4 Secteur manufacturier 139
   - 2.5 Commerce 140

3. Principals conclusions des évaluations précédentes 140

4. Risques, débouchés et adaptation 142
   - 4.1 Assurance 142
   - 4.2 Tourisme 146
   - 4.3 Construction résidentielle 149
   - 4.4 Secteur manufacturier 152
   - 4.5 Commerce 153

5. Conclusions et prochaines étapes 154

Références 155

PRINCIPALES CONCLUSIONS

Les publications qui traitent de l'incidence du climat sur l'industrie canadienne, ou évaluent la réaction du secteur en matière d'adaptation, sont relativement rares malgré l'importance des éventuelles répercussions économiques. La meilleure documentation au sujet des répercussions des changements climatiques et des mesures d'adaptation mises en œuvre provient des secteurs plus vulnérables au climat tels l'assurance des biens et le tourisme. S'ils parviennent à mettre en œuvre des mesures d'adaptation, ces secteurs pourront trouver des débouchés en diversifiant leur offre de produits et en élargissant les marchés visés. Pour le secteur de l'industrie dans son ensemble, les données existantes démontrent que :

- L'activité industrielle est tributaire des variations climatiques et des événements extrêmes; le type et l'ampleur des répercussions sur la production, les activités et le revenu variant considérablement, tant entre les différents secteurs qu'au sein d'une même industrie.
- Les pratiques de l'industrie ont jusqu'à présent surtout été modifiées à la suite d'un changement climatique ou d'événements extrêmes, plutôt qu'en prévision des futurs changements climatiques. Les exemples d'adaptation représentent l'exception, plutôt que la norme, dans le secteur.
- Les mesures d'adaptation mises en œuvre varient considérablement d'un secteur à l'autre et pourraient n'être qu'en partie déclarées pour des raisons stratégiques. Les secteurs du tourisme et de l'assurance pourraient trouver d'éventuels débouchés en appliquant des mesures d'adaptation.
- Il existe peu de publications sur les effets indirects qu'entraînent les changements climatiques sur l'industrie, notamment en ce qui concerne la demande exprimée par les consommateurs, la chaîne d'approvisionnement, l'immobilier et les autres actifs, l'adaptation des autres secteurs, les responsabilités légales ou les règlements administratifs.
- Le manque d'information sur les répercussions à l'échelle locale pour les entreprises, les incertitudes quant aux coûts et aux avantages des différentes mesures d'adaptation, et la faible demande en matière de leur mise en œuvre constituent autant de freins à l'adaptation.

1. INTRODUCTION

Le présent chapitre analyse l'effet des variations climatiques et des conditions climatiques extrêmes sur l'industrie canadienne, et explore les possibilités d'adaptation dans le but de réduire les risques ou de cerner les possibilités de croissance, compte tenu du contexte actuel et des changements climatiques prévus. Il s'articule autour de cinq secteurs – l'assurance des biens, le tourisme, la construction résidentielle, le secteur manufacturier et le commerce – et ne s'attarde pas sur les autres secteurs examinés dans le cadre de cette évaluation (la production d'énergie, la foresterie et l'industrie minière sont analysées au chapitre 3, l'agriculture au chapitre 4, la santé au chapitre 7 et les transports au chapitre 8).

Les études menées en matière d'adaptation ont tendance à se concentrer sur les secteurs qui présentent des liens évidents avec les écosystèmes ou les ressources vulnérables aux changements climatiques tels que le secteur agricole, la foresterie et la gestion de l'eau (Willbanks et al., 2007). Les publications scientifiques concernant les autres secteurs de production de biens ou de service sont rares. Le présent chapitre examine un échantillon de l'activité industrielle au sein de ces autres secteurs au Canada. Certains d'entre eux, comme l'assurance et le tourisme, attirent l'attention de plus en plus d'organismes de recherche au Canada et à l'échelle internationale, tandis que d'autres, comme ceux de la construction résidentielle, de la fabrication et du commerce, restent sous étudiés. Les répercussions que la divulgation du secret industriel pourrait avoir sur la concurrence font partie des raisons avancées pour expliquer le manque de données disponibles concernant les stratégies d'adaptation au sein de l'industrie (Agrawala et al., 2011). Parmi les secteurs abordés dans le présent chapitre, l'assurance et le tourisme sont les plus touchés par les effets des changements climatiques, et sont aussi les plus avancés en matière de mise en œuvre de mesures d'adaptation. Le secteur manufacturier et celui de la construction résidentielle, moins exposés à ces effets, n'ont commencé que récemment à envisager d'instaurer des mesures d'adaptation aux changements climatiques. Le secteur commercial est sans doute le moins vulnérable des secteurs analysés dans le présent document et les secteurs de l'exportation, quant à eux, présentent peu d'indications qu'ils travaillent à mettre en place des mesures d'adaptation (figure 1).

Les risques climatiques pour les entreprises canadiennes comprennent les répercussions directes, par exemple les dommages et les coûts liés aux conditions météorologiques extrêmes, et les répercussions indirectes, notamment les changements touchant les préférences des clients, les règlements gouvernementaux ou les responsabilités financières et légales relatives au manque de réaction ou aux réactions inefficaces aux changements climatiques. Dans la plupart des cas, l'industrie n'a pas encore élaboré de méthodes d'adaptation efficaces susceptibles de diminuer sa vulnérabilité par rapport à ces répercussions. Toutefois, il a été démontré que l'industrie réagit aux conditions météorologiques extrêmes et aux changements climatiques en adoptant des mesures d'adaptation telles des modifications aux codes du bâtiment ou à la gestion de la chaîne d'approvisionnement, qui peuvent favoriser l'adaptation aux changements climatiques. Les changements climatiques offrent également des débouchés commerciaux, grâce à la prestation de nouveaux services et produits pour certains secteurs. On se rend toutefois compte que ces débouchés sont tributaires d'une adaptation efficace.



FIGURE 1: Exposition de chaque secteur aux impacts des changements climatiques, comparativement à leurs mesures d'adaptation observées.

2. CONTEXTE ÉCONOMIQUE

En 2011, le produit national brut (PNB) du Canada a augmenté pour dépasser 1,7 milliard de dollars (Industrie Canada, 2011). Les industries productrices de biens, notamment celles des secteurs de l'agriculture, de l'extraction du pétrole et du gaz, de l'exploitation minière, de la foresterie, de la construction et de la fabrication, sont responsables d'environ le tiers de la production canadienne. Les secteurs de la fabrication et de la construction, qui produisent la majorité des biens au Canada, soit 75 pourcent des ventes, sont évalués dans le présent chapitre. Les industries des services sont responsables de près des deux tiers de la production et de l'emploi au Canada, notamment les secteurs bancaire et de l'assurance, de la vente au détail, du transport, de l'éducation, des soins de santé, des autres services publics et du tourisme. Le tourisme et l'assurance représentent 5 pourcent et 15 pourcent, respectivement, de l'industrie des services au pays (Industrie Canada, 2011).

2.1 ASSURANCE

En 2011, les compagnies d'assurance ont enregistré des revenus de 116,6 milliards de dollars, se classant ainsi au 9e rang parmi les 22 industries canadiennes (Statistique Canada, 2012a). Le secteur de l'assurance comprend plusieurs sous-secteurs, notamment ceux que représentent les entreprises de l'assurance vie et maladie, ainsi que

l'assurance de biens et de risques divers. Certains secteurs, comme l'assurance vie, ne semblent pas vulnérables aux changements des conditions météorologiques pour le moment (Mills et al., 2001). Toutefois, l'assurance de biens et, dans une moindre mesure, l'assurance automobile connaissent d'importantes variations en ce qui a trait aux coûts et aux revenus en fonction des variations des conditions météorologiques. En effet, les compagnies d'assurance de biens du Canada ont récemment affirmé que les déclarations de dommages causés par les intempéries représentent leurs plus importantes dépenses (Bureau d'assurance du Canada, 2012a; McBean, 2012).

Les changements climatiques, et leur incidence potentielle sur l'augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques graves, sont devenus une priorité clé des compagnies d'assurance de biens (McBean, 2012; Robinson, 2012). Ce secteur offre également des services de transfert de risques dont l'objet est de créer des mesures incitatives sur le plan économique conçues en vue d'appuyer l'adaptation. C'est pourquoi le présent chapitre est axé sur le secteur de l'assurance de biens du Canada. Les compagnies d'assurance de biens existent au pays depuis plus de 200 ans. Plusieurs centaines de compagnies offrent des polices d'assurance de biens et d'assurance automobile, faisant ainsi de ce secteur l'industrie financière la plus concurrentielle au pays (Bureau d'assurance du Canada, 2009). Ce secteur compte des grandes, des moyennes et des petites entreprises partout au pays.

2.2 TOURISME

En 2011, l'industrie du tourisme a généré des revenus de 78,8 milliards de dollars, soit environ 2 pourcent du produit national brut du Canada, et plus de 603 000 emplois directs (Gouvernement du Canada, 2012a). Bon nombre de ces emplois sont au sein de petites entreprises, de petites collectivités et de régions rurales (Association de l'industrie touristique du Canada, 2012). La contribution du tourisme à l'économie canadienne est bien moindre que celle d'autres nations du G20, puisque, au cours des dix dernières années, le Canada est passé du 7e au 18e rang au chapitre des arrivées de vols internationaux (Association de l'industrie touristique du Canada, 2012). Le Conseil mondial du voyage et du tourisme (2012) prévoit une croissance régulière du secteur du tourisme au Canada entre 2012 et 2022 (une moyenne de 2,9 pourcent par année). L'industrie du tourisme et les gouvernements fédéral et provinciaux croient d'ailleurs qu'une importante croissance du secteur est possible (Chambre de commerce du Canada, 2012; Gouvernement du Canada, 2012b; Association de l'industrie touristique du Canada, 2012), puisqu'on prévoit que les arrivées de vols internationaux passeront à 1,8 milliard d'ici 2030 (Organisation mondiale du tourisme des Nations Unies, 2011).

Bien que le tourisme soit un facteur économique important partout au Canada (tableau 1), il revêt une importance encore plus grande à l'échelle de la collectivité, où il constitue le secteur économique dominant dans les collectivités situées près des parcs, les zones de villégiature et de nombreuses autres destinations touristiques. Il constitue un élément important de la stratégie de revitalisation économique aux endroits où l'économie axée sur les ressources traditionnelles accuse un recul (Gouvernment du Canada, 2005, 2012a; Scott, 2011).

Province et Territoire	Produit national brut en 2011 (en dollars indexés de 2002)	Emploi en tourisme en 2011 (emplois)
Terre-Neuve	316 M$	8136
Île-du-Prince-Édouard	121 M$	2866
Nouvelle-Écosse	683 M$	16 636
Nouveau-Brunswick	438 M$	12 090
Québec	5357 M$	130 018
Ontario	9797 M$	226 781
Manitoba	903 M$	22 628
Saskatchewan	677 M$	18 063
Alberta	3063 M$	69 308
Colombie-Britannique	4913 M$	96 877
Yukon/Territoires du Nord-Ouest/Nunavut	147 M$	n.d.
Total	**26 415 G$**	603 400

TABLEAU 1: La contribution économique du tourisme au Canada *(Source : Association de l'industrie touristique du Canada, 2012).*

2.3 CONSTRUCTION RÉSIDENTIELLE

L'industrie de la construction résidentielle se préoccupe des nouvelles résidences et des travaux de rénovation. Ce secteur représente environ 6 pourcent du PNB du Canada et constituait le secteur dont la croissance était la plus rapide au cours des dix dernières années (TD Economics, 2011; Statistique Canada, 2012b). En 2011, 843 763 Canadiens (soit 7,1 pourcent des Canadiens sur le marché du travail) occupaient un emploi dans le secteur de la construction (Statistique Canada, 2012b, c).[1] Bien que le secteur ait connu un déclin au chapitre des dépenses et de l'emploi à la suite de la crise financière de 2007-2008, les conditions se sont quelque peu améliorées en 2011 (ACCH, 2011).

Au Canada, la croissance du secteur de la construction résidentielle repose sur les faibles taux de chômage, les faibles taux d'intérêt et l'immigration. L'Association canadienne des constructeurs d'habitations (ACCH) prévoit que la construction de nouvelles maisons sera stable au cours des prochaines années, mais devrait augmenter en réaction à l'immigration et aux pressions démographiques (ACCH, 2011).

2.4 SECTEUR MANUFACTURIER

Le secteur manufacturier constitue le secteur industriel le plus important et le plus diversifié du Canada. En 2011, les revenus annuels des fabricants du Canada étaient plus élevés que ceux de l'ensemble des autres industries de production de biens (Industrie Canada, 2011). Des milliers d'entreprises font partie du secteur, aussi bien de grandes entreprises internationales que de nombreuses moyennes et petites entreprises.

[1] Ces statistiques se rapportent à l'ensemble de l'industrie de la construction, ce qui comprend la construction d'immeubles commerciaux et la construction résidentielle. Le présent chapitre porte sur la construction résidentielle, mais les statistiques dressent le portrait de l'importance du secteur dans l'économie canadienne.

	Exportations de biens et de services			Importations de biens et de services			Balance – biens et services
	2011	Part en 2011	Pourcentage de croissance par rapport à 2010	2011	Part en 2011	Pourcentage de croissance par rapport à 2010	2011
Monde	523 293	100,0%	11,8	555 594	100,0%	9,4	-23 201
États-Unis	370 255	69,5%	10,5	337 772	60,8%	7,6	32 483
UE	55 334	10,4%	12,6	61 095	11,0%	10,6	-5761
Japon	12 612	2,4%	15,3	10 816	1,9%	-5,9	1796
Reste du monde	94 192	17,7%	16,4	145 911	26,3%	14,7	-51 719

TABLEAU 2: Marché des biens et des services du Canada par région en 2011 (en millions de dollars et pourcentage de changement annuel) (*Source : MAECD, 2012*).

Ce secteur a dû surmonter d'importants obstacles au cours des dernières années, en raison de la crise économique mondiale, de l'appréciation du dollar canadien et de la faiblesse des marchés d'exportation. La plupart des fabricants ont dû interrompre leurs activités à la suite de phénomènes météorologiques graves ayant causé divers problèmes, comme des retards dans l'obtention de matériaux indispensables, des difficultés à respecter les délais de livraison et des perturbations en raison de pannes de courant (Pegg, 2011; Campbell, 2012).

2.5 COMMERCE

Le commerce international représente 35 pourcent du PNB du Canada (Banque mondiale, 2012). En 2011, les exportations du Canada valaient plus de 458 milliards de dollars et les importations, plus de 455 milliards de dollars, calculées sur la base de la balance des paiements (Statistique Canada, 2012d). Le tableau 2 dresse la liste des biens et des services du Canada par région (en dollars et en pourcentage de changement par rapport à 2010). Les partenaires commerciaux les plus importants demeurent les États-Unis et, dans une moindre mesure, l'Union européenne (UE) et le Japon.

En 2011, les importations du Japon ont diminué de 5,9 pourcent, principalement en raison du tremblement de terre et du tsunami qui ont dévasté l'économie du pays. Cela démontre à quel point les catastrophes naturelles peuvent influencer les marchés canadiens. En règle générale, toutefois, les marchés canadiens ont connu des améliorations en 2011 et ont crû de 10,6 pourcent par rapport à l'année précédente (MAECD, 2012). Les matériaux et les biens industriels constituent la plus importante source d'exportation du Canada, suivis des produits énergétiques, de la machinerie et de l'équipement, et des pièces automatiques. La machinerie et l'équipement constituent la plus importante source d'importation du Canada, suivis des matériaux et des biens industriels, et des produits automobiles (MAECD, 2012)..

3. PRINCIPALES CONCLUSIONS DES ÉVALUATIONS PRÉCÉDENTES

L'analyse des mesures d'adaptation aux changements climatiques au sein des entreprises canadiennes et des secteurs de l'industrie traités dans le présent chapitre ne fait pas partie des évaluations canadiennes précédentes (Environnement Canada, 1998; Lemmen et al., 2008). Certains secteurs, particulièrement le tourisme et l'assurance, y sont mentionnés en raison de leur grande vulnérabilité aux impacts climatiques tels que les conditions météorologiques extrêmes. D'autres secteurs dont l'exposition aux impacts climatiques est moins évidente tels que le secteur manufacturier et celui de la construction résidentielle n'ont pas reçu beaucoup d'attention. Par conséquent, les évaluations précédentes n'offrent qu'une perspective limitée des mesures d'adaptation s'appliquant aux secteurs de l'industrie canadienne, autres que ceux du tourisme et de l'assurance.

Les discussions sur l'assurance dans les évaluations canadiennes précédentes, ainsi que celles du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), traitaient du rôle de l'industrie dans la promotion des mesures d'adaptation et des risques financiers liés aux changements climatiques. La discussion du GIEC semble indiquer que l'industrie pourrait être sensible aux risques importants s'il survenait une série d'événements coûteux ayant lieu sur une courte période. En 2005, les ouragans Katrina, Wilma et Rita ont tous entraîné des pertes économiques et des pertes de vies humaines importantes, et sont mentionnés à titre d'exemples de ce type de risque (voir TRNEE, 2011). Les évaluations précédentes traitaient d'autres préoccupations, y compris la possibilité que la disponibilité de l'assurance soit plus limitée si les risques de conditions météorologiques extrêmes augmentaient dans certaines régions (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008) et la possibilité que les assurances deviennent trop coûteuses pour de nombreux clients potentiels habitant des régions exposées aux risques climatiques importants que représentent les ouragans ou les inondations (Wilbanks et al., 2007). Ainsi, en ce qui a trait à l'adoption de mesures d'adaptation, le prix des assurances peut servir de signal économique, dont la tâche consiste à communiquer les risques et à jouer un rôle important lorsqu'il s'agit d'encourager l'adoption d'un comportement prudent à l'égard du risque. Les assureurs peuvent augmenter les tarifs pour les industries ou les propriétés exposées aux risques climatiques et réduire les tarifs si les clients investissent dans des mesures d'adaptation (Wilbanks et al., 2007).

Des discussions sur le tourisme dans le quatrième rapport d'évaluation du GIEC et un rapport spécial commandité par l'Organisation mondiale du tourisme et le Programme des Nations Unies pour l'environnement reconnaissent la vulnérabilité du secteur au climat et l'importance des mesures d'adaptation aux changements climatiques, particulièrement en ce qui concerne l'économie nationale et les

collectivités qui dépendent grandement du tourisme (Wilbanks et al., 2007; Scott et al., 2008). Les deux évaluations font état de la grande variété de répercussions directes (p. ex. changements de température et des précipitations, et fréquence des conditions météorologiques extrêmes) et de répercussions indirectes (p. ex. changements dans la disponibilité ou la qualité de l'eau, diminution de la couverture de neige ou des aires de plage, changements au niveau des coûts opérationnels et de déplacement, préférences des consommateurs et réputation des destinations) sur le tourisme mondial et les grandes destinations touristiques. Les deux évaluations font état des répercussions au niveau des destinations dans les chapitres sur les régions. Lorsqu'il s'agit de voyager, les touristes font preuve d'une incroyable capacité à changer de destination, à choisir d'autres moments et à opter pour d'autres activités. Une meilleure compréhension de la gamme d'options dont les consommateurs disposent en matière d'adaptation a donc été considérée un élément essentiel de toute démarche visant l'adoption de mesures d'adaptation efficaces par les entreprises touristiques et les collectivités qui dépendent d'elles. Les évaluations internationales concluent que les changements climatiques modifieront la compétitivité au niveau des destinations mondiales et que toutes les collectivités identifiées comme étant des destinations de choix devront s'adapter, soit en réduisant les risques, soit en créant des possibilités (Wilbanks et al., 2007; Scott et al., 2008).

Lemmen *et al.* (2008) ont présenté une évaluation régionale des répercussions des changements climatiques pour le Canada, y compris celles relatives au tourisme (tableau 3). Le rapport indique que ces changements pourraient entraîner des gains nets pour le secteur du tourisme du Canada, principalement en raison d'une plus longue période de températures chaudes durant la saison touristique et de l'augmentation connexe de l'activité touristique aux échelles nationale et internationale, ainsi qu'une meilleure position concurrentielle sur le marché touristique international (Bruce et Haites, 2008). Le tourisme lié aux sports d'hiver est le secteur le plus exposé aux risques, en raison de températures hivernales plus chaudes et d'une diminution des chutes de neige.

Bien que les évaluations précédentes aient souvent mis l'accent sur l'infrastructure, elles ont rarement porté sur les répercussions dans le domaine de la construction résidentielle. En règle générale, elles concluent que les changements climatiques augmenteront les risques climatiques actuels auxquels les propriétaires de résidences font face. Par exemple, une augmentation de l'intensité et de la fréquence des averses aggravera les problèmes d'inondations de sous-sol déjà existants dans les résidences où le réseau d'égouts est désuet (Wilbanks et al., 2007). Toutefois, on ne discute pas directement des mesures d'adaptation adoptées par ce secteur.

Peu de recherches sur les mesures d'adaptation aux changements climatiques dans le secteur manufacturier du Canada ont été entreprises; les évaluations précédentes en parlent d'ailleurs dans le contexte de l'infrastructure et du transport. Les répercussions directes comprennent celles qui concernent les activités industrielles dans des endroits particuliers, en plus de la chaîne d'approvisionnement qui maintient la production à ces endroits (Wilbanks et al., 2007). Les répercussions indirectes comprennent les changements au niveau de

Région	Principaux risques	Possibilités
Nord	Les infrastructures des sites touristiques sont exposées aux risques en raison de la dégradation du pergélisol et des inondations	La saison des voyages se prolongera et l'accessibilité augmentera au fur et à mesure que les températures se réchaufferont et que la surface de glace marine diminuera
Canada atlantique	L'infrastructure touristique est exposée aux risques en raison des inondations et de l'érosion côtière liées aux conditions météorologiques extrêmes et à l'élévation du niveau de la mer	Une période chaude plus longue durant la saison touristique sera bénéfique aux collectivités
Québec et Ontario	Le tourisme lié aux sports d'hiver (le ski, la pêche sur la glace, la motoneige) souffrira des températures hivernales plus chaudes et des chutes de neige et des conditions de glace plus variables Les festivals d'hiver pourraient en souffrir La pêche sportive en eau froide diminuera La qualité de l'eau et les feux de friches pourraient nuire au tourisme dans certaines collectivités	Les activités touristiques estivales (p. ex. le golf, la pêche, la navigation de plaisance, la visite de parcs) profiteront d'une saison chaude prolongée
Prairies	La disponibilité de l'eau pour la pêche et les loisirs pourrait diminuer Probabilité accrue de feux de forêt en raison des températures plus chaudes Le tourisme lié aux sports d'hiver souffrira des températures plus chaudes et des chutes de neige variables	Les activités touristiques estivales (p. ex. le golf, la pêche, la navigation de plaisance, la visite de parcs) profiteront d'une saison chaude prolongée
Colombie-Britannique	Le ski et d'autres activités récréatives d'hiver souffriront de la diminution des chutes de neige Le nombre de feux de forêt pourrait augmenter dans les régions intérieures La pêche sportive souffrira au rythme des changements des niveaux d'eau et des températures Les voies de transport vers les sites touristiques seront vulnérables aux glissements de terrain, aux inondations et aux feux de forêt	Les exploitants d'entreprises touristiques profiteront de la prolongation de la période des activités récréatives d'été

TABLEAU 3: Impacts climatiques sur le tourisme au Canada, par région *(Sources: Bourque et Simonet, 2008; Chiotti et Lavender, 2008; Sauchyn et Kulshreshtha, 2008; Vasseur et Catto, 2008; Walker et Sydneysmith, 2008).*

la disponibilité des intrants (p. ex. le bois d'œuvre, l'électricité), les préférences des consommateurs par rapport à certains produits.

Les recherches précédentes sur les mesures d'adaptation aux changements climatiques et les marchés canadiens sont également rares (Bruce et Haites, 2008). La répercussion des politiques d'atténuation des risques sur les marchés d'exportation du Canada et des États-Unis ont été analysées (Lister, 2008; Aldy et Pizer, 2011), mais on ne trouve dans la documentation aucune trace des recherches sur la vulnérabilité aux changements climatiques du réseau commercial du Canada ou des mesures d'adaptation possibles. Les évaluations précédentes soulignent la vulnérabilité potentielle des structures commerciales internationales et nationales du Canada aux changements climatiques, en mettant l'accent sur les produits de ressources naturelles (provenant, notamment, de la foresterie, de l'agriculture, de la pêche, de l'énergie et de l'eau; voir Bruce et Haites, 2008). Elles sont également axées sur les questions relatives à l'approvisionnement, tandis que les répercussions à plus long terme sur la demande de produits canadiens ont été jugées comme étant spéculatives (Bruce et Haites, 2008). Il faut également tenir compte de l'importance des impacts climatiques sur le transport en ce qui a trait au commerce international. Les ports côtiers et maritimes des côtes atlantique et pacifique qui offrent un accès important aux marchandises font face à des interruptions liées à l'élévation du niveau de la mer ou aux conditions météorologiques extrêmes (Vasseur et Catto, 2008; Walker et Sydneysmith, 2008). Les dommages aux réseaux routiers causés par les cycles de gel et de dégel et les conditions météorologiques extrêmes constitue un autre aspect des répercussions sur le transport susceptibles d'avoir une incidence sur le commerce international (Walker et Sydneysmith, 2008). En ce qui a trait aux mesures d'adaptation, les évaluations précédentes laissent entendre que les changements climatiques doivent être pris en considération durant la construction d'importantes structures de transport. Par exemple, dans les régions côtières, les ponts devraient être bâtis de façon à résister à l'élévation prévue du niveau de la mer (Vasseur et Catto, 2008).

4. RISQUES, DÉBOUCHÉS ET ADAPTATION

4.1 ASSURANCE

Les dommages aux résidences et aux entreprises causés par les phénomènes météorologiques graves sont à la hausse depuis plusieurs dizaines d'années, au Canada ainsi qu'ailleurs dans le monde. En effet, les pertes et les dommages causés par les pluies fortes, les ouragans, les tornades, les feux de friches et les tempêtes hivernales ont récemment augmenté jusqu'à dépasser ceux infligés par les incendies et les vols et représentent maintenant les coûts les plus importants pour le secteur de l'assurance de biens au Canada (McBean, 2012). En 2011, l'industrie de l'assurance du Canada a versé un montant record de 1,7 milliard de dollars en indemnisations de dommages matériels liés aux événements météorologiques, soit une tendance à la hausse pour ce type de pertes (Robinson, 2011; figure 2). L'augmentation des pertes assurées correspond principalement aux indemnisations pour des dommages causés par des inondations dans les sous-sols, mais on note également une augmentation des indemnisations versées pour des dommages causés par le vent et les feux de friches (McBean, 2012). La figure 3 présente quelques événements météorologiques extrêmes survenus au Canada au cours des dix dernières années et les coûts liés aux dommages qu'ils ont causés. La plupart des assureurs canadiens ont été en mesure de maintenir un bilan positif, bien qu'environ le tiers du secteur ait signalé des pertes techniques en 2012 (Dickson, 2012).

Au Canada, plusieurs facteurs ont contribué à l'augmentation des dommages causés aux biens par les phénomènes météorologiques graves, notamment le nombre plus élevé de personnes et de biens à risque, le vieillissement des infrastructures et les changements climatiques (McBean, 2012). Aucune étude n'a encore été entreprise au Canada estimant la part imputable aux changements climatiques dans les coûts des indemnisations versées par les assureurs (Kovacs, 2012). Les recherches ayant recours aux données sur les pertes assurées à l'échelle mondiale semblent indiquer que des facteurs socioéconomiques tels que l'augmentation de la richesse, ainsi que du nombre et de la valeur des propriétés à risque, et la détérioration de la capacité des infrastructures publiques, expliquent la plupart des augmentations de dommages aux biens signalées, sans que les changements climatiques y comptent pour beaucoup (Choi et Fisher, 2003; Bouwer, 2010). Cette conclusion est conforme à celles du rapport spécial du GIEC sur la gestion des risques d'événements climatiques extrêmes et de catastrophes en vue d'une meilleure adaptation aux changements climatiques (GIEC, 2012).

De nombreux éléments indiquent que les changements climatiques entraîneront des phénomènes de précipitations plus intenses (Min et al., 2011), qui pourraient inonder les systèmes d'égouts urbains désuets du Canada et causer d'importants dommages aux résidences et aux entreprises. Cela augmentera à son tour la fréquence et la gravité des inondations de sous-sols. Il appert que le réchauffement entraînera une augmentation de la gravité des ouragans dans l'Atlantique (Kunkel et al., 2008; Seneviratne et al., 2012), phénomène susceptible de mener à une augmentation du nombre de réclamations pour des dommages causés par le vent et les fortes pluies dans l'est du Canada. On



FIGURE 2: Pertes importantes dans le secteur des assurances au Canada, de 2006 à 2011 (milliards de dollars). Pertes totales approximatives pour une année complète, en dollars indexés (*Source : Robinson, 2011*).

s'inquiète du fait que les changements climatiques accentueront la fréquence et la gravité des tempêtes estivales en Amérique du Nord telles les tornades, les tempêtes de grêle et la foudre (Peterson et al., 2008), ce qui pourrait entraîner une augmentation des dommages et des pertes. Plusieurs raisons donnent à penser que les zones brûlées par des feux de friches seront plus étendues (Wotton et al., 2010; Handmer et al., 2012), ajoutant ainsi au risque de dommages causés par le feu aux résidences et aux entreprises situées dans les milieux périurbains. Bien qu'on note des progrès importants dans le domaine de la recherche sur les conditions climatiques extrêmes, ces recherches comportent des lacunes au Canada (Kovacs, 2012; *voir* le chapitre 2 - *Un aperçu des changements climatiques au Canada*). Les assureurs sont malgré tout convaincus que les changements climatiques augmenteront considérablement les risques de réclamations au cours des prochaines décennies (Mills, 2009a, b; McBean, 2012; Thistlethwaite, 2012).

Aux États-Unis, certains rapports ont également laissé entendre que les changements climatiques pourraient engendrer une augmentation des réclamations en matière d'assurance automobile et d'assurance responsabilité (Mills et Lecomte, 2006). Les événements météorologiques extrêmes, comme la grêle ou la neige, augmentent le nombre de réclamations en matière d'assurance automobile, comme on l'a vu au Manitoba, par exemple, lorsque des tempêtes de grêle ont entraîné un nombre important de réclamations auprès des assureurs automobiles en 2012 (MPI, 2011). Toujours aux États-Unis, certaines revues spécialisées en assurance ont avancé l'hypothèse selon laquelle les réclamations en matière d'assurance responsabilité des dirigeants et des administrateurs pourraient augmenter si les tribunaux jugent ces cadres coupables de négligence pour avoir ignoré les risques liés aux changements climatiques (Mills, 2007). Bien que les réclamations en matière de responsabilité civile pourraient représenter un risque pour les assureurs, les tribunaux du Canada et des États-Unis n'ont pas encore rendu de décision tenant une entreprise responsable d'une répercussion particulière des changements climatiques (Bobelian, 2012).

Bien qu'un consensus se dégage au sein de l'industrie canadienne de l'assurance quant au fait que les risques de pertes et de dommages augmenteront en partie en raison des changements climatiques, les recherches sur les débouchés auxquels le secteur de l'assurance au Canada pourrait avoir accès ne sont pas aussi solides (McBean, 2012). Il appert toutefois, dans le marché mondial des assureurs, que les assureurs commencent à explorer des débouchés potentiels liés aux changements climatiques (voir Mills, 2009b). En Europe et aux États-Unis, il est de plus en plus commun d'inclure, dans les contrats d'assurance de biens, des incitatifs sur le « droit de reconstruction » en cas d'événement météorologique causant des dommages. Dans certains pays en développement, on remarque l'émergence de plans offrant une couverture axée sur les données paramétriques ou indexées en cas de pertes de cultures ou de bétail en raison des conditions météorologiques. Les assureurs explorent également des plans conçus en vue de couvrir les risques liés aux nouvelles technologies des énergies renouvelables. Les marchés pour ces produits pourraient aider les assureurs à s'adapter aux augmentations de pertes de biens en créant des flux de rentrées de rechange (Mills, 2007, 2012).

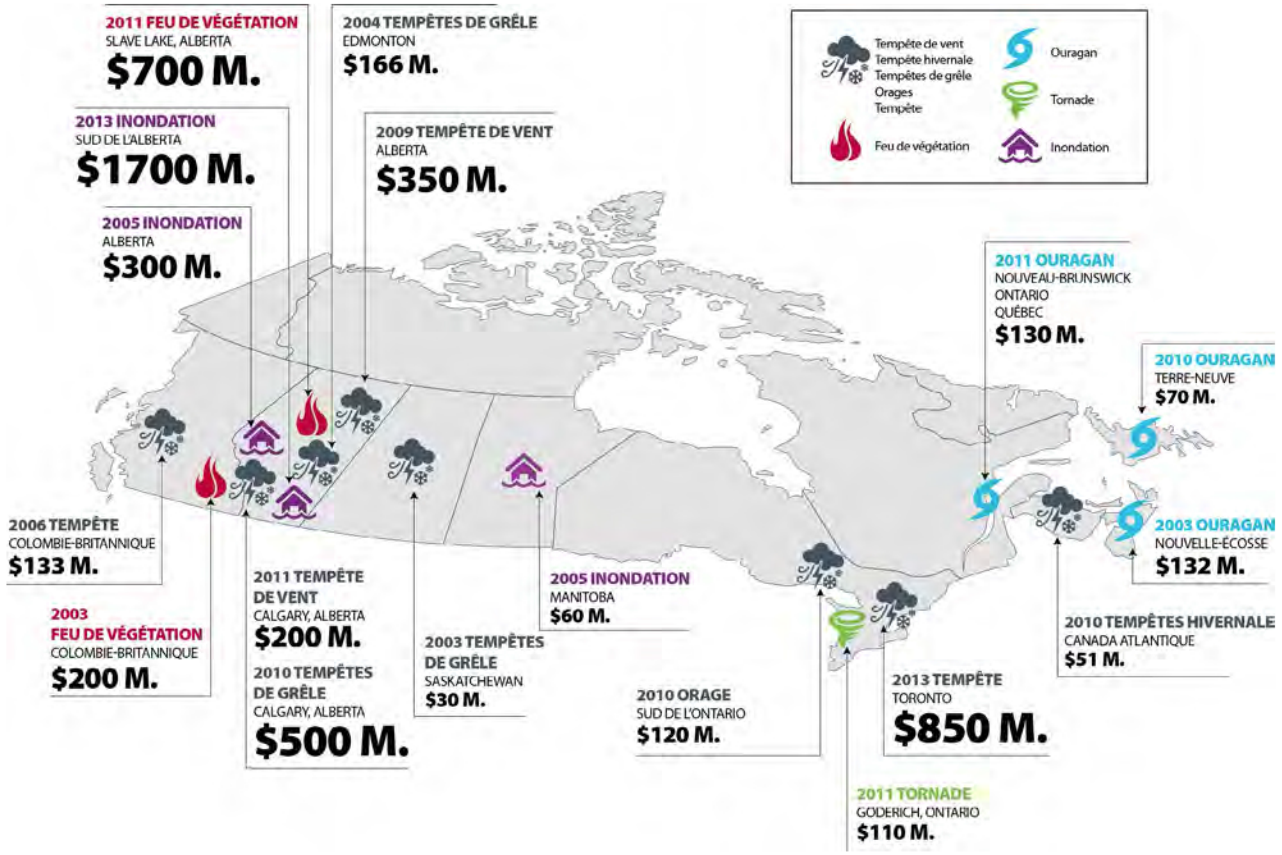


FIGURE 3: Pertes assurées en raison d'événements météorologiques extrêmes au Canada - (millions de dollars) (*Sources : Bureau d'assurance du Canada, 2008, 2011b, 2013a, b; McBean, 2012*).

ADAPTATION

Les mesures d'adaptation prises dans le domaine de l'assurance sont mieux documentées que dans la plupart des autres industries, tant dans les ouvrages internationaux (Dlugodecki, 2009; Kunreuther et al., 2009; Mills, 2009a, b; PNUE-IF, 2009; Thistlethwaite, 2012) que dans de nombreuses études canadiennes (Dotto et al., 2010; Kovacs, 2012; McBean, 2012). Les ajustements apportés à la couverture, les augmentations des prix et l'achat de contrats de réassurance représentent quelques mesures d'adaptation importantes à la portée des assureurs désireux de réduire leur exposition aux coûts engendrés par les conditions météorologiques extrêmes et la variabilité du climat.

Des coûts plus élevés en raison d'une augmentation des dommages causés par les conditions météorologiques extrêmes ont mené à l'adoption de certaines mesures d'adaptation dans le domaine de l'assurance. Bien que certains assureurs de biens aient ajusté la couverture offerte en cas de conditions météorologiques extrêmes, par exemple en n'offrant plus l'assurance en cas de refoulement d'égout aux communautés où les pertes sont récurrentes, l'ensemble des changements apportés à la couverture offerte est limité comparativement à certains marchés de l'assurance aux États-Unis. Par exemple, malgré le fait que la tempête de verglas qui a sévi en 1998 dans l'est de l'Ontario, le sud du Québec et certaines régions du Canada atlantique ait entraîné plus de 700 000 réclamations de pertes par les propriétaires de résidences, la couverture des assurances de biens offerte aux propriétaires de résidences et aux entreprises n'a presque pas diminué au cours de la dernière décennie (Dotto et al., 2010). De même, en dépit du fait que plusieurs centaines de maisons de Slave Lake et de Kelowna ont été détruites par le feu, aucun changement n'a été apporté quant à la disponibilité et à la portée de la couverture en cas d'incendie (voir Sandink, 2009). La situation est différente dans certains marchés de l'assurance dans les régions côtières des États-Unis, où les ouragans ont entraîné une réduction de la portée et de la disponibilité de l'assurance (Mills et Lecomte, 2006). Il semble que la nature très compétitive du secteur canadien de l'assurance de biens fasse en sorte que les compagnies sont prêtes à offrir une couverture, du moment qu'elles peuvent obtenir un prix équitable pour assumer le risque.

Bien que les changements apportés à l'étendue et à la disponibilité de la couverture soient minimes, l'augmentation des pertes et des réclamations pour dommages a entraîné une hausse des prix de l'assurance pour les propriétaires de résidences et les entreprises (Marr, 2011, 2012). Les assureurs du Canada commencent à utiliser le prix des assurances comme mesure incitative à l'adaptation. Par exemple, certains assureurs établissent le prix et la disponibilité de la couverture en cas de refoulement des égouts en fonction de l'adoption, par le titulaire de police, de mesures de prévention des sinistres, notamment l'installation d'un clapet anti-retour (Sandink, 2011). Les compagnies d'assurances de première ligne gèrent aussi activement le risque de pertes et de dommages catastrophiques au moyen de contrats de réassurance. Les compagnies de réassurance vendent des polices aux assureurs d'origine qui offrent de couvrir une grande portion des coûts occasionnés par les rares événements générateurs de perte importante. Les compagnies d'assurance évaluent leurs coûts possibles en matière d'événements météorologiques violents lorsqu'ils déterminent, par exemple, le capital retenu, la protection de réassurance achetée et le prix de la couverture offerte aux clients. Dans l'industrie, les pratiques s'adaptent au fur et à mesure que s'améliore le niveau de compréhension des compagnies au sujet des risques auxquels ils font face en matière de climat (Mills, 2009a, b).

Bien qu'on observe l'apparition de mesures d'adaptation conçues en vue de faire face aux futurs changements climatiques, des organismes de réglementation ont récemment réalisé des sondages au sein du secteur, lesquels confirment que ces mesures demeurent relativement rares. Aux États-Unis, une étude effectuée par la National Association of Insurance Supervisors (association nationale des gérants d'assurance) a révélé que seulement 11 compagnies sur les 88 sondées avaient adopté des politiques officielles en matière de changements climatiques (Leurig, 2011). Au Québec, un sondage effectué en 2011 a révélé qu'une minorité d'assureurs avaient officiellement adopté des mesures d'adaptation. Par exemple, quatre assureurs sur les neuf ayant répondu au sondage ont déclaré qu'ils évaluent le lien entre les épisodes climatiques et les réclamations en recueillant des données régionales sur les conditions météorologiques (Autorité des marchés financiers, 2011). Il importe de noter que ces résultats peuvent être influencés par les préoccupations des assureurs par rapport à la nature confidentielle de cette information sur les mesures d'adaptation et du fait que la partager pourrait nuire à la compétitivité.

L'utilisation par les organismes de réglementation de sondages sur la divulgation des risques relatifs aux changements climatiques pourra éventuellement servir d'outil de promotion des mesures d'adaptation au sein du secteur financier. Plus on disposera d'information sur les risques relatifs aux changements climatiques, plus les investisseurs, les actionnaires et les organismes de réglementation seront en mesure de dépister les entreprises les plus exposées à ces risques. Les investisseurs et les actionnaires qui se préoccupent du rendement de leur capital investi seraient alors en mesure de faire pression sur ces entreprises afin qu'elles adoptent des stratégies d'adaptation. Le Carbon Disclosure Project (CDP), soit le projet de divulgation du carbone (*voir* l'étude de cas 7 au chapitre 3), – initiative britannique à participation volontaire et sans but lucratif – a adopté cette stratégie de divulgation et possède aujourd'hui la plus importante base de données sur les risques relatifs aux changements climatiques au monde. Les organismes de réglementation des valeurs mobilières ont également réagi aux efforts de nature similaire au CDP en accentuant leur surveillance de l'exposition du secteur financier à ces risques. Au cours des dernières années, plusieurs nouveaux règlements sont apparus touchant l'amélioration de la divulgation des risques relatifs aux changements climatiques du côté des entreprises cotées en bourse (*voir* l'étude de cas 1).

Les assureurs disposent d'une série de mesures d'adaptation solides qu'ils peuvent utiliser afin de profiter de leur expertise et de leurs produits établis. Ces mesures comprennent l'établissement du prix des risques relatifs aux changements climatiques pour les contrats d'assurance, l'élaboration de modèles prospectifs qui intègrent l'information sur ces risques et la promotion des mesures d'adaptation auprès des intervenants externes afin de contribuer à la préservation de la disponibilité des assurances. L'établissement du prix des risques relatifs aux changements climatiques représente un défi important pour l'industrie. L'analyse actuarielle traditionnelle ne convient pas à la prévision des sinistres rares et importants et dépend des données historiques; or, ces dernières ne sont que d'une valeur limitée lorsqu'il s'agit de comprendre les futures répercussions des changements climatiques sur les réclamations (Olcese, 2010). L'analyse actuarielle a également été structurée de façon à prévoir les risques en matière d'incendies et de vols, et non des risques liés aux intempéries (Autorité des marchés financiers, 2011). Aux États-Unis, on considère les risques de tutelle comme un autre obstacle à l'intégration des risques relatifs aux changements climatiques dans l'établissement des prix (Leurig, 2011). Les assureurs s'inquiètent du fait que les hausses de prix qui s'imposent pour couvrir les risques relatifs aux changements climatiques pourraient rendre la tarification trop onéreuse et entraîner des interventions réglementaires susceptibles d'entraîner la réduction des tarifs. Les organismes de réglementation des États-Unis sont déjà intervenus en forçant les assureurs à essayer de récupérer les coûts à la suite d'un sinistre important tel l'ouragan Katrina, afin de réduire les tarifs (Thistlethwaite, 2012).

ÉTUDE DE CAS 1

DIVULGATION DE RENSEIGNEMENTS FINANCIERS RELATIFS AUX RISQUES EN MATIÈRE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La divulgation de renseignements financiers relatifs aux risques en matière de changements climatiques s'avère être l'un des outils les plus efficaces lorsqu'il s'agit d'encourager l'adoption de mesures d'adaptation aux changements climatiques. L'information provenant de cet exercice pourrait créer un signal de marché comparable à celui qui est utilisé par les investisseurs en vue de justifier leurs investissements dans des entreprises qui considèrent l'adoption de mesures d'adaptation aux changements climatiques comme une stratégie valable de gestion des risques. En 2012, le gouvernement du Royaume-Uni a annoncé que toutes les entreprises inscrites au London Stock Exchange seront tenues de divulguer leurs niveaux d'émission de gaz à effet de serre (GES; Secretary of State for Environment, Food and Rural Affairs, 2012). Ce règlement constitue la première exigence obligatoire au monde en matière de divulgation des émissions de GES et établit un précédent important du côté des organismes de réglementation financiers. Les organismes de réglementation des valeurs mobilières des États-Unis et du Canada ont également émis des lignes directrices, selon lesquelles les répercussions des changements climatiques sont des risques substantiels qui répondent aux critères régissant la divulgation (SEC, 2010; ACVM, 2012). Ce type de règlement donne à penser que les organismes de réglementation des valeurs mobilières et les investisseurs commencent à examiner rigoureusement l'exposition aux risques relatifs aux changements climatiques. En ce qui concerne le secteur de l'assurance et d'autres fournisseurs de services financiers, cet examen pourrait constituer une démarche incitative à l'adoption de mesures d'adaptation, comme des indemnités de risque plus élevées pour les produits financiers exposés aux risques relatifs aux changements climatiques.

Les actionnaires s'intéressent particulièrement aux renseignements sur les risques relatifs aux changements climatiques. Au cours des dernières années, les actionnaires ont présenté plusieurs résolutions afin de demander aux entreprises dans lesquelles ils investissent de fournir de l'information sur leur capacité à gérer les risques relatifs aux changements climatiques (Ceres, 2013). La Securities and Exchange Commission (SEC) des États-Unis a récemment renforcé le pouvoir des résolutions des actionnaires en ce qui concerne ces risques. Certaines institutions financières ont pu ignorer ces résolutions en affirmant qu'elles ne faisaient pas partie des « activités habituelles ». En février 2013, la SEC a annoncé que les entreprises ne pourraient plus ignorer ces règlements, que les répercussions des changements climatiques sont déterminantes et qu'elles doivent donc être communiquées aux investisseurs.

La mesure de l'exposition aux risques relatifs aux changements climatiques représente un des défis importants devant être surmontés en vue d'améliorer la divulgation. L'Institut canadien des comptables agréés (ICCA) tente d'améliorer la mesure des risques aux fins de communication de l'information financière. L'ICCA a élaboré des lignes directrices à l'intention des organismes de communication en vue d'identifier les renseignements sur les risques relatifs aux changements climatiques qui sont déterminants ou utiles aux investisseurs pour la prise de décisions (ICCA, 2009). Au fil du temps, ces efforts aideront à créer un signal de marché, grâce à la communication de l'information financière qui renseigne les investisseurs au sujet des entreprises qui sont les plus exposées aux risques substantiels et celles qui ont adopté des mesures d'adaptation afin de réduire ces risques.

Certains assureurs et certaines associations professionnelles de l'industrie ont commencé à adapter leurs pratiques de modélisation de manière à composer avec les limites imposées par l'une analyse actuarielle traditionnelle. Par exemple, les modélisateurs de risques des États-Unis ont élaboré des modèles de catastrophes à court terme qui placent une importance statistique sur les variables climatiques et météorologiques récentes (p. ex. des températures plus chaudes dans l'océan Atlantique), et qui permettent de cerner le signal climatique de façon plus efficace (Eeuwens, 2009). Les compagnies d'assurance ont également amorcé des recherches portant sur la façon dont les modèles climatiques pourraient être utilisés pour fournir des renseignements utiles aux pratiques d'établissement de prix (BAC, 2012a; McBean, 2012). L'Association of British Insurers et le Met Office du Royaume-Uni ont récemment collaboré à un projet ayant recours à des modèles climatiques pour comprendre la façon dont les dommages causés par l'eau évolueront en fonction des changements climatiques (Dailey et al., 2009). L'Institut canadien des actuaires travaille à l'élaboration d'un indice actuariel des changements climatiques que les assureurs pourront utiliser pour mieux qualifier les risques relatifs aux changements climatiques. L'indice suit de près les anomalies climatiques en comparant l'information historique aux tendances actuelles du climat. Cette information est ensuite combinée aux données socioéconomiques sur la vulnérabilité, afin de comprendre l'incidence des conditions climatiques extrêmes sur le risque d'un sinistre pour divers marchés (Solterra Solutions, 2012). Le Bureau d'assurance du Canada (BAC) travaille également en partenariat avec plusieurs collectivités en vue de mettre au point un outil d'évaluation du risque pour les municipalités (OERM), afin d'améliorer la qualité des données et la gestion des risques de dommages causés par le refoulement d'égouts (BAC, 2012b). Les outils comme l'OERM (*voir* l'étude de cas 2) et la recherche sur la corrélation entre les changements climatiques et l'augmentation des pertes d'assurance peuvent aider à générer des données financières sur les risques relatifs aux changements climatiques (Kovacs, 2012).

Malgré ces progrès, il est nécessaire d'effectuer plus de recherche avant de pouvoir utiliser les modèles et les analyses sur les changements climatiques pour mieux établir les prix des contrats d'assurance. Tout changement apporté à la façon d'établir les prix des assureurs sera étudié par les titulaires de polices et les organismes de réglementation. Le secteur de l'assurance doit non seulement créer un consensus technique au sein de l'industrie sur les bonnes pratiques en matière d'établissement de prix dans le cas des risques relatifs aux changements climatiques, mais aussi collaborer avec les intervenants afin de veiller à ce que les prix demeurent abordables (Thistlethwaite, 2012). C'est pourquoi, en plus de leurs propres recherches, les assureurs s'associent au milieu universitaire (p. ex. CCAP, 2012 et ACT, 2013) et s'assurent la participation d'intervenants externes dans le but d'encourager l'adoption de mesures d'adaptation. Par exemple, les assureurs collaborent avec des constructeurs de maisons, des consommateurs et les gouvernements en vue de les sensibiliser au sujet des risques relatifs aux changements climatiques et d'élaborer des outils d'évaluation et de gestion des risques. On remarque au nombre de ces mesures, la construction de maisons dont les caractéristiques surpassent les exigences actuelles du code du bâtiment, et lesquelles peuvent prévenir les dommages causés par un ouragan de catégorie 4, une tornade de catégorie 2 ou une averse importante (IPSC, 2007).

En règle générale, le secteur de l'assurance semble disposer de la capacité et des compétences nécessaires pour s'adapter aux changements climatiques. Les assureurs mettent en place plusieurs mesures d'adaptation, notamment l'ajustement de la couverture et des prix, la recherche sur les modèles climatiques en vue de fournir des renseignements utiles aux pratiques d'établissement des prix et la collaboration avec les intervenants qui exercent une influence

sur l'infrastructure et les codes du bâtiment. Toutefois, l'industrie doit obtenir plus d'information sur les répercussions financières des changements climatiques et des mesures d'adaptation (PNUE-IF et SBI, 2011). Même si l'utilisation de modèles climatiques, l'augmentation de la prime pour certains types de couverture et l'évaluation de la vulnérabilité des réserves financières en cas d'événements météorologiques rares constituent des premiers pas importants, l'information sur la contribution des changements climatiques aux risques financiers et sur les risques liés à la mise en place de mesures d'adaptation demeure floue. Une lacune au niveau des politiques et des règlements appuyant la mise en place de mesures d'adaptation propres à l'infrastructure et aux édifices représente un deuxième obstacle pour les assureurs; cette lacune est également mentionnée dans la documentation sur les autres secteurs (Mills, 2012). En l'absence d'information pouvant aider les assureurs à établir le prix de l'exposition aux risques relatifs aux changements climatiques et sans les améliorations à la conception de l'infrastructure aussi bien existante que future, les assureurs risquent de fixer des primes d'assurance trop onéreuses pour les entreprises et les propriétaires de résidences. (Mills et Lecomte, 2005).

ÉTUDE DE CAS 2

L'OUTIL D'ÉVALUATION DU RISQUE POUR LES MUNICIPALITÉS (OERM)

Le Bureau d'assurance du Canada (BAC) a déterminé que les changements climatiques étaient une question prioritaire pour ses membres (Robinson, 2011; McBean, 2012). Le manque de données sur les risques liés aux conditions météorologiques extrêmes est l'un des défis les plus importants auxquels le secteur de l'assurance est confronté. L'outil d'évaluation du risque pour les municipalités (OERM) a été mis au point en vue d'aider les assureurs à offrir une couverture en cas de précipitations abondantes (BAC, 2011a). Les dommages causés par les averses abondantes sont généralement attribuables aux inondations de sous-sols qui se produisent lorsque les égouts municipaux débordent.

Afin de mieux comprendre les risques liés aux inondations de sous-sols, le BAC a réuni un groupe d'experts formé d'hydrologistes, de spécialistes du climat, de gestionnaires des risques et d'ingénieurs de l'infrastructure, afin de mettre au point un outil permettant de déterminer les zones à risque d'exposition aux inondations de sous-sols à l'échelle du quartier. Les données sur les tendances existantes en matière de dommages causés par les inondations de sous-sols, l'hydrologie et les infrastructures en place sont combinées afin de dresser une carte des dangers illustrant une « représentation visuelle des zones à risque de refoulements d'égouts ». Ces zones à risque sont fondées sur les données climatiques historiques et futures, et elles attirent l'attention de la municipalité ainsi que des assureurs sur les vulnérabilités qui sont susceptibles d'augmenter avec les changements climatiques.

L'outil aidera les municipalités à calculer les coûts et les avantages d'éventuels investissements supplémentaires dans les infrastructures, à fournir de l'information sur les répercussions potentielles des changements climatiques et à mettre à jour les périodes de récurrence des pluies diluviennes. Dans le cas des assureurs, cet outil rendra le processus d'assurance plus précis. Il est difficile de produire des renseignements sur l'exposition aux risques et ces renseignements font l'objet d'une attention toute particulière de la part des personnes susceptibles de payer des primes plus élevées. Par exemple, les municipalités hésiteront à fournir aux assureurs de l'information qui pourrait entraîner une augmentation des tarifs dans un quartier donné. D'autre part, les assureurs pourraient faire face à des risques quant à leur réputation auprès des consommateurs s'ils augmentent leurs tarifs à des niveaux que certains pourraient considérer comme étant inabordables.

4.2 TOURISME

En raison de leurs liens étroits avec les conditions météorologiques et l'environnement naturel, on prévoit que les changements climatiques auront de nombreuses répercussions sur la durabilité et la compétitivité des destinations touristiques et des grands segments du marché touristique mondial. Les récents classements des répercussions des changements climatiques sur le tourisme à l'échelle mondiale ont toujours désigné le Canada comme pays ayant la capacité d'améliorer sa position concurrentielle à titre de destination internationale (Deutsche Bank Research, 2008; Scott et al., 2008). Des changements en matière de dépenses liées au tourisme émetteur et au tourisme national découlant des conditions météorologiques au Canada, une saison touristique chaude prolongée et améliorée et la diminution des voyages vers des destinations ensoleillées en hiver seraient avantageux pour le secteur du tourisme du Canada (Wilton et Wirjanto, 1998; Bigano et al., 2007; Scott et al., 2012a). Toutefois, on ne comprend pas bien le rôle que joue une vaste gamme de facteurs non climatiques (notamment le prix de l'essence et les frais de transport, les restrictions imposées aux frontières, les fluctuations monétaires, la réputation internationale, les tendances démographiques et les tendances du marché) dans la détermination du nombre de visiteurs en provenance des États-Unis et d'outre-mer, et la façon dont cela interagira avec les changements climatiques.

Puisque le tourisme national représente 80 pourcent des dépenses touristiques au Canada (Gouvernement du Canada, 2012a), une des priorités de recherche est de déterminer les répercussions potentielles des changements climatiques sur les principaux marchés de ce segment du secteur (Scott, 2006). Il est essentiel, aux fins de planification des mesures d'adaptation, de comprendre les répercussions régionales et locales et la façon dont la compétitivité et la durabilité des grands marchés touristiques pourraient être touchées par les changements climatiques.

LES SYSTÈMES DES PARCS

Les parcs nationaux et provinciaux font partie des attractions touristiques les plus connues du Canada. Les études portant sur les liens entre les conditions météorologiques et le nombre de visiteurs dans les parcs indiquent que, dans un scénario de changements climatiques, le nombre de visiteurs pourrait augmenter partout au pays. Si les tendances actuelles se maintiennent, les augmentations seront plus importantes dans le Canada atlantique, en Ontario et au Québec, et pourraient atteindre 30 pourcent dans tout le système de parcs nationaux d'ici les années 2050 (Jones et Scott, 2006). L'accroissement éventuel du nombre de visiteurs en raison d'une saison touristique chaude et prolongée a plusieurs répercussions sur les plans de l'économie, des services et de l'écologie dans le cas des parcs nationaux du Canada (Jones et Scott, 2006; Lemieux et Scott, 2011). Des changements dans la fréquence et l'ampleur des événements météorologiques extrêmes, comme les tempêtes de vent, les inondations et les feux de forêt, constitueront également un défi pour les organismes responsables des parcs en ce qui concerne les dommages à l'infrastructure, la sécurité des visiteurs et les interruptions des activités (Lemieux et Scott, 2011; Scott et al., 2012b). Par exemple, Parcs Canada a dû débourser plus de 14 millions de dollars en

2011 pour des opérations de réparation et de nettoyage à la suite d'événements météorologiques extrêmes (Lindell, 2012).

ACTIVITÉS DE LOISIR EN SAISON CHAUDE

En adoptant des mesures d'adaptation efficaces, les grands marchés touristiques de saison chaude du Canada pourraient tirer profit des changements climatiques prévus. L'industrie du golf et les destinations touristiques de golf de partout au pays pourraient voir leur saison et la demande augmenter, jusqu'à atteindre une prolongation maximale de 40 jours dès les années 2020 dans les régions des Grands Lacs et de l'Atlantique (Scott et Jones, 2007). Les mesures d'adaptation prises en vue d'accroître l'efficacité de l'irrigation présenteront un défi particulier dans les régions où les ressources en eau sont limitées ou affichent une tendance à la baisse.

La prolongation prévue de la saison de golf est également un indicateur relativement fidèle de la prolongation possible d'autres activités touristiques de saison chaude, notamment les parcs d'attractions thématiques ou aquatiques, les zoos, la navigation de plaisance, la pêche et les loisirs de plage (Jones et Scott, 2006; Dawson et Scott, 2012). Par exemple, à Toronto, qui exploite 14 plages publiques le long de son front d'eau, la saison de climat propice à la natation serait prolongée d'au moins 30 jours dans les années 2020 et jusqu'à 60 jours dans les années 2050 (Scott et Jones, 2006). Le maintien de la qualité de l'eau sera un des grands défis de l'adaptation puisque le pouvoir oxyphorique des lacs diminue au fur et à mesure que la température de l'eau augmente, ce qui contribue à la croissance accrue des algues et à d'autres problèmes de pollution de l'eau susceptibles de porter atteinte à l'esthétique des plages et à représenter un risque pour la santé des nageurs (Foghaden, 2012; NOAA, 2012). Il est possible que ces prolongations soient encore plus longues dans le cas d'autres activités touristiques importantes de nature aquatique qui nécessitent l'absence de glace (comme la navigation de plaisance et le canotage).

ACTIVITÉS DE LOISIR EN SAISON FROIDE

Contrairement aux marchés touristiques estivaux, une saison touristique hivernale détériorée et écourtée représente un risque pour le tourisme dans de nombreuses régions du Canada. Les risques que posent les changements climatiques pour les vastes secteurs du ski et de la motoneige ont beaucoup attiré l'attention des chercheurs, des médias et des dirigeants communautaires (Scott et al., 2012a). Les hivers chauds record aux courtes saisons de ski qu'ont connu l'Ontario et le Québec entre 2000 et 2010 ont entraîné une diminution des fréquentations de 10 à 15 pourcent (Scott et al., 2012a), mettant ainsi en évidence les répercussions possibles des futures tendances en matière de réchauffement. L'industrie touristique du ski risque de voir le couverture neigeuse naturelle diminuer et sa dépendance à la fabrication de neige augmenter. Dans l'est du Canada et les secteurs moins élevés de l'ouest du Canada, on prévoit des saisons de ski plus courtes et variables d'ici le milieu du siècle. Le nombre de sites skiables pourrait également diminuer en raison de l'augmentation certaine des coûts d'exploitation (Scott et al., 2006; Scott et al., 2007). En dépit de ces répercussions négatives sur l'industrie canadienne du ski, il y a toujours des débouchés puisque les données semblent indiquer que les répercussions seront plus prononcées dans les États de la Nouvelle-Angleterre et en Californie qu'au Québec et en Colombie-Britannique (Dawson et Scott, 2012; Scott et Steiger, 2012). Les secteurs des investissements et de l'immobilier ont déjà commencé à réagir à ces degrés de vulnérabilité, mais des données complètes doivent être recueillies avant que cette conclusion ne puisse être confirmée (Ebner, 2008; Butsic et al., 2011; Scott et al., 2012a).

Au Canada, l'industrie de la motoneige est plus vulnérable aux changements climatiques que l'industrie du ski, puisque le vaste réseau de sentiers de motoneige rend la fabrication de neige à grande échelle difficilement applicable. On prévoit que la longueur des saisons de motoneige dans les sentiers des régions non montagneuses du Manitoba à la Nouvelle-Écosse sera réduite jusqu'à 60 pourcent au cours des 20 prochaines années et les conditions propices à la pratique du sport pourraient presque disparaître, selon les scénarios où les températures sont les plus chaudes dans les années 2050 (McBoyle et al., 2007). Les tendances récentes du marché, caractérisées par la diminution des ventes de nouvelles motoneiges par rapport aux ventes de véhicules tout-terrain (Cycle Country, 2006), pourraient refléter une mesure d'adaptation à des tendances continues vers des températures plus chaudes. Les réseaux de sentiers de ski de fond dépendent également grandement des chutes de neige naturelle, mais sont moins vulnérables puisqu'il faut moins de neige pour tracer les pistes de façon sécuritaire et efficace et pratiquer le sport de façon récréative (Jones et Scott, 2006). Les répercussions économiques nettes de nature régionale, ou en fonction de la destination, des changements saisonniers dans les activités touristiques partout au Canada demeurent floues. Des analyses plus approfondies sont nécessaires afin de déterminer dans quelle mesure les pertes encourues durant la saison hivernale pourraient être compensées par les gains durant la saison estivale.

TOURISME AXÉ SUR LA NATURE

On a de plus en plus de preuves que les changements environnementaux causés par le climat auront une incidence sur le tourisme axé sur la nature quant aux choix des destinations. Dans le nord du Canada, les changements de condition de la glace prolongent la saison des croisières dans l'Arctique et permettent l'accès à des endroits qui étaient jusqu'à maintenant inaccessibles (Hall et Saarinen, 2010; Stewart et al., 2010). Le nombre des croisières planifiées dans l'Arctique canadien a plus que doublé entre 2005 et 2010 et le marché des touristes souhaitant explorer le Canada arctique lors de croisières maritimes devrait croître, tout comme il l'a fait dans l'Antarctique, en Norvège et au Groenland (Stewart et al., 2010). Les récentes tendances en matière de croisières offrent un aperçu de l'évolution de ce marché au cours des années à venir. Les trajets près de la section sud de l'île de Baffin et des rives de la baie d'Hudson sont moins achalandés au cours des dernières années, tandis que les activités dans les trajets plus nordiques, particulièrement dans le passage du Nord-Ouest, ont augmenté à mesure que ces endroits sont devenus plus accessibles (Stewart et al., 2010; Stewart et al., 2011). La glace marine pluriannuelle continue de présenter des conditions de déplacement dangereuses dans le passage du Nord-Ouest et à d'autres endroits, ce qui met l'accent sur l'importance de continuer d'améliorer les capacités de recherche et de sauvetage du Canada et son habileté à surveiller la circulation des navires de croisière dans la région afin d'assurer la croissance sécuritaire de ce nouveau marché (Stewart et al., 2011). D'autres consultations entre les collectivités et l'industrie des croisières en matière de règles de conduite lors de l'accostage et de collaboration améliorée avec des communautés d'accueil prêtes à accueillir un grand nombre de touristes sont également nécessaires, afin de veiller à ce que le tourisme contribue au développement durable de ces collectivités nordiques (Hall et Saarinen, 2010; Stewart et al., 2011).

Ailleurs dans le Nord, les répercussions des changements climatiques sur le tourisme sont très différentes. Le marché du tourisme d'observation des ours blancs à Churchill, au Manitoba, sera menacé au cours des 20 prochaines années par la détérioration des conditions de la glace sur la baie d'Hudson. Un sondage réalisé sur place auprès des touristes a révélé que si les populations d'ours blancs venaient à sembler « en mauvaise santé » (très maigres), ce qu'on commence déjà à remarquer, seulement 60 pourcent des visiteurs reviendraient dans la région (Dawson et al., 2010). Les répondants ont indiqué en grande majorité que, s'ils ne pouvaient observer les ours blancs à Churchill, ils iraient ailleurs pour les voir (Dawson et al., 2010), ce qui semble indiquer que les répercussions négatives sur une destination nordique donnée pourraient constituer un avantage pour d'autres collectivités.

Les changements qui touchent la biodiversité et la production faunique auront des répercussions sur d'autres secteurs du tourisme, particulièrement la pêche et la chasse sportives. Par exemple, la pêche sportive (nombre de jours de pratique de l'activité) augmentera vraisemblablement dans le nord de l'Ontario, en raison de l'augmentation de la population de doré jaune, tandis que les possibilités de chasse à l'orignal se porteront à des latitudes plus nordiques (Browne et Hunt, 2007). L'incertitude persiste au sujet des répercussions sur d'autres secteurs touristiques importants sur le plan économique, comme la pêche sportive, la chasse et l'observation de la faune (p. ex. l'ornithologie).

Les répercussions des changements environnementaux sur les paysages touristiques toucheront également l'image de la destination et sa demande auprès des touristes. Un sondage auprès des touristes sur leurs perceptions des changements environnementaux dans les parcs nationaux de Banff et des Lacs-Waterton a établi qu'il faudrait que des changements considérables aient lieu (p. ex. pertes importantes de glaciers visibles) avant qu'une grande proportion de visiteurs (au moins 30 pourcent) choisisse de ne plus visiter ces endroits (Scott et al., 2007). Cette observation correspond aux résultats de sondages auprès de touristes recueillis à divers endroits partout dans le monde (Scott et al., 2012a).

Ailleurs au pays, on a remarqué que d'autres changements environnementaux liés au climat, y compris la destruction des forêts par le dendroctone du pin ponderosa en Colombie-Britannique, les niveaux d'eau plus bas des Grands Lacs, l'érosion des plages et des côtes dans les provinces atlantiques, les proliférations d'algues et les feux de forêt au Manitoba, et la floraison précoce des tulipes à Ottawa, ont eu des répercussions sur le tourisme, mais les répercussions en fonction des régimes climatiques prévus n'ont pas été évaluées. Il est nécessaire de mieux comprendre les perceptions et les réactions des touristes en matière de changements environnementaux, afin de contribuer à l'élaboration de stratégies d'adaptation efficaces (Gossling et al., 2012).

Les répercussions des changements environnementaux sur le tourisme peuvent changer au fil du temps, et ce, peu importe la destination. Lemelin et al. (2010, 2012) soutiennent que des changements environnementaux observés et prévus causés par le climat ont donné naissance à un nouveau marché appelé « tourisme de la dernière chance », où les touristes visitent un endroit ou une attraction avant sa « disparition » en raison des changements climatiques. À court terme, certaines destinations canadiennes pourraient donc tirer profit du nombre accru de visiteurs souhaitant être témoins de l'évolution des paysages, pour ensuite connaître un déclin des activités touristiques au fur et à mesure que cette attraction environnementale se détériore (Scott et al., 2012a).

ADAPTATION

Les exploitants d'entreprises touristiques ont mis en place une vaste gamme de mesures d'adaptation qui leur permettent de réaliser leurs activités dans toutes les zones climatiques du Canada, notamment la fabrication de neige, l'irrigation, la climatisation de l'air, l'aménagement de « paysages intelligents » dans le but de prévenir les incendies, la diversification des activités selon les saisons, la communication par caméra Web, le marketing direct au moyen d'Internet et des médias sociaux, et les produits d'assurance et financiers, comme les garanties de neige et de beau temps (Scott et al., 2012a). Bon nombre de ces stratégies seront utiles lorsqu'il s'agira de s'adapter aux futurs changements climatiques; toutefois, la motivation derrière la mise en place de ces stratégies a presque uniquement été la gestion des répercussions de la variabilité et des extrêmes climatiques actuels (Scott et al., 2012a). Les entreprises touristiques, les exploitants d'entreprises touristiques gouvernementaux ou les agences de marketing, et les collectivités qui dépendent du tourisme au Canada ne semblent pas avoir évalué la capacité des mesures actuelles d'adaptation au climat de composer avec les futurs changements climatiques pas plus que leur durabilité financière ou environnementale à long terme (Scott et Jones, 2006; Dodds et Kuenzig, 2009; Lemieux et al., 2011; Scott et al., 2012b).

Les évaluations sur l'état des mesures d'adaptation aux changements climatiques axées sur l'avenir dans l'industrie du tourisme, tant à l'échelle internationale qu'au Canada, ont toujours conclu à des niveaux faibles, mais croissants, de sensibilisation aux changements climatiques, à de faibles perceptions des risques relatifs aux changements climatiques et à un optimisme considérable sur la capacité d'adaptation afin de surmonter les obstacles que présentent les changements climatiques (KPMG 2010; OCDE et PNUE, 2011; Scott et al., 2012b). Toutefois, la nature hautement compétitive de l'industrie signifie que, pour des raisons commerciales stratégiques, les stratégies d'adaptation aux changements climatiques ne sont pas habituellement communiquées au public. Ainsi, il est possible que le niveau d'adaptation de l'industrie soit sous-estimé (Scott et al., 2012b).

Voici quelques exemples de mesures d'adaptation proactives prises par l'industrie du tourisme au Canada :

- Parcs Canada a commencé à tenir compte de la fonte des glaciers des parcs nationaux de Banff et de Jasper dans sa planification du réaménagement des sites d'observation et des centres d'interprétation situés près de ces grandes attractions. L'agence a également commencé à intégrer l'érosion côtière liée à l'élévation du niveau de la mer dans la planification des infrastructures du parc national du Canada de l'Île-du-Prince-Édouard (Lemieux et al., 2011).
- La Tourism Industry Association of British Columbia a commencé à élaborer un plan d'action à l'égard du tourisme en réaction aux dommages actuels et futurs causés par le dendroctone du pin ponderosa (Council of Tourism Associations of British Columbia, 2009).
- Au Revelstoke Mountain Resort (Revelstoke, Colombie-Britannique), des investisseurs ont tenu compte des répercussions possibles des changements climatiques sur l'industrie du ski et des marchés immobiliers connexes de l'ouest de l'Amérique du Nord dans le cadre de leur important plan de développement à long terme (Ebner, 2008).
- Parcs Ontario a déterminé et évalué une vaste gamme de stratégies d'adaptation dans ses six grands secteurs de programmes (politiques, planification des systèmes et législation; direction de la gestion; activités et développement;

recherche, surveillance et production de rapports; culture et fonction d'entreprise; éducation, interprétation et sensibilisation), dont plusieurs sont liées aux loisirs, au tourisme et à l'éducation en matière d'interprétation (Lemieux et al. 2008).

- Whistler Blackcomb (Whistler, Colombie-Britannique) a entrepris une évaluation complète de ses risques climatiques et mis au point un plan d'adaptation à stratégies multiples (TRNEE, 2012a; *voir* l'étude de cas 3).

Malgré ces exemples, les mesures d'adaptation axées sur l'avenir dans l'industrie du tourisme semblent demeurer une priorité de faible importance. Pour pouvoir aller de l'avant, il faut de meilleurs renseignements auxquels les exploitants d'entreprise de tourisme peuvent avoir recours pour comprendre les répercussions des changements climatiques et la rentabilisation des mesures d'adaptation possibles, ainsi que l'élaboration de politiques et, vraisemblablement, de règlements pour appuyer le concept de l'adaptation. Par exemple, le manque de données sur les coûts et les avantages des mesures d'adaptation est considéré comme un obstacle important à l'adaptation efficace dans l'industrie du tourisme (Lemieux et al., 2011). De plus, la plupart des entreprises touristiques sont petites ou moyennes et n'ont ni l'expertise ni la capacité requises pour évaluer les répercussions des changements climatiques à l'échelle locale sur leur entreprise et mettre en place des stratégies d'adaptation efficaces (Scott et al., 2008; Scott et al., 2012a).

Le faible niveau de préparation de l'industrie du tourisme (Scott et al., 2008; KPMG, 2010) a été attribué à la perception répandue au sein de l'industrie que l'adaptation aux changements climatiques relève de la responsabilité du gouvernement (Scott et al., 2012a) et que les longs délais associés aux répercussions des changements climatiques ne correspondent pas aux délais plus courts qui régissent le processus de planification des activités, faisant ainsi des mesures d'adaptation une priorité de faible importance. Cette conclusion semble indiquer que, tel qu'il s'agit dans le cas d'autres secteurs, le gouvernement a la responsabilité de fournir de l'information et des lignes directrices dans le but d'encourager la mise en place de mesures d'adaptation. Cette observation est d'autant plus importante pour un pays comme le Canada, où les changements climatiques représentent tant un risque qu'un débouché pour l'industrie du tourisme. Il importe de comprendre ces possibilités et de s'y préparer, en vue de motiver l'industrie à s'engager plus à fond.

4.3 CONSTRUCTION RÉSIDENTIELLE

L'analyse des répercussions des changements climatiques sur le secteur du logement se concentre principalement sur les risques liés aux répercussions directes, particulièrement l'augmentation des dommages aux biens causés par des conditions météorologiques extrêmes plus fréquentes et intenses. Les résidences sont construites en fonction d'un climat stable. Les conditions météorologiques extrêmes liées aux changements climatiques peuvent facilement dépasser le seuil calculé de ces structures et causer des dommages (Auld et al., 2008). Au Canada, au cours des 20 dernières années, le secteur de l'assurance a noté une augmentation importante des dommages aux résidences causés par les conditions météorologiques extrêmes. En effet, les dommages causés par les intempéries ont remplacé les incendies et le vol comme principal motif de réclamations (McBean, 2012).

Une augmentation des dommages causés par l'eau en raison des refoulements d'égouts et des inondations de sous-sols représente la majorité de ses réclamations. Chez Intact Corporation financière, le plus important assureur d'habitations au Canada, les réclamations pour dommages causés par l'eau sont passées de 20 à 50 pourcent de toutes les réclamations relatives aux biens au cours des neuf dernières années (SFI, 2012). Selon le Bureau d'assurance du Canada, les dommages causés par l'eau ont représenté près de 1,7 milliard de dollars réclamés en 2011 (BAC, 2012c). Une étude récente a combiné les données historiques sur les précipitations et les réclamations dans le but de confirmer que les changements climatiques entraîneront une augmentation des dommages causés par l'eau dans plusieurs bassins hydrographiques de l'Ontario (Cheng et al., 2012).

Dans son plus récent rapport sur les conditions météorologiques extrêmes, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat conclut que « de petites augmentations des phénomènes climatiques extrêmes au-dessus des seuils ou des points critiques des infrastructures régionales pourraient entraîner de grandes augmentations des dommages à tous les types d'infrastructure en

ÉTUDE DE CAS 3

PLAN D'ADAPTATION DE WHISTLER BLACKCOMB

En 2009, le centre de ski Whistler Blackcomb a reconnu que son succès dépendait d'un climat stable et que les changements climatiques touchaient l'ensemble de ses activités. Pour combattre ce problème, le centre a mis en place un cadre stratégique en sept étapes, afin de limiter les risques liés aux changements climatiques auxquels il fait face (figure 4). La première étape consiste en l'évaluation des risques au moyen de scénarios de changements climatiques, afin de produire de l'information sur la façon dont les changements climatiques toucheront les activités du centre. Cette information a été utilisée pour orienter la quatrième étape du cadre, qui comprenait la détermination de mesures clés susceptibles de favoriser l'adaptation. Deux de ces mesures consistaient à doubler la capacité de fabrication de neige et à optimiser la couverture neigeuse afin de réduire les répercussions causées par une hausse de la température. Le centre a également élaboré une gamme d'activités pour la période creuse, comme la randonnée et le vélo de montagne, afin de diversifier ses activités et de ne pas se concentrer seulement sur les activités hivernales (TRNEE, 2012a).

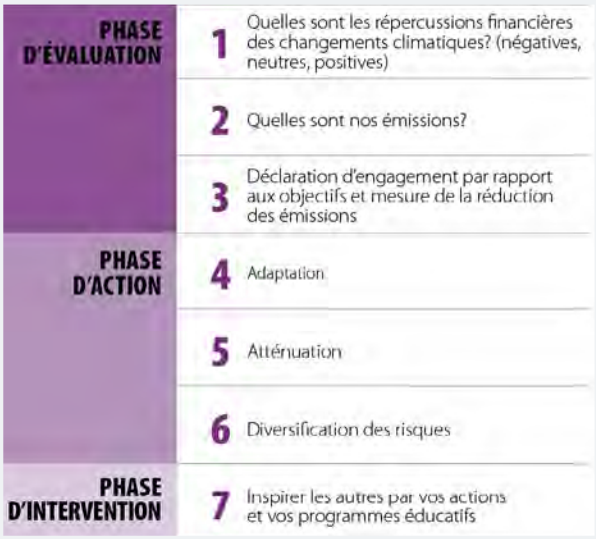


FIGURE 4: Stratégie relative aux changements climatiques de Whistler Blackcomb.

place à l'échelle nationale et accroître les risques de catastrophes [traduction] » (Lal et al., 2012, p. 366). Des études réalisées en Australie ont démontré qu'une augmentation de la vitesse des vents peut considérablement augmenter les dommages causés à la structure de divers immeubles (Coleman, 2002), tandis que d'autres analyses se sont concentrées sur les dommages causés par les intempéries extrêmes, les inondations et le surchauffement (Graves et Phillipson, 2000; Camilleri, 2001). Un accroissement graduel des températures et des précipitations pose également un risque pour les logements, puisqu'il sera vraisemblablement lié à l'amplification des processus de météorisation, qui sont responsables de la détérioration progressive de la qualité des constructions (Auld, 2008). Les glissements de terrain et les dommages aux fondations représentent d'autres risques liés aux changements climatiques pour les logements, bien qu'aucune recherche n'a encore été entreprise au Canada à ces sujets (Swiss Re, 2011).

Tel que déjà mentionné dans la discussion sur les assurances (section 4.1), les augmentations des dommages aux biens ne peuvent pas toutes être liées aux changements climatiques. Les changements au niveau des phénomènes météorologiques extrêmes ne constituent qu'un facteur parmi plusieurs responsables de l'augmentation des taux de dommages au parc de logements. Un facteur plus important encore : aujourd'hui plus que jamais, plus de personnes et de biens sont exposés et vulnérables aux changements se manifestant au niveau des régimes climatiques extrêmes (GIEC, 2012). Les infrastructures vieillissantes et le parc de logements, conjugués à un mauvais aménagement du territoire qui permet aux entrepreneures de bâtir dans des zones déjà exposées aux phénomènes météorologiques extrêmes, intensifient les effets des changements climatiques (Cutter et al., 2012; Lal et al., 2012; Seneviratne et al., 2012).

Les répercussions indirectes possibles des changements climatiques sur les logements comprennent les changements au niveau des attitudes des consommateurs (p. ex. une demande croissante d'habitations résistantes), l'augmentation de pressions de nature réglementaire (p. ex. des changements aux codes du bâtiment) ou l'augmentation du passif financier (p. ex. des conditions de prêts ou d'assurance plus strictes; Hertin et al., 2003; voir aussi Sanders et Phillipson, 2003; Rousseau, 2004). Ces répercussions indirectes pourraient jouer un rôle important dans la création de mesures incitatives commerciales visant à encourager les constructeurs à adopter des mesures d'adaptation.

Il n'existe aucune donnée publique au Canada sur les dommages aux habitations causés par le climat, ce qui explique pourquoi les renseignements sur les assurances constituent le meilleur indicateur disponible. Une étude récente a permis d'établir que les constructeurs d'habitations ne s'étaient pas rendus compte que les dommages accusaient une tendance à l'augmentation, réduisant ainsi les possibilités qu'ils adaptent la conception des habitations et les pratiques de construction afin de réagir de manière proactive aux changements climatiques (IPSC, 2012).

ADAPTATION

Pour la plupart des intervenants du secteur résidentiel, l'adaptation aux changements climatiques est une nouvelle préoccupation, où la recherche et les politiques en la matière visent principalement l'atténuation (amélioration de l'efficacité énergétique; p. ex. Parker et al., 2000; Scott et Rowlands, 2000; Hertin et al., 2003; ARUP, 2008; Morna et van Vuuren, 2009; St. Denis et Parker, 2009) . Par exemple, on a récemment ajouté des clauses au code du bâtiment de l'Ontario exigeant que les habitations respectent une norme d'efficacité énergétique assez stricte (Lio and Associates, 2010; Laporte, 2011). L'industrie utilise de nombreux outils et pratiques qui, jusqu'à maintenant, ont servi à titre de mesures réactives à la variabilité climatique et aux conditions météorologiques extrêmes existantes, mais qui pourraient aussi servir à encourager l'adoption de mesures d'adaptation.

Les codes du bâtiment (Sanders et Phillipson, 2003; Lowe, 2004; Kovacs, 2012), l'aménagement du territoire (Hertin et al., 2003; Deilmann, 2004; Lowe, 2004), les politiques de rénovation (ARUP, 2008; Sandink et McGillivray, 2012) et la planification financière (Hertin et al., 2003; Milne, 2004) sont tous des moyens pouvant servir à encourager l'adaptation aux changements climatiques dans l'industrie du logement. L'utilisation de ces outils dépend du soutien de plusieurs intervenants, y compris les constructeurs, les organismes de réglementation, le secteur des services financiers et les consommateurs (figure 5).

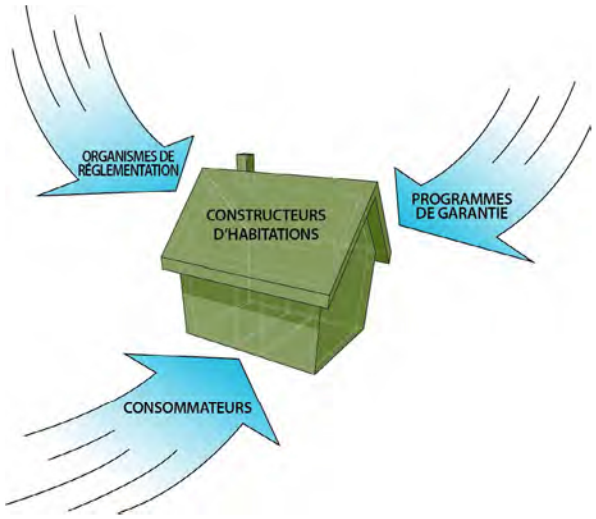


FIGURE 5: Le rôle des intervenants externes dans la promotion de l'adaptation sur le marché du logement.

CODE DU BÂTIMENT

La plupart des pays développés utilisent un code du bâtiment normalisé comme norme minimale pour la conception et la construction d'habitations. Jusqu'à présent, le code du bâtiment du Canada a utilisé des données sur les tendances climatiques actuelles et historiques afin de guider le choix des paramètres de conception de maisons en fonction du climat. Toutefois, on présente souvent le code comme l'un des outils les plus utiles à la promotion de l'adaptation dans les nouvelles maisons (Sanders et Phillipson, 2003; Lowe, 2004). Une orientation normative sur les pratiques de construction plus résistantes et des paramètres de construction en fonction du climat à jour fondés sur les tendances météorologiques nouvelles et futures peuvent être intégrés au code du bâtiment à titre de stratégie d'encouragement à l'adoption de mesures d'adaptation dans la construction de nouvelles habitations (Auld, 2008; Thistlethwaite et al., 2012). Par exemple, l'Initiative de normalisation des infrastructures du Nord vise l'élaboration d'information sur les changements climatiques en vue de la mise à jour des codes et des normes qui guident les activités de construction dans les régions à climat nordique (Conseil canadien des normes, 2013).

AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

L'aménagement du territoire peut servir à favoriser la construction de nouvelles habitations dans des régions protégées contre les dangers liés aux événements météorologiques extrêmes actuels et futurs (Richardson et Otero, 2012). À l'instar des codes du bâtiment, l'aménagement du territoire se fonde sur les données climatiques actuelles et historiques en vue d'établir des règles. Toutefois, comme l'ont démontré des exemples provenant de partout au monde, des modèles climatiques peuvent servir à expliquer la façon dont cet aménagement doit être modifié en réaction aux changements graduels et futurs du climat. En Allemagne, par exemple, la modélisation des plaines inondables basée sur le SIG sera intégrée aux modèles climatiques et hydrologiques, afin de guider la prise de décisions en matière de futur aménagement du territoire (Deilmann, 2004). En outre, l'aménagement du territoire peut mener à une réduction considérable des dommages causés par les inondations lors d'ondes de tempête (Mills, 2009b). Aux Pays-Bas, on étudie présentement de nouvelles stratégies d'aménagement du territoire qui préservent l'espace naturel dans les secteurs où l'on prévoit que les changements climatiques augmenteront les risques d'inondations terrestres (Leven met Water, 2007).

RÉNOVATION DES MAISONS EXISTANTES

Bien que le code du bâtiment et l'aménagement du territoire favorisent le recours aux mesures d'adaptation pour les nouvelles maisons, ce sont les habitations existantes qui sont les plus vulnérables aux événements météorologiques extrêmes et aux changements climatiques (ARUP, 2008). Le parc de logements actuel a été construit selon d'anciennes normes et est lié à une infrastructure plus âgée. Les politiques encourageant les rénovations conçues en vue d'améliorer la résistance aux phénomènes météorologiques extrêmes des maisons actuelles constituent la stratégie d'adaptation la plus efficace (Steemers, 2003; Sandink et McGillivray, 2012). Par exemple, bon nombre de municipalités canadiennes ont mis en place des programmes de subventions en vue d'encourager l'installation de clapets anti-retour dans le but de réduire les dommages causés par les inondations attribuables à une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des précipitations (Sandink, 2011). Les subventions peuvent également servir à financer la reconstruction à la suite d'événements météorologiques extrêmes afin d'améliorer la résistance aux futurs risques liés aux changements climatiques (Sandink et McGillivray, 2012). Par exemple, le scellage des espaces vides autour des tuyaux, des câbles, des fenêtres et des cadres de porte peut limiter les dommages que pourraient causer les futures inondations (ARUP, 2008).

FINANCEMENT DE L'ADAPTATION

L'adaptation peut également avoir lieu grâce à l'amélioration de la planification financière. Cela peut comprendre l'élargissement des budgets afin de permettre une plus grande couverture de responsabilité civile en cas de dommages aux sites de construction, ou l'achat de terres protégées contre les risques liés aux changements climatiques. Les programmes de garantie, qui assurent une habitation contre les dommages durant les premières années suivant la construction, sont probablement les plus exposés aux risques climatiques (Milne, 2004). Il faudrait pouvoir prévoir un élargissement possible des réserves financières pour ces programmes. Les tarifs d'assurance pourraient aussi augmenter en raison du fait que les phénomènes météorologiques extrêmes se produisent plus fréquemment. Afin de réduire ces coûts, la demande des consommateurs en matière de pratiques de construction plus résistantes augmentera sans doute (Milne, 2004).

Il convient de remarquer que ces outils demeurent sous-utilisés au Canada aux fins d'adaptation en raison de divers obstacles relevés dans les recherches internationales. Les constructeurs d'habitations ne disposent pas de l'information ni de la capacité nécessaires à la mise en place de mesures d'adaptation et la demande du marché à ce sujet ne suffit pas à encourager la prise de ces mesures dans le secteur (Hertin et al., 2003; Liso et al., 2003; voir aussi Sanders et Phillipson, 2003; Lowe, 2004; Kovacs 2012). Plus d'information doit être recueillie si l'on veut mieux comprendre les répercussions locales du climat sur la conception des immeubles et la rentabilité de la modification de la conception afin d'en améliorer la résistance aux risques climatiques. Il est également nécessaire d'avoir la capacité d'élaborer les solutions d'adaptation appropriées telles les nouvelles techniques ou technologies de conception (Sanders et Phillipson, 2003; Lowe, 2004). Il est difficile d'inciter les experts en conception d'immeubles à tenir compte des changements climatiques en raison de la précision spatiale des prévisions climatiques, qui est telle qu'elle ne permet pas d'établir des exigences en matière de conception conçues en vue de protéger les habitations contre les conditions météorologiques violentes qu'engendreront les changements climatiques (Sanders et Phillipson, 2003; Lowe, 2004). De plus, les conceptions fondées sur les prévisions représentent une révolution conceptuelle importante par rapport au code du bâtiment et aux méthodes de conception actuelles qui s'appuyent essentiellement sur l'expérience historique (Lowe, 2004; Kovacs, 2012).

Les demandes du marché ont aussi une incidence sur les décisions des acteurs clés du secteur de l'habitation (Rousseau, 2004). L'adaptation peut ajouter des coûts à la construction d'une maison si de nouvelles technologies ou pratiques de conception y sont intégrées. Il est peu probable que les constructeurs appuient des pratiques de conception plus résistantes, sauf si le consommateur demande les améliorations et est prêt à en assumer les coûts; si des règlements exigeant l'adaptation sont adoptés (code du bâtiment, aménagement du territoire); ou s'ils sont plus sujets à subir un examen financier de la part de leurs investisseurs et assureurs (Hertin et al., 2003; Milne, 2004; ARUP, 2008). Les pressions du marché servent également à alimenter l'opposition au sein des constructeurs en ce qui concerne les modifications au code du bâtiment ou à l'aménagement du territoire, puisqu'elles peuvent mener à une augmentation des coûts d'opération (Liso et al., 2003). Néanmoins, on reconnaît que le code du bâtiment est un outil important pour faire progresser l'adaptation (p. ex. Environnement Canada, 2010) et qu'il est tout aussi important de trouver des façons d'y intégrer des mesures d'adaptation s'appliquant à la construction de nouvelles habitations (Ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2011; Commissaire à l'environnement de l'Ontario, 2012).

La présente analyse laisse entendre que les progrès en matière d'adaptation au sein de l'industrie du logement dépendent fortement des intervenants externes, comme les consommateurs ou les autorités en matière du code du bâtiment. Il est peu probable que les constructeurs d'habitation mettent en place des mesures d'adaptation sans avoir plus d'information sur les risques locaux liés aux changements climatiques, les demandes des consommateurs, les modifications au code du bâtiment ou à l'aménagement du territoire, qui favorise le recours à des pratiques de construction plus résistantes. La recherche sur les coûts et les avantages de la mise en place de certaines rénovations ou modifications au code du bâtiment s'avère être une lacune particulièrement importante (IPSC, 2012). La collaboration entre les spécialistes du bâtiment, le secteur de l'assurance et les constructeurs constitue la première étape essentielle à l'élaboration de cette recherche (*voir* l'étude de cas 4).

ÉTUDE DE CAS 4

BÂTIR UNE HABITATION QUI DÉPASSE LES EXIGENCES DU CODE DU BÂTIMENT

Les changements climatiques pourraient entraîner une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des épisodes de vent violent. On a déterminé bon nombre de pratiques de construction pouvant réduire le risque de perte et de dommages causés par des épisodes de vent violent, mais elles sont rarement mises en application lors de la construction d'une nouvelle habitation (IPSC, 2010). Par conséquent, on produit rarement de l'information importante pouvant contribuer à la promotion de l'adaptation au sein de l'industrie du logement, notamment au sujet des coûts, des compétences et des matériaux nécessaires à la construction de ces habitations.

L'Institut de prévention des sinistres catastrophiques a établi un partenariat avec la Compagnie d'assurance générale Co-operators afin de combler cet écart en construisant des « maisons modèles », qui tiennent compte de bon nombre des préoccupations techniques des constructeurs en ce qui a trait à la construction d'une habitation résistante au climat. La première maison a été bâtie à West Point, à l'Île-du-Prince-Édouard, à la suite d'un incendie qui a ravagé l'habitation originale. La conception et la construction ont intégré plusieurs nouvelles technologies et pratiques qui rehaussent les exigences déjà en place dans le code du bâtiment, afin de faire en sorte qu'une habitation puisse résister aux vents violents. Ces améliorations à la conception ont été élaborées grâce à des recherches effectuées à la soufflerie à couche limite de l'Université Western Ontario. Les caractéristiques sont données au tableau 4.

Caractéristique	Objectif
Tiges d'acier de 1 po (2,5 cm) de diamètre pour joindre les planchers (entre le rez-de-chaussée et la fondation)	S'assurer que l'habitation est arrimée au sol afin d'atténuer l'effet de soulèvement exercé par la pression du vent
Des contrevents qui relient les fermes à la charpente de l'habitation	Réduire les risques que le toit soit soulevé de l'habitation lors d'épisodes de vent violent
Des bardeaux spéciaux pouvant résister à des vents de 200 km/h	Réduire les dommages aux bardeaux lors de grands vents, atténuant ainsi les risques que la pluie s'infiltre dans l'habitation
Lourd voligeage lié par des clous à tige annulaire	Réduire la possibilité que le voligeage se soulève du toit lors de vents intenses
Bandes adhésives résistantes aux intempéries recouvrant chaque joint du toit dans le voligeage	Empêcher l'eau de s'infiltrer par les joints dans le voligeage
Scellement résistant à l'eau autour des fenêtres et des portes	Limiter l'infiltration de l'eau de pluie
Parement, bordure de toit et soffites résistants au vent	Limiter l'infiltration de l'eau de pluie

TABLEAU 4: Caractéristiques et objectifs de la conception de la « maison modèle » (*Source : IPSC, 2010*).

Bien qu'il soit possible d'intégrer ces caractéristiques du code et de sécurité dans la construction d'habitations abordables, plus de recherche s'impose afin de confirmer leur rentabilité quant à l'atténuation des risques liés aux phénomènes météorologiques extrêmes (Oulehan, 2010). Plusieurs d'entre elles pourraient être intégrées dans des révisions au code du bâtiment, de sorte que la prochaine génération d'habitations soit plus en mesure de prévenir les dommages causés par les intempéries violentes qu'engendreront les changements climatiques (Thistlethwaite et al., 2012).

Après la construction de la maison, elle a été exposée à plusieurs reprises à des vents violents pouvant atteindre la force d'un ouragan et elle n'a subi aucun dommage. Bien que ce projet ait contribué à démontrer les avantages liés au recours à des pratiques avancées de construction, il faut procéder à plus de recherche en vue d'établir si les avantages de l'application de ces technologies à toutes les habitations dépassent les coûts.

4.4 SECTEUR MANUFACTURIER

Les documents portant sur les changements climatiques dans le secteur manufacturier du Canada traitent presque uniquement des mesures d'atténuation, tandis que l'information sur les répercussions du climat, les risques, les possibilités et les stratégies adoptées en vue de favoriser le recours à des mesures d'adaptation n'est pas bien élaborée.

Les recherches internationales ont démontré que les changements climatiques peuvent avoir de nombreuses répercussions physiques sur le secteur manufacturier. Les changements dans l'environnement peuvent limiter la disponibilité de matières clés utilisées dans la production telles que l'eau ou le bois d'œuvre, menant ainsi à une augmentation des coûts pour les fabricants. Par exemple, les feux de forêt, les ravageurs, les maladies et les changements dans les cycles de croissance pourraient entraîner une diminution dans le taux de productivité des forêts (TRNEE, 2011; *voir* le chapitre 3), ce qui, en retour, pourrait faire augmenter les coûts des matériaux de production tels les produits de bois de construction et les pâtes et papiers. Les pénuries en eau représentent un risque pour les processus industriels nécessitant de l'eau pour le refroidissement, l'irrigation, le nettoyage ou le raffinage des matières premières (Morrison et al., 2009).

Les températures élevées pourraient limiter la production en raison du fait qu'elles créent des conditions dans lesquelles il est impossible pour les employés de travailler (Agrawala et al., 2011). Des études internationales semblent notamment indiquer que les températures et l'humidité élevées peuvent contribuer à une diminution du taux de productivité et augmenter les risques pour la santé (Hanna et al., 2011; Kjellstrom et Crowe, 2011; Dunne, Stouffer et John, 2013). Les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent également nuire aux activités, en causant des dommages à l'infrastructure et en interrompant les chaînes d'approvisionnement. Par exemple, un ouragan atlantique pourrait interrompre le transport critique de matériaux et causer la fermeture d'usines de fournisseurs dans le sud de l'Ontario (TRNEE, 2012b).

Les changements au niveau des demandes et des préférences des consommateurs liés aux changements climatiques (et à une sensibilisation accrue au sujet de l'environnement au sein du public et des intervenants) présentent des possibilités indirectes et des risques pour divers domaines du secteur manufacturier. En règle générale, des hivers plus doux et des étés plus chauds pourraient augmenter la demande pour certains produits de consommation et la diminuer pour d'autres (p. ex. une augmentation de la demande en climatiseurs en été; Wilbanks et al., 2007; *voir* le chapitre 3). Les domaines du secteur manufacturier émettant des gaz à effet de serre pourraient être à risque puisque les consommateurs commencent à se procurer des produits écoénergétiques, contribuant ainsi à atténuer les effets des changements climatiques (Ceres, 2010).

ADAPTATION

Bien que le secteur manufacturier du Canada participe à certaines initiatives d'adaptation (*voir* l'étude de cas 5), des mesures d'adaptation particulières ne sont pas consignées dans la documentation disponible. Toutefois, les recherches internationales offrent un aperçu des stratégies du secteur, en ce qui concerne la façon de gérer la variabilité climatique et les conditions météorologiques extrêmes actuelles. Ces stratégies sont considérées comme des « mesures douces », susceptibles de pouvoir aider à intégrer l'adaptation aux changements climatiques dans l'ensemble de l'entreprise ou du secteur en introduisant la prise en considération des répercussions climatiques à plus long terme (Agrawala et al., 2011).

On utilise souvent des systèmes de gestion environnementale sur place afin de gérer les changements au niveau de la disponibilité en eau ou en énergie, ou en cas de phénomènes météorologiques extrêmes (Agrawala et al., 2011). La gestion des chaînes d'approvisionnement constitue une autre stratégie à laquelle les fabricants ont recours en vue d'atténuer les risques liés aux phénomènes météorologiques extrêmes. Par exemple, l'élaboration de stratégies favorisant la souplesse des chaînes d'approvisionnement peut mener à une réduction des dommages causés par les phénomènes météorologiques extrêmes. Le recours à plusieurs fournisseurs, la production de biens à différentes installations et la production de surplus de biens, dont la fabrication est sujette à de fréquentes interruptions sont tous des façons d'améliorer la résistance des chaînes d'approvisionnement aux phénomènes météorologiques extrêmes et à la variabilité du climat (Agrawala et al., 2011). Les fabricants utilisent également la planification de la continuité des activités pour faire face aux conditions météorologiques extrêmes. La planification proactive en cas d'interruption imprévue peut considérablement contribuer à atténuer le coût lié à ces conditions (Forfas, 2011). En outre, la plupart des fabricants souscrivent à une assurance des pertes d'exploitation qui peut aider à récupérer les revenus perdus en cas d'interruption des opérations causée par des phénomènes météorologiques extrêmes (Chasan, 2012).

Bien que dans leurs rapports sur la résistance des entreprises, les membres de la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE) portent une attention toute particulière aux répercussions plus vastes des changements climatiques sur le secteur des entreprises, plutôt que sur la fabrication en particulier, ils soulignent toutefois quelques obstacles à l'adaptation efficace touchant ce secteur et communs aux secteurs discutés dans le présent chapitre. Les fabricants ont du mal à transposer les répercussions et les risques relatifs aux changements climatiques en renseignements qui leur seront utiles lorsqu'il s'agit de prendre des décisions en ce qui concerne les processus clés. De plus, le secteur n'est pas convaincu des avantages ou de l'efficacité de l'adaptation, en tant que stratégie opérationnelle (TRNEE, 2012b). La recherche indique également que l'absence de règlements ou de politiques encourageant les fabricants à réduire leur exposition aux répercussions des changements climatiques est un obstacle important. Par exemple, des règlements réduisant l'utilisation d'eau pour les processus de fabrication dans des régions où on prévoit que la rareté de l'eau augmentera pourraient constituer pour les entreprises un important facteur motivant en matière de leur adoption de mesures d'adaptation (TRNEE, 2012b).

4.5 COMMERCE

La recherche sur le lien entre l'adaptation aux changements climatiques et le commerce n'en est encore qu'à ses débuts. Les changements apportés à l'avantage commercial comparatif et aux chaînes d'approvisionnement qui appuient les réseaux commerciaux mondiaux sont les deux principales répercussions attribuables aux changements climatiques (Tamiotti et al., 2009). Les pays, dont l'avantage comparatif dépend de l'agriculture, sont les plus à risque de subir les effets des changements climatiques (Perez-Garcia et al., 2002; Julia et Duchin, 2007; Tamiotti et al., 2009). L'exposition du Canada à ces marchés est minime en comparaison avec les États-Unis, l'Union européenne ou le Japon (MAECD, 2012). Il a été démontré que les chaînes d'approvisionnement touchant les marchés canadiens sont exposées aux risques relatifs aux changements climatiques. En 2011, par exemple, des inondations en Thaïlande ont entraîné l'interruption des chaînes

ÉTUDE DE CAS 5

RIO TINTO ALCAN

Rio Tinto Alcan est l'un des plus importants fabricants d'aluminium au monde (TRNEE, 2012a). Les opérations de fusion qui forment une grande partie des activités de l'entreprise dépendent d'importants investissements de capitaux, de longs délais associés à de nouveaux développements et de chaînes d'approvisionnement allégées. Un des aspects importants de la gestion des installations et des opérations consiste à s'assurer qu'aucun chaînon de la chaîne d'approvisionnement ne subit de délai ou d'interruption. Le fait de ne pas tenir compte des conséquences possibles d'événements pouvant nuire à l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement peut entraîner d'importantes pertes pour l'entreprise. Par exemple, en 2011, le marché de l'aluminium a fait face à des interruptions de production en raison d'inondations le long des ports du fleuve Mississippi (TRNEE, 2012a). Afin d'améliorer le rendement de l'entreprise et de s'adapter aux changements climatiques prédits, Rio Tinto Alcan élabore un cadre en matière de changements climatiques, qui aidera l'entreprise à évaluer la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement et des opérations, ainsi que de l'infrastructure, aux risques relatifs aux changements climatiques.

Ce cadre est conçu en vue de cerner une grande variété de risques, y compris la vulnérabilité des systèmes de transport, le potentiel d'interruption des opérations essentielles en raison des conditions météorologiques extrêmes, et la variation dans les capacités de génération d'énergie. Il reconnaît l'importance de la prise en considération des scénarios de changements climatiques, et l'entreprise a formé une alliance de recherche coopérative avec le consortium Ouranos afin d'améliorer son niveau de compréhension des répercussions des changements climatiques sur le bassin du lac Saint-Jean, au Québec. Ces initiatives permettront à l'entreprise d'intégrer les répercussions des changements climatiques à la composante sur la gestion des risques et l'adaptation de son modèle d'entreprise.

d'approvisionnement vers les importateurs du secteur manufacturier du Canada (MAECD, 2012). Il est nécessaire de réaliser une analyse approfondie de la vulnérabilité au climat des réseaux commerciaux du Canada par rapport aux principaux partenaires du pays.

ADAPTATION

Le commerce a joué un rôle important dans la détermination des répercussions de la variabilité du climat et des phénomènes météorologiques extrêmes sur l'économie d'un pays. Les recherches semblent indiquer que cette capacité pourrait également jouer un rôle important dans l'adaptation aux changements climatiques. Si un pays fait face à une pénurie de biens imputable aux changements climatiques, par exemple en raison d'une sécheresse limitant la production agricole, d'autres partenaires commerciaux pourraient s'avancer et combler cet écart (Tamiotti et al., 2009). Une période de végétation prolongée au Canada pourrait produire des surplus agricoles, qui compenseraient le manque de biens dans d'autres régions du monde. Dans ce contexte, le rôle de l'adaptation serait de cibler les secteurs en mesure de combler les pénuries causées par les changements climatiques dans d'autres pays et de favoriser leur croissance.

La demande en matière d'expertise et d'information en ce qui concerne les changements climatiques augmente aussi et pourrait représenter une possibilité d'exportation pour certains pays (IF PNUE et SBI, 2011). Puisque le Canada fait face à des conditions météorologiques très variables, son expertise en matière de gestion des risques et ses outils de transfert des risques financiers en vue de compenser ces risques pourraient lui permettre de profiter d'une demande mondiale croissante.

Les mesures d'adaptation qui réduisent la vulnérabilité des chaînes d'approvisionnement commerciales ont déjà fait l'objet de discussions dans le contexte du transport (*voir* aussi le chapitre 8 – *Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport*). Par exemple, des mesures comme les digues et les ouvrages longitudinaux sont essentiels à la protection des ports contre l'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête (Vasseur et Catto, 2008). Ces mesures ont souvent été utilisées en réaction à des événements historiques importants et pourraient servir à améliorer la résistance des principaux centres de transport aux effets des changements climatiques. Tout comme pour d'autres secteurs industriels, il n'existe aucune analyse de rentabilité précise sur la mise en place des mesures d'adaptation dans le but de protéger les chaînes d'approvisionnement. Cette lacune représente un obstacle important à l'adoption de mesures d'adaptation efficaces dans le secteur commercial (Tamiotti et al., 2009).

5. CONCLUSIONS ET PROCHAINES ÉTAPES

La recherche sur l'adaptation aux changements climatiques et l'industrie canadienne a principalement porté sur les assurances et le tourisme, les secteurs les plus exposés aux risques de nature climatique. Les secteurs moins vulnérables au climat, mais qui contribuent grandement à l'économie, ne font pas toujours l'objet d'une attention particulière de la part du milieu de la recherche. Les études actuelles font la distinction entre les répercussions climatiques « directes » tels les phénomènes météorologiques extrêmes et les répercussions « indirectes » tels les changements dans la demande des consommateurs. Jusqu'à présent, la plupart des recherches se sont concentrées sur les répercussions directes, n'offrant que peu d'information au sujet des répercussions indirectes.

La présente évaluation semble indiquer que les entreprises canadiennes commencent à intégrer l'adaptation au processus de prise de décisions opérationnelles, mais qu'il leur reste toujours à mettre en place à grande échelle des mesures à l'appui de l'adoption de mesures d'adaptation au sein même du secteur industriel du Canada. Encore une fois, on a noté les plus grands progrès dans les secteurs de l'assurance et du tourisme. Les études de cas présentées dans le présent chapitre démontrent que l'industrie appuie l'adaptation lorsque les intervenants du secteur placent au premier rang et comprennent les répercussions climatiques. Toutefois, les changements documentés en matière de pratiques sont principalement réactifs, en réaction aux variations des intempéries et des phénomènes météorologiques extrêmes, plutôt que proactifs, en réaction aux prévisions sur les conditions climatiques à venir. Ces mesures réactives ont souvent recours aux mêmes outils qu'utilise l'industrie pour favoriser l'adaptation. Les recherches ont déterminé certains besoins importants à prendre en considération avant que cette adaptation puisse être mise en œuvre à grande échelle. Ces besoins comprennent le développement d'une expertise en matière de répercussions des changements climatiques sur les entreprises de chaque secteur, ainsi qu'un meilleur niveau de compréhension de la rentabilité des mesures d'adaptation. La faible demande du marché pour ces mesures telles que les changements des préférences des consommateurs ou les politiques gouvernementales à l'appui de l'adaptation, constitue également un obstacle.

Le manque de recherche sur la façon de gérer ces obstacles constitue une lacune importante. On ne dispose que de peu de recherches permettant de transposer les données sur le climat et les mesures d'adaptation dans une formulation pouvant être intégrée aux cadres de prise de décisions utilisés par l'industrie canadienne. Cela comprend la quantification des coûts et des avantages liés tant aux répercussions climatiques qu'aux mesures d'adaptation. La recherche sur les répercussions « indirectes » relatives aux changements climatiques telles que l'évolution des préférences des consommateurs, la responsabilité financière ou les règlements gouvernementaux, est également un domaine à mettre en valeur. Cette recherche contribuerait à déterminer la façon grâce à laquelle il serait possible d'inciter les entreprises à mettre en place des mesures d'adaptation. Enfin, il est nécessaire de réaliser d'autres études de cas sur les stratégies opérationnelles efficaces, susceptibles d'aider à faire face aux risques climatiques actuels. Ces études de cas servent de point repère pour les approches « habituelles » en matière de risques climatiques pouvant être comparées aux exemples d'adaptation proactive. Cette comparaison pourrait produire de l'information importante portant sur les coûts, la main-d'œuvre, les matériaux ou les stratégies de gestion nécessaires en vue d'une adaptation efficace au sein de l'industrie.

RÉFÉRENCES

ACCH (Association canadienne des constructeurs d'habitations). *Canadian Housing Industry – Performance and Trends*, Association canadienne des constructeurs d'habitations, 2011, <http://vancouver.ca/ctyclerk/civicagencies/housing/RPRT_Housing_Industry_Performance_and_Trends_Oct_2011.pdf>.

ACT (Adaptation to Climate Change Team). Adaptation to Climate Change Team, 2013, <http://act-adapt.org/programs/>.

ACVM (Autorités canadiennes en valeurs mobilières). *Avis 51-333 du personnel des ACVM Indications en matière d'information environnementale*, Autorités canadiennes en valeurs mobilières, 2012, <http://www.lautorite.qc.ca/files/pdf/reglementation/valeurs-mobilieres/0-avis-acvm-staff/2010/2010oct29-51-333-acvm-fr.pdf>.

Agrawala, S., M. Carraro, N. Kingsmill, E. Lanzi, M. Mullan et G. Prudent-Richard. *Participation du secteur privé à l'adaptation au changement climatique*, Document de travail de l'OCDE sur l'environnement no 39, Organisation de coopération et de développement économiques, Paris, 2011.

Aldy, J.E. et W.A. Pizer. *The competitiveness impacts of climate change mitigation policies*, Regulatory Policy Program, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 2011, <http://www.hks.harvard.edu/m-rcbg/rpp/Working%20papers/RPP_2011_08_Aldy_Pizer.pdf>.

ARUP. *Your home in a changing climate*, Three Regions Climate Change Group, Londres, Royaume-Uni, 2008, <http://www.arup.com/Publications/Your_home_in_a_changing_climate.aspx>.

Association de l'industrie touristique du Canada. *L'industrie touristique canadienne – Un rapport spécial*, Association de l'industrie touristique du Canada, Ottawa, 2012.

Auld, H. « Adaptation by design: the impact of changing climate on infrastructure », *Journal of Public Works and Infrastructure*, vol. 3, 2008, pp. 276-288.

Auld, H., J. Waller, S. Eng, J. Klaassen, R. Morris, S. Fernandez, V. Cheng et D. MacIver. *The changing climate and national building codes and standards*, Environnement Canada, Ottawa, Canada, 2008.

Autorité des marchés financiers. *Gestion des risques relatifs aux changements climatiques*, Autorité des marchés financiers, 2011, <http://www.lautorite.qc.ca/files/pdf/publications/professionnels/assurance/AMF-changements-climatiques-web.pdf>.

Banque mondiale. *Exportations de biens et de services (% du PIB)*, Banque mondiale, 2012, <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NE.EXP.GNFS.ZS>.

Bigano, A., J. Hamilton et R. Tol. « The impact of climate change on domestic and international tourism: a simulation study », *Integrated Assessment Journal*, vol. 7, 2007, pp. 25-49.

Bobelian, M. « An Alaskan town threatened by climate change loses in court », *Forbes*, 26 septembre, 2012, <http://www.forbes.com/sites/michaelbobelian/2012/09/26/an-alaskan-town-threatened-by-climate-change-loses-in-court/>.

Bourque, A. et G. Simonet. « Québec », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada* : édition 2007, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 171-226.

Bouwer, L. « Have disaster losses increased due to anthropogenic climate change? », *American Meteorological Society*, vol. 92, 2010, pp. 39-46.

Browne, S. et L. Hunt. *Climate change and nature-based tourism, outdoor recreation, and forestry in Ontario: potential effects and adaptation strategies*, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 2007.

Bruce, J.P. et E. Haites. « Le Canada dans le contexte international », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 387-424.

Bureau d'assurance du Canada. *Facts of the General Insurance Industry in Canada*, Bureau d'assurance du Canada, Toronto, 2008.

Bureau d'assurance du Canada. *Facts of the General Insurance Industry in Canada*, Bureau d'assurance du Canada, Toronto, 2009.

Bureau d'assurance du Canada. Projet d'outil d'évaluation des risques concernant l'infrastructure des systèmes d'eaux pluviales et sanitaires à l'intention des municipalités, Bureau d'assurance du Canada, 2011a.

Bureau d'assurance du Canada. *Les tempêtes de vent dans le sud de l'Alberta causent des dommages éprouvés par les biens assurés d'une valeur de 200 millions de dollars*, Bureau d'assurance du Canada, 2011b, <http://www.ibc.ca/fr/Media_Centre/News_Releases/2011/12-22-2011.asp>.

Bureau d'assurance du Canada. Canadian Severe Weather – Events and Insured Damage, Bureau d'assurance du Canada, 2012a, <http://www.ibc.ca/en/Media_Centre/News_Releases/2012/05-31-2012-2.asp>.

Bureau d'assurance du Canada. « June Alberta Floods are Costliest Insured Natural Disaster in Canadian History – Estimate of insured losses exceed $1.7 billion », *Media Release*, 23 septembre 2013, 2013a, en ligne. <ibc.ca/en/Media_Centre/News_Releases/2013/June_Alberta_Floods_are_Costliest_Insured_Natural_Disaster_in_Canadian_History.asp>.

Bureau d'assurance du Canada. « Preliminary insured losses released in the most expensive natural disaster in Ontario history – IBC expects the number to go even higher », *Media Release*, 14 août septembre 2013, 2013b, en ligne.<ibc.ca/en/Media_Centre/News_Releases/2013/Preliminary_insured_losses_released_in_the_most_expensive_natural_disaster_in_Ontario_history.asp>.

Bureau d'assurance du Canada. Outil d'évaluation du risque pour les municipalités, Bureau d'assurance du Canada, 2012b, <http://www.ibc.ca/fr/Natural_Disasters/Municipal_Risk_Assessment_Tool.asp>.

Bureau d'assurance du Canada. IBC Reminder to Torontonians About Protecting Homes from Water Damage, 2012c, <http://www.ibc.ca/en/Media_Centre/News_Releases/2012/05-31-2012-2.asp>.

Butsic, V., E. Hanak et R. Valletta. « Climate change and housing prices: hedonic estimates for ski resort in western North America », *Land Economics*, vol. 87, 2011, pp. 75-91.

Camilleri, M. « Impacts of climate change on building performance in New Zealand », *Building Research & Information*, vol. 29, no 6, 2001, pp. 440-450.

Campbell, R.J. *Weather-related power outages and electric system resiliency*, CRS Report for Congress, Congressional Research Service, 2012, <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/R42696.pdf>.

Chambre de commerce du Canada. *10 principaux obstacles à la compétitivité*, Chambre de commerce du Canada, Ottawa, 2012, <http://www.chamber.ca/images/uploads/Top10/Top10Barriers.pdf>.

Climate Change Adaptation Project. *Climate change adaptation: a priorities plan for Canada*, Waterloo (Ontario), Climate Change Adaptation Project, 2012, <http://adaptnowcanada.ca/report/>.

Ceres. *Climate change risk perception & management: a survey of risk managers*, Coalition for Environmentally Responsible Economies, Boston, 2010, <http://www.ceres.org/resources/reports/risk-manager-survey>.

Ceres. *Shareholder resolutions*, Coalition for Environmentally Responsible Economies, Boston, 2013, <http://www.ceres.org/investor-network/resolutions>.

Chasan, E. « Q&A: an insurer's take on business interruptions after Hurricane Sandy », *Wall Street Journal*, novembre, 2012, <http://mobile.blogs.wsj.com/cfo/2012/11/02/qa-an-insurers-take-on-business-interruptions-after-hurricane-sandy/>.

Cheng, C.S., Q. Li, G. Li et H. Auld. « Climate change and heavy rainfall-related water damage insurance claims and losses in Ontario, Canada », *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 4, 2012, pp. 49-62.

Chiotti, Q. et B. Lavender. « Ontario », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 227-274.

Choi, O. et A. Fisher. « The impacts of socioeconomic development and climate change on severe weather catastrophe losses: mid-Atlantic region (MAR) and the U.S. », *Climate Change*, vol. 58, 2003, pp. 149-170.

Coleman, T. *The impact of climate change on insurance against catastrophes*, Insurance Australia Group, Melbourne, 2002.

Commissaire à l'environnement de l'Ontario. *Prêt pour un changement? Évaluation de la stratégie ontarienne d'adaptation au changement climatique*, Commissaire à l'environnement de l'Ontario, Toronto, 2012.

Conseil canadien des normes. *Initiative de normalisation des infrastructures du Nord*, Conseil canadien des normes, 2013, <http://www.scc.ca/fr/stakeholder-participation/roadmaps-and-standardization-solutions/initiative-de-normalisation-des-infrastructures-du-nord>.

Conseil mondial du voyage et du tourisme. *Travel & tourism: economic impact 2012 Canada*, Londres, Royaume-Uni, 2012, <http://www.wttc.org/site_media/uploads/downloads/canada2012.pdf>.

Council of Tourism Associations of British Columbia. *A tourism sector strategy: for the southern Interior region in response to mountain pine beetle*, 2009, <http://torc.linkbc.ca/torc/downs1/COTA_MPB_Strategy_Executive_Summary.pdf>.

Cutter, S., B. Osman-Elasha, J. Campbell, S.-M. Cheong, S. McCormick, R. Pulwarty, S. Supratid et G. Ziervogel. « Managing the risks from climate extremes at the local level », dans *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen. M. Tignor et P.M. Midgley (éd.), Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2012, pp. 291-338.

Cycle Country. *Record all-terrain vehicle – ATV – sales in US deliver double-digit growth again*, Cycle Country, 2006, <www.cyclecountry.com>.

Dailey, P., S. Huddleston et D. Fasking. *The financial risks of climate change*, ABI Research Paper, n° 19, 2009.

Dawson, J. et D. Scott. « Managing for climate change in the Alpine ski sector », *Tourism Management*, vol. 35, 2012, pp. 244-254.

Dawson, J., E.J. Stewart, H. Lamelin et D. Scott. « The carbon cost of polar bear viewing tourism in Churchill, Canada », *Journal of Sustainable Tourism*, vol. 18, 2010, pp. 319-336.

Deilmann, C. « Climate change: lessons from Germany », *Building Research & Information*, vol. 32, n° 1, 2004, pp. 65-66.

Deutsche Bank Research. *Climate change and tourism: where will the journey take us?*, Berlin, 2008.

Dickson, J. Allocution de la surintendante Julie Dickson dans le cadre de la Conférence nationale sur l'assurance au Canada (présentation), Conférence nationale sur l'assurance au Canada, 1er octobre, Québec, 2012, <http://www.osfi-bsif.gc.ca/app/DocRepository/1/fra/discours/jd20121001_f.pdf>.

Dlugodecki, A. *Coping with climate change: risks and opportunities*, Chartered Insurance Institute, Londres, 2009.

Dodds, R. et G. Kuenzig. *Climate change and Canada's municipal destination marketing organizations*, The Icarus Foundation, 2009, <http://www.theicarusfoundation.com/pdf/ExecSummaryDMOandCC_Final.pdf>.

Dotto, L., L. Duchesne, D. Etkin, E. Jaffit, P. Joe, B. Jones, G. Koshida, B. Leblon, E. Opoku-Boateng, K. Schenk, I. Stefanovic et B. Stocks. *Canadians at risk: our exposure to natural hazards*, Institut de prévention des sinistres catastrophiques, ICLR Research Paper Series, n° 48., 2010, <http://www.iclr.org/images/Canadians_at_Risk_2010.pdf>.

Dunne, J.P., R.J. Stouffer et J.G. John. « Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming », *Climate Change*, vol. 3, 2013, pp. 563-566.

Ebner, D. « Deep snow, deep pockets: it's a billion-dollar bet on climate change », *The Globe and Mail*, janvier 2008.

Eeuwens, K. « Have near term CAT risk models failed? », *Reactions*, 15 juin, 2009.

Environnement Canada. *L'Étude pan-canadienne*, Environnement Canada, 1998, <http://publications.gc.ca/pub?id=425615&sl=0>.

Environnement Canada. *Climate information to inform new codes and standards*, Environnement Canada, 2010, <http://www.ec.gc.ca/sc-cs/default.asp?lang=En&n=20CD1ADB-1>.

Foghaden, C. « The blooming paradise: algae blooms, environmental change and tourism impacts », *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 2012.

Forfas. *Business continuity planning in severe weather*, Dublin, Irlande, 2011,<http://www.forfas.ie/media/ffs111109-BCP_in_Severe_Weather.pdf>.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique*, C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor et P.M. Midgley (éd.), Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, New York, U.S.A., 2012, pp. 1-19.

Gossling, S., D. Scott et C.M. Hall. « Consumer behaviour and demand response of tourists to climate change », *Annals of Tourism Research*, vol. 39, n° 1, 2012, pp. 36-58.

Gouvernement du Canada. *Une promenade à la campagne : le tourisme dans les régions rurales au Canada*, Gouvernement du Canada, 2005, <http://www5.statcan.gc.ca/bsolc/olc-cel/olc-cel?catno=21-006-X2005005&lang=fra>.

Gouvernement du Canada. *Survol de l'industrie : tourisme*, Appuyer le tourisme, Gouvernement du Canada, 25 septembre, 2012a, <http://www.tourism.gc.ca/eic/site/034.nsf/fra/h_00003.html>.

Gouvernement du Canada. *Stratégie fédérale en matière de tourisme du Canada*, Gouvernement du Canada, 2012b, <http://www.ic.gc.ca/eic/site/034.nsf/fra/00216.html>.

Graves, H.M. et M.C. Phillipson. *Potential implications of climate change in the built environment*, BRE Centre for Environmental Engineering, 2000.

Hall, C.M. et J. Saarinen. « Polar tourism: definitions and dimensions », *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, vol. 10, n° 4, 2010, pp. 448-467.

Handmer, J., Y. Honda, N. Kundzewicz, N. Arnell, G. Benito, J. Hatfield, I.F. Mohamed et P. Peduzzi. « Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems », dans *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen. M. Tignor et P.M. Midgley (éd.), Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2012, pp. 339-392.

Hanna, E.G., T. Kjellstrom, C. Bennett et K. Dear. « Climate change and rising heat: population health implications for working people in Australia », *Pacific Journal of Public Health*, vol. 23, n° 2, 2011, pp. 14S-26S.

Hertin, J., F. Berkhout, D.M. Gann et J. Barlow. « Climate change and the UK house building sector: perceptions, impacts and adaptive capacity », *Building Research & Information*, vol. 31, n° 3-4, 2003, pp. 278-290.

ICCA (Institut canadien des comptables agréés). *Améliorer son rapport de gestion : informations à fournir sur le changement climatique*, Conseil canadien de l'information sur la performance, 2009, <http://www.icca.ca/champs-dexpertise/reporting-and-capital-markets/centre-de-ressources-sur-linformation-sur-la-performance/item12870.pdf>.

Industrie Canada. *Statistiques relatives à l'industrie canadienne : PIB économie canadienne*, Industrie Canada, 2011, <https://www.ic.gc.ca/app/scr/sbms/sbb/cis/gdp.html?code=11-91&lang=fra>.

Institut de Prévention des Sinistres Catastrophiques. « ICLR and The Co-operators Complete Canada's First Safer Living Home », *Cat Tales*, 2007, <http://www.iclr.org/images/CatTales1_1_.pdf>.

Institut de Prévention des Sinistres Catastrophiques. *Home Builder's Guide: Designed for Safer Living*, Institut de Prévention des Sinistres Catastrophiques, 2010.

Institut de Prévention des Sinistres Catastrophiques. *A Plan Forward: Building Practices to Increase the Resilience of Homes to Severe Weather*, Institut de Prévention des Sinistres Catastrophiques, Toronto, 2012.

Intact Corporation financière. *Natural disaster and Intact Insurance, Intact Corporation financière*, 2012, <http://library.constantcontact.com/download/get/file/1103201627468-256/Water+Damage+Fact+Sheet.pdf>.

IPSC (Institut de prévention des sinistres catastrophiques). « ICLR and The Co-operators complete Canada's first safer living home », dans *Cat Tales*, Institut de prévention des sinistres catastrophiques, 2007, <http://www.iclr.org/images/CatTales1_1_.pdf>.

IPSC (Institut de prévention des sinistres catastrophiques). *Home builder's guide: designed for safer living*, Institut de prévention des sinistres catastrophiques, 2010.

IPSC (Institut de prévention des sinistres catastrophiques). *A plan forward: building practices to increase the resilience of homes to severe weather*, Institut de prévention des sinistres catastrophiques, Toronto, 2012.

Jones, B. et D. Scott. « Climate change, seasonality and visitation to Canada's national parks », *Journal of Parks and Recreation Administration*, vol. 24, n° 2, 2006, pp. 42-62.

Julia, R. et F. Duchin. « World trade as the adjustment mechanism of agriculture to climate change », *Climatic Change*, vol. 82, n° 3-4, 2007, pp. 393-409.

Kjellstrom, T. et J. Crowe. « Climate change, workplace heat exposure, and occupational health and productivity in Central America », *International Journal of Occupational and Environmental Health*, vol. 17, n° 3, 2011, pp. 270-281.

Kovacs, P. « Insurance: aligning price of insurance with risk of damage », dans *Climate Change Adaptation: a Priorities Plan for Canada*, B. Feltmate et J. Thistlethwaite (éd.), Climate Change Adaptation Project, Waterloo (Ontario), 2012.

KPMG. *Climate change and sustainability services*, KPMG, 2010, <http://www.kpmg.com/global/en/topics/climate-change-sustainability-services/pages/default.aspx?utm_medium=mdd&utm_campaign=mdd-global&utm_source=link>.

Kunkel, K.E., P.D. Bromirski, H.E. Brooks, T. Cavazos, A.V. Douglas, D.R. Easterling, K.A. Emanuel, P. Groisman, G. Holland, T. Knutson, J. Kossin, P. Komar, D. Levinson et R. Smith. « Observed changes in weather and climate extremes », dans *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean and U.S. Pacific Islands*, un rapport du U.S. Climate Change Science Program et du Subcomittee on Global Change Research, Department of Commerce, NOAA's National Climatic Data Center, Washington (DC), 2008, 164 p.

Kunreuther, H., E. Michel-Kerjan, N.A. Doherty, M.F. Grace, R.W. Klein et M.V. Pauly. *At war with the weather: managing large-scale risks in a new era of catastrophes*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2009.

Lal, P.N., T. Mitchell, P. Aldunce, H. Auld, R. Mechler, A. Miyan, L.E. Romano et S. Zakaria. « National Systems for Managing the Risks from Climate Extremes and Disasters », dans *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor et P.M. Midgley (éd.), Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, New York, États-Unis, 2012, pp. 339-392.

Laporte, D. « Ontario code tops in energy efficiency », *The Toronto Star*, 19 août, 2011. <http://www.yourhome.ca/homes/article/1041046>.

Lemelin, H., J. Dawson et E. Stewart. *Last Chance Tourism*, Routledge, Londres, 2012.

Lemelin, H., J. Dawson, E. Stewart et M. Lueck. « Last-chance tourism: the boom, doom and gloom of visiting vanishing destinations », *Current Issues in Tourism*, vol. 13, n° 5, 2010, pp. 477-493.

Lemieux, C., T. Beechey et D. Scott. « The state of climate change adaptation in Canada's protected areas sector », *Canadian Geographer*, vol. 55, n° 3, 2011, pp. 301-317.

Lemieux, C. et D. Scott. « Changing climate, challenging choices: identifying and evaluating adaptation options for conservation », *Environmental Management*, vol. 48, n° 4, 2011, pp. 675-690.

Lemieux, C., D. Scott, R.G. Davis et P.A. Gray. *Changing climate challenging choices: Ontario parks and climate change adaptation*, Ressources naturelles Canada, Ottawa, 2008.

Lemmen, D.S., F.J. Warren et J. Lacroix. « Synthèse », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 1-20.

Leurig, S. *Climate risk disclosure by insurers: evaluating insurer responses to the NAIC climate disclosure survey*, A Ceres Report, Ceres, Boston, 2011.

Leven met Water. *Towards a Climate-proof Netherlands*, Amsterdam, Pays-Bas, 2007, <http://www.levenmetwater.nl/static/media/files/Routeplanner_eng.pdf>.

Lindell, R. « Extreme weather hit national parks hard in 2011 », *Global News*, 2012, <http://www.globalnews.ca/force%20of%20nature/6442585028/story.html>.

Lio and Associates. *A study of prescriptive requirements for Energuide 80 in Ontario's building code*, rapport rédigé pour le ministère des Affaires municipales et du Logement de l'Ontario, Toronto, 2010, <http://www.mah.gov.on.ca/Asset8297.aspx?method=1>.

Liso, K.R., G. Aandahl, S. Eriksen et K.H. Alfsen. « Preparing for climate change impacts in Norway's built environment », *Building Research & Information*, vol. 31, n° 3-4, 2003, pp. 200-209.

Lister, M. *Climate change, trade and competitiveness: risks and opportunities in a North American perspective*, Forum des politiques publiques, 2008.

Lowe, R. « Lessons from climate change: a response to the commentaries », *Building Research & Information*, vol. 32, n° 1, 2004, pp. 75-78.

MAECD (Affaires étrangères, Commerce et Développement Canada). *Le commerce international du Canada : le point sur le commerce et l'investissement – 2012*, ministère des Affaires étrangères, du Commerce et du Développement du Canada, Ottawa, Canada, 2012, <http://international.gc.ca/economist-economiste/assets/pdfs/performance/SoT_2012/SoT_2012_Fra.pdf>.

Marr, G. « Climate change blamed for spike in home insurance premiums », *The Financial Post*, novembre, 2011, <http://business.financialpost.com/2011/11/17/climate-change-blamed-for-spike-in-home-insurance-premiums/?__lsa=fa67-72a2>.

McBean, G. *Comprendre le climat*, rapport rédigé par l'Institut de prévention des sinistres catastrophiques pour le Bureau d'assurance du Canada, 2012.

McBoyle, G., D. Scott et B. Jones. « Climate change and the future of snowmobiling in non-mountainous regions of Canada », *Managing Leisure*, vol. 12, n° 4, 2007, pp. 237-250.

Mills, E. *From risk to opportunity: 2007 – insurer responses to climate change*, Ceres, 2007.

Mills, E. « A global review of insurance industry responses to climate change », *The Geneva Papers*, n° 34, 2009a, pp. 323-359.

Mills, E. *From risk to opportunity:2008 – insurer responses to climate change*, Ceres, 2009b.

Mills, E. « The greening of insurance », *Science*, vol. 338, 2012, pp. 1424-1425.

Mills, E. et E. Lecomte. *Availability and affordability of insurance under climate change: a growing threat for the U.S.*, Ceres, 2005.

Mills, E. et E. Lecomte. *From risk to opportunity: how insurers can proactively and profitably manage climate change*, Ceres, 2006.

Mills, E., E. Lecomte et A. Peara. *U.S. insurance industry perspectives on global climate change*, Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S. Department of Energy, University of California, 2001, <http://evanmills.lbl.gov/pubs/pdf/climate_report.pdf>.

Milne, J. « Climate change, insurance and the building sector: synergisms, conflicts and adaptive capacity », *Building Research & Information*, vol. 32, n° 1, 2004, pp. 48-54.

Min, S.-K., X. Zhang, F.W. Zwiers et G.C. Hergerl. « Human contribution to more-intense precipitation extremes », *Nature*, vol. 470, 2011, pp. 378-381.

Ministère de l'Environnement de l'Ontario. *Faire face au changement climatique : stratégie d'adaptation et plan d'action de l'Ontario*, ministère de l'Environnement de l'Ontario, Toronto, 2011.

Morna, I. et D. van Vuuren. « Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change », *Energy Policy*, vol. 37, n° 2, 2009, pp. 507-521.

Morrison, J., M. Morikawa, M. Murphy et P. Schulte. Water scarcity & climate change: growing risks for businesses and investors, Ceres et Pacific Institute, Boston, 2009, <http://www.thesapientsolution.com/research/20090525_Water_Scarcity_and_Climate_Change_thesapientsolution.pdf>.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). *Climate change and harmful algal blooms*, 2012, <http://www.cop.noaa.gov/stressors/extremeevents/hab/current/CC_habs.aspx>.

OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) et PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). *Climate change and tourism policy in OECD countries*, Organisation de coopération et de développement économiques et Programme des Nations Unies pour l'environnement, Paris, 2011.

Olcese, A. « Les changements climatiques : un flot de possibilités pour les assureurs IARD », *Au-delà du risque*, 2010.

Organisation mondiale du tourisme des Nations Unies. *Tourism towards 2030 – global overview*, Organisation mondiale du tourisme des Nations Unies, Madrid, 2011.

Oulahen, G. « Habitat for resilience », *Canadian Underwriter*, octobre, 2010, <http://www.canadianunderwriter.ca/news/habitat-for-resilience/1000389796/>.

Parker, P., D. Scott et I. Rowlands. « Residential energy consumption and greenhouse gas emissions: global context for local action », *Environments*, vol. 28, n° 3, 2000, pp. 11-28.

Pegg, H. « Thai floods capsize North American production », *Autonet.ca*, novembre, 2011, <http://www.autonet.ca/auto-news/automotive-industry-news/2011/11/24/thai-floods-capsize-north-american-production/>.

Perez-Garcia, J., L.A. Joyce, D. Mcguire et X. Xiao. « Impacts of climate change on the global forest sector », *Climatic Change*, vol. 54, n° 4, 2002, pp. 439-461.

Peterson, T.C., X. Zhang, M. Brunet-India et J.L. Vazquez-Aguirre. « Changes in North American extremes derived from daily weather data », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 113, 2008.

PNUE-IF (Programme des Nations Unies pour l'Environnement–Initiative Financière). *The global state of sustainable insurance*, Groupe de travail sur les assurances de l'Initiative Financière du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2009.

PNUE-IF (Programme des Nations Unies pour l'Environnement–Initiative Financière) et SBI (Sustainable Business Institute). *Advancing adaptation through climate information services*, Initiative Financière du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et Sustainable Business Institute, Genève, 2011, <http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/advancing_adaptation.pdf>.

Richardson, G.R.A. et J. Otero. *Outils d'aménagement locaux pour l'adaptation aux changements climatiques*, Ressources naturelles Canada, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2012, 38 p., <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/sites/www.nrcan.gc.ca.earth-sciences/files/files/landuse-f.pdf>.

Robinson, G. *Extreme weather and insurance*, novembre, TRNEE-REDD Climate Change Adaptation Forum, 2011.

Robinson, G. *P&C insurance: state of the industry* (présentation), déjeuner du CIAA, 30 avril, 2012.

Rousseau, D. « Adapting to climate change: some observations », *Building Research & Information*, vol. 32, n° 1, 2004.

Sanders, C.H. et M.C. Phillipson. « UK adaptation strategy and technical measures: the impacts of climate change on buildings », *Building Research & Information*, vol. 31, n° 3-4, 2003, pp. 210-221.

Sandink, D. *The resilience of the City of Kelowna: exploring mitigation before, during and after the Okanagan Mountain park fire*, Institut de prévention des sinistres catastrophiques, ICLR Research Paper Series, n° 45., 2009, <http://www.iclr.org/images/ICLR_Report_Kelowna_D4_2.pdf>.

Sandink, D. *Involving homeowners in urban flood risk reduction: a case study of the Sherwood Forest neighbourhood*, Institut de prévention des sinistres catastrophiques, ICLR Research Paper Series, n° 51, 2011.

Sandink, D. et G. McGillivray. « Insurance: adaptation for existing homes », dans *Climate Change Adaptation: a Priorities Plan for Canada*, B. Feltmate et J. Thistlethwaite (éd.), Climate Change Adaptation Project, Waterloo (Ontario), 2012.

Sauchyn, D. et S. Kulshreshtha. « Prairies », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 275-328.

Scott, D. « Climate change and sustainable tourism in the 21st Century », dans *Tourism Research: Policy, Planning and Prospects*, J. Cukier (éd.), Department of Geography Publication Series, University of Waterloo, Waterloo (Ontario), 2006.

Scott, D. *Climate change and a healthy, sustainable environment: an opportunity for recreation and parks leadership*, Lake Louise, 2011.

Scott, D. et B. Jones. Climate change and seasonality in Canadian outdoor recreation and tourism – executive summary, Waterloo University, Waterloo, Ontario, 2006.

Scott, D. et B. Jones. « A regional comparison of the implications of climate change of the golf industry in Canada », *Le Géographe canadien*, vol. 51, n° 2, 2007, pp. 219-232.

Scott, D. et I. Rowlands. « Integrating technical and social energy studies: prospects for change in the Canadian residential sector », *Environments*, vol. 28, n° 3, 2000, pp. 1-10.

Scott, D. et R. Steiger. « Climate vulnerability of the ski industry », dans *Climate Vulnerability*, R. Pielke (éd.), Elsevier, San Diego, 2012.

Scott, D., G. McBoyle, B. Mills et A. Minogue. « Climate change and the sustainability of ski-based tourism in eastern North America », *Journal of Sustainable Tourism*, vol. 14, n° 4, pp. 376–398.

Scott, D., B. Amelung, J.-P. Ceron, G. Dubois, S. Gossling, P. Peeters et M. Simpson. *Climate change and tourism: responding to global challenges*, Organisation mondiale du tourisme des Nations Unies et Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2008.

Scott, D., S. Gossling et C.M. Hall. *Climate Change and Tourism: Impacts, Adaptation and Mitigation*; Routledge, Londres, 2012a.

Scott, D., S. Gossling et C.M. Hall. « International tourism and climate change », *Wiley Interdisciplinary Reviews*, Climate Change, vol. 3, n° 3, 2012b, pp. 213-232.

Scott, D., B. Jones et J. Konopek. « Implications of climate and environmental change for nature-based tourism in the Canadian Rocky Mountains: a case study of Waterton Lakes National Park », *Tourism Management*, vol. 28, n° 2, 2007, pp. 570-579.

SEC (Securities and Exchange Commission). *SEC issues interpretive guidance on disclosure related to business or legal developments regarding climate change*, 2010, <http://www.sec.gov/news/press/2010/2010-15.htm>.

Secretary of State for Environment, Food and Rural Affairs. *Company reporting of greenhouse gas emissions by quoted companies*, 2012, <http://www.parliament.uk/documents/commons-vote-office/June_2012/20-06-12/3.DEFRA-Company-reporting-greenhouse-gas-emissions-by-quoted-companies.pdf>.

Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo et K. Marengo. « Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment », dans *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor et P.M. Midgley (éd.), Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, New York, États-Unis, 2012, pp. 109-230.

Société d'assurance publique du Manitoba. *Rapport annuel de la Société d'assurance publique du Manitoba*, Société d'assurance publique du Manitoba, Winnipeg, 2011, <http://mpi.mb.ca/AnnualReport/AnnualReport2011/PDFs/Financial.pdf>.

Solterra Solutions. *Determining the impact of climate change on insurance risk and the global community*, Ottawa : Institut canadien des actuaires, American Academy of Actuaries, Society of Actuaries, Casualty Actuarial Society, 2012.

St. Denis, G. et P. Parker. « Community energy planning in Canada: the role of renewable energy », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, 2009, pp. 2088-2095.

Statistique Canada. *Tableau 187-0002 – Les données trimestrielles de l'état de l'évolution de la situation financière, selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN)*, certains ratios financiers et certains composants désaisonnalisés, Statistique Canada, 2012a, <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26;jsessionid=DFCC8B60E540EF836BBB87007 A3DD16A?id=1870002&pattern= &p2=37&tabMode=dataTable&p1=1&stByVal=1&paSer= &csid=&retrLang=fra&lang=fra>.

Statistique Canada. *Construction*, Statistique Canada, 2012b, <http://www.statcan.gc.ca/pub/11-402-x/2011000/chap/construction/construction-fra.htm>.

Statistique Canada. *Tableau 281-0024 – Emploi (EERH), estimations non désaisonnalisées, selon le type d'employé pour une sélection d'industries selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN)*, Statistique Canada, Base de données CANSIM, 2012c, <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a05?id=2810024&retrLang=fra&lang=fra>.

Statistique Canada. *Exportations de biens sur la base de la balance des paiements, selon le produit*, Statistique Canada, 2012d, <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/gblec04-fra.htm>.

Steemers, K. « Towards a research agenda for adapting to climate change », *Building Research & Information*, vol. 31, n° 3-4, 2003, pp. 291-301.

Stewart, E.J., J. Dawson et D. Draper. « Cruise-ship tourism in Nunavut, Arctic Canada: an analysis of resident perspectives », *Journal of Hospitality and Tourism Management*, 2011.

Stewart, E.J., A. Tivy, S.E.L. Howell, J. Dawson et D. Draper. « Cruise tourism and sea ice in Canada's Hudson Bay region », *Arctic*, vol. 63, n° 1, 2010, pp. 57-66.

Swiss Re. *The hidden risks of climate change: an increase in property damage from soil subsidence in Europe*, Swiss Re, Genève, 2011, <http://media.swissre.com/documents/Soil_Subsidence_Publication_en_0718.pdf>.

Tamiotti, L., R. Teh, V. Kulacoglu, A. Olhoff, B. Simmons et A. Hussein. *Commerce et changement climatique*, Programme des Nations Unies pour l'environnement et Organisation mondiale du commerce, Genève, 2009, <http://www.wto.org/french/res_f/booksp_f/trade_climate_change_f.pdf>.

TD Economics. *Canada's construction sector flexes its economic muscle*, TD Economics, 2011.

Thistlethwaite, J. « The ClimateWise principles: self-regulating climate change risks in the insurance sector », *Business & Society*, 2012.

Thistlethwaite, J., P. Kovacs et G. Kelly. « Insurance: adapting building codes for climate change », dans *Climate Change Adaptation: a Priorities Plan for Canada*, B. Feltmate et J. Thistlethwaite (éd.), Climate Change Adaptation Project, Waterloo (Ontario), 2012.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). Le prix à payer : répercussions économiques du changement climatique pour le Canada, Rapport 04, *Prospérité climatique, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie*, Ottawa, 2011.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Prospérité climatique : Études de cas*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 2012a, <http://nrtee-trnee.ca/wp-content/uploads/2012/03/cp5-case-studies.pdf>.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique*, Rapport 05, Prospérité climatique, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa, 2012b.

Vasseur, L. et Catto, N. « Canada atlantique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 119-170.

Walker, I.J. et R. Sydneysmith. « Colombie-Britannique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 329-386.

Willbanks, T.J., P. Romero Lankao, M. Bao, F. Berkhout, J.P. Ceron, S. Cairncross, M. Kapshe, R. Muir-Wood et R. Zapata-Marti. « Industry, settlement and society », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. ven der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 357-390.

Wilton, D. et T. Wirjanto. *Analyse des variations saisonnières dans les Indicateurs Nationaux du Tourisme*, Commission canadienne du tourisme, Ottawa, Canada, 1998.

Wotton, B.M., C.A. Nock et M.D. Flannigan. « Forest fire occurence and climate change in Canada », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 19, n° 3, 2010, pp. 253-271.

CHAPITRE 6 : **BIODIVERSITÉ ET AIRES PROTÉGÉES**

Principaux auteurs :

Patrick Nantel, **Marlow G. Pellatt** et **Karen Keenleyside** *(Parcs Canada)*, **Paul A. Gray** *(Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario)*

Collaborateurs :

Isabelle Côté *(Simon Fraser University)*, **Philip Dearden** *(University of Victoria)*, **Simon Goring** *(University of Wisconsin)*, **Nancy Kingsbury** *(Environnement Canada)*, **Donald McLennan** *(Affaires autochtones et Développement du Nord Canada)*, **Tory Stevens** *(Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique)*

Citation recommandée :

Nantel, P., M.G. Pellatt, K. Keenleyside et P.A. Gray. « Biodiversité et aires protégées », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 159-190.

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions 161

1. Introduction 162

2. Aperçu des conclusions tirée des évaluations précédentes. 163

3. Climat et biodiversité. 164
- 3.1 Changements dans la chronologie des étapes du cycle de vie (phénologie) 164
- 3.2 Changements touchant les aires de répartition des espèces 166
- 3.3 Effets sur la santé des poissons et de la faune 168
- 3.4 Relations avec les régimes de perturbation et les facteurs de stress d'origine anthropique 171
- 3.5 Incertitudes et lacunes liées à l'état des connaissances dans le domaine 172
- 3.6 Répercussions sociales et économiques des changements induits par le climat sur la biodiversité 173
- 3.7 Synthèse 174

4. Adaptation et rôle des aires protégées. 174
- 4.1 Protéger les écosystèmes à l'état intact 175
- 4.2 Mettre en réseau les aires protégées au moyen de paysages terrestres et aquatiques gérés de façon durable 175
- 4.3 Restaurer les écosystèmes forestiers dégradés et soutenir le rétablissement des espèces 176
- 4.4 Planifier l'adaptation 179
- 4.5 Appuyer la planification en acquérant des connaissances. 180
- 4.6 Favoriser l'adaptation en mobilisant les collectivités 180

5. Conclusions 182

Références 183

PRINCIPALES CONCLUSIONS

La biodiversité – qui représente la variété des espèces et des écosystèmes, ainsi que les processus écologiques dont ils font partie – exerce une influence déterminante sur le capital naturel du Canada, de même que sur sa capacité à dispenser des services. Ces derniers contribuent à la santé et au bien-être des humains et appuient un large éventail de secteurs économiques. Les changements climatiques, combinés à d'autres facteurs d'origine anthropique tels la pollution et le morcellement du paysage, se répercutent déjà sur la biodiversité au Canada. L'ampleur des changements climatiques continus et les décisions prises en matière d'adaptation en vue de renforcer la résilience des écosystèmes auront une incidence sur les répercussions. Suivent les principales conclusions découlant du présent chapitre.

- Les variations dans la répartition des espèces qui sont induites par le climat ont été documentées au Canada. Les variations futures pourraient consister notamment en une expansion, un rétrécissement et un morcellement des modèles de répartition des différentes espèces. En plusieurs endroits, ces variations au niveau des aires de répartition vont probablement entraîner la formation de nouveaux écosystèmes.

- Des disparités phénologiques surviennent lorsque les variations dans la chronologie des étapes du cycle de vie diffèrent entre des espèces dépendantes, ce qui peut, par exemple, provoquer des situations où une espèce migratoire arrive à un endroit après la période où sa proie habituelle est la plus accessible. On prévoit que ces disparités, tout comme les cas d'hybridation, seront plus fréquentes à l'avenir. Les effets de l'hybridation peuvent conduire à la disparition de certaines espèces rares, ou encore renforcer la capacité d'adaptation de certaines espèces en introduisant une variation génétique.

- Les changements environnementaux actuels et prévus vont probablement dépasser la capacité d'adaptation naturelle de nombreuses espèces en intensifiant le stress qu'elles subissent, ce qui créera une situation menaçante pour la biodiversité. Par conséquent, les changements climatiques amplifient l'importance de gérer les écosystèmes d'une manière susceptible de lui permettre d'améliorer la résilience et de protéger la biodiversité.

- Les aires protégées, notamment les parcs, les réserves fauniques et les zones marines protégées, joueront un rôle important dans la conservation de la biodiversité en période d'évolution rapide. De nombreuses aires protégées serviront de « refuges » ou de corridors de migration aux espèces indigènes et contribueront ainsi à préserver la diversité génétique. Les aires protégées ont tendance à mieux résister aux changements climatiques que les paysages terrestres et aquatiques intermédiaires, car elles renferment des écosystèmes relativement intacts et sont moins touchées par les facteurs de stress de nature non climatique tels que la perte d'habitat et le morcellement.

- Bon nombre de provinces canadiennes élargissent leur réseau de parcs et autres aires protégées dans le cadre de leur plan global de gestion et de leurs stratégies d'adaptation aux changements climatiques. Les initiatives destinées à entretenir ou à restaurer la connectivité des zones permettent d'accroître la résilience des écosystèmes en améliorant la capacité des espèces à adapter leur répartition aux effets des changements climatiques. La recherche connexe, la surveillance, la science grand public, la sensibilisation du public et les programmes d'expérience du visiteur favorisent la compréhension et aident à mobiliser le public en l'invitant à participer au processus décisionnel.

- La communauté de la conservation reconnaît l'importance du rôle que joue la restauration écologique dans le renforcement de la résilience des écosystèmes par rapport aux effets des changements climatiques. L'intégration des stratégies d'adaptation aux changements climatiques au processus décisionnel concernant la restauration est complexe, au Canada comme ailleurs.

1. INTRODUCTION

Le Canada compte une grande partie des régions polaires, de la toundra, des forêts boréales et tempérées, des prairies et des écosystèmes marins du monde (y compris les eaux territoriales situées dans les océans Pacifique, Atlantique et Arctique), de même que des Grands Lacs. Ces écosystèmes renferment environ 10 % des forêts et 20 % des ressources en eau douce de la planète (Environnement Canada, 2009) et abritent plus de 70 000 espèces de mammifères, d'oiseaux, de reptiles, d'amphibiens, de poissons, d'invertébrés, de plantes et d'autres organismes (CCCEP, 2011).

La biodiversité, qui représente la variété des espèces et des écosystèmes, ainsi que les processus écologiques dont ils font partie, est le capital naturel sur lequel repose en grande partie le bien-être économique et social des Canadiens. Elle contribue à l'assainissement de l'air et de l'eau, à la régulation du climat, au stockage du carbone, à la pollinisation et à la régulation des crues. Les humains profitent de façon directe et indirecte de la biodiversité, par exemple, comme source de nourriture, de fibres, de matériaux pour la fabrication de vêtements et de produits forestiers, et pour soutenir les activités récréatives. La biodiversité est essentielle au maintien et au renforcement des secteurs économiques (tels l'agriculture et le tourisme) pendant les périodes de mutation environnementale rapide (Environnement Canada, 2009).

Le présent chapitre résume les effets des changements climatiques sur la biodiversité au Canada et présente différents outils permettant de maintenir et d'accroître la résilience écologique. Bien que la plupart des études réalisées jusqu'à présent aient porté sur les effets des changements climatiques sur les espèces individuelles, des recherches sur les rapports interspécifiques sont en cours et permettront de mieux comprendre les effets de ces changements sur les processus à l'échelle de l'écosystème et sur les services écosystémiques (Walther, 2010).

L'encadré 1 contient la définition des termes techniques employés dans le présent chapitre.

ENCADRÉ 1

TERMES TECHNIQUES EMPLOYÉS DANS LE PRÉSENT CHAPITRE

Biodiversité : la variété des espèces et des écosystèmes, ainsi que les processus écologiques dont ils font partie.

Cycles biogéochimiques : voies par lesquelles les éléments chimiques ou les molécules se déplacent entre les composantes biotiques et abiotiques d'un écosystème.

Écosystème : ensemble des organismes vivants (plantes, animaux et microbes) qui interagissent avec les composantes abiotiques de leur milieu (air, eau, sol) pour former un système.

Enveloppe climatique : modèle qui prédit la répartition d'une espèce dans un espace géographique, en fonction d'une représentation mathématique de sa répartition connue dans une zone délimitée par les données climatiques (telles la température et les précipitations).

Hybridation : croisement entre deux espèces, sous-espèces ou populations différentes d'animaux ou de plantes.

Hypoxie : manque d'oxygène, un phénomène qui survient en milieu aquatique à mesure que la concentration en oxygène dissous diminue au point de nuire aux organismes marins qui évoluent dans le système touché.

Insectivores aériens : oiseaux qui attrapent des insectes en vol pour se nourrir soit, par exemple, le martinet ramoneur et l'hirondelle rustique.

Intégrité écologique : état (d'une aire protégée ou d'un autre écosystème) jugé caractéristique de sa région naturelle et susceptible de durer, qui comprend les composantes abiotiques et la composition, de même que l'abondance, des espèces indigènes et des communautés biologiques, les rythmes de changement et les processus qui les soutiennent. L'intégrité écologique permet de mesurer la résilience écologique (voir ci-dessous).

Niche écologique : l'ensemble des conditions et des ressources environnementales dont une espèce a besoin pour accomplir son cycle vital.

Phénologie : description (ou étude) de la chronologie des étapes du cycle de la vie végétale et animale, et de l'incidence des fluctuations climatiques saisonnières et annuelles, ainsi que des facteurs d'habitat (comme l'altitude), sur ces étapes.

Résilience écologique : capacité d'un système à supporter les perturbations, à changer tout en conservant essentiellement la même fonction, la même structure et les mêmes réactions, donc la même identité.

Services écologiques (ou écosystémiques) : nombreuses ressources et processus fournis par les écosystèmes et dont bénéficient les humains. Ils comprennent, entre autres, l'eau potable et des processus comme la décomposition des déchets.

Vigueur hybride : niveau accru de vigueur d'un hybride par rapport à la variété ou à l'espèce de l'un ou l'autre des parents, un phénomène particulièrement courant chez les hybrides végétaux. Ce phénomène est également appelé hétérosis ou avantage hétérozygote.

Zone biogéographique : surface terrestre définie en fonction des formes de vie, de la répartition des espèces ou de l'adaptation des plantes et des animaux aux conditions climatiques, au sol ou à d'autres facteurs.

Zoonose : maladie infectieuse qui se transmet d'une espèce à l'autre (quelquefois par le biais d'un vecteur), d'un animal à un humain ou d'un humain à d'autres animaux.

Zooplancton : ensemble des organismes hétérotrophes (parfois détritivores) qui dérivent dans les océans, les mers et les plans d'eau douce.

2. APERÇU DES CONCLUSIONS TIRÉES DES ÉVALUATIONS PRÉCÉDENTES

Les effets écologiques, sociaux et économiques des changements climatiques ont été abordés dans chacun des chapitres régionaux du document intitulé *Vivre avec les changements climatiques au Canada* (Lemmen *et al.*, 2008). Les principales conclusions relatives à la biodiversité découlant de cette évaluation comprennent, entre autres, les constatations suivantes :

- Au Canada, les écosystèmes septentrionaux (p. ex., taïga, toundra et désert polaire) sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques et continueront de l'être. La perte d'habitats, la compétition avec des espèces migrant vers le nord et l'arrivée de nouvelles maladies et de nouveaux parasites en provenance du sud comptent parmi les répercussions sur les espèces arctiques (Furgal et Prowse, 2008).
- Les répercussions des changements climatiques sur la répartition, l'abondance, la physiologie et la chronologie des étapes du cycle de vie des espèces modifieront le rapport interspécifique et les habitats. L'arrivée précoce du printemps entraîne des modifications au calendrier de croissance et de reproduction de nombreuses espèces végétales, qui constituent une source de nourriture et un habitat pour plusieurs espèces. On a remarqué, par exemple, qu'en Alberta, la date de floraison du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) survient 26 jours plus tôt qu'il y a 100 ans (Beaubien et Freeland, 2000). Ces changements peuvent provoquer le découplage d'espèces qui ont co-évoluées (Beaubien et Freeland, 2000 *dans* Sauchyn et Kulshreshtha, 2008).
- Les écosystèmes littoraux et estuariens sont exposés aux risques que posent une intensification de l'érosion et un rétrécissement de l'espace côtier, ce qui entraînerait la disparition de l'habitat d'espèces, comme le pluvier siffleur (Vasseur et Catto, 2008; Walker et Sydneysmith, 2008). Le réchauffement prévu du Gulf Stream et le refroidissement du courant du Labrador pourraient altérer l'habitat et nuire aux espèces du Canada atlantique (Vasseur et Catto, 2008).
- L'augmentation du stress hydrique dans les écosystèmes des terres herbeuses est susceptible de diminuer la productivité des pâturages naturels, même si le prolongement de la période de croissance et la diminution de la compétition avec les arbustes et les arbres (en raison des conditions plus sèches) viennent partiellement compenser les effets du manque d'humidité (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008).
- Les habitats situés dans les écosystèmes alpins, les steppes froides et la forêt acadienne pourraient rétrécir ou devenir de plus en plus morcelés à mesure que le climat se réchauffe (Vasseur et Catto, 2008). D'autre part, certaines espèces telles celles de la zone carolinienne pourraient venir à occuper de nouvelles niches écologiques dans des habitats situés plus au nord.
- Même si la hausse des concentrations atmosphériques de CO_2 et la prolongation des saisons de croissance permettaient de stimuler la productivité des forêts, l'augmentation du nombre et de l'intensité des incendies, des infestations d'insectes, des périodes de sécheresse et des épisodes de givre pourraient réduire les gains potentiels. La progression de l'infestation par le dendroctone du pin ponderosa vers l'est dans la forêt boréale est également préoccupante (Bourque et Simonet, 2008).
- Dans la baie d'Hudson, les changements observés sur le plan de la répartition et de l'abondance des phoques et des ours polaires, ainsi que dans le nombre d'espèces de poisson recensées, correspondent au raccourcissement de la saison des glaces et à une élévation des températures de l'eau (Furgal et Prowse, 2008).
- Les effets des changements climatiques sur la quantité et la qualité de l'eau constituent une préoccupation en ce qui a trait aux lacs et aux rivières du Canada. Les températures plus élevées modifient l'indice thermique de l'habitat de plusieurs espèces de poisson, augmentant ainsi le nombre d'habitats adaptés aux espèces envahissantes tout en créant des conditions favorables à une prolifération indésirable d'algues (Chiotti et Lavender, 2008).
- Dans les régions nordiques et alpines, la fonte rapide des glaciers modifiera les régimes d'écoulement et cela se répercutera sur les écosystèmes aquatiques en aval et les ressources en eau de bon nombre de villages et de villes (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008)

Plusieurs exemples de mesures et de stratégies d'adaptation sont présentés dans Lemmen *et al.* (2008). Les mesures qui contribuent à protéger la biodiversité comprennent l'augmentation de la connectivité entre les écosystèmes et la réduction du morcellement écologique, l'extension des réseaux d'aires protégées de façon à préserver les aires représentatives de chaque région naturelle, et la mise en œuvre de programmes d'inventaire, de surveillance et de recherche dans le but d'éclairer les décisions en matière d'adaptation.

3. CLIMAT ET BIODIVERSITÉ

Le climat joue un rôle de premier plan dans la composition, la structure et la fonction d'un écosystème. Il interagit aussi avec d'autres facteurs qui exercent une influence sur la biodiversité tels la pollution et les changements survenant au niveau de l'utilisation du sol. C'est pour cette raison que plusieurs études écologiques comprennent des données modélisées ou observées sur le rapport qui existe entre la biodiversité et les changements climatiques.

Les données actuelles indiquent que les aires de répartition appropriées sur le plan climatique (enveloppe climatique) à de nombreuses espèces se déplaceront probablement vers le nord en réaction au réchauffement des températures (p. ex., McKenney *et al.*, 2007; Coristine et Kerr, 2011) et que ce phénomène aura d'importantes conséquences sur les gens qui dépendent de la structure actuelle des divers types d'écosystèmes. Par exemple, les modèles de niche écologique qui ont servi à étudier 765 espèces semblent indiquer que les changements climatiques pourraient favoriser la biodiversité dans le sud du Québec au cours du présent siècle, à mesure que les espèces se déplaceront vers le nord (Berteaux *et al.*, 2010; Chambers *et al.* 2013). De même, plusieurs espèces d'oiseaux qui nichent dans la partie septentrionale de l'Est des États-Unis se déplaceront probablement vers le Canada, contribuant ainsi à une augmentation de la diversité des espèces d'oiseaux dans l'est du Canada (Desgranges et Morneau, 2010).

Même si les flux migratoires s'étendent vers le nord, il est possible que la limite méridionale de l'aire de répartition d'une espèce se contracte en réaction aux changements climatiques (Hampe et Petit, 2005). Les populations qui se retrouvent près des limites méridionales d'un habitat sont souvent génétiquement plus diversifiées, en raison des changements survenus antérieurement dans la répartition des espèces (Jaramillo-Correa *et al.*, 2009). Une telle situation fait en sorte que le déplacement vers le nord des populations méridionales peut non seulement avoir une incidence sur la diversité régionale et la fonction de l'écosystème, mais aussi sur la diversité génétique globale des espèces touchées (Hampe et Jump, 2011).

Les conditions physiques (p. ex., obstacles au déplacement) et les processus biologiques (p. ex., accès réduit à la nourriture pendant les étapes essentielles du cycle de vie, la période de reproduction et d'élevage) qui nuisent au déplacement des espèces peuvent également avoir une incidence sur la biodiversité. Les changements dans la composition de l'espèce qui découlent de cette migration peuvent avoir des conséquences variées telle une perturbation des rapports prédateur-proie et des rapports hôte-parasite. Ainsi, même si nous savons que la biodiversité du Canada évoluera en réponse aux nouvelles conditions climatiques, des incertitudes persistent quant à la manière dont ces changements influeront sur la composition, la structure et la fonction des écosystèmes (Varrin *et al.*, 2007). Selon toute probabilité, la réaction sera propre à l'écosystème ou à l'habitat, ce qui créera un ensemble disparate d'espèces dont la variété et la productivité augmenteront ou diminueront au fil du temps partout au pays.

La présente section du chapitre porte sur l'état des connaissances actuelles des effets des changements climatiques sur ce qui suit :

1. la chronologie des étapes du cycle de vie (phénologie);
2. la répartition observée et prévue des espèces;
3. la santé des poissons et de la faune; et
4. les régimes de perturbation et autres facteurs de stress d'origine anthropique tels que le morcellement de l'habitat.

Elle inclut aussi une brève analyse des incertitudes, des lacunes en matière de connaissances, et des répercussions sociales et économiques globales.

3.1 CHANGEMENTS DANS LA CHRONOLOGIE DES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE (PHÉNOLOGIE)

La hausse des températures hivernales et printanières aux latitudes moyennes et élevées a provoqué chez certaines espèces des changements phénologiques, certains phénomènes se produisant plus tôt au printemps (Schwartz *et al.*, 2006a; Coristine et Kerr, 2011). Parmi les exemples de changements phénologiques survenus au Canada, on remarque le déclenchement précoce du cycle de reproduction chez les amphibiens (p. ex., Walpole et Bowman, 2011; Walpole *et al.*, 2012), l'occupation hâtive des habitats de reproduction et l'apparition précoce des nouveau-nés chez diverses espèces d'oiseau en Amérique du Nord (Waite et Strickland, 2006; Friends of Algonquin Park, 2012; Hurlbert et Liang, 2012; *voir aussi* l'étude de cas 1), et le début hâtif de la saison de croissance de diverses espèces végétales (Schwartz *et al.*, 2006a).

Il existe une forte corrélation entre la physiologie des insectes et la température. Par exemple, on a constaté que la vitesse du métabolisme de certains insectes peut doubler si la température augmente de 10 °C, ce qui les rend très sensibles aux variations de température (Gillooly *et al.*, 2001; Clarke et Fraser, 2004). Les réactions métaboliques à la hausse de la température influencent et amplifient probablement la dynamique des populations, notamment au niveau de la fécondité, du taux de survie, du temps de génération et de la dispersion (Bale *et al.*, 2002). La chronologie des étapes du cycle de vie printanier de plusieurs insectes et végétaux est déjà devancée en réaction à la hausse des températures (Harrington *et al.*, 2001; Logan *et al.*, 2003), et la disparité phénologique pourrait constituer l'une des conséquences potentielles pour les oiseaux migrateurs. Cette disparité est caractérisée par un manque de synchronisme entre les pics saisonniers de la biomasse végétale ou d'insectes, et la croissance et le développement des nouveau-nés (p. ex., Rodenhouse *et al.*, 2009; Knudsen *et al.*, 2011; *voir* l'étude de cas 1).

Les fluctuations du climat océanique (*voir* le chapitre 2 – *Un aperçu des changements climatiques au Canada*), en particulier de la température de la surface de la mer, exercent une forte influence sur la chronologie des événements du cycle de vie des organismes marins. Par exemple, dans le détroit de Georgie, la période d'abondance maximale de l'espèce dominante du zooplancton, qui survenait à la fin de mai il y a cinquante ans, a eu lieu à la mi-mars en 2004 (MPO, 2010). Ce changement peut également jouer un rôle dans les dates d'éclosion de plus en plus précoces de plusieurs espèces d'oiseaux marins du secteur (Gaston *et al.*, 2009), tout en étant symptomatique du rapport étroit que l'on remarque entre le succès du recrutement aux niveaux trophiques supérieurs et le moment de la production primaire liée à la température (Bertram *et al.*, 2009; Koeller *et al.*, 2009). Les espèces dont les besoins liés à l'habitat diffèrent selon l'étape de leur cycle de vie peuvent être particulièrement vulnérables aux variations de température. Ainsi, par exemple, les jeunes

saumons de l'Atlantique (Friedland *et al.*, 2003) et du Pacifique (Crozier *et al.*, 2008) sont soumis à un stress accru en raison du réchauffement des températures, lequel peut mener à une disparité entre le début du processus d'adaptation à l'eau salée (une combinaison de réactions comportementales, morphologiques et physiologiques qui stimule la migration et prépare le poisson à vivre dans l'océan) et les conditions biogéochimiques qui prévalent dans l'environnement marin.

ÉTUDE DE CAS 1

RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, DISPARITÉ PHÉNOLOGIQUE ET DÉCLIN DES POPULATIONS D'OISEAUX MIGRATEURS

Les oiseaux sont étudiés et surveillés de près et font l'objet de recherches étayées par des données à long terme tirées de nombreuses sources (p. ex., Recensement des oiseaux de Noël, Relevé des oiseaux nicheurs). Les analyses révèlent un déclin marqué des populations de certains oiseaux migrateurs, en particulier chez les insectivores qui se nourrissent en vol, les oiseaux de rivage et les oiseaux de prairie (Stuchbury, 2007; Nebel *et al.* 2010; Sauer *et al.*, 2011; Initiative de conservation des oiseaux de l'Amérique du Nord–Canada, 2012). Au cours des 40 dernières années, plus de la moitié de la population des 20 espèces d'oiseaux les plus communes en Amérique du Nord a disparu (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010). La population de la plupart de ces espèces continue de décliner, et des milliers d'oiseaux disparaissent chaque année. Le rythme et l'ampleur du déclin des populations d'espèces comme l'engoulevent d'Amérique (*Chordeiles minor*), le martinet ramoneur (*Chaetura pelagica*), la paruline du Canada (*Cardellina canadensis*) et la sturnelle des prés (*Sturnella magna*) sont suffisamment importants pour que ces oiseaux soient inscrits sur la liste des espèces menacées en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* (COSEPAC, 2007a, b, 2008, 2011). Des déclins comparables de populations d'oiseaux migrateurs ont été notés en Europe au cours des dernières décennies (Møller *et al.*, 2008).

Les changements climatiques ont probablement joué un rôle important dans le déclin récent des populations (Knudsen *et al.*, 2011; Initiative de conservation des oiseaux de l'Amérique du Nord–Canada, 2012); en effet, ils ont contribué à la détérioration du territoire d'hivernage des oiseaux migrateurs causée par les épisodes de sécheresse et d'autres effets de nature climatique, ainsi qu'à la création d'une disparité phénologique, à savoir un découplage entre le moment de la migration et l'abondance de la nourriture. Bien qu'il soit possible d'affirmer que les disparités phénologiques peuvent avoir d'importantes répercussions sur les populations et les espèces (Post *et al.*, 2009; Knudsen *et al.*, 2011; Miller-Rushing *et al.*, 2012), peu d'études sont consacrées explicitement aux répercussions des changements climatiques sur les disparités phénologiques qui touchent les oiseaux migrateurs.

Un indice des disparités phénologiques, calculées comme étant la différence entre les tendances en matière de température sur les territoires d'hivernage par rapport aux territoires de reproduction, permet de prévoir le déclin des populations d'oiseaux en Amérique du Nord (Jones et Cresswell, 2010). En Europe, on a constaté un déclin dans les populations d'oiseaux qui n'avaient pas devancé leur migration printanière entre 1990 et 2000, tandis que les populations d'oiseaux qui avaient devancé le moment de la migration étaient demeurées stables ou avaient augmenté (Møller *et al.*, 2008). En outre, malgré des dates d'arrivée plus hâtives, les oiseaux arrivent désormais au moment où les températures sont plus chaudes que par le passé. Les processus écologiques qui dépendent de la chaleur, comme l'apparition des insectes, surviennent donc avant leur arrivée, ce qui crée un « décalage thermique » (Saino *et al.*, 2010, figure 1). On note un déclin plus marqué des populations chez les espèces d'oiseaux qui sont confrontées à un décalage thermique plus prononcé.

Certaines espèces européennes (comme la mésange bleue (*Cyanistes caeruleus*), la mésange charbonnière (*Parus major*), le gobemouche noir (*Ficedula hypoleuca*) et l'épervier d'Europe (*Accipiter nisus*)) connaissent les plus grandes disparités, puisque les dates de reproduction sont moins (Both *et al.*, 2009) ou plus (Pearce-Higgins *et al.*, 2005) devancées par rapport à la période où la nourriture de base des oisillons est disponible. En revanche, cette disparité peut ne pas être présente dans les environnements où la nourriture abonde pendant toute la saison de reproduction. En Amérique du Nord, par exemple, on observe que le début de la ponte chez l'hirondelle bicolore, un oiseau qui s'alimente en vol, est étroitement lié à la biomasse d'insectes volants pendant la même période et non au pic saisonnier de l'approvisionnement en nourriture, qui survient plus tard en saison presque tous les ans dans la plupart des endroits (Dunn *et al.*, 2011).

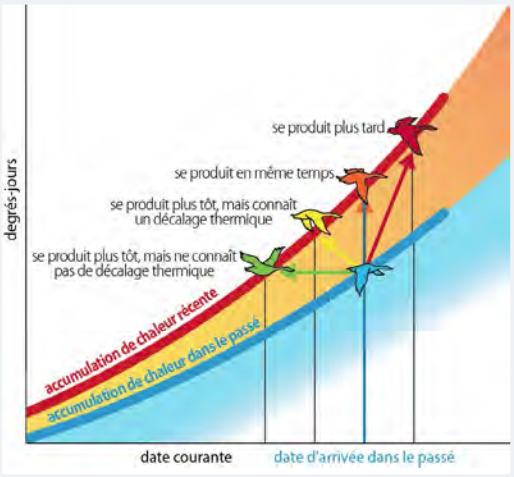


FIGURE 1 : Changements climatiques et phénologiques qui sont susceptibles d'entraîner des disparités écologiques chez les oiseaux migrateurs. Les courbes représentent la progression du printemps sur deux ans, à mesure que les degrés-jours augmentent (accumulation de chaleur) au fil du temps. La courbe représentant la dernière année (ligne rouge) apparaît au-dessus de celle des années passées (ligne bleue), étant donné le réchauffement hivernal et printanier, ce qui signifie que les degrés-jours ont augmenté plus rapidement. Les données sur la date d'arrivée de certains oiseaux migrateurs ne montrent aucun changement, ni avance ni retard. Les espèces qui arrivent désormais à la même date, ou à une date ultérieure, sont confrontées à des degrés-jours plus élevés et à des processus écologiques relativement avancés, comme l'apparition des insectes, et connaissent donc un « décalage thermique ». Mêmes les espèces ayant devancé leur arrivée peuvent être confrontées à un décalage thermique si l'arrivée précoce ne permet pas de contrebalancer pleinement la hausse des températures. Seule une modification importante de la date d'arrivée peut pallier les effets des changements climatiques *(adapté de Saino et al., 2010)*.

3.2 CHANGEMENTS TOUCHANT LES AIRES DE RÉPARTITION DES ESPÈCES

Les observations démontrent clairement des changements touchant les aires de répartition traditionnelles des espèces. Au cours des 40 dernières années, l'aire de répartition de quelque 180 espèces d'oiseaux, sur les 305 espèces qui hivernent en Amérique du Nord, s'est déplacée vers le nord sur une distance moyenne de 1,4 km par an. De même, les aires de reproduction des oiseaux qui peuplent le sud de l'Amérique du Nord se sont déplacées en moyenne de 2,4 km par année (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010). Dans les forêts du nord-est de l'Amérique du Nord, les aires de répartition traditionnelles de 27 des 38 espèces qui ont été documentées se sont déplacées principalement vers le nord (Rodenhouse *et al.*, 2009). Des rapports sur les déplacements des aires de répartition ont été publiés pour un certain nombre d'espèces au Canada (Hitch et Leberg, 2007; Blancher *et al.*, 2008). On a effectué des analyses détaillées concernant la paruline à capuchon (*Setophaga citrina*, Melles *et al.*, 2011), le petit polatouche (*Glaucomys volans*, Garroway *et al.*, 2010, 2011), les papillons (Petersen *et al.*, 2004; Kharouba *et al.*, 2009) et un certain nombre d'arbres (Gamache et Payette, 2005; Asselin et Payette, 2006; Crête et Marzell, 2006; Boisvert-Marsh, 2012).

Les modèles de répartition des espèces et les modèles d'enveloppes climatiques permettent de prédire ces déplacements. Ces modèles utilisent les corrélations statistiques entre les occurrences connues d'espèces ou de types d'écosystèmes et les variables climatiques associées à ces occurrences (p. ex., Thuiller *et al.*, 2005; Hamann et Wang, 2006) pour prédire la répartition d'une espèce en fonction des conditions climatiques, aussi bien futures que passées (Thuiller *et al.*, 2005; Berteaux *et al.*, 2010, 2011; Pellatt *et al.*, 2012). À l'heure actuelle, la plupart des modèles partent du principe que le climat est le principal déterminant de la qualité de l'habitat. Quoique tout probablement valide à une grande échelle géographique, cette hypothèse est susceptible de moins l'être à une échelle spatiale plus réduite (*voir* la section 3.5). Les modèles prévoient une expansion de l'aire de répartition lorsque l'étendue spatiale du climat propice augmente, mais le réchauffement peut provoquer un rétrécissement de l'aire de répartition lorsque celle-ci est limitée sur le plan géographique. On prévoit que l'aire de répartition de plusieurs espèces arctiques et alpines se rétrécira en réaction au réchauffement (Alsos *et al.*, 2012), étant donné qu'elle ne pourra peut-être pas se déplacer en amont ou vers le nord.

Les changements dans la répartition des espèces qui sont prévus selon les scénarios des conditions climatiques à venir dépendent également de la prise en considération de la capacité de dispersion d'une espèce. Par exemple, selon un scénario qui ne comporte aucune limite quant à la capacité des graines à coloniser un nouvel habitat, on prévoit que l'aire de répartition future de 130 essences d'arbres nord-américaines rétrécira de 12 % et que le centre de cette zone se déplacera d'environ 700 km vers le nord d'ici la fin du siècle. Par contre, lorsqu'on suppose que la migration des arbres ne peut se faire grâce à la dispersion des graines, les modèles prévoient que l'aire rétrécira de 58 % et qu'elle se déplacera de 330 km vers le nord (McKenney *et al.*, 2007). Le résultat le plus probable se situe entre ces deux extrêmes, particulièrement dans le Nord canadien où le manque de sols fertiles freinera fort probablement la migration de plusieurs essences vers le nord.

La plupart des scénarios climatiques prévoient d'importants changements dans la composition des forêts dans l'est de l'Amérique du Nord, y compris une réduction de l'aire propice à la croissance de nombreuses essences de feuillus nordiques (Iverson *et al.*, 2008). Ces essences seront probablement remplacées par des espèces caractéristiques des forêts de chênes et de caryers et par diverses variétés de pins, mais on ignore le rythme de la mutation (Iverson *et al.*, 2008). Les propriétés du sol à l'échelle locale ou régionale ralentiront probablement le potentiel de migration des essences forestières (Lafleur *et al.*, 2010). Certaines études semblent indiquer qu'il faut s'attendre à ce que la composition des essences forestières évolue constamment à l'avenir, puisque les espèces réagiront de diverses façons aux variations climatiques et aux propriétés du sol (Drobyshev *et al.*, 2013).

Les scénarios fondés sur les modèles d'enveloppes bioclimatiques pour l'ouest du Canada démontrent que les essences dont la limite septentrionale de l'aire de répartition est située en Colombie-Britannique pourraient se déplacer d'au moins 100 km par décennie (Hamann et Wang, 2006). Même si les essences de feuillus les plus courantes ne semblent pas touchées par les variations de la température moyenne et des précipitations, on observe qu'une grande partie de l'aire de répartition de certaines essences de conifères importantes sur le plan économique pour la Colombie-Britannique tel le pin tordu latifolié, pourrait disparaître (figure 2a). Il convient de remarquer qu'il est improbable que toutes les propriétés propres à l'enveloppe climatique d'une espèce mutent en même temps. La redistribution des zones biogéographiques pourrait être considérable; on prévoit que les régions climatiques de type subboréal et subalpin, aujourd'hui fort répandues, diminueront rapidement (figure 2b).

Les animaux qui se reproduisent dans les forêts se trouvant à haute altitude sont très vulnérables aux effets des changements climatiques, car ils ne peuvent pas trouver refuge dans un nouvel habitat à un endroit plus élevé. Certain modèles prévoient, par exemple, que la grive de Bicknell ne pourra plus accéder à une partie importante de son aire de reproduction si la température annuelle moyenne augmente de 1 °C (Lambert *et al.*, 2005; Rodenhouse *et al.*, 2008).

L'expansion et le rétrécissement des aires de répartition peuvent avoir des conséquences d'ordre génétique sur les populations. Même si la dispersion des individus peut améliorer la diversité génétique locale et propager des génotypes bénéfiques (Hewitt et Nichols, 2005), cette diversité peut décroître aux limites externes de l'aire de répartition d'une espèce si seule une faible population colonise les nouveaux habitats. La diversité génétique peut aussi décroître lorsqu'une population disparaît à la limite de son aire de répartition en voie de rétrécissement (Hewitt et Nichols, 2005; Hampe et Jump, 2011). Les modèles qui étudient 27 espèces courantes de plantes arctiques prévoient une diminution de la diversité génétique en réaction au rétrécissement de l'aire de répartition des espèces causé par les changements climatiques (Alsos *et al.*, 2012). On remarque que des analyses des observations in situ commencent aussi à faire leur apparition dans la documentation publiée. On a observé, par exemple, une réduction de la diversité génétique du tamia alpin (*Tamia alpinus*) causée par le rétrécissement en amont de son aire de répartition lié aux changements climatiques (Rubidge *et al.*, 2012).

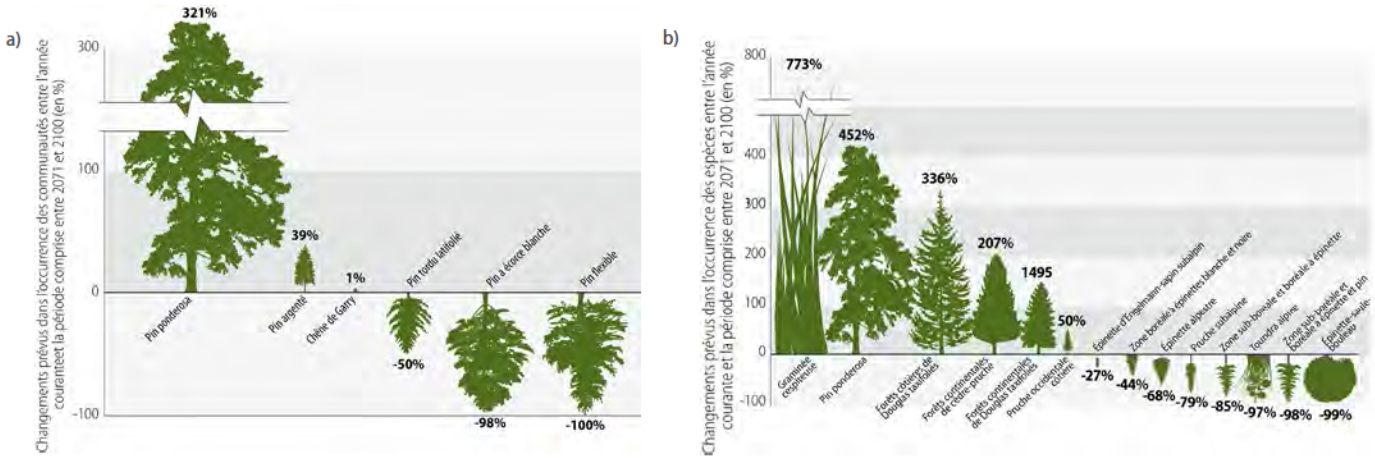


FIGURE 2 : Changements prévus dans la composition des espèces et des communautés entre l'année courante et la période comprise entre 2071 et 2100, en Colombie-Britannique, en réaction aux changements climatiques *(adapté de Hamann et Wang, 2006)*. **a)** Changements dans l'occurrence des essences de pin et de chêne; le pin ponderosa (*Pinus ponderosa*) sera beaucoup plus répandu, alors que des essences comme le pin à écorce blanche (*Pinus albicaulus*) et le pin flexible (*Pinus albicaulus*) pourraient être amenées à disparaître. **b)** Changements dans la répartition des zones écologiques bioclimatiques; les graminées cespiteuses et les forêts de pin ponderosa (*Pinus ponderosa*) pourraient être beaucoup plus répandues qu'aujourd'hui, tandis que la toundra alpine, par exemple, pourrait disparaître.

L'expansion de l'aire de répartition liée aux changements climatiques peut contribuer à un accroissement des croisements et des hybridations lorsque deux populations ou espèces auparavant distinctes entrent en contact (Hoffmann et Sgrò, 2011). Par exemple, le petit polatouche (*Glaucomys volans*) a agrandi son aire de répartition d'environ 200 km vers le nord (Bowman *et al.*, 2005; Garroway *et al.*, 2010, 2011) pendant les hivers doux survenus en Ontario entre 1994 et 2003. Cette expansion a favorisé une co-occurrence et une hybridation accrues entre le petit polatouche et le grand polatouche (*Glaucomys sabrinus*; Garroway *et al.*, 2010). L'hybridation peut avoir différents résultats : i) une descendance stérile, ii) une progéniture viable dotée d'une valeur adaptative accrue, iii) une progéniture viable dotée d'une valeur adaptative réduite, ou iv) aucun changement en ce qui concerne la valeur adaptative. Dans certains cas, l'hybridation peut renforcer la capacité de certaines espèces à s'adapter aux changements en introduisant une variation génétique (Hoffmann et Sgrò, 2011).

L'hybridation peut provoquer l'extinction d'une espèce rare si celle-ci est croisée avec une espèce plus abondante. Par exemple, on a noté que la pyrole mineure (*Pyrola minor*) est rarement présente à un certain nombre d'endroits le long de la limite méridionale de son aire de répartition, et des études génétiques ont révélé que le croisement avec la pyrole à grandes fleurs (*Pyrola grandiflora*) favorise la présence accrue des hybrides au détriment de P. minor (mais non au détriment de *P. grandiflora*) au Groenland et dans le nord du Canada. Ce processus peut entraîner la disparition de P. minor par assimilation génétique (Beatty *et al.*, 2010). Ce même phénomène se manifeste chez la mésange à tête noire (*Poecile atricapillus*), un oiseau chanteur commun en Amérique du Nord, qui se croise avec la mésange de Caroline (*Poecile carolinensis*; Curry, 2005). Les parents hybrides connaissent un taux de succès réduit à l'éclosion et leurs descendants ont de la difficulté à se reproduire (Varrin *et al.*, 2007). Dans la zone d'hybridation des deux espèces, les chercheurs ont repéré une bande étroite où le taux de succès de la reproduction est réduit (Bronson *et al.*, 2005). Puisque l'aire de répartition de la mésange de Caroline continue sa progression vers le nord (Hitch et Leberg, 2007), la zone d'hybridation pourrait s'étendre de l'Ohio jusqu'en Ontario d'ici quelques années. Les mésanges hybrides pourraient un jour remplacer la mésange à tête noire dans le sud de l'Ontario.

L'hybridation peut renforcer la capacité d'adaptation d'un organisme aux répercussions des changements climatiques (Hoffmann et Sgrò, 2011). Par exemple, les populations de pékans (*Martes pennanti*) qui recolonisent l'Ontario présentent une vigueur hybride (Carr *et al.*, 2007), et la période d'émergence de la tordeuse des bourgeons (*Choristoneura* spp.) varie davantage en fonction des fluctuations de température printanière, lorsque cet insecte s'hybride avec une espèce voisine appartenant au même genre (Volney et Fleming, 2000).

Des changements dans la répartition des poissons et d'autres organismes aquatiques se produisent déjà, ou sont à prévoir. Même si les températures chaudes de l'été restreignent la dispersion des poissons d'eaux froides (p. ex., le touladi [*Salvelinus namaycush*]; Rahel, 2002), la limnologie physique et les caractéristiques géographiques des lacs peuvent avoir une influence sur l'habitabilité des eaux nordiques (Minns *et al.*, 2009). Les prévisions des répercussions des changements climatiques sur l'habitat du touladi en Ontario semblent indiquer une diminution d'entre 30 % et 60 % de la superficie de certains bassins versants méridionaux. Cette diminution ne sera compensée qu'en partie par une augmentation de la superficie des habitats dans les bassins versants du nord-ouest de l'Ontario (Minns *et al.*, 2009).

Les limites septentrionales des aires de répartition des poissons d'eau chaude sont souvent déterminées par la fraîcheur des températures estivales, responsable du ralentissement de la croissance (Shuter et Post, 1990; Rahel, 2002). Par exemple, l'achigan à petite bouche (*Micropterus dolomieu*) ne fréquente pas les cours d'eau dont la température est supérieure à 27 °C ou inférieure à 15 °C. Au Canada, seuls les lacs situés dans des régions plus au sud offrent des conditions thermiques appropriées. Les prévisions climatiques semblent toutefois indiquer qu'un plus grand nombre de lacs situés plus au nord fourniront un habitat adéquat aux poissons d'eau chaude d'ici la fin du siècle (Chu *et al.*, 2005). Cela signifie que la limite septentrionale de l'aire de répartition de l'achigan à petite bouche pourrait s'étendre vers le nord-ouest de l'Ontario, le nord-est du Manitoba et le centre-sud de la Saskatchewan, ce qui perturberait du même coup les réseaux trophiques actuels. Les auteurs Jackson et Mandrak (2002) sont d'avis qu'une telle expansion pourrait entraîner la disparition de 25 000 individus parmi les populations de ventres rouges du nord (*Phoxinus eos*), de ventres citron (*Phoxinus neogaeus*), de tête-de-boule (*Pimephales promelas*) et de mulets perlés (*Margariscus margarita*). Une telle situation aurait des conséquences négatives sur les ressources alimentaires des prédateurs tel le touladi (Vander Zanden *et al.*, 1999). Les obstacles à la migration des espèces aquatiques, y compris les barrières physiques et les divisions installées entre les bassins versants, ainsi qu'une meilleure compréhension de la part du public des risques associés au déplacement d'espèces entre deux plans d'eau, pourraient freiner l'expansion prévue des aires de répartition.

Les espèces marines pourraient réagir au réchauffement des températures en modifiant la répartition latitudinale et la profondeur de leur habitat (*voir* le chapitre 4 – *Production alimentaire*). Les calculs semblent indiquer qu'à tous les dix ans, la répartition latitudinale pourrait se déplacer de 30 à 130 km vers le nord et la profondeur de l'habitat pourrait descendre de 3,5 m (Cheung *et al.*, 2009, 2010). Au Canada, les gains et les pertes liés aux espèces ont été évalués pour les habitats marins. On estime que les plus grandes pertes se produiront aux latitudes plus basses. Certains prévoient cependant une augmentation du nombre global d'espèces dans les eaux canadiennes (Cheung *et al.*, 2011). On constate déjà des mutations biogéographiques rapides, soit le fait que des espèces qui fréquentent les eaux chaudes se sont déplacées de plus de 10 degrés de latitude vers le nord au cours des 30 dernières années dans l'Atlantique du Nord, entraînant une baisse correspondante au chapitre de la diversité des espèces qui fréquentent les eaux froides (Helmuth *et al.*, 2006). Le réchauffement de l'océan Arctique devrait favoriser l'expansion des espèces du Pacifique vers l'Arctique et de là, vers l'océan Atlantique (Vermeij et Roopnarine, 2008; *voir aussi* Reid *et al.*, 2008). Certains autres cas d'expansion pourraient ne pas être aussi marqués, mais avoir tout de même d'importantes répercussions sur les collectivités côtières. Par exemple, Harley (2011) fait état de la façon dont le réchauffement favorise l'étoile ocrée, *Pisaster ochraceus*, mais semble indiquer que ces conditions auront pour effet de réduire l'étendue des bancs de moules dont elle se nourrit, ce qui aura une incidence sur les autres espèces qui en dépendent pour survivre.

3.3 EFFETS SUR LA SANTÉ DES POISSONS ET DE LA FAUNE

Plusieurs études traitent des effets des changements climatiques sur la santé des poissons et des animaux sauvages au Canada. Des exemples des effets produits sur certaines espèces emblématiques sont fournis dans la présente section.

L'ours polaire est sans contredit l'espèce la plus associée aux changements climatiques dans l'esprit du public. Ces animaux sont tributaires de la banquise pour chasser et se reproduire – ils engraissent en avril, en mai et en juin, avant que la glace ne cède et au moment où les phoques annelés nouvellement sevrés sont abondants (Stirling *et al.*, 1999; Derocher *et al.*, 2004; Rosing-Asvid, 2006). L'altération du cycle de dégel et de gel et du moment où se forme la banquise aura une incidence sur les ours polaires, en particulier sur les populations australes. Puisque la calotte glacière se désintègre plus tôt et se forme plus tard, les ours polaires auront moins de temps pour se nourrir de phoques, ce qui se traduira par une détérioration de l'état des femelles reproductrices et un faible rendement du taux de reproduction (Stirling *et al.*, 1999; Obbard *et al.*, 2006; Peacock *et al.*, 2011). Ces répercussions ne représentent qu'une partie de l'ensemble complexe de changements écologiques qui ont déjà été documentés dans l'Arctique (*voir* l'étude de cas 2).

ÉTUDE DE CAS 2

CHANGEMENTS ÉCOLOGIQUES INDUITS PAR LE CLIMAT DANS L'ARCTIQUE

La synthèse des récentes recherches sur les changements environnementaux dans les parcs nationaux arctiques (McLennan *et al.*, 2012) révèle que ces écosystèmes à l'état relativement intact subissent des changements considérables et rapides au niveau de la cryosphère (glaciers, pergélisol, couverture de neige, glace lacustre, fluviale et marine) et de la végétation, tandis que les populations d'animaux sauvages commencent tout juste à s'adapter aux effets du réchauffement, qui est plus que le double de celui enregistré aux latitudes méridionales (*voir* le chapitre 2 – *Un aperçu des changements climatiques au Canada*). Les parcs nationaux, ainsi que les autres aires protégées, peuvent servir de points de référence sur les changements et nous aider à saisir la nature, l'ampleur et le rythme des mutations qui surviennent dans les systèmes naturels en raison des changements climatiques (Lemieux *et al.*, 2011; CCP, 2013).

Dans Derkson *et al.* (2012), les auteurs dressent un portrait complet des changements récents observés dans la cryosphère de l'Arctique canadien. Les glaciers des parcs nationaux arctiques reculent et perdent de la masse (Dowdeswell *et al.*, 2007; Barrand et Sharp, 2010; Gardner *et al.*, 2011; Sharp *et al.*, 2011), tandis que le pergélisol se réchauffe et que la profondeur du dégel estival augmente (Burn et Kokelj, 2009; Smith *et al.*, 2010). L'accroissement de la profondeur du dégel estival est un facteur important qui contribue à l'augmentation du nombre de glissements de terrain (Broll *et al.*, 2003). La dégradation du pergélisol dans les sols riches en glace favorise l'assèchement des marécages et altère le régime des eaux des écosystèmes de la toundra (Fortier *et al.*, 2007; Godin et Fortier, 2012).

Parmi les modifications de la végétation qui ont été observées dans les parcs nationaux arctiques, on remarque l'écart de croissance entre les individus d'une même espèce déjà présente dans une zone donnée et l'expansion des aires de répartition des arbres et arbustes du bas Arctique, phénomène qui entraîne d'importants changements dans la composition de la communauté de la toundra. La croissance plus rapide de la végétation de la toundra, phénomène associé à la diminution de la glace de mer (Lawrence *et al.*, 2008; Bhatt *et al.* 2010; Stroeve *et al.*, 2011), a pour conséquence de contribuer à une augmentation générale de la végétation dans toute la région nordique (Jia *et al.*, 2009). Dans quatre parcs nationaux arctiques, on observe que le couvert d'arbustes s'étend et que les espèces herbacées occupent de plus en plus un sol auparavant dénudé (Fraser *et al.*, 2012). Dans le parc national Ivvavik, au Yukon, la biomasse foliaire mesurée pendant le pic saisonnier a plus que doublé entre 1985 et 2010 (figure 3) et la saison de croissance a augmenté de plus de 40 jours en moyenne pendant cette même période (Chen *et al.*, 2012). Les résultats des études semblent indiquer que le réchauffement favorise la croissance des végétaux dans les écosystèmes des parcs nationaux arctiques, mais les réactions varient d'une espèce et d'un endroit à l'autre (Hill et Henry, 2011).

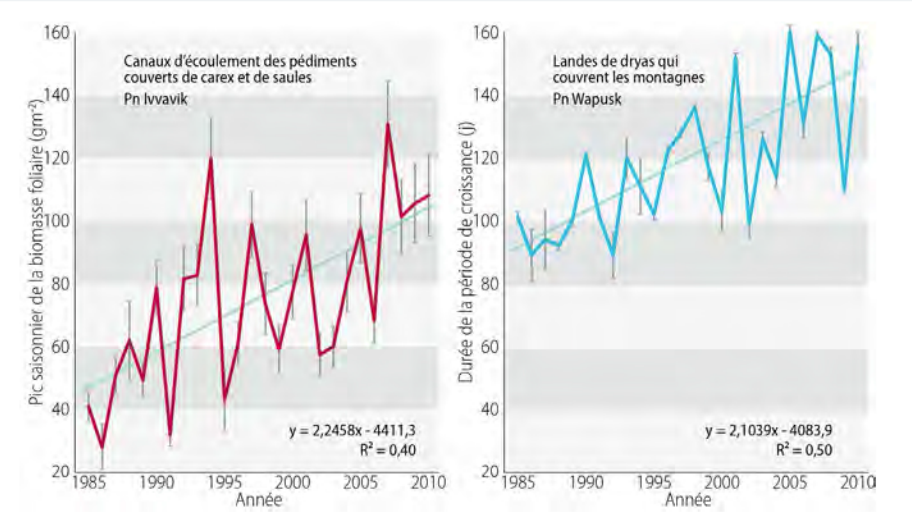


FIGURE 3 : La biomasse foliaire (g m^{-2}) mesurée pendant le pic saisonnier a plus que doublé entre 1985 et 2010 dans l'écotype caractérisé par des canaux de drainage de pédiments où croissent des saules et du carex dans le parc national Ivvavik, au Yukon, et la durée de la période de croissance a presque doublé dans les hautes terres couvertes de dryades et d'éricacées du parc national Wapusk, au Manitoba (Chen *et al.*, 2012).

L'évolution de la végétation peut, entre autres, avoir des conséquences sur les habitats et les processus du sol à l'échelle locale (Sturm *et al.*, 2005a; Post *et al.*, 2009), des effets sur l'hydrologie dans l'ensemble d'un bassin versant (McFadden *et al.*, 2001) et des effets mondiaux sur le climat par l'intermédiaire des rétroactions sur le cycle du carbone (Sturm *et al.*, 2005b; Ping *et al.*, 2008; Bonfils *et al.*, 2012).

Les populations animales changent elles aussi, avec pour conséquence possible des répercussions sur les réseaux trophiques arctiques. Par exemple, les recherches portant sur les réseaux trophiques du parc national Sirmilik, au Nunavut, (figure 4) démontrent que les lemmings jouent un rôle primordial au chapitre de la biodiversité arctique, étant donné leur abondance, et un rôle secondaire en tant que proie pour plusieurs rapaces arctiques et mammifères prédateurs (Gauthier *et al.*, 2004, 2011; Gauthier et Berteaux, 2011; Therrien, 2012). Même s'il est largement démontré que les changements climatiques

Étude de cas 2 suite à la page suivante

ont une incidence sur le nombre de lemmings et de prédateurs qui s'en nourrissent dans le nord de l'Europe et au Groenland (Kausrud *et al.*, 2008; Gilg *et al.*, 2009), rien de tel n'a été constaté jusqu'à présent au Canada (Gauthier *et al.*, 2011; Krebs *et al.*, 2011). Les difficultés à prévoir des changements dans la profondeur de la neige et la phénologie, et la variation naturelle des chutes de neige à l'échelle locale constituent une importante source d'incertitude lorsqu'il s'agit de prévoir l'avenir des petits mammifères arctiques et des espèces qui en dépendent pour survivre.

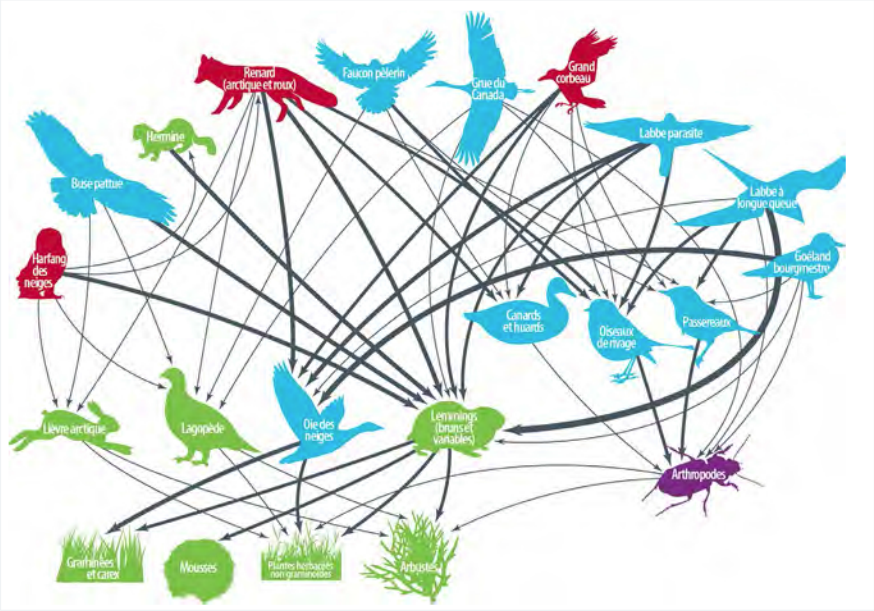


FIGURE 4 : Réseau trophique de l'île Bylot (parc national Sirmilik) formé de quatre catégories d'espèces : migratrice (rouge), en partie migratrice (bleu), résidente (vert) et résidente gelée (violet) dans le sol pendant l'hiver. L'épaisseur du trait indique le degré de solidité relative des liens entre les espèces *(extrait modifié tiré de Gauthier et al., 2011)*.

Les parcs nationaux arctiques abritent aussi les principales aires de reproduction de plusieurs hardes de grands caribous de la toundra. Le nombre de caribous diminue dans la plupart des hardes de l'Arctique circumpolaire (CARMA, 2012). On estime que les variations observées au niveau des populations de grands caribous de la toundra représentent une étape du cycle normal attribuable à l'interaction entre le cycle climatique à long terme, la qualité du fourrage et la survie des petits (Payette *et al.*, 2004; Sharma *et al.*, 2009). Le rétablissement des populations appauvries est peut-être maintenant compromis par les pressions exercées par les changements climatiques tels les changements touchant la phénologie de la végétation (White, 2008; Sharma *et al.*, 2009), l'augmentation du nombre d'épisodes de givre et de périodes de harcèlement par les insectes (Sharma *et al.*, 2009, CARMA, 2012), et l'augmentation de la fréquence des incendies de forêt sur les territoires d'hivernage (Joly *et al.*, 2012). Ces facteurs climatiques sont exacerbés par un nombre croissant de facteurs de stress d'origine anthropique (Sharma *et al.*, 2009; CARMA, 2012, Joly *et al.*, 2012; *voir* la section 3.4). Les facteurs négatifs doivent être évalués en regard des effets potentiellement positifs de l'augmentation de la biomasse sur les lieux de broutage des caribous et des températures plus chaudes dans l'ensemble (Griffith *et al.*, 2002). Le rapport entre chacun de ces facteurs crée des incertitudes quant à l'avenir du grand caribou de la toundra, figure emblématique des parcs nationaux arctiques, principal moteur de la biodiversité et des processus écosystémiques arctiques, et élément essentiel de la culture des collectivités et des modes de vie fondés sur la terre. Des incertitudes semblables pèsent sur le caribou de Peary *(Rangifer tarandus pearyi)*, une espèce dont les populations ont subi les contrecoups de phénomènes climatiques extrêmes (Miller et Gunn, 2003), mais qui pourrait se rétablir si l'augmentation du rendement fourrager compense les effets négatifs des changements climatiques (Tews *et al.*, 2007).

Certaines populations australes d'ours polaires, en particulier celles qui peuplent la portion ouest de la baie d'Hudson (parc national Wapusk, au Manitoba) et la portion sud de la mer de Beaufort (parc national Ivvavik, au Yukon), devraient disparaître au cours des 30 à 40 prochaines années (Stirling et Derocher, 2012). On prévoit que la fonte de la glace de mer forcera les populations à se déplacer vers le nord, à mesure que la glace d'été continuera de disparaître. Des changements substantiels au niveau de la faune arctique sont inévitables, et ils ne font que commencer. Au cours des prochaines décennies, on prévoit qu'un plus grand nombre d'espèces subarctiques et boréales d'oiseaux chanteurs, de rapaces, de petits mammifères, d'ongulés et de prédateurs nomades se déplaceront vers le nord, et interagiront de façon complexe avec les espèces arctiques qui peuplent déjà la région (ACIA, 2005; Berteaux *et al.*, 2006; Gilg *et al.*, 2012). L'immigration d'espèces méridionales occasionnée par le déplacement ou l'expansion de l'aire de répartition lié au réchauffement de la température exercera des pressions sur les espèces arctiques tributaires de ces milieux tels l'ours polaire, le bœuf musqué, le lemming, le renard arctique et le caribou de Peary (Berteaux *et al.*, 2006; Berteaux et Stenseth, 2006; Gilg *et al.*, 2012). Les régions montagneuses de l'Arctique, qui comprennent plusieurs parcs nationaux, peuvent servir de zones-refuges en altitude ou sur les pentes orientées vers le nord. Il importe de comprendre le rôle que peuvent jouer les zones-refuges pour les espèces dont l'aire de répartition rétrécit en raison des changements climatiques, et les conséquences possibles pour les espèces qui seront confinées à ces zones (Barnosky, 2008; Keppel *et al.*, 2012), afin de prédire le sort de nombreuses espèces arctiques tributaires de ces zones.

Dans l'ensemble, les résultats des programmes de surveillance et de recherche mis en place dans les parcs nationaux révèlent un degré élevé d'incertitude concernant la façon dont les écosystèmes terrestres du Nord canadien s'adapteront aux effets des changements climatiques. Cette incertitude est en partie imputable à la difficulté de prédire la façon dont les climats changeront aux échelles spatiales et temporelles susceptibles d'être utiles à la mise en place des mesures de gestion (ACIA, 2005; McLennan, 2011), et à la complexité inhérente aux écosystèmes naturels (Berteaux *et al.*, 2006; Gilg *et al.*, 2012). Les gestionnaires des parcs nationaux arctiques et les collectivités qui dépendent de ces écosystèmes pour se nourrir ou subsister sont confrontés au fait qu'un changement écologique profond est inévitable.

La température de l'eau est l'un des principaux déterminants de la survie et de la reproduction des poissons dans les écosystèmes aquatiques. La température moyenne de l'eau en été dans le fleuve Fraser, en Colombie-Britannique, a augmenté d'environ 1,5 °C depuis les années 1950 (Martins *et al.*, 2011). Les températures record de l'eau enregistrées dans le fleuve Fraser pendant les récentes migrations de reproduction du saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*) ont été associées à un niveau de mortalité élevé, ce qui a suscité des préoccupations quant à la viabilité des stocks touchés par les nouveaux régimes climatiques. Une analyse de quatre stocks de saumons rouges dans le fleuve Fraser donne des résultats variés. Certaines populations sont touchées plus que d'autres par les températures chaudes recensées dans le bras inférieur du fleuve (Martins *et al.*, 2011). Une diminution de 9 à 16 % du taux de survie de tous les stocks est prévue d'ici la fin du siècle, si la température de l'eau du fleuve Fraser continue d'augmenter telle que prévue. L'étude met en évidence le fait que les stratégies de gestion des pêches et de conservation doivent tenir compte des réactions spécifiques des stocks aux variations de température.

Dans les écosystèmes marins, les changements climatiques sont associés à toute une série de stress physiologiques ayant une incidence sur la santé des espèces. Par exemple, dans Crawford et Irvine (2009), les auteurs attribuent l'hypoxie (diminution du taux d'oxygène dissous), documentée à toutes les profondeurs sous la couche de mélange qui longe la totalité des côtes de la Colombie-Britannique, au réchauffement des eaux au large des côtes asiatiques, largement responsable de l'accroissement de la stratification et de la réduction de l'aération (Whitney *et al.*, 2007, *voir aussi* le chapitre 2 – *Un aperçu des changements climatiques au Canada*). L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre joue aussi un rôle dans l'acidification des océans, ce qui a des répercussions importantes sur l'abondance et la répartition à long terme des espèces marines (Feely *et al.*, 2008, Friedlingstein *et al.*, 2010). Par exemple, l'acidification des océans a entraîné une diminution de la disponibilité du carbonate de calcium, élément essentiel à la formation des structures squelettiques et des coquilles rigides des animaux marins. Les eaux froides boréales absorbent plus efficacement le dioxyde de carbone que les eaux australes, et les étés plus chauds engendrent une fonte plus rapide de la glace marine, plus acide (Yamamoto-Kawai *et al.*, 2009). Des signes d'acidification ont également été observés au large de la côte ouest du Canada (Feely *et al.*, 2008 ; Cummins et Haigh, 2010) et dans le golfe du Saint-Laurent, où des chercheurs ont associé une diminution considérable du taux de pH à une augmentation de l'hypoxie (Dufour *et al.*, 2010).

3.4 RELATIONS AVEC LES RÉGIMES DE PERTURBATION ET LES FACTEURS DE STRESS D'ORIGINE ANTHROPIQUE

On croit qu'il existe d'importantes synergies parmi les nombreux facteurs écologiques et socioéconomiques touchés par les changements climatiques. Par exemple, Ainsworth *et al.* (2011) ont conclu que, dans le cas des milieux marins du nord-est du Pacifique, la combinaison de la désoxygénation, de l'acidification, de la production primaire, de la structure des communautés du zooplancton et du déplacement des aires de répartition des espèces avait des effets plus marqués que la somme de ces facteurs pris individuellement. De plus, les effets des changements climatiques interagissent avec d'autres facteurs de stress d'origine anthropique et naturelle tels que la perte et le morcellement des habitats, la pollution, la surexploitation, les incendies de forêt et les espèces envahissantes, de sorte que les effets cumulatifs pourraient menacer de nombreuses espèces (Venter *et al.*, 2006).

Les effets cumulatifs des changements climatiques et du morcellement de l'habitat pourraient vraisemblablement limiter la capacité d'adaptation de certaines espèces (Travis, 2003; Inkley *et al.*, 2004; Opdam et Wascher, 2004; Bowman *et al.*, 2005; Varrin *et al.*, 2007). On a constaté que la colonisation par les plantes forestières est mieux réussie dans les paysages terrestres mieux reliées, et que les espèces végétales dispersées par les animaux colonisaient plus facilement les nouveaux habitats que celles dispersées par d'autres vecteurs (Honnay *et al.*, 2002). Le morcellement du territoire peut aussi constituer un obstacle à l'expansion de l'aire de répartition des oiseaux, surtout dans le cas des populations locales moins importantes installées aux limites des zones de tolérance (p. ex., Opdam et Wascher, 2004; Melles *et al.*, 2011). Des mammifères comme le petit polatouche, un animal forestier qui s'est déplacé vers le nord en passant par les habitats boisés contigus du Bouclier précambrien de l'Est ontarien, mais non par les forêts morcelées du sud-ouest (Bowman *et al.*, 2005), peuvent aussi être touchés. Le morcellement de l'habitat pose également problème dans les écosystèmes d'eau douce (Allan *et al.*, 2005), surtout en ce qui a trait aux barrages, aux structures de détournement, aux revêtements, aux passages lotiques remplacés par des réservoirs, à la reconfiguration des canaux ou à l'assèchement (Stanford, 1996).

D'autres facteurs de stress d'origine anthropique, notamment la pollution de l'eau, l'assèchement des marécages et la baisse des nappes phréatiques, ont entraîné une dégradation importante des écosystèmes d'eau douce partout en Amérique du Nord au cours des 60 dernières années (Kundzewicz et Mata, 2007) et les changements climatiques exacerberont bon nombre de ces effets. De même, les pêches dans les écosystèmes marins ont entraîné des changements dans la composition et l'abondance des communautés de poissons dans les eaux canadiennes (*voir* le chapitre 4 – *Production alimentaire*). Ces modifications, couplées aux variations des températures, de la salinité et de l'acidité induites par les changements climatiques, ont entraîné des changements considérables au niveau de la biodiversité marine au Canada (Benoît et Swain, 2008; Templeman, 2010).

Les incendies et les infestations d'insectes constituent les moteurs naturels des changements que subissent les écosystèmes dans la plupart des régions du Canada. Les changements climatiques devraient toutefois modifier la fréquence et l'ampleur de ces perturbations (*voir* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*). La superficie moyenne brûlée par les incendies au Canada devrait augmenter de 75 à 120 % d'ici 2100 (Flannigan *et al.*, 2009; Stocks et Ward, 2011). Les effets varieront d'une région à l'autre – par exemple, la superficie moyenne brûlée par décennie en Alaska et dans l'ouest du Canada devrait doubler d'ici 2041 à 2050, comparativement à ce que l'on a observé entre 1991 et 2000, et pourrait augmenter jusqu'à 5,5 fois d'ici la dernière décennie du XXIe siècle (Balshi *et al.*, 2009).

Les espèces envahissantes sont celles qui se propagent au-delà de leur aire naturelle ou de leur zone naturelle de dispersion (Mortsch *et al.*, 2003) et qui peuvent causer des dommages aux espèces indigènes par la compétition, la prédation ou le parasitisme (Varrin *et al.*, 2007). De nombreuses espèces aquatiques envahissantes présentes à l'heure actuelle au Canada s'adapteront à l'élévation de la température de l'eau, ce qui aura des conséquences importantes sur la santé des écosystèmes et sur certains secteurs de l'économie. Par exemple, plusieurs espèces envahissantes d'origine européenne (p. ex., espèces

pontocaspiennes) ou asiatique proviennent d'eaux plus chaudes, ce qui leur procure un avantage concurrentiel par rapport aux espèces indigènes d'eaux tempérées et froides dans un contexte de réchauffement climatique (Schindler, 2001). À l'heure actuelle, la carpe asiatique prolifère dans le réseau du fleuve Mississippi et s'est établie jusque dans les eaux du Chicago Sanitary and Ship Canal (canal maritime et sanitaire de Chicago). Même si on a érigé une barrière électrique qui empêche les carpes de pénétrer dans le lac Michigan, le potentiel d'invasion est jugé important. En outre, certaines personnes ont déjà tenté de transporter des carpes vivantes au Canada, et cette situation pourrait se répéter (Dove-Thompson *et al.*, 2011). Dans le milieu marin océanique, le crabe européen (*Carcinus maenas*) s'est déplacé de la Californie vers la Colombie-Britannique (Klassen et Locke 2007), et deux tuniciers (*Botryllus schlosseri* et *B. violaceus*), observés dans l'île de Vancouver, pourraient envahir la majeure partie des côtes de la Colombie-Britannique si le climat se réchauffe (Epelbaum *et al.*, 2009).

Même si l'on pense généralement que les changements climatiques profitent de manière disproportionnée aux espèces végétales envahissantes par rapport aux espèces indigènes, cette hypothèse n'a pas été directement vérifiée (Dukes *et al.*, 2009). Plusieurs études démontrent que les espèces végétales envahissantes qui parviennent à s'établir ont tendance à avoir un niveau de tolérance environnementale supérieur (Goodwin *et al.*, 1999; Qian et Ricklefs, 2006) et à posséder d'autres caractéristiques leur permettant de maintenir ou d'améliorer leur niveau d'adaptation par rapport aux autres espèces en situation de changement climatique. Ces caractéristiques comprennent des cycles de croissance courts, de longues et fréquentes périodes de dispersion des propagules (p. ex., par les graines), et des attributs facilitant la dispersion à grande échelle; grâce à ces caractéristiques, de nombreuses espèces envahissantes sont en mesure de supplanter les espèces indigènes moins bien adaptées aux nouveaux climats (Pitelka *et al.*, 1997; Dukes et Mooney, 1999; Malcolm *et al.*, 2002).

Le réchauffement peut aussi avoir des conséquences importantes sur le cycle biologique et la répartition d'espèces éruptives d'insectes indigènes, comme le dendroctone du pin ponderosa (*voir aussi* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*). Les modèles de prévision du réchauffement semblent indiquer qu'une hausse de la température moyenne de 1 °C à 4 °C augmentera sensiblement le risque d'infestations, d'abord aux plus hautes élévations (dans le cas des hausses de 1 °C et de 2 °C), puis aux latitudes les plus septentrionales (4 °C; Sambaraju *et al.*, 2012). Dans le Front Range du Colorado, la période de vol du dendroctone du pin ponderosa commence au moins un mois plus tôt que de par le passé et dure environ deux fois plus longtemps (Mitton et Ferrenberg, 2012). Certains insectes de cette espèce ont maintenant deux générations de couvains par année. Étant donné que le dendroctone du pin ponderosa n'hiberne pas et que la croissance et le processus de maturation sont contrôlés par la température, cette espèce s'adapte aux changements climatiques en accélérant sa croissance (Mitton et Ferrenberg, 2012). De plus, cet insecte a un succès de reproduction plus élevé dans les zones où les arbres-hôtes n'ont pas été touchés par de fréquentes infestations (Cudmore *et al.*, 2010). Ce taux de fécondité accru est probablement l'un des facteurs clés de l'explosion démographique rapide qui a provoqué une mortalité des arbres-hôtes sans précédent dans de vastes régions de l'Ouest canadien (*voir* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*). Les pratiques d'aménagement forestier tel le maintien de la diversité des essences et des classes d'âge à l'échelle du territoire, peuvent contribuer à atténuer les effets d'une telle infestation (Cudmore *et al.*, 2010).

3.5 INCERTITUDES ET LACUNES LIÉES À L'ÉTAT DES CONNAISSANCES DANS LE DOMAINE

Même s'il existe des preuves solides de l'incidence des changements induits par le climat sur la biodiversité au Canada, il est toujours difficile de les prévoir et de les mesurer. Les modèles qui prévoient que les changements climatiques provoqueront une altération des aires de répartition des espèces supposent généralement que le climat constitue le facteur le plus important dans la détermination de la viabilité d'un habitat. Même si les facteurs climatiques agissent sur les profils de diversité à grande échelle et définissent l'aire de répartition de la plupart des espèces, de nombreux facteurs biophysiques et interactions tels que la compétition, la prédation et la symbiose, exercent aussi une influence sur la répartition et l'abondance des populations à l'échelle locale (McLachlan *et al.*, 2005; Anderson et Ferree, 2010).

Dans l'ensemble, on ne comprend toujours pas la mesure exacte dans laquelle les espèces peuvent effectuer des migrations massives et soudaines (Pearson, 2006). Le recours à des modèles d'enveloppes climatiques en vue de prédire les effets potentiels sur la répartition d'une espèce est d'une utilité limitée, car ces modèles ne sont pas intégrés aux modèles de population, lesquels aident à prédire le risque d'extinction (Brook *et al.*, 2009). Par exemple, les modèles d'enveloppes climatiques qui établissent la moyenne des conditions climatiques dans une grande zone ne tiennent pas compte des microclimats locaux au sein desquels une population de faible densité pourrait subsister (p. ex., *voir* McLachlan *et al.*, 2005). Par conséquent, ces modèles pourraient s'avérer être trop imprécis pour tenir compte des mécanismes clés grâce auquel une espèce pourrait survivre à des changements climatiques rapides (Pearson, 2006). La capacité des modèles d'enveloppes climatiques à prévoir l'étendue actuelle de populations d'arbres et d'oiseaux en Amérique du Nord diminue en fonction de la taille de l'aire de répartition, et les paramètres climatiques constituent des variables explicatives de moindre importance lorsqu'il s'agit de les appliquer à de petites aires (Schwartz *et al.*, 2006). Ainsi, il est presque impossible de prévoir le risque d'extinction d'espèces à répartition limitée, même si les espèces rares et endémiques jouent un rôle important au moment de prévoir le risque global d'extinctions provoquées par les changements climatiques. Il convient aussi de noter que même si une espèce existe dans un espace climatique adéquat, des facteurs tels que la compétition, la disponibilité des aliments, la maladie et la prédation peuvent jouer un rôle encore plus important dans la persistance de cette espèce à cet endroit.

Certaines difficultés ont été en partie corrigées en intégrant les modèles climatiques aux modèles de population. De tels modèles donnent un aperçu de la façon dont les interactions complexes entre les étapes du cycle de vie, le régime de perturbation et la répartition peuvent entraîner un risque accru d'extinction pour une espèce donnée dans un contexte de changements climatiques (Keith *et al.*, 2008). Par exemple, les niveaux de dispersion requis pour

pallier le déplacement des enveloppes climatiques dépassaient la capacité de dispersion plausible sur le plan biologique de certaines espèces végétales. Malgré ces progrès, il importe de poursuivre la recherche sur les effets des changements climatiques sur les tendances des espèces en matière des choix de niches écologiques et sur les réactions des groupes ou ensembles d'espèces, si l'on veut comprendre le processus de réorganisation des écosystèmes au Canada qui se produira à mesure que la température continuera de se réchauffer.

3.6 RÉPERCUSSIONS SOCIALES ET ÉCONOMIQUES DES CHANGEMENTS INDUITS PAR LE CLIMAT SUR LA BIODIVERSITÉ

Il est bien établi que la biodiversité offre des services écosystémiques (et certains biens dont la production dépend des écosystèmes) qui garantissent le bien-être humain (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010). Au Canada, les services écosystémiques participent de façon marquée à plusieurs secteurs économiques, notamment dans les domaines de l'agriculture et des pêches (*voir* le chapitre 4 – *Production alimentaire*), le secteur forestier (*voir* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*) et le tourisme (*voir* le chapitre 5 – *Industrie*). Par exemple, la biodiversité joue un rôle important au chapitre de la pollinisation et de la productivité forestière (Thompson *et al.*, 2011). De tels services peuvent être directement fournis par une ou plusieurs espèces au sein d'une communauté (p. ex., séquestration à long terme du carbone par la sphaigne [*Sphagnum*] dans une tourbière; *voir aussi* McLaughlin et Webster, 2013), par la présence d'espèces rares au sein d'une communauté (en assurant une résistance aux espèces envahissantes; Lyons et Schwartz, 2001) ou grâce aux interactions entre les différentes espèces d'un écosystème (Cardinale *et al.*, 2011). La diversité et l'abondance des espèces comptent parmi les facteurs déterminants les plus importants de la fonction écosystémique (Hooper *et al.*, 2012), y compris la prestation de services écosystémiques.

La biodiversité est également liée à la santé et au bien-être (*voir* chapitre 7 – *Santé humaine*). L'appauvrissement de la biodiversité aux échelles locale et régionale est lié à une hausse du nombre de cas d'allergies chez les adolescents (Hanski *et al.*, 2012) et pourrait aussi accroître le taux de prévalence des zoonoses tels le virus du Nil occidental et la maladie de Lyme, chez les humains (Ostfield, 2009). L'appauvrissement de la biodiversité provoque une baisse du nombre de taxons-hôtes présentant un faible degré d'adaptabilité pour les pathogènes. Ces hôtes à faible aptitude sont remplacés par des espèces généralistes tels la corneille d'Amérique (Corvus brachyrhynchos) et le geai bleu (*Cyanocitta cristata*), dans le cas du virus du Nil occidental, et la souris à pattes blanches (*Peromyscus leucopus*) et le tamia rayé (*Tamias striatus*) dans le cas de la maladie de Lyme (Ostfield, 2009). On prévoit que ces deux maladies progresseront au-delà de leur zone de prévalence en raison des changements climatiques (Hongoh *et al.*, 2011).

L'évaluation économique des services écosystémiques est une discipline relativement nouvelle et complexe. Des estimations ont été préparées pour un certain nombre de régions du Canada où des organisations examinent les façons d'intégrer ces valeurs au processus décisionnel. Ainsi, par exemple, la valeur des services d'approvisionnement (marché) dans la forêt boréale du Canada est estimée à 37,8 milliards de dollars par année, alors que la valeur non économique des services écosystémiques, notamment la lutte contre les ravageurs et les activités liées à la nature, se chiffre à 93,2 milliards de dollars par année (Anielski et Wilson, 2009). On estime que le parc urbain national de la Rouge, dont la création est prévue, et ses bassins hydrographiques environnants procureront des avantages économiques non marchands d'une valeur de 115,6 millions de dollars par année (soit 2247 $ par hectare par année) aux résidents de la région du Grand Toronto (Wilson, 2012). Les services de pollinisation (28,2 millions de dollars par année), le stockage du carbone (17,8 millions de dollars par année) et les habitats humides (17,1 millions de dollars par année) comptent parmi les services écosystémiques qui contribuent le plus au capital naturel de la région étudiée.

Les liens entre la biodiversité, les services écosystémiques et les changements climatiques mettent en évidence l'importance de la résilience écologique à titre de fondement de l'adaptation sociale dans bon nombre de régions (p. ex., SCDB, 2009; Hounsell, 2012; Staudinger *et al.*, 2012; Munang *et al.*, 2013). Une diminution de l'accès aux services écosystémiques, de même que de leur quantité et leur qualité, causée par de nombreux facteurs et aggravée par les changements climatiques (Mooney *et al.*, 2009; Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010; Hounsell, 2012), accroît la vulnérabilité des collectivités tributaires des ressources naturelles (figure 5; Vasseur, 2010; Klein *et al.*, 2011). Au Canada, les collectivités autochtones qui dépendent des sources traditionnelles de nourriture (sauvages) sont particulièrement vulnérables aux changements de l'aire de répartition des espèces et des processus écologiques (*voir* le chapitre 4 – *Production alimentaire*). Cette situation prévaut davantage dans le Nord, car on prévoit que les effets des changements climatiques seront plus marqués dans cette région.

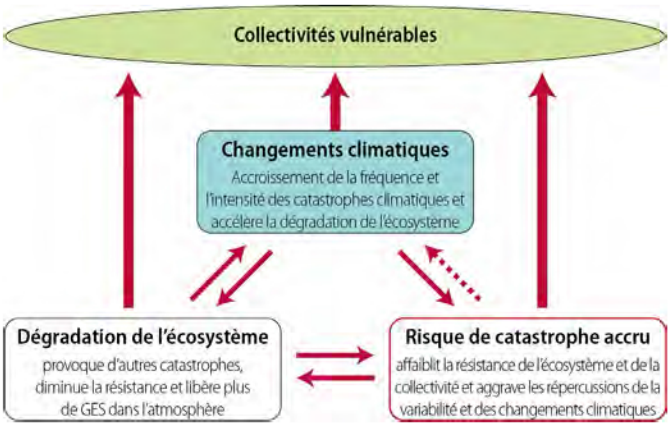


FIGURE 5 : Illustration des liens entre les répercussions des changements climatiques, la dégradation des écosystèmes et le risque accru de catastrophes climatiques *(extrait modifié tiré de PNUE, 2009)*.

3.7 SYNTHÈSE

Les répercussions des facteurs de stress d'origine anthropique, y compris les changements climatiques, sur la biodiversité au Canada sont évidentes. Parmi les changements observés, on note la perte de forêts anciennes, l'altération des débits des rivières aux périodes critiques de l'année, la perte d'habitats fauniques dans les zones agricoles, la diminution des populations de certaines espèces d'oiseaux, la hausse du nombre de feux de friches, une altération importante des réseaux trophiques marins, d'eau douce et terrestres, et la quantité croissante de contaminants présents chez les espèces sauvages (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010). Les réactions des espèces et des écosystèmes aux changements climatiques interagissent de façon complexe, de sorte qu'un effet sur un maillon de la chaîne se répercute sur les autres (figure 6), phénomène qui, dans certains cas, entraîne la création de nouvelles relations interspécifiques et l'apparition de nouvelles caractéristiques au sein des écosystèmes (p. ex., Gray, 2005). Les changements climatiques exercent un stress supplémentaire sur les écosystèmes et les espèces qui sont parfois déjà sur le point d'atteindre un seuil critique telles les populations de poissons en voie de rétablissement une fois que la pêche est interdite, les populations d'oiseaux qui diminuent fortement en raison du déclin des prairies dans la région et de la dégradation de leur état, et le caribou des bois mis à risque par le morcellement de son habitat (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010). Le recul important de la glace de mer dans l'Arctique se répercute actuellement de plusieurs façons sur les écosystèmes et devrait provoquer une diminution des espèces tributaires de la glace, comme les ours polaires (*voir* l'étude de cas 2). D'importantes incertitudes et lacunes liées à l'état des connaissances dans ce domaine subsistent, surtout en ce qui concerne les risques auxquels seront confrontés les espèces et les types d'écosystèmes vulnérables.

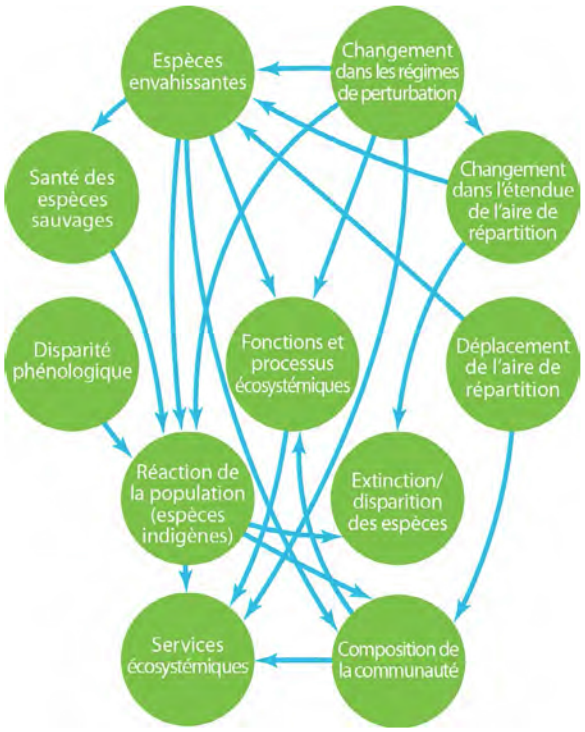


FIGURE 6 : Illustration des interactions complexes entre les réactions observées ou prévues des espèces et des processus écosystémiques aux changements climatiques. Ces complexités font en sorte qu'il est difficile de prévoir les résultats pour une espèce donnée. Des exemples sont fournis dans la section 3.

4. ADAPTATION ET RÔLE DES AIRES PROTÉGÉES

La documentation scientifique en matière de conservation porte sur un vaste éventail de recommandations au chapitre de l'adaptation, visant à atténuer les effets des changements climatiques sur la biodiversité (figure 7; Heller et Zavaleta, 2009; Glick *et al.*, 2011; Poiani *et al.*, 2011; Hounsell, 2012; Oliver *et al.*, 2012). On recommande, entre autres, d'améliorer les mécanismes de coordination entre les institutions, de tenir compte des perspectives spatiales et temporelles, et d'intégrer les scénarios de changements climatiques à la planification et aux mesures de gestion des écosystèmes. Les réactions naturelles des écosystèmes aux changements provoqués par les nouvelles situations environnementales, appelées « ajustements autonomes » (SCDB, 2009), sont généralement insuffisantes pour freiner la perte de la biodiversité et des services écosystémiques qu'elle procure aux gens (Andrade Pérez *et al.*, 2010). Les mesures d'adaptation prévues, qui visent à maintenir ou à restaurer la biodiversité et les services écosystémiques, tout en aidant les populations à s'adapter aux changements climatiques, deviennent de plus en plus courantes dans le monde entier (Andrade Pérez *et al.* 2010).

Les mesures d'adaptation axées sur les écosystèmes (Colls *et al.*, 2009; SCDB, 2009) insistent sur le renforcement de la résilience des collectivités locales aux changements climatiques, grâce au recours à une gestion des écosystèmes qui met l'accent sur la protection de la biodiversité, la restauration des fonctions des écosystèmes et l'utilisation durable des ressources. La résilience renvoie à la capacité d'un écosystème, et de ses sous-systèmes culturels, sociaux et économiques, à s'adapter aux changements.

Les réseaux de conservation, qui reposent essentiellement sur les parcs et d'autres types d'aires protégées, sont les éléments clés d'un système socioécologique résilient, car ils protègent la structure et la fonction de l'écosystème, et contiennent des habitats mis en réseau qui permettent aux organismes de s'adapter aux conditions climatiques changeantes. Les dispositions législatives relatives aux aires protégées procurent les mécanismes qui appuient le rétablissement des espèces en péril et protègent les valeurs culturelles et sociales (Fischer *et al.*, 2009; Hounsell, 2012). Les écosystèmes protégés constituent des sites de recherche et de surveillance

importants (en tant que repères écologiques relativement peu modifiés dans lesquels il est possible de mesurer l'ampleur des changements, par exemple), et servent à mobiliser les visiteurs et à sensibiliser les citoyens aux répercussions des changements climatiques, ainsi qu'aux possibilités et aux solutions qu'elles présentent (NAWPA, 2012). Les caractéristiques d'un programme de gestion réussie du réseau comprennent la cueillette et le partage efficaces des connaissances, les occasions de mobiliser les citoyens et la prise de décisions en collaboration. Au Canada, le Conseil canadien des aires écologiques (Lemieux *et al.*, 2010) et le Conseil canadien des parcs (CCP, 2013) se sont penchés sur le rôle que joue la protection d'écosystèmes fonctionnels et bien gérés au sein de paysages terrestres et aquatiques gérés de façon durable au chapitre de la résilience aux changements climatiques. De plus, la Commission de coopération environnementale de l'Amérique du Nord a élaboré des lignes directrices concernant la création de réseaux d'aires marines protégées résilients dans le contexte des changements climatiques (CCE, 2012). Les mesures suivantes sont jugées essentielles au processus d'adaptation visant à renforcer la résilience des écosystèmes (p. ex., Mawdsley *et al.*, 2009; Berteaux *et al.*, 2010; Lemieux et al., 2010; Lindenmayer et al., 2010; Auzel *et al.*, 2012; CCE, 2012).

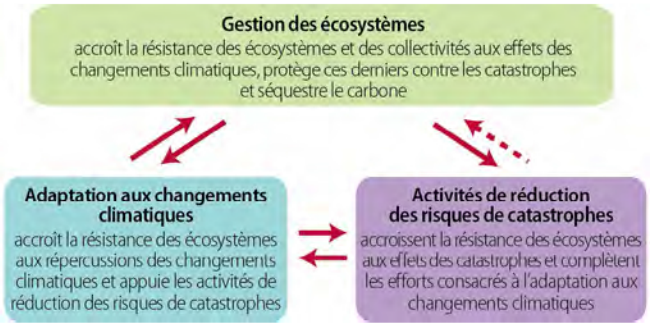


FIGURE 7 : Illustration du rôle de la gestion des écosystèmes dans le renforcement de la résilience des systèmes naturels et des sociétés humaines, en fonction de la façon qu'elle maximise les avantages mutuels associés à l'atténuation des changements climatiques, assure une protection physique contre les catastrophes climatiques (p. ex., protection du littoral) et contribue aux mesures d'adaptation proactives et de gestion des catastrophes *(extrait modifié tiré de PNUE, 2009)*.

1. Protection des écosystèmes à l'état intact, de la diversité biologique et des processus qui en font partie.
2. Mettre en réseau les aires protégées au moyen de paysages terrestres et aquatiques gérés de façon durable.
3. Restaurer les écosystèmes dégradés et appuyer le rétablissement des espèces.
4. Maintenir ou restaurer les régimes de perturbation naturels dans le but de refléter la variabilité naturelle des caractéristiques de l'écosystème visé.
5. Inclure des mesures de conservation qui protègent et gèrent les limites des aires de répartition.
6. Privilégier l'adoption de mesures de gestion active telle la migration assistée, s'il y a lieu.

La présente section explore ces mesures, donne des exemples de projets de recherche et d'initiatives en cours au Canada et décrit leur rôle en ce qui a trait à l'adaptation aux changements climatiques. L'efficacité des mesures d'adaptation repose sur les connaissances acquises grâce à la recherche et à la surveillance, et sur les connaissances traditionnelles (p. ex., Lalonde *et al.*, 2012). Cela nécessite aussi une planification rigoureuse fondée sur la compréhension commune, la mobilisation et le soutien de la population, qui permet à cette dernière d'évaluer les changements climatiques, de s'y adapter et de tirer profit des nouvelles occasions (Chapin *et al.*, 2009).

4.1 PROTÉGER LES ÉCOSYSTÈMES À L'ÉTAT INTACT

Les aires protégées jouent un rôle vital dans la préservation de la biodiversité en période de changement rapide. Elles offrent un habitat aux espèces indigènes et des possibilités d'adaptation autonome, de migration et de sélection naturelle en maintenant la diversité génétique (Hannah *et al.*, 2007; Environnement Canada, 2009; Hannah, 2009; SCDB, 2009; Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010). Ce processus renforce la capacité des espèces à s'adapter aux effets des changements climatiques tels que les disparités phénologiques et les changements dans les régimes de perturbation (*voir* les sections 3.1 et 3.4), tout en profitant des avantages sociétaux qui en découlent (Dudley *et al.*, 2010; NAWPA, 2012; CCP, 2013).

Un réseau national qui relie des aires marines protégées établies dans trois océans et les Grands Lacs compte parmi les efforts récemment consentis par le Canada en cette matière (CIEM, 2011; Gouvernement du Canada, 2011). Le gouvernement fédéral et plusieurs provinces commencent à tenir compte de l'adaptation aux changements climatiques lorsqu'ils planifient l'expansion de leurs parcs et aires protégées. On note, par exemple, l'augmentation de la superficie de la réserve de parc national Nahanni, en 2009, la création de la réserve de parc national Nááts'ihch'oh en 2012, et la création de la réserve d'aire marine nationale de conservation et du site du patrimoine haïda Gwaii Haanas, à proximité de la réserve de parc national Gwaii Haanas, en 2010.

4.2 METTRE EN RÉSEAU LES AIRES PROTÉGÉES AU MOYEN DE PAYSAGES TERRESTRES ET AQUATIQUES GÉRÉS DE FAÇON DURABLE

Les espèces et les écosystèmes réagiront aux changements climatiques grâce aux processus d'évolution et d'ajustement autonome tels que la migration au sein des paysages terrestres et aquatiques qui auront été mis en réseau pour rejoindre des aires appropriées sur le plan climatique et écologique. La planification de la conservation fait la distinction entre deux types de connectivité – les corridors (bandes d'habitats qui relient des parcelles autrement

isolées) et les terrains boisés de départ (série de petites parcelles qui relient des parcelles autrement isolées; Baum *et al.*, 2004). Même si l'intégration des données sur l'adaptation aux changements climatiques au fil du temps sera essentielle à la planification de la mise en réseau, les corridors comme les vallées, les bandes riveraines et les zones côtières continueront de jouer un rôle essentiel et de favoriser la migration des espèces vers de nouveaux habitats. De tels corridors favorisent, en outre, le flux génétique et procurent de la nourriture, de l'eau et un abri pendant les périodes de pénurie, de perturbations d'envergure (comme les gros feux de friches) ou de perturbations d'origine anthropique (SCDB, 2009; Gouvernement du Canada, 2010; Lemieux *et al.*, 2011).

Même si peu de plans d'utilisation des terres au Canada ont tenu compte de la connectivité des habitats dans le passé, les choses sont en train de changer. Par exemple, le gouvernement de la Nouvelle-Écosse et la Ville d'Amherst collaborent dans le but de protéger l'isthme de Chignectou, une bande de terre qui relie la Nouvelle-Écosse au continent nord-américain, en le désignant région sauvage, tout en protégeant l'approvisionnement en eau potable de la ville d'Amherst (Government of Nova Scotia, 2008, 2012). En Ontario, le Programme 50 millions d'arbres, programme de reboisement mis sur pied par le ministère des Richesses naturelles de la province, a désigné des zones dans le but de créer des corridors entre les principaux espaces naturels dans les régions les plus densément peuplées et les plus morcelées du Canada (G. Nielsen, Ministère des richesses naturelles de l'Ontario, communication personnelle).

Étant donné que plusieurs aires protégées du Canada sont entourées de forêts aménagées, les plans d'aménagement forestier tentent de protéger de nombreux biens et services écosystémiques, notamment la connectivité des paysages terrestres (*voir aussi* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*). En Ontario, des « secteurs préoccupants » sont désignés dans des parcelles choisies aux fins d'activités de récolte du bois d'œuvre (MRN, 2004). Ces secteurs préoccupants renferment une ou plusieurs valeurs naturelles ou culturelles qui méritent d'être protégées, et font l'objet d'une considération particulière dans le cadre des activités d'aménagement forestier et de récolte du bois. Ces zones peuvent servir de corridors et de terrains boisés de départ.

La planification à grande échelle de la connectivité est également recommandée dans les milieux marins (CCE, 2012). La connectivité des habitats marins peut s'avérer être particulièrement importante lorsqu'il s'agit de relier des zones essentielles à diverses étapes du cycle de vie (p. ex., larvaire et adulte), étant donné que la répartition des principales espèces sera modifiée par les changements climatiques (CCE, 2012). Le Plan d'action du Canada pour les océans (MPO, 2005) a établi cinq zones étendues de gestion des océans, au sein desquelles la planification de la gestion est maintenant intégrée : l'est du plateau néo-écossais, le golfe du Saint-Laurent, la baie de Placentia et les Grands Bancs, la mer de Beaufort et la côte nord du Pacifique.

Il faut tenir compte de la connectivité temporelle et spatiale afin de maintenir des conditions climatiques favorables à une espèce donnée ou à un type d'écosystème pendant une période définie (Rose et Burton, 2009; Pellatt *et al.*, 2012). Lorsqu'on examine les résultats des modèles d'enveloppes climatiques dans le contexte des aires protégées, il est possible de définir les aires les plus susceptibles de présenter le potentiel d'abriter des espèces en cernant les zones qui maintiennent une enveloppe climatique appropriée pendant une assez longue période de temps (mesurée en termes de décennies et de siècles; *voir* l'étude de cas 3; Hamann et Aitken, 2012; Pellatt *et al.*, 2012).

4.3 RESTAURER LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS DÉGRADÉS ET SOUTENIR LE RÉTABLISSEMENT DES ESPÈCES

4.3.1 RESTAURATION ÉCOLOGIQUE

Les stratégies visant à maintenir la santé ou l'intégrité écologique en réduisant l'influence exercée par les facteurs de stress non climatiques tels le morcellement de l'habitat ou la pollution, ou en remédiant à la dégradation déjà subite au moyen d'efforts de restauration écologique, jouent un rôle important dans le renforcement de la résilience aux changements climatiques (Harris *et al.*, 2006). La restauration écologique est un outil important qui est utilisé depuis des dizaines d'années. Elle contribue aux efforts d'adaptation aux changements climatiques en aidant à prévenir la disparition des espèces et à maintenir des écosystèmes sains (p. ex., Thorpe, 2012). Les initiatives qui visent les paysages exploités, comme le Programme d'intendance de l'habitat pour les espèces en péril (Environnement Canada, 2012), comprennent des techniques et des stratégies de restauration.

Les organismes responsables des aires protégées au Canada élaborent et mettent en œuvre des techniques de restauration écologique dans le but de rétablir des espèces précises, des communautés biotiques et des écosystèmes dans leur ensemble. Ces programmes allient de l'expérimentation, des modifications et des mesures d'adaptation, et créent une culture axée sur la capacité et la volonté de s'adapter aux changements climatiques (Parcs Canada, 2008). Des lignes directrices sur les techniques de restauration ont été formulées et sont maintenant employées couramment dans de nombreux parcs et autres aires protégées (Agence Parcs Canada et Conseil canadien des parcs, 2008). Des exemples comprennent la restauration de l'écosystème des terres herbeuses dans le parc national des Prairies, en Saskatchewan, la restauration des habitats riverains et la mise en réseau des habitats aquatiques dans le parc national de la Mauricie, au Québec (Parcs Canada, 2011a, b). Les plus récentes études tiennent compte de manière explicite de l'adaptation aux changements climatiques et de l'atténuation de ses effets, des rapports entre la restauration des écosystèmes à l'intérieur et autour des aires protégées et la connectivité écologique, de la mobilisation et de l'expérience des visiteurs et du public, du bien-être humain, et de la protection et de la prestation des biens et des services écosystémiques (Keenleyside *et al.*, 2012).

Les programmes visant à maintenir ou à accroître la diversité génétique tel l'ensemencement de plusieurs espèces de plantes indigènes au moment de convertir des terres agricoles marginales en couverture permanente et la plantation de plusieurs essences d'arbres dans le cadre de la restauration du paysage forestier accroissent la tolérance des espèces associées aux changements et peuvent contribuer à renforcer ou à maintenir la résilience aux changements climatiques (Thompson *et al.*, 2009; Maestre *et al.*, 2012) et à d'autres facteurs de stress. Les efforts déployés en vue de restaurer l'intégrité écologique du parc national des Prairies ont compris, entre autres, l'ensemencement d'herbes indigènes et de fleurs sauvages pour reverdir d'anciennes terres agricoles et la réintroduction des régimes de perturbation (p. ex., le recours aux feux dirigés) nécessaires au maintien de l'intégrité écologique des terres de pâturage utilisées par les bisons (Parcs Canada, 2011a). Grâce à la surveillance permanente, il est possible de définir la façon dont l'écosystème réagit à ces interventions et de prendre des décisions éclairées en matière d'adaptation. Cette approche est aussi utile en dehors des aires

ÉTUDE DE CAS 3

CONNECTIVITÉ TEMPORELLE DES HABITATS DANS LES ÉCOSYSTÈMES À CHÊNES DE GARRY QUI SE TROUVENT DANS LES AIRES PROTÉGÉES DE L'OUEST DE L'AMÉRIQUE DU NORD

Les écosystèmes à chênes de Garry (*Quercus garryana*) (figure 8), établis dans la partie méridionale de la côte ouest du Canada, sont rares et abritent plus d'une centaine d'espèces en péril. L'analyse des réactions des écosystèmes à chênes de Garry (*Quercus garryana*) aux effets des changements climatiques, à des échelles pertinentes pour la gestion des aires protégées, sert à concevoir des programmes de surveillance et à orienter les gestionnaires de parcs et les urbanistes au moment de choisir les sites qui serviront à protéger ou à restaurer des zones reliées temporairement dont les conditions sont favorables aux espèces d'intérêt (Pellatt *et al.*, 2012).



FIGURE 8: Écosystème à chênes de Garry dans l'île Saturna, réserve de parc national des Îles-Gulf.

L'évaluation des risques associés aux changements climatiques pour les écosystèmes à chênes de Garry (*Quercus garryana*) a exigé l'examen du niveau actuel de protection du chêne de Garry (*Quercus garryana*) et la détermination de la mesure dans laquelle les aires protégées actuelles du nord-ouest du Pacifique sont susceptibles d'offrir des conditions climatiques favorables en fonction de scénarios de changements climatiques futurs. Un modèle d'enveloppe climatique à échelle réduite a été mis au point dans le but de cerner les zones susceptibles de maintenir des conditions climatiques favorables au fil du temps. Des scénarios ont été élaborés afin d'examiner les écosystèmes à chênes de Garry (*Quercus garryana*) reliés sur le plan temporel qui persisteront pendant tout le XXIe siècle, et le degré de chevauchement entre ces régions mises en réseau sur le plan temporel et les aires protégées actuelles. Même si l'on prévoit que la superficie des écosystèmes à chênes de Garry (*Quercus garryana*) adaptés aux conditions climatiques augmentera légèrement, surtout aux États-Unis, cet habitat ne sera pas bien représenté dans les aires protégées de classe I à V établies par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). En ce qui a trait aux aires protégées qui contiennent actuellement des habitats favorables aux chênes de Garry (*Quercus garryana*), les modèles indiquent que seulement de 6,6 à 7,3 % seront reliées sur le plan temporel entre 2010 et 2099 (figure 9; fondé sur le scénario A2 du MCCG2). Le degré de chevauchement entre l'habitat du chêne de Garry (*Quercus garryana*) adapté sur le plan climatique (que les conditions favorables soient actuellement présentes ou non) et les zones naturelles protégées de classe I à V pour la période comprise entre 2010 et 2039 est d'environ 40 %, selon le même scénario de changements climatiques. C'est la raison pour laquelle le chêne de Garry (*Quercus garryana*) est mal représenté dans les zones reliées sur le plan temporel à l'extérieur et à l'intérieur des aires protégées. Cette situation met en relief le besoin de collaboration entre les organisations publiques et privées concernées par les aires protégées, en vue de maintenir la connectivité temporelle dans les zones adaptées sur le plan climatique et d'assurer l'avenir des écosystèmes à chênes de Garry (*Quercus garryana*).

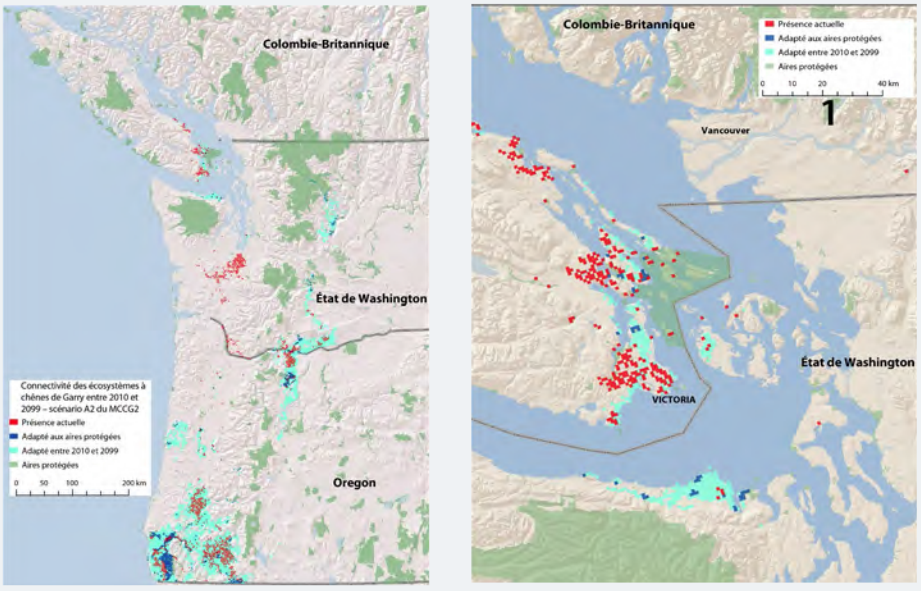


FIGURE 9 : Habitat du chêne de Garry (*Quercus garryana*) adapté sur le plan climatique selon le scénario A2 (connectivité temporelle) pour la période s'étendant de 2010 à 2099. La partie en vert correspond à l'emplacement des aires protégées. La partie en bleu clair représente la connectivité temporelle de l'habitat du chêne de Garry (*Quercus garryana*). La partie en bleu foncé représente la connectivité temporelle de l'habitat du chêne de Garry (*Quercus garryana*) à l'intérieur des aires protégées actuelles. La partie en rouge représente la répartition actuelle du chêne de Garry (*Quercus garryana*).

protégées, dans les paysages terrestres et aquatiques communs. Par exemple, les lignes directrices formulées à l'intention des propriétaires, des locataires et des autres gestionnaires fonciers dans la partie albertaine des Prairies (p. ex., Saunders *et al.*, 2006) encouragent l'utilisation de mélanges de semences indigènes dans la restauration des parcours naturels afin d'accroître la résilience des populations d'espèces sauvages et la viabilité des activités agricoles.

À l'instar d'autres mesures de conservation, la restauration écologique peut aussi contribuer à contrer les effets des changements climatiques sur le bien-être humain (*voir* le chapitre 7 – *Santé humaine*). Par exemple, la protection et la restauration des terres humides et des réseaux hydrographiques naturels aident à conserver l'eau et représentent donc une importante mesure d'adaptation (Schindler et Bruce, 2012). Le rétablissement des populations de castors, qui influent sur l'hydrologie des terres humides et améliorent la rétention de l'eau, s'est traduit par une augmentation importante de la surface d'eau libre dans le parc national Elk Island, en Alberta, même pendant les années exceptionnellement sèches (Hood et Bayley, 2008; Schindler et Bruce, 2012). La restauration écologique dans les aires protégées, et entre celles-ci, aide à réduire le morcellement du paysage et facilite la migration, le flux génétique et d'autres genres d'adaptation aux effets des changements climatiques (*voir* l'étude de cas 4). Les grandes initiatives de conservation de la connectivité telles que la Yellowstone to Yukon (Graumlich et Francis, 2010) et la Algonquin to Adirondacks (Algonquin to Adirondacks Collaborative, 2013), ainsi que les North American Wildways du Wildlands Network (The Wildlands Network, 2009; Dugelby, 2010), utilisent la restauration écologique comme élément clé de la connectivité et de l'adaptation aux changements climatiques.

Les changements climatiques posent aussi des défis de taille aux gestionnaires des écosystèmes, qui doivent établir des cibles réalistes de restauration écologique. Les écosystèmes non analogues ou les « nouveaux » écosystèmes devront peut-être servir de cible de gestion dans certains cas (Hobbs *et al.*, 2009, 2011). La restauration écologique peut être considérée comme faisant partie d'une série d'interventions (c.-à-d. « écologie d'intervention »; Hobbs *et al.*, 2011) qui se distinguent par la manipulation des caractéristiques biotiques et abiotiques d'un écosystème, et dont l'intensité peut varier du non-interventionnisme délibéré à une intervention ponctuelle, voire même à une intervention continue à grande échelle. Le fait d'incorporer des scénarios de changements climatiques, y compris les phénomènes extrêmes, aux modèles qui étudient les réactions des espèces au climat (c.-à-d. modèles d'enveloppes climatiques, modèles de processus, études axées sur l'observation, surveillance) dans le cadre d'analyses dont l'objet consiste à appuyer les efforts de restauration écologique, permettrait de mieux évaluer si : 1) le rétablissement naturel d'un système est possible, 2) l'intervention (p. ex., migration assistée) est nécessaire à la survie de l'espèce, 3) des interventions techniques d'ordre anthropique sont requises (p. ex., vulnérabilité des côtes au changement du niveau de la mer et à l'érosion côtière, changement dans l'hydrologie et le ruissellement des

ÉTUDE DE CAS 4

RESTAURATION ÉCOLOGIQUE AYANT RECOURS À UNE APPROCHE FONDÉE SUR LE PAYSAGE

(source : Parcs Canada, 2011a, b)

Les principes de restauration écologique sont illustrés dans une initiative visant à rétablir la connectivité du paysage dans la réserve de biosphère mondiale de Long Point, notamment dans la réserve nationale de faune de Long Point, sur la rive nord du lac Érié, en Ontario (figure 10). À l'aide de la science de la conservation et des technologies de pointe en gestion de l'information, on a pu définir les principales aires naturelles et les autres aires naturelles d'importance de la zone centrale carolinienne, de même que les corridors fauniques susceptibles de relier ces aires entre elles. Ce réseau interrelié de corridors et d'aires centrales d'habitat a été conçu en vue de faciliter la dispersion des plantes et des animaux vers des habitats plus favorables et préserver la biodiversité face aux changements climatiques. Les partenaires de la conservation, notamment le secteur privé, ont contribué à la plantation de plus de 4,5 millions d'arbres et arbustes indigènes et à l'application de techniques de restauration pour recréer les caractéristiques des forêts anciennes de la zone carolinienne. Ces travaux aident à créer des corridors, ainsi qu'à accroître la résilience des écosystèmes et la capacité d'adaptation dans l'ensemble de la réserve de biosphère.



FIGURE 10 : Une technique de remise en état de creux et de buttes a été utilisée pour reproduire le paysage caractéristique des forêts anciennes créé par la décomposition des arbres tombés. Les creux ont fourni des endroits propices à la reproduction aux amphibiens et aux insectes, des aires d'alimentation et d'abreuvement aux oiseaux et aux mammifères, et ont contribué à maintenir les systèmes de recharge des eaux souterraines. Les buttes, dont les sols sont bien drainés et oxygénés, ont favorisé, entre autres, la croissance rapide des chênes rouges et blancs *(photo publiée avec l'aimable autorisation de B. Craig ©).*

eaux de surface; Galatowitsch, 2012) ou 4) un nouvel écosystème s'impose (Hobbs *et al.*, 2011). Étant donné les incertitudes associées à la gestion de processus écologiques complexes, il importe de mettre en œuvre une méthode de gestion adaptative qui revoit régulièrement les objectifs et les décisions et qui les adapte à mesure que l'on acquiert de nouvelles connaissances, particulièrement en ce qui a trait aux activités de restauration écologique et aux interventions connexes entreprises dans le contexte des changements climatiques (Keenleyside *et al.*, 2012).

4.3.2 MIGRATION ASSISTÉE

Étant donné que l'ampleur des changements climatiques prévus au cours des cent prochaines années pourrait dépasser la capacité naturelle des populations à s'adapter par la migration ou d'autre façon (Loarie *et al.*, 2009), le transport d'origine humaine d'espèces choisies vers des habitats qui présentent des conditions climatiques appropriées peut être envisagé comme solution de gestion (Eskelin *et al.*, 2011; Pedlar *et al.*, 2012; *voir aussi* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*). Outre les initiatives de gestion du territoire qui accroissent la superficie des habitats interreliés aux fins de migration, trois types de migration assistée (définie comme étant le déplacement d'espèces assisté par l'humain) ont été cernés (Ste-Marie *et al.*, 2011) :

1. *Migration assistée des populations :* le mouvement, assisté par l'humain, de populations (caractérisées par une constitution génétique différente) d'une espèce donnée à l'intérieur de sa zone de répartition actuelle (c.-à-d. l'aire de répartition naturelle de l'espèce).
2. *Expansion assistée de l'aire de répartition :* le mouvement, assisté par l'humain, d'une espèce donnée vers des zones situées juste à l'extérieur de sa zone de répartition actuelle, de façon à faciliter ou à mimer l'expansion naturelle de la répartition.
3. *Migration assistée sur de longues distances :* le mouvement, assisté par l'humain, d'une espèce donnée vers des zones situées à de grandes distances à l'extérieur de sa zone de répartition actuelle (sur des distances supérieures à celles accessibles par dispersion naturelle).

La migration assistée des populations et l'expansion assistée de l'aire de répartition sont des méthodes actuellement utilisées au Canada. Par exemple, au Québec, on se fonde sur les modèles de transfert de semences sensibles au climat pour trouver des sites (à l'intérieur de la zone de répartition d'une espèce) où les plantes produites à partir de semences récoltées dans des vergers à graines peuvent être plantées, afin de leur offrir les meilleures chances de survie et la possibilité d'atteindre la maturité (Ste-Marie *et al.*, 2011). L'expansion assistée de l'aire de répartition est employée en Colombie-Britannique, car la plupart des essences d'arbres qui croissent dans cette région peuvent être plantées à une altitude supérieure d'environ 200 mètres par rapport à l'altitude de départ. Le mélèze occidental peut être planté légèrement en dehors de son aire de répartition actuelle (O'Neill *et al.*, 2008) et, en Alberta, aux endroits où sa limite a progressé d'au moins 2 degrés de latitude nord et de 200 m d'altitude (Ste-Marie *et al.*, 2011). On privilégie la migration assistée sur de longues distances lorsque l'espèce est menacée ou lorsque des obstacles géographiques ou physiques freinent la migration naturelle. Ce type de migration pose davantage de risques que les deux autres techniques, parce qu'il entraîne l'introduction d'un nouveau bagage génétique qui pourrait nuire aux autres espèces et à l'écosystème touchés. À l'heure actuelle, les organismes canadiens responsables des forêts ne prévoient aucun programme de gestion à distance (Ste-Marie *et al.*, 2011).

Il existe divers points de vue concernant l'utilité et la pertinence du recours à la migration assistée en tant qu'outil d'adaptation (Riccardi et Simerloff, 2008; Aubin *et al.*, 2011; Beardmore et Winder, 2011; Pedlar *et al.*, 2011, 2012; Ste-Marie *et al.*, 2011; Winder *et al.*, 2011; Larson et Palmer, 2013). Il est essentiel de bien comprendre les risques avant de mettre en œuvre ce type de mesure. Sur le plan fonctionnel, il faut avoir en main des prévisions climatiques de haute qualité, des données génécologiques (la fréquence du gène d'une espèce par rapport à la répartition de la population dans un milieu défini), des renseignements sur les caractéristiques qui répondent aux pressions sélectives exercées par les variables climatiques, et des modèles qui prévoient les sources de semences appropriées pour la plantation (St. Clair et Howe, 2007; O'Neill *et al.*, 2008; Rehfeldt et Jaquish, 2010; Eskelin *et al.*, 2011).

Bien que la migration assistée contribuerait à réduire le nombre d'espèces menacées d'extinction par des changements climatiques rapides, elle pourrait également perturber les communautés existantes (McLachlan *et al.*, 2007). Même si beaucoup d'efforts ont été consacrés à l'étude des espèces envahissantes, il est difficile de prévoir celles qui pourraient devenir nuisibles. En outre, il peut s'écouler plusieurs années, voire des décennies, entre l'introduction et l'explosion démographique d'une espèce exotique, ce qui semble indiquer qu'il pourrait être difficile de suivre les conséquences écologiques négatives associées au transfert des espèces (McLachlan *et al.*, 2007). Bien qu'on puisse atténuer certains risques associés à la migration assistée grâce à la la planification, la surveillance, la gestion adaptative et la réglementation (Mawdsley *et al.*, 2009), le soutien accordé aux techniques de migration assistée et le recours à celles-ci varieront en fonction des buts et des objectifs établis pour les aires protégées et les paysages terrestres et aquatiques communs.

4.4 PLANIFIER L'ADAPTATION

De nombreuses initiatives de conservation en Amérique du Nord intègrent de plus en plus les données sur les changements climatiques. Au Canada, l'amélioration continue des réseaux d'aires protégées contribue de manière importante à atténuer les effets des changements climatiques et à offrir des possibilités d'adaptation. On note, par exemple, le *Natural areas system plan* (plan du système des aires naturelles) élaboré par le gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador (Government of Newfoundland and Labrador, 2011), deux nouveaux parcs fondés au Manitoba, en 2010, afin de préserver l'aire d'hivernage de la harde de caribous de la toundra de Qamanirjuaq (Gouvernement du Manitoba, a, b, sans date) et le plan d'aménagement du territoire recommandé pour le bassin de la rivière Peel, dans le nord-est du Yukon. Ce dernier découle d'une initiative régionale de planification conçue de manière à préserver les ressources sauvages, la faune et son habitat, les ressources culturelles et l'approvisionnement en eau dans un contexte de changements climatiques rapides (Lemieux *et al.*, 2010). Élaboré dans le cadre de la mise en œuvre du chapitre 11 de l'accord définitif conclu avec les Premières Nations Nacho Nyak Dun, Tr'ondëk Hwëch'in et Vuntut Gwitchin, le plan établit clairement un lien entre les répercussions des changements climatiques et la nécessité de créer des aires protégées qui contiennent de vastes écosystèmes à l'état intact (Peel Watershed Planning Commission, 2010).

Parmi les autres stratégies qui visent à conserver la biodiversité régionale dans un cadre de conditions climatiques en constante évolution, on compte la planification de la conservation entreprise dans l'optique d'englober toute la gamme des propriétés physiques définies par l'altitude, la géologie et bien d'autres facteurs (Beier et Brost, 2010). Puisqu'une multitude de propriétés physiques contribue à maintenir des communautés écologiques distinctes dans toute une gamme de climats (Rosenzweig, 1995), la conservation d'exemples représentatifs de ces propriétés devrait aider à protéger la biodiversité dans les conditions climatiques actuelles et futures (Beier et Brost, 2010). Les auteurs d'une étude ont découvert que les aires protégées définies en fonction de la diversité physique comptent pour plus de 90 % de la diversité retrouvée dans les communautés végétales (Game *et al.*, 2011).

4.5 APPUYER LA PLANIFICATION EN ACQUÉRANT DES CONNAISSANCES

Les évaluations intégrées de la biodiversité et des changements climatiques s'avèrent être un excellent moyen d'acquérir les connaissances qui serviront à déterminer le niveau de préparation et les solutions d'intervention, et à accroître l'adaptation aux changements climatiques. Dans Pellatt *et al.* (2007), les auteurs ont entrepris une telle étude fondée sur la paléoécologie, la dendroécologie, l'analyse spatiale et les modèles d'enveloppes bioclimatiques en vue de parvenir à une meilleure compréhension de l'avenir de l'écosystème à chênes de Garry et de l'écosystème côtier de Douglas taxifoliés (*voir* l'étude de cas 3). Cette étude a depuis été élargie pour comprendre la mise en place d'une expérience prolongée de restauration qui surveille la réaction de l'écosystème aux changements de l'environnement et qui comprend le recours aux feux dirigés et l'exclusion des grands herbivores. Des observations et des travaux empiriques sont également requis pour appuyer l'interprétation des scénarios fondés sur les conditions climatiques propices générés par les modèles climatiques (Hamann et Wang, 2006; Hamann et Aitken, 2012).

La recherche éclaire aussi la prise des décisions par les gestionnaires du parc national Kouchibouguac, au Nouveau-Brunswick, où l'on a recours aux photos aériennes, à l'arpentage et aux travaux sur le terrain dans le but de documenter les changements survenus dans la zone côtière au cours des dernières décennies et de cerner les régions qui nécessiteront davantage de protection à l'avenir (Parcs Canada, 2010). Par ailleurs, les gestionnaires des parcs de la Colombie-Britannique analysent la sensibilité du littoral à l'élévation du niveau de la mer, afin d'élaborer des plans de gestion des nouvelles aires protégées créées le long des côtes nord et centrales (Province of British Columbia, 2013).

Le suivi écologique est une autre mesure qui sert à acquérir les connaissances nécessaires à la planification des mesures d'adaptation aux changements climatiques (Hannah *et al.*, 2002). Par exemple, on suit de près la végétation arctique-alpine dans les parcs du Québec situés à cette altitude (p. ex., Parc national de la Gaspésie, des Hautes-Gorges-de-la-Rivière-Malbaie et des Grands-Jardins; Société des établissements de plein air du Québec, 2012), car il s'agit d'un important indicateur des changements liés au climat qui se répercuteront sur le caribou (une espèce en péril) et sur d'autres espèces qui dépendent de cet habitat pour se nourrir. Des programmes de surveillance semblables, qui utilisent des technologies terrestres et de télédétection (y compris les technologies spatiales), servent d'instruments dont la tâche consiste à faire rapport sur l'état de l'intégrité écologique des parcs nationaux du Canada (McLennan et Zorn, 2005; Parcs Canada, 2011c).

Outre les connaissances scientifiques, on reconnaît que les connaissances autochtones et les connaissances expérientielles des collectivités devraient contribuer plus largement à la planification de l'adaptation aux changements climatiques et à la prise de décisions en matière de conservation (CCP, 2013). Ces connaissances fournissent des renseignements utiles sur l'état passé et actuel des écosystèmes et sur les interactions humaines avec le milieu naturel, basés sur des centaines, voire des milliers d'années d'expérience (Waithaka, 2010). Par exemple, les responsables du parc national des Monts-Torngat (Terre-Neuve-et-Labrador) participent à des projets de recherche visant à étudier les principales sources d'alimentation des Inuits tels les petits fruits et le phoque annelé, et à établir des données de base qui serviront à évaluer les effets des changements climatiques sur ces espèces importantes (CCP, 2013).

4.6 FAVORISER L'ADAPTATION EN MOBILISANT LES COLLECTIVITÉS

Il est indispensable de collaborer pour faire en sorte que les mesures d'adaptation liées à d'autres secteurs (p. ex., l'infrastructure existante) n'aient pas d'incidence négative sur la biodiversité ou sur la capacité d'adaptation des écosystèmes aux changements climatiques, et que les mesures visant à aider la biodiversité à s'adapter aux changements climatiques procurent aussi des avantages sociétaux (Andrade Pérez *et al.*, 2010). Les organismes de conservation, les visiteurs des parcs, les groupes communautaires locaux, les collectivités autochtones et l'industrie comptent parmi les acteurs clés. Une mobilisation efficace entraîne une prise de décisions plus responsable et encourage le recours à des approches durables d'intendance des ressources naturelles (NAWPA, 2012).

Il existe de nombreux exemples de mobilisation et de collaboration efficaces au Canada, allant des programmes de surveillance faisant appel aux citoyens (*voir* l'étude de cas 5) à la supervision de l'élaboration de politiques à l'échelle municipale, provinciale, territoriale et nationale. Ces exemples comprennent des évaluations de la vulnérabilité aux changements climatiques et des études pilotes sur les solutions d'adaptation pour les écosystèmes de la ceinture d'argile dans le nord-est de l'Ontario, où les intervenants et les partenaires ont été invités à participer dès le début et ont été mis au courant des résultats et du déroulement général de l'étude (Lalonde *et al.*, 2012). Parmi les exemples de collaboration intergouvernementale, on remarque la zone interprovinciale de nature protégée créée par le Manitoba et l'Ontario, qui couvre plus de 9400 km^2 de forêt boréale et comprend des aires protégées importantes dans les parcs provinciaux et les réserves de conservation (CCP, 2013). Les collectivités des Premières Nations des deux provinces tentent de créer sur leurs terres ancestrales un réseau d'aires protégées et de paysages terrestres gérés d'une superficie de 30 000 km^2.

ÉTUDE DE CAS 5

PROGRAMMES DE SURVEILLANCE FAISANT APPEL AUX CITOYENS

Les programmes de surveillance fournissent des données essentielles à la planification de l'adaptation et peuvent être entrepris à diverses échelles et réunir différents groupes. Les urbanistes et la communauté scientifique s'appuient de plus en plus sur les données recueillies par les groupes communautaires. Voici deux exemples qui concernent le pica d'Amérique et les poissons de mer et invertébrés marins.

Les espèces sensibles, comme le pica d'Amérique (*Ochotona princeps*; figure 11), peuvent servir d'indicateurs à l'aide desquels il est possible de mesurer les effets des changements climatiques sur les écosystèmes des chaînes de montagnes. Dans les parcs nationaux du Canada Banff et Kootenay (en Alberta et en Colombie-Britannique, respectivement), le travail de collaboration entre Parcs Canada, la University of Alberta et la Bow Valley Naturalists Society a favorisé la participation des membres de la collectivité locale aux activités de surveillance écologique, tout en assurant un contrôle de la qualité. Les chargés des relevés (groupes de deux à quatre personnes) ont examiné une parcelle d'habitat du pica (p. ex., un talus) afin de relever des amas de foin et des picas jusqu'à 30 m du talus. L'emplacement des amas de foin, utilisés activement ou non par les picas, a été enregistré à l'aide d'un GPS (système de positionnement global), tout comme les observations de l'animal proprement dites (Timmins et Whittington, 2011). Ce type de surveillance aidera les responsables de la gestion à cerner les effets des changements climatiques sur l'habitat du pica et à éclairer la prise de décisions en matière de gestion.



FIGURE 11 : Pica (*Ochotona pinceps*) observé sur la pente d'un talus dans le parc national Banff.

Il y a peu de données de grande envergure et de longue durée sur la répartition et l'abondance des organismes marins, surtout en ce qui concerne les espèces qui ne font pas l'objet d'une surveillance aux fins de la pêche. Depuis 1998, des plongeurs participent au programme bénévole de recensement des poissons et des invertébrés mis en œuvre par la Reef Environmental Education Foundation (REEF) en Colombie-Britannique. Les participants sont formés afin de reconnaître les espèces cibles, qu'ils comptent à l'aide d'un simple formulaire de recensement itinérant en plongée. Plus de 3700 recensements recueillis bénévolement ont été effectués le long des côtes de la Colombie-Britannique grâce à ce programme, ce qui représente plus de 2800 heures d'observation sous-marine à plus de 300 endroits. On a ainsi recensé près de 150 espèces de poissons et 50 espèces d'invertébrés. La série temporelle échelonnée sur 15 ans qui en résulte fait état de tendances à l'abondance (voir la figure 12) d'une gamme étendue d'espèces. Les résultats ont également permis de définir les limites des aires de répartition des espèces, ainsi que les changements dans la répartition des espèces et dans les assemblages des communautés au fil du temps. En 2012, le programme a étendu son champ d'étude à l'est du Canada.

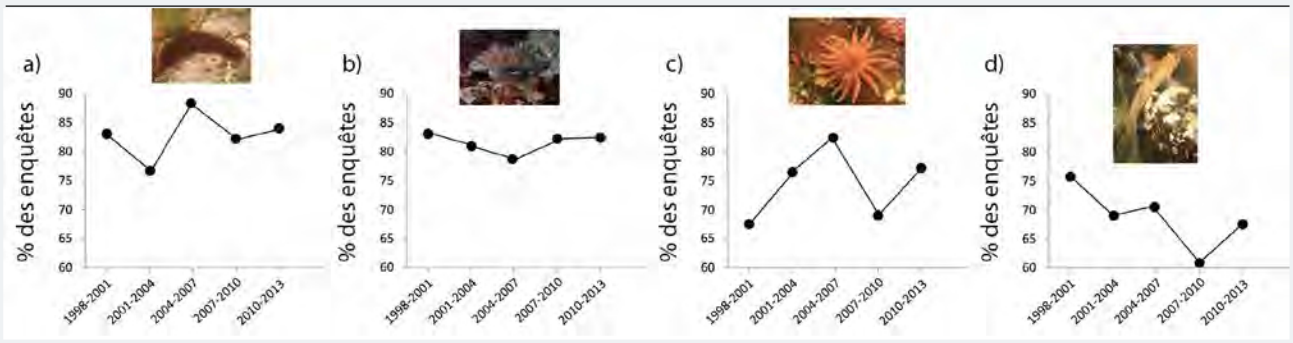


FIGURE 12 : Tendances de l'abondance des quatre espèces marines les plus souvent observées par les plongeurs participant au recensement de la REEF en Colombie-Britannique. **a)** Concombre de mer (*Parastichopus californicus*) **b)** sourcil de varech (*Hexagrammos decagrammus*) **c)** solaster géant (*Pycnopodia helianthoides*) et **d)** gobie aux yeux noirs (*Rhinogobiops nicholsii*). L'abondance correspond à la proportion des relevés dans lesquels chaque espèce a été recensée. Le nombre de relevés effectués à chaque endroit varie de 83 (invertébrés, de 1998 à 2001) à 1074 (poissons, de 2010 à 2013) *(photo publiée avec l'aimable autorisation d'I.M. Côté. Données modifiées tirées de www.reef.org).*

5. CONCLUSIONS

Les preuves que la biodiversité du Canada est soumise à la pression croissante exercée par les changements climatiques continuent de s'accumuler. Des changements dans la chronologie des étapes du cycle de vie, dans l'aire de répartition des espèces et dans la santé de la faune sont déjà perceptibles et devraient se faire de plus en plus sentir. La biodiversité assure le bien-être et la prospérité des Canadiens par l'intermédiaire des services écosystémiques. Les stratégies qui aident à maintenir et à rétablir la biodiversité permettent non seulement aux écosystèmes de s'adapter aux changements climatiques, mais améliorent aussi la résilience écologique, sociale et économique.

L'ampleur et l'accélération des changements climatiques créent un nouveau contexte écologique dans lequel les gestionnaires des ressources naturelles envisagent de plus en plus l'utilisation de méthodes plus interventionnistes dans le but de préserver la biodiversité (Glick *et al.*, 2011; Poiani *et al.*, 2011). Des pratiques telles que la migration assistée, sont examinées au même titre que la restauration écologique et d'autres interventions, afin de gérer les changements (Glick *et al.*, 2011).

Le lien entre les répercussions des changements climatiques sur la biodiversité, examinés à la section 3 du présent chapitre, et les stratégies d'adaptation mises en œuvre en vue d'aider la biodiversité à s'adapter à ces changements est illustré à la figure 13. Les mesures visant à protéger, à relier ou à rétablir les réseaux d'écosystèmes qui fonctionnent bien à l'intérieur de réseaux d'aires protégées, combinées aux activités d'intendance de l'habitat axées sur la conservation qui sont menées sur des terres et des plans d'eau privés, et à des pratiques durables d'utilisation des terres et de l'eau (p. ex., exploitation forestière, agriculture et pêches durables) améliorent la résilience du capital naturel du Canada. Ces mesures sont appuyées par de nouvelles connaissances au sujet des changements induits par le climat dans les écosystèmes, par l'intégration de ces dernières aux plans de conservation, et par l'établissement de nouveaux partenariats et processus collaboratifs impliquant une mobilisation à grande échelle de tous les Canadiens.

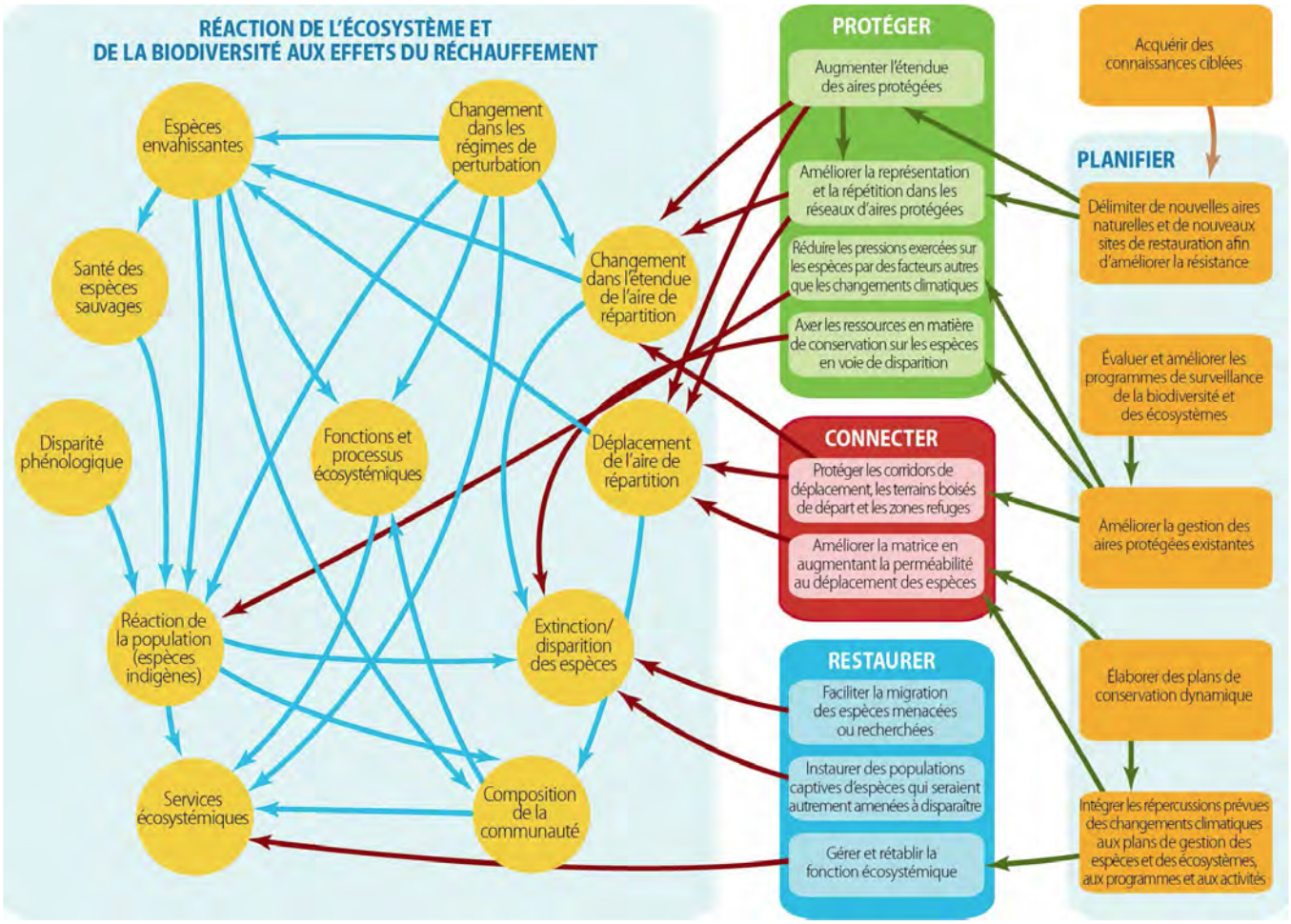


FIGURE 13 : Liens entre les éléments d'une stratégie axée sur la conservation qui favorise l'adaptation de la biodiversité aux changements climatiques et les effets potentiels de ces éléments sur la capacité d'adaptation d'un écosystème.

RÉFÉRENCES

ACIA (Arctic Climate Impact Assessment). *Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impacts assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, 2005, 1042 p.

Ainsworth, C.H., J.F. Samhouri, D.S. Busch, W.W. Cheung, J. Dunne et T.A. Okey. « Potential impacts of climate change on Northeast Pacific marine foodwebs and fisheries », *ICES Journal of Marine Science*, vol. 68, nº 6, 2011, pp. 1217-1229.

Algonquin to Adirondacks Collaborative. *Algonquin to Adirondacks Collaborative*, 2013, <http://www.a2alink.org/>.

Allan, J.D., M. Palmer et N.L. Poff. « Climate change and freshwater ecosystems », dans *Climate Change and Biodiversity*, T.E. Lovejoy et L. Hannah (éd.), Yale University Press, New Haven, Connecticut, 2005, pp. 274-290.

Alsos, I.G., D. Ehrich, W. Thuiller, P.B. Eidesen, A. Tribsch, P. Schönswetter, C. Lagaye, P. Taberlet et C. Brochmann. « Genetic consequences of climate change for northern plants », *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 279, nº 1735, 2012, pp. 2042-2051.

Anderson, M.G. et C.E. Ferree. « Conserving the stage: climate change and the geophysical underpinnings of species diversity », *PLoS ONE*, vol. 5, nº 7, 2010.

Andrade Pérez, A., B. Herrera Fernandez et R. Cazzolla Gatti (éd.) *Building resilience to climate change: ecosystem-based adaptation and lessons from the field*, Union internationale pour la conservation de la nature, Gland, Suisse, 2010, 164 p.

Anielski, M. et S. Wilson. Counting Canada's natural capital: assessing the real value of Canada's boreal ecosystems, Initiative boréale canadienne et Pembina Institute, Ottawa (Ontario), 2009, <www.pembina.org/pub/204>.

Asselin, H. et S. Payette. « Origin and long-term dynamics of a subarctic tree line », *Ecoscience*, vol. 13, 2006, pp. 135-142.

Aubin, I., C.M. Garbe, S. Colombo, C.R. Drever, D.W. McKenney, C. Messier, J. Pedlar, M.A. Saner, L. Venier, A.M. Wellstead, R. Winder, E. Witten et C. Ste-Marie. « Why we disagree about assisted migration: ethical implications of a key debate regarding the future of Canada's forests », *The Forestry Chronicle*, vol. 87, nº 6, 2011, pp. 755-765.

Auzel, P., H. Gaonac'h, F. Poisson, R. Siron, S. Calmé, M. Belanger, M. Bourassa, A. Kestrup, A. Cuerrier, A. Downing, C. Lavallée, F. Pelletier, J. Chambers, A.E. Gagnon, M.C. Bedard, Y. Gendreau, A. Gonzalez, M. Mitchell, J. Whiteley et A. Larocque. *Impacts des changements climatiques sur la biodiversité du Québec : résumé de la revue de littérature*, Le Centre de la science de la biodiversité du Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Ouranos, 2012, 29 p.

Bale, J.S., G.J. Masters, I.D. Hodkinson, C. Awmack, T.M. Bezemer, V.K. Brown, J. Butterfield, A. Buse, J.C. Coulson, J. Farrar, J.E.G. Good, R. Harrington, S. Hartley, T.H. Jones, R.L. Lindroth, M.C. Press, I. Symrnioudis, A.D. Watt et J.B. Whittaker. « Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores », *Global Change Biology*, vol. 8, nº 1, 2002, pp. 1-16.

Balshi, M.S., A.D. Mcguire, P. Duffy, M. Flannigan, J. Walsh et J. Melillo. « Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) approach », *Global Change Biology*, vol. 15, 2009, pp. 578-600.

Barnosky, A. « Climatic change, refugia, and biodiversity: where do we go from here? An editorial comment », *Climate Change*, vol. 86, 2008, pp. 29-32.

Barrand, N.E. et M.J. Sharp. « Sustained rapid shrinkage of Yukon glaciers since the 1957-1958 international geophysical year », *Geophysical Research Letters*, vol. 37, L07501, 2010.

Baum, A.K., K.J. Haynes, F.P. Dillemuth et J.T. Cronin. « The matrix enhances the effectiveness of corridors and stepping stones », *Ecology*, vol. 85, nº 10, 2004, pp. 2671-2676.

Beardmore, T. et R. Winder. « Review of science-based assessments of species vulnerability: Contributions to decision-making for assisted migration », *The Forestry Chronicle*, vol. 87, 2011, pp. 745-754.

Beatty, G.E., M. Philipp et J. Provan. « Unidirectional hybridization at a species' range boundary: implications for habitat tracking », *Diversity and Distributions*, vol. 16, nº 1, 2010, pp. 1-9.

Beaubien, E.G. et H.J. Freeland. « Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature », *International Journal of Biometereology*, vol. 44, nº 2, 2000, pp. 53-59.

Beier, P. et B. Brost. « Use of land facets to plan for climate change: conserving the arenas, not the actors », *Conservation Biology*, vol. 24, 2010, pp. 701-710.

Benoît, H.P. et D.P. Swain. « Impacts of environmental change and direct and indirect harvesting effects on the dynamics of a marine fish community », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 65, nº 10, 2008, pp. 2088-2104.

Berteaux, D. et N.C. Stenseth. « Measuring, understanding and projecting the effects of large-scale climatic variability on mammals », *Climate Research*, vol. 32, nº 2, 2006, pp. 95-97.

Berteaux, D., M.M. Humphries, C.J. Krebs, M. Lima, A.G. McAdam, N. Pettorelli, D. Réale, T. Saitoh, E. Tkadlec, R.B. Weladji et N.C. Stenseth. « Constraints to projecting the effects of climate change on mammals », *Climate Research*, vol. 32, 2006, pp. 151-158.

Berteaux, D., S. DeBlois, J. Angers, J. Bonin, N. Casajus, M. Darveau, F. Fournier, M.M. Humphries, B. McGill, J. Larivée, T. Logan, P. Nantel, C. Périé, F. Poisson, D. Rodrigue, S. Rouleau, R. Siron, W. Thuiller et L. Vescovi. « The CC-Bio Project: studying the effects of climate change on Quebec biodiversity », *Diversity*, vol. 2, 2010, pp. 1181-1204.

Berteaux, D., N. Casajus et Y. Gendreau. *Impacts des changements climatiques sur la biodiversité du Québec*, rapport inédit rédigé pour le Service canadien de la faune (mars 2011), 2011, 25 p.

Bertram, D.F., A. Harfenist et A. Hedd. « Seabird nestling diets reflect latitudinal temperature-dependent variation in availability of key zooplankton prey populations », *Marine Ecology Progress Series*, vol. 393, 2009, pp. 199-210.

Bhatt, U.S., D.A. Walker, M.K. Raynolds, J.C. Cosimo, H.E. Epstein, G. Jia, R. Gens, J.E. Pinzon, C.J. Tucker, C.E. Tweedie et P.J. Webber. « Circumpolar arctic tundra vegetation change is linked to sea ice decline », *Earth Interaction*, vol. 14, nº 8, 2010, pp. 1-20.

Blancher, P., M.D. Cadman, B.A. Pond, A.R. Couturier, E.H. Dunn, C.M. Francis et R.S. Rempel. « Changements dans la répartition des oiseaux depuis le premier atlas », dans *Atlas des oiseaux nicheurs de l'Ontario*, 2001-2005, M.D. Cadman, D.A. Sutherland, G.G. Beck, D. Lepage et A.R. Couturier (éd.), Études d'Oiseaux Canada, Environnement Canada, Ontario Field Ornithologists, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Ontario Nature, Toronto (Ontario), 2008, pp. 32-48.

Boisvert-Marsh, L. *Spatiotemporal changes at the northern limit of tree distribution in Quebec since 1970*, thèse présentée pour satisfaire en partie aux conditions d'obtention d'une maîtrise en sciences, Department of Plant Sciences, Macdonald Campus, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue (Québec), Canada, 2012.

Bonfils, C.J.W, T.J. Phillips, D.M. Lawrence, P. Cameron-Smith, W.J. Riley et Z.M. Subin. « On the influence of shrub height and expansion on northern high latitude climate », *Environmental Research Letters*, vol. 7, 015503, 2012.

Both, C., M. van Asch, R.G. Bijlsma, A.B. van den Burg et M.E. Visser. « Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels: constraints or adaptations? », *Journal of Animal Ecology*, vol. 78, 2009, pp. 73-83.

Bourque, A. et G. Simonet. « Québec », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 171-226.

Bowman, J., G.L. Holloway, J.R. Malcolm, K.R. Middel et P.J. Wilson. « Northern range boundary dynamics of southern flying squirrels: evidence of an energetic bottleneck », *Revue canadienne de zoologie*, vol. 83, 2005, pp. 1486-1494.

Broll, G., C. Tarnocai et J. Gould. « Long-term High Arctic ecosystem monitoring in Quttinirpaaq National Park, Ellesmere Island, Canada », dans *Permafrost*, M. Philips, S. Springman et L.U. Arenson (éd.), vol. 2, A.A. Balkema Publishers, Swets & Zeitlinger, Lisse, Pays-Bas, ISBN 90 5809 582 7, vol. 1, 2003, pp. 89-94.

Brook, B., H.R. Akçakaya, D.A. Keith, G.M. Mace, R.G. Pearson et M.B. Araujo. « Integrating bioclimate with population models to improve forecasts of species extinctions under climate change », *Biology Letters,* publié en ligne le 22 juillet 2009, 2009.

Bronson, C.L., T.C. Grubb, G.D. Sattler et M.J. Braun. « Reproductive success across the Black-capped chickadee (*Poecile atricapillus*) and Carolina chickadee (*P. Carolinensis*) hybrid zone in Ohio », *The Auk*, vol. 122, 2005, pp. 759-772.

Burn, C.R. et S.V. Kokelj. « The environment and permafrost of the Mackenzie Delta area », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 20, no 2, 2009, pp. 83-105.

Cardinale, B.J., K.L. Matulich, D.U. Hooper, J.E. Byrnes, E. Duffy, L. Gamfeldt, P. Balvanera, M.I. O'Connor et A. Gonzalez. « The functional role of producer diversity in ecosystems », *American Journal of Botany*, vol. 98, 2011, pp. 572-592.

CARMA (CircumArctic rangifer monitoring and assessment). *Circumpolar rangifer monitoring and assessment network*, CircumArctic rangifer monitoring and assessment, 2012, <www.carmanetwork.com/display/public/home>.

Carr, D., J. Bowman et P.J. Wilson. « Density-dependent dispersal suggests a genetic measure of habitat suitability », *Oikos*, vol. 116, 2007, pp. 629-635.

CCE (Commission de coopération environnementale). *Guide à l'intention des planificateurs et des gestionnaires pour la création de réseaux d'aires marines protégées résilientes dans le contexte des changements climatiques*, Commission de coopération environnementale, Montréal, Canada, 2012, 35 p.

CCCEP (Conseil canadien pour la conservation des espèces en péril). *Espèces sauvages 2010 : la situation générale des espèces au Canada*, Conseil canadien pour la conservation des espèces en péril, Groupe de travail national sur la situation générale, 2011, 323 p.

Chambers, D., C. Périé, N. Casajus et S. de Blois. « Challenges in modelling the abundance of 105 tree species in eastern North America using climate, edaphic, and topographic variables », *Forest Ecology and Management*, vol. 291, 2013, pp. 20-29.

Chapin III, F.S., S.R. Carpenter, G.P. Kofinas, C. Folke, N. Abel, W.C. Clark, P. Olsson, D.M. Stafford Smith, B. Walker, O.R. Young, F. Berkes, R. Biggs, J.M. Grove, R.L. Naylor, E. Pinkerton, W. Steffen et F.J. Swanson. « Ecosystem stewardship: sustainability strategies for a rapidly changing planet », *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 25, no 4, 2009, pp. 241-249.

Chen, W., P. Zorn, N. Foy, I. Olthof, Y. Zhang, J. Li, R. Fraser, Z. Chen, D.S. McLennan, J. Poitevin, J. Quirouette et H.M. Stewart. *Final report on plant growth and seasonality changes in Canada's four northern national parks during 1985-2010, monitored using satellite remote sensing*, rapport final de l'API présenté à Parcs Canada, Hull (Québec), Canada, 2012.

Cheung, W.W.L., V.W.Y. Lam, J.L. Sarmiento, K. Kearney, R. Watson et D. Pauly. « Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios », *Fish and Fisheries*, vol. 10, 2009, pp. 235-251.

Cheung, W.W.L., V.W.Y. Lam, J.L. Sarmiento, K. Kearney, R. Watson, D. Zeller et D. Pauly. « Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change », *Global Change Biology*, vol. 16, 2010, pp. 24-35.

Cheung, W.W.L., D. Zeller et D. Pauly. *Projected species shifts due to climate change in the Canadian marine ecoregions*, rapport préparé pour Environnement Canada, 2011, <www.seaaroundus.org/researcher/dpauly/PDF/2011/Books_Reports_OrChaptersTherein/ProjectedSpeciesShiftduetoClimateChange.pdf>.

Chiotti, Q. et B. Lavender. « Ontario », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), 2008, Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 227-274.

Chu, C., N.E. Mandrak et C.K. Minns. « Potential impacts of climate change on the distributions of several common and rare freshwater fishes in Canada », Diversity and Distributions, vol. 11, 2005, pp. 299-310.

Clarke, A. et K.P.P. Fraser. « Why does metabolism scale with temperature? », *Functional Ecology*, vol. 18, 2004, pp. 243-251.

Colls, A., N. Ash et N. Ikkala. *Ecosystem-based adaptation: a natural response to climate change*, Union internationale pour la conservation de la nature, Gland, Suisse, 2009, 16 p., <cmsdata.iucn.org/downloads/iucn_eba_brochure.pdf>.

COSEPAC (Comité sur la situation des espèces en péril au Canada). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur l'engoulevent d'Amérique (Chordeiles minor) au Canada*, Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, Ottawa, 2007a, vi + 28 p., <http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/sar/assessment/status_f.cfm>.

COSEPAC (Comité sur la situation des espèces en péril au Canada). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le martinet ramoneur (Chaetura pelagic) au Canada*, Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, Ottawa, 2007b, viii + 56 p., <http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/sar/assessment/status_f.cfm>.

COSEPAC (Comité sur la situation des espèces en péril au Canada). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur la paruline du Canada (Wilsonia Canadensis) au Canada*, Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, Ottawa, 2008, vii + 38 p., <http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/sar/assessment/status_f.cfm>.

COSEPAC (Comité sur la situation des espèces en péril au Canada). *Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur la sturnelle des prés (Sturnella magna) au Canada*, Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, Ottawa, 2011, x + 44 p.

Coristine, L.E. et J.T. Kerr. « Habitat loss, climate change, and emerging conservation challenges in Canada », *Revue canadienne de zoologie*, vol. 89, 2011, pp. 435-451.

CCP (Conseil canadien des parcs). *Parcs et aires protégées du Canada : aider le Canada à faire face au changement climatique*, rapport du Groupe de travail sur le changement climatique du Conseil canadien des parcs, 2013, 52 p.

Crawford, W.R. et J.R. Irvine. *State of physical, biological and selected fishery resources of Pacific Canadian marine ecosystems*, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2009/022, Pêches et Océans Canada, Ottawa, 2009.

Crête, M. et L. Marzell. « Évolution des forêts québécoises au regard des habitats fauniques : analyse des grandes tendances sur trois décennies », *Forestry Chronicle*, vol. 82, 2006, pp. 368-382.

Crozier, L.G., R.W. Zabel et A.F. Hamlet. « Predicting differential effects of climate change at the population level with life-cycle models of spring Chinook salmon », *Global Change Biology*, vol. 14, 2008, pp. 236-249.

Cudmore, T.J., N. Bjorklund, A.L. Carroll et B.S. Lindgren. « Climate change and range expansion of an aggressive bark beetle: evidence of higher beetle reproduction in naïve host tree populations », *Journal of Applied Ecology*, vol. 47, no 5, 2010, pp. 1036-1043.

Cummins, P. et R. Haigh. *Ecosystem status and trends report for north coast and Hecate Strait ecozone*, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2010/045, Pêches et Océans Canada, Ottawa, 2010.

Curry, R.L. « Hybridization in chickadees: much to learn from familiar birds », *The Auk*, vol. 122, 2005, pp. 747-758.

Derocher, A.E., N.J. Lunn et I. Stirling. « Polar bears in a warming climate », *Integrative and Comparative Biology*, vol. 44, 2004, pp. 163-176.

Desgranges, J.L. et F. Morneau. « Potential sensitivity of Quebec's breeding birds to climate change », *Écologie et conservation des oiseaux*, vol. 5, nº 2, 2010.

Derksen, C., S.L. Smith, M. Sharp, L. Brown, S. Howell, L. Copland, D.R. Mueller, Y. Gauthier, C. Fletcher, A. Tivy, M. Bernier, J. Bourgeois, R. Brown, C.R. Burn, C. Duguay, P. Kushner, A. Langlois, A.G. Lewkowicz, A. Royer et A. Walker. « Variability and change in the Canadian cryosphere », *Climatic Change*, vol. 115, 2012, pp. 59-88.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Plan d'action du Canada pour les océans : pour les générations d'aujourd'hui et de demain*, Pêches et Océans Canada, Ottawa, 2005, 20 p., <http://www.dfo-mpo.gc.ca/oceans/publications/oap-pao/pdf/oap-fra.pdf>.

MPO (Pêches et Océans Canada). *Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes marins canadiens en 2010*, Pêches et Océans Canada, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Avis scientifique 2010/030, Ottawa, 2010.

Dove-Thompson, D., C. Lewis, P.A. Gray, C. Chu et W.I. Dunlop. *A summary of the effects of climate change on Ontario's aquatic ecosystems*, Climate Change Research Report CCRR-11, Direction de la recherche appliquée et du développement, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ontario), 2010, 37 p.

Dowdeswell, E.K., J.A. Dowdeswell et F. Cawkwell. « On the glaciers of Bylot Island, Nunavut, Arctic Canada », *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, vol. 39, 2007, pp. 402-411.

Drobyshev, I., S. Gewehr, F. Berninger et Y. Bergeron. « Species specific growth responses of black spruce and trembling aspen may enhance resilience of boreal forest the climate change », *Journal of Ecology*, vol. 101, 2013, pp. 231-242.

Dudley, N., S. Stolton, A. Belokurov, L. Krueger, N. Lopoukhine, K. MacKinnon, T. Sandwith et S. Sekhran (éd.) Solutions naturelles – aider les gens à faire face au changement climatique, UICN-CMAP, TNC, UNDP, WCS, la Banque mondiale et WWF, Gland, Suisse, Washington (DC), et New York, 2010.

Dufour, R., H. Benoît, M. Castonguay, J. Chassé, L. Devine, P. Galbraith, M. Harvey, P. Larouche, S. Lessard, B. Petrie, L. Savard, C. Savenkoff, L. St-Armand et M. Starr. *Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes : écozone de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent*, Pêches et Océans Canada, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2010/030, 2010, 187 p.

Dugelby, B.L. *Climate disruption and connectivity: toward a strategy for nature protection*, rédigé pour le Wildlands Network, 2010, <www.twp.org/sites/default/files/Climate%20Paper_Full_FINAL-1.pdf>.

Dukes, J.S. et H.A. Mooney. « Does global change increase the success of biological invaders? », *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 14, nº 4, 1999, pp. 135-139.

Dukes, J.S., J. Pontius, D. Orwig, J.R. Garnas, V.L. Rodgers, N. Brazee, B. Cooke, K.A. Theoharides, E.E. Stange, R. Harrington, J.E. Ehrenfeld, J. Gurevitch, M. Lerdau, K. Stinson, R. Wick et M. Ayres. « Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: what can we predict? », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 39, nº 2, 2009, pp. 231-248.

Dunn, P.O., D.W. Winkler, L.A. Whittingham, S.J. Hannon et R.J. Robertson. « A test of the mismatch hypothesis: how is timing of reproduction related to food abundance in an aerial insectivore? », *Ecology*, vol. 92, nº 2, 2011, pp. 450-461.

Environnement Canada. *4e Rapport national du Canada à la Convention sur la diversité biologique*, Environnement Canada, Ottawa, 2009, 199 p.

Environnement Canada. *Initiatives écosystémiques*, Environnement Canada, 2012, <http://www.ec.gc.ca/nature/default.asp?lang=Fr&n=2C63408C-1>.

Epelbaum, A., L.M. Herborg, T.W. Therriault et C.M. Pearce. « Temperature and salinity effects on growth, survival, reproduction and potential distribution of two non-indigenous botryllid ascidians in British Columbia », *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 369, 2009, pp. 43-52.

Eskelin, N., W.C. Parker, S.J. Colombo et P. Lu. *Assessing assisted migration as a climate change adaptation strategy for Ontario's forests: project overview and bibliography*, Climate Change Research Report CCRR-19, Direction de la recherche appliquée et du développement, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ontario), 2011, 44 p.

Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada. *Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010*, Conseils canadiens des ministres des ressources, Ottawa (Ontario), 2010, vi + 148 p.

Feely, R.A., C.L. Sabine, J.M. Hernandez-Ayon, D. Ianson et B. Hales. « Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf », *Science*, vol. 320, 2008, pp. 1490-1492.

Fischer, J., G.D. Peterson, T.A. Gardner, L.J. Gordon, I. Fazey, T. Elmqvist, A. Felton, C. Folke et S. Dovers. « Integrating resilience thinking and optimisation for conservation », *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 24, 2009, pp. 549-554.

Flannigan, M., B. Stocks, M. Turetsky et M. Wotton. « Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest », *Global Change Biology*, vol. 15, 2009, pp. 549-560.

Fortier, D., M. Allard et Y. Shur. « Observation of rapid drainage system development by thermal erosion of ice wedges on Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 18, 2007, pp. 229-243.

Fraser, R.H., I. Olthof, M. Carrière, A. Deschamps et D. Pouliot. « A method for trend-based change analysis in Arctic tundra using the 25-year Landsat archive », *Polar Record*, vol. 48, 2012, pp. 83-93.

Friedland, K.D., D.G. Reddin, J.R. McMenemy et K.F. Drinkwater. « Multidecadal trends in North American Atlantic salmon (Salmo salar) stocks and climate trends relevant to juvenile survival », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 60, 2003, pp. 563-583.

Friedlingstein, P., R.A. Houghton, G. Marland, J. Hackler, T.A. Boden, T.J. Conway, J.G. Canadell, M.R. Raupach, P. Ciais et C. Le Quere. « Update on CO_2 emissions », *Nature Geoscience*, vol. 3, 2010, pp. 811-812.

Friends of Algonquin Park. *Algonquin Park birding report*, Friends of Algonquin Park, 2012, <www.algonquinpark.on.ca/news/algonquin_park_birding_report.php>.

Furgal, C. et T.D. Prowse. « Nord du Canada », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), 2008, Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 57-118.

Galatowitsch, S.M. « Landforms and Hydrology », *chapitre 6 dans Ecological Restoration*, Sinauer Association, SunderLand, Massachusetts, 2012, pp. 169-229.

Gamache I. et S. Payette. « Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada », *Journal of Biogeography*, vol. 32, 2005, pp. 849-862.

Game, E.T., G. Lipsett-Moore, E. Saxon, N. Peterson et S. Sheppard. « Incorporating climate change adaptation into national conservation assessments », *Global Change Biology*, vol. 17, 2011, pp. 3150-3160.

Gardner, A.S., G. Moholdt, B. Wouters, G.J. Wolken, D.O. Burgess, M.J. Sharp, J.G. Cogley, C. Braun et C. Labine. « Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago », *Nature*, 10089, 2011.

Garroway, C.J., J. Bowman, T.J. Cascaden, G.L. Holloway, C.G. Mahan, J.R. Malcolm, M.A. Steele, G. Turner et P.J. Wilson. « Climate change induced hybridization in flying squirrels », *Global Change Biology*, vol. 16, nº 1, 2010, pp. 113-121.

Garroway, C.J., J. Bowman, G.L. Holloway, J.R. Malcolm et P.J. Wilson. « The genetic signature of rapid range expansion by flying squirrels in response to contemporary climate warming », *Global Change Biology*, vol. 17, nº 5, 2011, pp. 1760-1769.

Gaston, A.J., D.F. Bertram, A. Boyne, J. Chardine, G. Davoren, A.W. Diamond, A. Hedd, W.A. Montevecchi, J.M. Hipfner, M.J.F. Lemon, M.L. Mallory, J.F. Rail et G.J. Robertson. « Changes in Canadian seabird populations and ecology since 1970 in relation to changes in oceanography and food webs », *Dossiers environnement*, vol. 17, 2009, pp. 267-286.

Gauthier, G. et D. Berteaux (éd.) *ArcticWOLVES: Arctic wildlife observatories linking vulnerable ecoSystems*, rapport final de synthèse, Centre d'études nordiques, Université Laval, ville de Québec (Québec), Canada, 2011, 133 p.

Gauthier, G., J. Bêty, J.F. Giroux et L. Rochefort. « Trophic interactions in a high Arctic snow goose colony », *Integrative and Comparative Biology*, vol. 44, nº 2, 2004, pp. 119-129.

Gauthier, G., D. Berteaux, J. Bêty, A. Tarroux, J.F. Therrien, L. McKinnon, P. Legagneux et M.C. Cadieux. « The tundra food web of Bylot Island in a changing climate and the role of exchanges between ecosystems », *Ecoscience*, vol. 18, 2011, pp. 223-235.

Gilg, O., B. Sittler et I. Hanski. « Climate change and cyclic predator-prey population dynamics in the high Arctic », *Global Change Biology*, vol. 15, 2009, pp. 2634-2652.

Gilg, O., K.M. Kovacs, J. Aars, J. Fort, G. Gauthier, D. Gremillet, R.A. Ims, H. Meltofte, J. Moreau, E. Post, N.M. Schmidt, G. Yannic et L. Bollache. « Climate change and the ecology and evolution of Arctic vertebrates », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1249, 2012, pp. 166-190.

Gillooly, J.F., J.H. Brown, G.B. West, V.M. Savage et E.L. Charnov. « Effects of size and temperature on metabolic rate », *Science*, vol. 293, 2001, pp. 2248-2251.

Glick, P., B.A. Stein et N.A. Edelson (éd.) *Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment*, National Wildlife Federation, Washington (DC), 2011, 168 p.

Godin, E. et D. Fortier. « Geomorphology of a thermo-erosion gully, Bylot Island, Nunavut, Canada », *Revue canadienne des sciences de la Terre*, vol. 49, no 8, 2012, pp. 979-986.

Goodwin, B.J., A.J. McAllister et L. Fahrig. « Predicting invasiveness of plant species based on biological information », *Conservation Biology*, vol. 13, 1999, pp. 422-426.

Gouvernement du Canada. *Cinquième communication nationale sur les changements climatiques*, présentée le 12 février 2010 à la CCNUCC, Gouvernement du Canada, Ottawa, 2010.

Gouvernement du Canada. *Cadre national pour le réseau d'aires marines protégées du Canada*, Pêches et Océans Canada, Ottawa, 2011, 34 p., <http://www.dfo-mpo.gc.ca/oceans/publications/dmpaf-eczpm/framework-cadre2011-fra.asp>.

Government of Manitoba. *Nueltin Lake Provincial Park, Manitoba's Protected Areas Initiative*, Government of Manitoba, sans date [a], <www.gov.mb.ca/conservation/pai/pdf/nueltin_lake_provincial_park.pdf>.

Government of Manitoba. *Colvin Lake Provincial Park Proposal, Manitoba's Protected Areas Initiative*, Government of Manitoba, sans date [b], <www.gov.mb.ca/conservation/parks/pdf/planning/colvin_lake_proposal.pdf>.

Government of Newfoundland and Labrador. *Charting our course: climate change action plan 2011*, Government of Newfoundland and Labrador, 2011, 83 p., <www.exec.gov.nl.ca/exec/cceeet/2011_climate_change_action_plan.html>.

Government of Nova Scotia. *Wilderness area protects Amherst's water, communiqué de presse*, Government of Nova Scotia, 2008, <http://novascotia.ca/news/release/?id=20081211001>.

Government of Nova Scotia. *Chignecto Isthmus wilderness area – Amherst Town Lands*, Government of Nova Scotia, 2012, <www.gov.ns.ca/nse/protectedareas/wa_ChignectolsthmusasP>.

Graumlich, L. et W.L. Francis (éd.) *Moving toward climate change adaptation: the promise of the Yellowstone to Yukon Conservation Initiative for addressing the region's vulnerabilities*, Yellowstone to Yukon Conservation Initiative, Canmore (Alberta), 2010.

Gray, P.A. « Impacts of climate change on diversity in forested ecosystems: some examples », *The Forestry Chronicle*, vol. 81, 2005, pp. 655-661.

Griffith, B., D. Douglas, N. Walsh, D.T.M. Young, D.E. Russell, R.G. White, R. Cameron, et K. Whitten. « The porcupine caribou herd », dans *Arctic Refuge Coastal Plain Terrestrial Wildlife Research Summaries*, 2002.

Hamann, A. et S.N. Aitken. « Conservation planning under climate change: accounting for adaptive potential and migration capacity in species distribution models », *Diversity and Distributions*, vol.19, nº 3, 2012, pp. 268-280.

Hamann, A. et T. Wang. « Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia », *Ecology*, vol. 87, nº 11, 2006, pp. 2773-2786.

Hampe, A. et A.S. Jump. « Climate relicts: past, present, future », *Annual Review of Ecology, Evolution*, and Systematics, vol. 42, 2011, pp. 313-333.

Hampe, A. et R.J. Petit. « Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters », *Ecology Letters*, vol. 8, 2005, pp. 461-467.

Hannah, L. « A global conservation system for climate-change adaptation », *Conservation Biology*, vol. 24, 2009, pp. 70-77.

Hannah, L., G.F. Midgley, T. Lovejoy, W.J. Bond, M. Bush, J.C. Lovett, D. Scott et F.I. Woodward. « Conservation of biodiversity in a changing climate », *Conservation Biology*, vol. 16, 2002, pp. 264-268.

Hannah, L., G. Midgley, S. Andelmon, M. Araujo, G. Hughes, E. Martinez-Meyer, R. Pearson et P. Williams. « Protected area needs in a changing climate », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 5, 2007, pp. 131-138.

Hanski, I., L. von Hertzen, N. Fyhrquist, K. Koskinen, K. Torppa, T. Laatikainen, P. Karisola, P. Auvinen, L. Paulin, M.J. Mäkelä, E. Vartiainen, T.U. Kosunen, H. Alenius, T. Haahtela. « Environmental biodiversity, human microbiota, and allergy are interrelated », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, 2012, pp. 8334-8339, <www.pnas.org/content/early/2012/05/01/1205624109.full.pdf>.

Harley, C.D.G. « Climate change, keystone predation, and biodiversity loss », *Science*, vol. 334, 2011, pp. 1124-1127.

Harris, J.A., R.J. Hobbs, E. Higgs et J. Aronson. « Ecological restoration and global climate change », *Restoration Ecology*, vol. 14, nº 2, 2006, pp. 170-176.

Harrington, R., R. Fleming et P. Woiwod. « Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted? », *Agricultural and Forest Entomology*, vol. 3, 2001, pp. 233-240.

Heller, N.E. et E.S. Zavaleta. « Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations », *Biological Conservation*, vol. 142, 2009, pp. 14-32.

Helmuth, B., N. Mieszkowska, P. Moore et S.J. Hawkins. « Living on the edge of two changing worlds: forecasting the responses of rocky intertidal ecosystems to climate change », *Annual Review of Ecology*, Evolution and Systematics, vol. 37, 2006, pp. 373-404.

Hewitt, G.M. et R.A. Nichols. « Genetic and evolutionary impacts of climate change », dans *Climate Change and Biodiversity*, R.L. Peters et T.E. Lovejoy (éd.), Yale University Press, New Haven, Connecticut, 2005, pp. 176-192.

Hill, G.B. et G.H.R. Henry. « Responses of high Arctic wet sedge tundra to climate warming since 1980 », *Global Change Biology*, vol. 17, 2011, pp. 276-287.

Hitch, A.T. et P.L. Leberg. « Breeding distributions of North American bird species moving north as a result of climate change », *Conservation Biology*, vol. 21, 2007, pp. 534-539.

Hobbs, R.J., E. Higgs et J.A. Harris. « Novel ecosystems: implications for conservation and restoration », *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 24, 2009, pp. 599-605.

Hobbs, R.J., L.M. Hallett, P.R. Ehrlich et H.A. Mooney. « Intervention ecology: applying ecological science in the twenty-first century », *BioScience*, vol. 61, nº 6, 2011, pp. 442-450.

Hoffmann, A.A. et C.M. Sgrò. « Climate change and evolutionary adaptation », *Nature*, vol. 470, nº 7335, 2011, pp. 479-485.

Hongoh, V., L. Berrang-Ford, M.E. Scott et L.R. Lindsay. « Expanding geographical distribution of the mosquito, Culex pipiens, in Canada under climate change », *Applied Geography*, vol. 33, 2011, pp. 53-62.

Honnay, O., K. Verheyen, J. Butaye, H. Jacquemyn, B. Bossuyt et M. Hermy. « Possible effects of habitat fragmentation and climate change on the range of forest plant species », *Ecology Letters*, vol. 5, 2002, pp. 525-530.

Hood, G.A. et S.E. Bayley. « Beaver (Castor canadensis) mitigate the effects of climate on the area of open water in boreal wetlands in western Canada », *Biological Conservation*, vol. 141, 2008, pp. 556-567.

Hooper, D.U., E.C. Adair, B.J. Cardinale, J.E.K. Byrnes, B.A. Hungate, K.L. Matulich, A. Gonzalez, J.E. Duffy, L. Gamfeldt et M.I. O'Connor. « A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change », *Nature*, vol. 486, 2012, pp. 105-108.

Hounsell, S. « Biodiversity », dans *Climate change adaptation: a priorities plan for Canada*, rapport du Climate Change Adaptation Project (Canada), Intact Foundation et University of Waterloo, B. Feltmate et J. Thistlethwaite (éd.), 2012, pp. 37-48, 122 p.

Hurlbert, A.H. et Z. Liang. « Spatiotemporal variation in avian migration phenology: citizen science reveals effects of climate change », *PLoS ONE*, vol. 7, nº 2, e31662, 2012.

CIEM (Conseil international pour l'exploration de la mer). *Report of the study group on designing marine protected area networks in a changing climate (SGMPAN)*, Conseil international pour l'exploration de la mer, 15 au 19 novembre 2010, Woods Hole, Massachusetts, États-Unis, ICES CM 2011/SSGSUE:01, 2011, 155 p.

Inkley, D.B., M.G. Anderson, A.R. Blaustein, V.R. Burkett, B. Felzer, B. Griffith, J. Price et T.L. Root. « Global climate change and wildlife in North America », *Technology Review*, The Wildlife Society, Bethesda (MD), vol. 4, nº 2, 2004.

Iverson, L.R., A.M. Prasad et S. Matthews. « Potential changes in suitable habitat for 134 tree species in the northeastern USA », *Mitigation and Adaptation Strategies*, vol. 13, 2008, pp. 541-560.

Jackson, D.A. et N.E. Mandrak. « Changing fish biodiversity: predicting the loss of cyprinid biodiversity due to global climate change », *American Fisheries Society Symposium*, vol. 32, 2002, pp. 89-98.

Jaramillo-Correa, J.P., J. Jean Beaulieu, P. Damase, D.P. Khasa et J. Jean Bousquet. « Inferring the past from the present phylogeographic structure of North American forest trees: seeing the forest for the genes », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 39, nº 2, 2009, pp. 286-307.

Jia, G.J., H.E. Epstein et D.A. Walker. « Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming », *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 11, 2009, pp. 2231-2238.

Joly, K., P.A. Duffy et T.S. Rupp. « Simulating the effects of climate change on fire regimes in Arctic biomes: implications for caribou and moose habitat », *Ecosphere*, vol. 3, nº 5, art. 36, 2012.

Jones, T. et W. Cresswell. « The phenology mismatch hypothesis: are declines of migrant birds linked to uneven global climate change? », *Journal of Animal Ecology*, vol. 79, 2010, pp. 98-108.

Kausrud, K.L., A. Mysterud, H. Steen, J.O. Vik, E. Ostbye, B. Cazelles, E. Framstad, A.M. Eikeset, I. Mysterud, T. Solhøy et N.C. Stenseth. « Linking climate change to lemming cycles », *Nature*, vol. 456, 2008, pp. 93-97.

Keenleyside, K.A., N. Dudley, S. Cairns, C.M. Hall et S. Stolton. *Restauration écologique pour les aires protégées : principes, lignes directrices et bonnes pratiques*, Union internationale pour la conservation de la nature, Gland, Suisse, 2012, x + 120 p.

Keith, D.A., H.R. Akçakaya, W. Thuiller, G.F. Midgley, R.G. Pearson, S.J. Phillips, H.M. Regan, M.B. Araujo et T.G. Rebelo. « Predicting extinction risks under climate change: coupling stochastic population models with dynamic bioclimatic habitat models », *Biology Letters*, vol. 4, 2008, pp. 560-563.

Keppel, G.K.P., G.W. Van Niel, C.J. Wardell-Johnson, M. Yates, L. Byrne, A. Mucina, G.T. Schut, S.D. Hopper et S.E. Franklin. « Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change », *Global Ecology and Biogeography*, vol. 21, 2012, pp. 393-404.

Kharouba, H.M., A.C. Algar et J.T. Kerr. « Historically calibrated predictions of butterfly species' range shift using global change as a pseudo-experiment », *Ecology*, vol. 90, nº 8, 2009, pp. 2213-2222.

Klassen, G. et A. Locke. *A biological synopsis of the European green crab, Carcinus maenas*, Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques no 2818, Pêches et Océans Canada, 2007.

Klein, J.A., E. Yeh, J. Bump, Y. Nyima et K. Hopping. « Coordinating environmental protection and climate change adaptation policy in resource-dependent communities: a case study from the Tibetan Plateau », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice*, Springer, J.D. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Advances in Global Change Research, vol. 42, chap. 31, 2011, pp. 423-438.

Knudsen, E., A. Lindén, C. Both, N. Jonzén, F. Pulido, N. Saino, W.J. Sutherland, L.A. Bach, T. Coppack, T. Ergon, P. Gienapp, J.A. Gill, O. Gordo, A. Hedenström, E. Lehikoinen, P.P. Marra, A.P. Møller, A.L.K. Nilsson, G. Péron, E. Ranta, D. Rubolini, T.H. Sparks, F. Spina, C.E. Studds, S.A. Sæther, P. Tryjanowski et N.C. Stenseth. « Challenging claims in the study of migratory birds and climate change », *Biological Reviews*, vol. 86, nº 4, 2011, pp. 928-946.

Koeller. P., C. Fuentes-Yaco, T. Platt, S. Sathyendranath, A. Richards, P. Ouellet, D. Orr, U. Skuladottir, K. Wieland, L. Savard et M. Aschran. « Basin-scale coherence in phenology of shrimps and phytoplankton in the North Atlantic Ocean », *Science*, vol. 324, 2009, pp. 791-793.

Krebs, C.J., D. Reid, A.J. Kenney et S. Gilbert. « Fluctuations in lemming populations in north Yukon, Canada, 2007-2010 », *Revue canadienne de zoologie*, vol. 89, 2011, pp. 297-306.

Kundzewicz, Z.W. et L.J. Mata. « Freshwater resources and their management », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution du Groupe de travail II au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, M.L. Parry, O.F. Canziana, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 173-210, 976 p.

Lafleur, B., D. Paré, A.D. Munson et Y. Bergeron. « Response of Northeastern North American forests to climate change: will soil conditions constrain tree species migration? », *Dossiers environnement*, vol. 18, 2010, pp. 279-289.

Lalonde, R., J. Gleeson, P.A. Gray, A. Douglas, C. Blakemore et L. Ferguson. *Climate change vulnerability assessment and adaptation options for Ontario's clay belt – a case study*, Direction de la recherche appliquée et du développement, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ontario). Climate Change Research Report CCRR-24, 2012, 51 p.

Lambert, J.D., K.P. McFarland, C.C. Rimmer, S.D. Faccio et J.L. Atwood. « A practical model of Bicknell's thrush distribution in the northeastern United States », *Wilson Bulletin*, vol. 117, 2005, pp. 1-11.

Larson, B.M.H. et C. Palmer. « Assisted colonization is no panacea, but let's not discount it either », *Ethics*, Policy and Environment, vol. 16, nº 1, 2013, pp. 16-18.

Lawrence, D.M., A.G. Slater, R.A. Tomas, M.M. Holland et C. Deser. « Accelerated Arctic land warming and permafrost degradation during rapid sea ice loss », *Geophysical Research Letters*, vol. 35, L11506, 2008.

Lemieux, C.J., T.J. Beechey, D.J. Scott et P.A. Gray. *Protected areas and climate change in Canada: challenges and opportunities for adaptation, Conseil canadien des aires écologiques (CCAE)*, publication hors-série nº 19, Secrétariat du CCAE, Ottawa, 2010.

Lemieux, C.J., T.J. Beechey et P.A. Gray. « Prospects for Canada's protected areas in an era of rapid climate change », *Land Use Policy*, vol. 28, nº 4, 2011, pp. 928-941.

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

Lindenmayer, D.B., W. Steffen, A.A. Burbidge, L. Hughes, R.L. Kitching, W. Musgrave, M.S. Smith et P.A. Werner. « Conservation strategies in response to rapid climate change: Australia as a case study », *Biological Conservation*, vol. 143, 2010, pp. 1587-1593.

Loarie, S.R., P.B. Duffy, H. Hamilton, G.P. Asner, C.B. Field et D.D. Ackerly. « The velocity of climate change », *Nature*, vol. 462, 2009, pp. 1052-1055.

Logan, J.A., J. Regnière et J.A. Powell. « Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics », *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 1, no 3, 2003, pp. 130-137.

Lyons, K.G. et M.W. Schwartz. « Rare species loss alters ecosystem function – invasion resistance », *Ecology Letters*, vol. 4, 2001, pp. 358-365.

Maestre, F.T., J.L. Quero, N.J. Gotelli, A. Escudero, V. Ochoa, M. Delgado-Baquerizo, M. Garcia-Gomez, M.A. Bowker, S. Soliveres, C. Escolar, P. Garcia-Palacios, M. Berdugo, E. Valencia, B. Gozalo, A. Gallardo, L. Aguilera, T. Arredondo, J. Blones, B. Boeken, D. Bran, A.A. Conceição, O. Cabrera, M. Chaieb, M. Derak, D.J. Eldridge, C. Espinosa, A. Florentino, J. Guilán, M.G. Gatica, W. Ghiloufi, S. Gómez-González, J.R. Gutiérrez, R.M. Hernándes, X. Huang, E. Huber-Sannwald, M. Jankju, M. Miriti, J. Monerris, R.L. Mau, E. Morici, K. Naseri, A. Ospina, V. Polo, A. Prina, E. Pucheta, D.A. Ramirez-Collantes, R. Romão, M. Tighe, C. Torres-Diaz, J. Val, J.P. Veiga, D. Wang et E. Zaady. « Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands », *Science*, vol. 335, nº 6065, 2012, pp. 214-218.

Malcolm, J.R., A. Markham, R.P. Neilson et M. Oaraci. « Estimated migration rates under scenarios of global climate change », *Journal of Biogeography*, vol. 29, 2002, pp. 835-849.

Martins, E.G., S.G. Hinch, D.A. Patterson, M.J. Hague, S.J. Cooke, K.M. Miller, M.F. Lapointe, K.K. English et A.P. Farrell. « Effects of river temperature and climate warming on stock-specific survival of adult migrating Fraser River sockeye salmon (Oncorhynchus nerka) », *Global Change Biology*, vol. 17, nº 1, 2011, pp. 99-114.

Mawdsley, J.R., R. O'Malley et D.S. Ojima. « A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation », *Conservation Biology*, vol. 23, 2009, pp. 1080-1089.

McFadden, J.P., G.E. Liston, M. Sturm, R. Pilke Sr. et F.S. Chapin. *Interactions of shrubs and snow in arctic tundra: measurements and models*, symposium tenu lors de la Sixième assemblée scientifique de l'International Association for Environmental Hydrology, Maastricht, Pays-Bas, juillet 2001, IAHS Publ. nº. 270, 2001.

McKenney, D.W., J.H. Pedlar, K.M. Lawrence, K.L. Campbell et M.F. Hutchinson. « Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees », *BioScience*, vol. 57, nº 11, 2007, pp. 939-948.

McLachlan, J.S., J.S. Clark et P.S. Manos. « Molecular indicators of tree migration capacity under rapid climate change », *Ecology*, vol. 86, nº 8, 2005, pp. 2088-2098.

McLachlan, J.S., J.J. Hellmann et M.W. Schwartz. « A framework for debate of assisted migration in an era of climate change », *Conservation Biology*, vol. 21, nº 2, 2007, pp. 297-302.

McLaughlin, J. et K. Webster. *Effects of a changing climate on peatlands in permafrost zones: a literature review and application to Ontario's far North*, Climate Research Report CCRR-34, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ontario), 2013, 157 p.

McLennan, D.S. « Dealing with uncertainty: managing and monitoring Canada's northern national parks in a rapidly changing world », dans *Ecological Consequences of Climate Change: Mechanisms, Conservation, and Management*, J.L. Bellant et E.A. Beever (éd.), CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton (FL), 2011.

McLennan, D.S., T. Bell, D. Berteaux, W. Chen, L. Copland, R. Fraser, D. Gallant, G. Gauthier, D. Hik, C.J. Krebs, I. Myers-Smith, I. Olthof, D. Reid, W. Sladen, C. Tarnocai, W. Vincent et Y. Zhang. « Recent climate-related terrestrial biodiversity research in Canada's Arctic national parks: review, summary, and management implications », *Biodiversity*, vol. 13, nº 3-4, 2012, pp. 35-39.

McLennan, D.S. et P. Zorn. *Monitoring for ecological integrity and state of the parks reporting*, Parks Research Forum of Ontario (PRFO) State-of-the-Art Workshop, 2005, <http://casiopa.mediamouse.ca/wp-content/uploads/2010/06/PRFO-2005-MonitoringProceedings-p35-39-McLennan-and-Zorn.pdf>

Melles, S.J., M.J. Fortin, K.L. Lindsay et D. Badzinski. « Expanding northward: influence of climate change, forest connectivity, and population processes on a threatened species' range shift », *Global Change Biology*, vol. 17, nº 1, 2011, pp. 17-31.

Miller, F.L. et A. Gunn. « Catastrophic die-off of Peary caribou on the western Queen Elizabeth Islands, Canadian High Arctic », *Arctic*, vol. 56, 2003, pp. 381-390.

Miller-Rushing, A.J., T.T. Høye, D.W. Inouye et E. Post. « The effects of phenological mismatches on demography », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, nº 1555, 2012, pp. 3177-3186.

Minns, C.K., B.J. Shuter et J.L. McDermid. *Regional projections of climate change effects on Ontario lake trout (Salvelinus namaycush) populations*, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Direction de la recherche appliquée et du développement, Sault Ste. Marie (Ontario), Climate Change Research Report CCRR-14, 2009, 10 p.

Mitton, J.B. et S.M. Ferrenberg. « Mountain pine beetle develops an unprecedented summer generation in response to climate warming », *American Naturalist*, vol. 179, no 5, 2012, E163-E171.

MRN (ministère des Richesses naturelles). *Forest management planning manual for Ontario's crown forests*, ministère des Richesses naturelles, Toronto (Ontario), 2004.

Møller, A.P., D. Rubolini et E. Lehikoinen. « Populations of migratory bird species that did not show a phenological response to climate change are declining », *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, 2008, pp. 16195-16200.

Mooney, H., A. Larigauderie, M. Cesario, T. Elmquist, O. Hoegh-Gulberg, S. Lavorel, G.M. Mace, M. Palmer, R. Scholes et T. Yahara. « Biodiversity, climate change, and ecosystem services », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 1, 2009, pp. 46-54.

Mortsch, L., M. Alden et J.D. Scheraga. *Climate change and water quality in the Great Lakes region: risks, opportunities and responses*, rapport rédigé pour le Conseil de la qualité de l'eau des Grands lacs de la Commission mixte internationale, 2003, 135 p.

Munang, R., I. Thiaw, K. Alverson, J. Liu et Z. Han. « The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction », *Current opinion in Environmental Sustainability*, vol. 5, 2013, pp. 1-6.

NAWPA (Comité intergouvernemental nord-américain pour la coopération sur la conservation des milieux sauvages et des aires protégées). *Les aires protégées : une solution naturelle aux changements climatiques*, North American Intergovernmental Committee on Cooperation for Wilderness and Protected Areas Conservation Network, 2012, <nawpacommittee.org/wp-content/uploads/2012/08/NAWPA-CCWG-Brochure.pdf>.

Nebel, S., A. Mills, J.D. McCracken et P.D. Taylor. « Declines of aerial insectivores in North America follow a geographic gradient », *Écologie et conservation des oiseaux*, vol. 5, nº 2, 2010, <www.ace-eco.org/vol5/iss2/art1/>.

Initiative de conservation des oiseaux de l'Amérique du Nord – Canada. *État des populations d'oiseaux du Canada*, 2012, Environnement Canada, Ottawa, Canada, 2012, 36 p.

Obbard, M.E., M.R.L. Cattet, T. Moody, L.R. Walton, D. Potter, J. Inglis et C. Chenier. *Temporal trends in the body condition of Southern Hudson Bay polar bears*, Direction de la recherche appliquée et du développement, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ontario), 2006.

Oliver, T.H., R.J. Smithers, S. Bailey, C.A. Walmsley et K. Watts. « A decision framework for considering climate change adaptation in biodiversity conservation planning », *Journal of Applied Ecology*, vol. 49, 2012, pp. 1247-1255.

O'Neill, G.A., M.R. Carlson, V. Berger et N.K. Ukrainetz. *Assisted migration adaptation trial: workplan*, B.C. Ministry of Forests and Range – Research Branch, 2008, <www.for.gov.bc.ca/HRE/forgen/interior/AMAT_workplan_22.pdf>.

Opdam, P. et D. Wascher. « Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation », *Biological Conservation*, vol. 117, 2004, pp. 285-297.

Ostfield, R.S. « Biodiversity loss and the rise of zoonotic pathogens », *Clinical Microbiology and Infection*, vol. 15, 2009, pp. 40-43.

Parcs Canada. *Agir sur le terrain II – Travailler avec les Canadiens pour améliorer l'intégrité écologique des parcs nationaux du Canada*, Parcs Canada, 2008, <http://www.pc.gc.ca/fra/docs/v-g/ie-ei/at-ag/agir2-action2.aspx>.

Parcs Canada. *Parc national du Canada Kouchibouguac : plan directeur*, Parcs Canada, Ottawa, Canada, 2010, 98 p.

Parcs Canada. *Études de cas de restauration : restauration de l'écosystème des Prairies (parc national des Prairies)*, Parcs Canada, 2011a, <http://www.pc.gc.ca/fra/progs/np-pn/re-er/ec-cs/ec-cs01.aspx>.

Parcs Canada. *Études de cas de restauration : restauration d'écosystèmes aquatiques (parc national de la Mauricie)*, Parcs Canada, 2011b, <http://www.pc.gc.ca/fra/progs/np-pn/re-er/ec-cs/ec-cs02.aspx>.

Parcs Canada. *Lignes directrices de suivi de l'intégrité écologique des parcs nationaux du Canada*, Parcs Canada, Direction générale de l'établissement et conservation des aires protégées de Parcs Canada, Parcs Canada, 2011c.

Agence Parcs Canada et Conseil canadien des parcs. *Principes et lignes directrices pour la restauration écologique dans les aires naturelles protégées du Canada*, Agence Parcs Canada et Conseil canadien des parcs, 2008, <http://www.pc.gc.ca/docs/pc/guide/resteco/index_f.asp>.

Payette, S., S. Boudreau, C. Morneau et N. Pitre. « Long term interactions between migratory caribou, wildfires and Nunavik hunters inferred from tree rings », *Ambio*, vol. 33, nº 8, 2004, pp. 482-486.

Peacock, E., A.E. Derocher, G.W. Thiemann et I. Stirling. « Conservation and management of Canada's polar bears (Ursus maritimus) in a changing Arctic », *Revue canadienne de zoologie*, vol. 89, nº 5, 2011, pp. 371-385.

Pearce-Higgins, J.W., D.W. Yalden et M.J. Whittingham. « Warmer springs advance the breeding phenology of golden plovers Pluvialis apricaria and their prey (Tipulidae) », *Oecologia*, vol. 143, 2005, pp. 470-476.

Pearson, R.G. « Climate change and the migration capacity of species », *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 21, no 3, 2006, pp. 111-113.

Pedlar, J.H., D.W. McKenney, J. Beaulieu, S.J. Colombo, J.S. McLachlan et G.A. O'Neill. « The implementation of assisted migration in Canadian forests », *The Forestry Chronicle*, vol. 87, nº 6, 2011, pp. 766-777.

Pedlar, J.H., D.W. McKenney, I. Aubin, T. Beardmore, J. Beaulieu, L. Iverson, G.A. O'Neill, R.S. Winder et C. Ste-Marie. « Placing forestry in the assisted migration debate », *BioScience*, vol. 62, nº 9, 2012, pp. 835-842.

Peel Watershed Planning Commission. *Recommended Peel watershed regional land use plan*, Peel watershed Planning Commission, Whitehorse (Territoire du Yukon), Canada, 2010.

Pellatt, M.G., Z. Gedalof, M. McCoy, K. Bodtker, A. Cannon, S. Smith, B. Beckwith, R. Mathewes et D. Smith. *Fire history and ecology of Garry oak and associated ecosystems in British Columbia*, Agence Parcs Canada, Western and Northern Service Centre Publication, Vancouver, Canada, 2007.

Pellatt, M.G., S.J. Goring, K.M. Bodtker et A.J. Cannon. « Using a down-scaled bioclimate envelope model to determine long-term temporal connectivity of Garry oak (Quercus garryana) habitat in western North America: implications for protected area planning », *Environmental Management*, vol. 49, 2012, pp. 802-815.

Petersen, A.T., E. Martinez-Meyer, C. Gonzalez-Salazar et P.W. Hall. « Modeled climate change effects on distributions of Canadian butterfly species », *Revue canadienne de zoologie*, vol. 82, 2004, pp. 851-858.

Ping, C.L., G.J. Michaelson, M.T. Jorgenson, J.M. Kimble, H. Epstein, V.E. Romanovsky et D.A. Walker. « High stocks of soil organic carbon in North American Arctic region », *Nature Geoscience*, vol. 1, 2008, pp. 615-619.

Pitelka, L.F., R.H. Gardner, J. Ash, S. Berry, H. Gitay, I.R. Noble, A. Saunders, R.H.W. Bradshaw, L. Brubaker, J.S. Clark, M.B. Davis, S. Sugita, J.M. Dyer, R. Hengeveld, G. Hope, B. Huntley, G.A. King, S. Lavorel, R.N. Mack, G.P. Malanson, M. Mcglone, I.C. Prentice et M. Rejmanek. « Plant migration and climate change », *American Scientist*, vol. 85, nº 5, 1997, pp. 464-473.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement). « The role of ecosystem management in climate change adaptation and disaster risk reduction », *Copenhagen discussion series*, R. Munang, J. Liu et I. Thiaw (éd.), nº 2, 2009, 8 pp., <http://www.unep.org/climatechange/Portals/5/documents/UNEP-DiscussionSeries_2.pdf>.

Poiani, K.A., R.L. Goldman, J. Hobson, J.M. Hoekstra et K.S. Nelson. « Redesigning biodiversity conservation projects for climate change: examples from the field », *Biodiversity Conservation*, vol. 20, 2011, pp. 185-201.

Post, E., M.C. Forchhammer, M.S. Bret-Harte, T.V. Callaghan, T.R. Christensen, B. Elberling, A.D. Fox, O. Gilg, D.S. Hik, T.T. Hoye, R.A. Ims, E. Jeppesen, D.R. Klein, J. Madsen, A.D. McGuire, S. Rysgaard, D.E. Schindler, I. Stirling, M.P. Tamstorf, N.J.C. Tyler, R. van der Wal, J. Welker, P.A. Wookey, N.M. Schmidt et P. Aastrup. « Ecological dynamics across the Arctic associated with recent climate change », *Science*, vol. 325, 2009, pp. 1355-1358.

Province of British Columbia. *Recent climate change projects*, Province of British Columbia, 2013, <www.env.gov.bc.ca/bcparks/conserve/climate_change/CCProjects.html>.

Qian, H. et R.E. Ricklefs. « The role of exotic species in homogenizing the North American flora », *Ecology Letters*, vol. 9, 2006, pp. 1293-1298.

Rahel, F.J. « Using current biogeographic limits to predict fish distributions following climate change », *American Fisheries Society Symposium*, vol. 32, 2002, pp. 99-110.

Rehfeldt, G.E. et B.C. Jaquish. « Ecological impacts and management strategies for western larch in the face of climate change », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 15, 2010, pp. 283-306.

Reid, P.C., M. Edwards et D.G. Johns. « Trans-Arctic invasion in modern times », *Science*, vol. 322, 2008, p. 528.

Riccardi, A. et D. Simberloff. « Assisted colonization is not a viable conservation strategy », *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 24, nº 5, 2008, pp. 248-253.

Rodenhouse, N.L., S.N. Matthews, K.P. McFarland, J.D. Lambert, L.R. Iverson, A. Prasad, T.S. Sillett et R.T. Holmes. « Potential effects of climate change on birds of the Northeast », *Mitigation and Adaptation Strategies to Global Change*, vol. 13, 2008, pp. 517-540.

Rodenhouse, N.L., L.M. Christenson, D. Parry et L.E. Green. « Climate change effects on native fauna of Northeastern forests », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 39, 2009, pp. 249-263.

Rose, N.A. et P.J. Burton. « Using bioclimatic envelopes to identify temporal corridors in support of conservation planning in a changing climate », *Forest Ecology and Management*, vol. 258, 2009, pp. S64-S74.

Rosenzweig, M.L. « The four questions: what does the introduction of exotic species do to diversity? », *Evolutionary Ecology Research*, vol. 3, 1995, pp. 361-367.

Rosing-Asvid, A. « The influence of climate variability on polar bear (Ursus maritimus) and ringed seal (Pusa hispida) population dynamics », *Revue canadienne de zoologie*, vol. 84, 2006, pp. 357-364.

Rubidge, E.M., J.L. Patton, M. Lim, A.C. Burton, J.S. Brashares et C. Moritz. « Climate-induced range contraction drives genetic erosion in an alpine mammal », *Nature Climate Change*, vol. 2, nº 4, 2012, pp. 285-288.

Saino, N., R. Ambrosini, D. Rubolini, J. von Hardenberg, A. Provenzale, K. Hüppop, O. Hüppop, A. Lehikoinen, E. Lehikoinen, K. Rainio, M. Romano et L. Sokolov. « Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds », *Proceedings of the Royal Society*, Series B: Biological Sciences, vol. 278, nº 1707, 2010, pp. 835-842.

Sambaraju, K.R., A.L. Carroll, J. Zhu, K. Stahl, R.D. Moore et B.H. Aukema. « Climate change could alter the distribution of mountain pine beetle outbreaks in western Canada », *Ecography*, vol. 35, nº 3, 2012, pp. 211-223.

Sauchyn, D. et S. Kulshreshtha. « Prairies », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 275-328.

Sauer, J.R., J.E. Hines, J.E. Fallon, K.L. Pardieck, D.J. Ziolkowski Jr. et W.A. Link. *The North American breeding bird survey, results and analysis 1966-2010*, version 12.07.2011, USGS Patuxent Wildlife Research Center, Laurel (MD), 2011.

Saunders, E., R. Quinlan, P. Jones, B. Adams et K. Pearson. *At home on the range: living with Alberta's prairie species at risk*, Alberta Conservation Association et Alberta Sustainable Resource Development, Lethbridge (Alberta), 2006.

SCDB (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique). *Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation: report of the second ad hoc technical expert group on biodiversity and climate change*, Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, CBD Technical Services No. 41, 2009, 126 p.

Schindler, D.W. « The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 58, 2001, pp. 18-29.

Schindler, D.W. et J. Bruce. « Freshwater resources », dans *Climate Change Adaptation: a Priorities Plan for Canada*, rapport du Climate Change Adaptation Project (Canada), B. Feltmate et J. Thistlethwaite (éd.), Intact Foundation et University of Waterloo, 2012, pp. 51-64.

Schwartz, M.D., R. Ahas et A. Aasa. « Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere », *Global Change Biology*, vol. 12, 2006, pp. 343-351.

Schwartz, M.W., L.R. Iverson, A.M. Prasad, S.N. Matthews et R.J. O'Connor. « Predicting extinctions as a result of climate change », *Ecology*, vol. 87, nº 7, 2006, pp. 1611-1615.

Sharma, S., S. Couturier et S.D. Côté. « Impacts of climate change on the seasonal distribution of migratory caribou », *Global Change Biology*, vol. 15, nº 10, 2009, pp. 2549-2562.

Sharp, M., D.O. Burgess, J.G. Gogley, M. Ecclestone, C. Labine et G.J. Wolken. « Extreme melt on Canada's arctic ice caps in the 21st century », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L11501, 2011.

Shuter, B.J. et J.R. Post. « Climate, population viability, and the zoogeography of temperate fishes », *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 119, 1990, pp. 314-336.

Smith, S.L., V.E. Romanovsky, A.G. Lewkowicz, C.R. Burn, M. Allard, G.D. Clow, K. Yoshikawa et J. Throop. « Thermal state of permafrost in North America: contribution to the International Polar Year », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 21, 2010, pp. 117-135, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.690/abstract>.

Société des établissements de plein air du Québec. *Programme de suivi de l'intégrité écologique*, Réseau Parcs Québec, Québec (Québec), 2012, 117 p., <http://www.sepaq.com/pq/conserver/integrite-ecologique.dot?language_id=2>.

St. Clair, J.B. et G.T. Howe. « Genetic maladaptation of coastal Douglas-fir seedlings to future climates », *Global Change Biology*, vol. 13, 2007, pp. 1441-1454.

Stanford, J.A. « Landscapes and catchment basins », dans *Methods in Stream Ecology*, F.R. Hauer et G.A. Lambert (éd.), Academic Press Inc., New York (NY), 1996, 674 p.

Staudinger, M.D., N.B. Grimm, A. Staudt, S.L. Carter, F.S. Chapin III, P. Kareiva, M. Ruckelshaus et B.A. Stein. *Impacts of climate change on biodiversity, ecosystems, and ecosystem services: technical input to the 2013 National Climate Assessment*, Cooperative Report to the 2013 National Climate Assessment, 2012, 296 p.

Ste-Marie, C., E.A. Nelson, A. Dabros et E.A. Bonneau. « Assisted migration: introduction to a multifaceted concept », *The Forestry Chronicle*, vol. 87, nº 6, 2011, pp. 724-730.

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

Stirling, I. et Derocher, A.E. « Effects of climate warming on polar bears: a review of the evidence », *Global Change Biology*, vol. 18, nº 9, 2012, pp. 2694-3706.

Stocks, B.J. et P.C. Ward. *Climate change, carbon sequestration, and forest fire protection in the Canadian boreal zone*, Climate Change Research Report CCRR-20, Direction de la recherche appliquée et du développement, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ontario), 2011, 26 p.

Stroeve, J., M. Serreze, M. Holland, J. Kay, J. Maslanik et A. Barrett. « The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis », *Climatic Change*, vol. 100, nº 3-4, 2011, pp. 1005-1027.

Stuchbury, B. *Silence of the Songbirds*, HarperCollins, Toronto, Canada, 2007, 256 p.

Sturm, M., J. Schimel, G. Michaelson et J.M. Welker. « Winter biological processes could help convert Arctic tundra to shrubland », *BioScience*, vol. 55, 2005a, pp. 17-26.

Sturm, M., T. Douglas, C. Racine et G. Liston. « Changing snow and shrub conditions affect albedo with global implications », *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, nº G1, 2005b.

Templeman, N.D. *Ecosystem status and trends report for the Newfoundland and Labrador Shelf*, Secrétariat canadien de consultation scientifique, Document de recherche 2010/026, Pêches et Océans Canada, Ottawa, 2010.

Tews, J., M.A.D. Ferguson et L. Fahrig. « Potential net effects of climate change on high Arctic Peary caribou: lessons from a spatially explicit simulation model », *Ecological Modelling*, vol. 207, 2007, pp. 85-98.

The Wildlands Network. 2009, <www.twp.org/wildways>.

Therrien, J.F. *Réponses des prédateurs aviaires aux fluctuations d'abondance de proies dans la toundra*, thèse de doctorat, département de biologie, Université Laval, Québec, 2012.

Thompson, I., B. Mackey, S. McNulty et A. Mosseler. *Forest resilience, biodiversity, and climate change, a synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems*, Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, Montréal, Technical Series, nº 43, 2009, 67 p., <www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-43-en.pdf>.

Thompson, I.D., K. Okabe, J.M. Tylianakis, P. Kumar, E.G. Brockerhoff, N.A. Schellhorn, J.A. Parrotta et R. Nasi. « Forest biodiversity and the delivery of ecosystem goods and services: translating science into policy », *BioScience*, vol. 61, 2011, pp. 972-981.

Thorpe, J. *Limited report: adaptation to climate change in management of prairie grasslands*, rédigé pour l'Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale des Prairies (ICAR), Saskatchewan Research Council (SRC) Publication No. 12855-1E12, 2012, <www.parc.ca/rac/fileManagement/upload/12855-1E12%20Adaptation%20to%20ClimateChange%20in%20Grassland%20Management.pdf>.

Thuiller, W., S. Lavorel et M.B. Araújo. « Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change », *Global Ecology and Biogeography*, vol. 14, 2005, pp. 347-357.

Timmins, J. et J. Whittington. *Pika monitoring in Banff National Park: 2011 pilot study*, Parc national du Canada Banff, Agence Parcs Canada, Banff (Alberta), 2011.

Travis, J.M.J. « Climate change and habitat destruction: a deadly anthropogenic cocktail », *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 270, 2003, pp. 467-473.

Vander Zanden, M.J., J.M. Casselman et J.B. Rasmussen. « Stable isotope evidence for the food web consequences of species invasions in lakes », *Nature*, vol. 401, 1999, pp. 464-467.

Varrin, R., J. Bowman et P.A. Gray. *The known and potential effects of climate change on biodiversity in Ontario's terrestrial ecosystems: case studies and recommendations for adaptation*, Climate Change Research Report CCRR-09, Direction de la recherche appliquée et du développement, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ontario), 2007, 48 p., <www.mnr.gov.on.ca/stdprodconsume/groups/lr/@mnr/@climatechange/documents/document/196749.pdf>.

Vasseur, L. « Championing climate change adaptation at the community level by using an ecosystem approach », dans *Building Resilience to Climate Change: Ecosystem-based adaptation and lessons from the field*, A. Andrade Pérez, B. Herrera Fernandez et R. Cazzolla Gatti (éd.), Gland, Suisse : UICN, 2010, 164 p.

Vasseur, L. et N. Catto. « Canada atlantique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, 2008, pp. 119-170.

Venter, O., N.N. Brodeur, L. Nemiroff, B. Belland, I.J. Dolinsek et J.W.A. Grant. « Threats to endangered species in Canada », *Bioscience*, vol. 56, 2006, pp. 903-910.

Vermeij, G. et P.D. Roopnarine. « The coming Arctic invasion », *Science*, vol. 321, 2008, pp. 780-781.

Volney, W.J. et R.A. Fleming. « Climate change and impacts of boreal forest insects », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 82, 2000, pp. 283-294.

Waite, T.A. et D. Strickland. « Climate change and the demographic demise of a hoarding bird living on the edge », *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 273, 2006, pp. 2809-2813.

Waithaka, J. « Parks Canada science: providing knowledge for better service to Canadians », *The George Wright Forum*, vol. 27, nº 2, 2010, pp. 213-221.

Walker, I. et R. Sydneysmith. « Colombie-Britannique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.L. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 329-386.

Walpole, A.A. et J. Bowman. *Wildlife vulnerability to climate change: an assessment for the Lake Simcoe watershed*, Climate Change Research Report CCRR-22, Direction de la recherche appliquée et du développement, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste. Marie (Ontario), 2011, 15 p.

Walpole, A.A., J. Bowman, D.C. Tozer et D.S. Badzinski. « Community-level response to climate change: shifts in Anuran calling phenology », *Herpetological Conservation and Biology*, vol. 7, nº 2, 2012, pp. 249-257.

Walther, G.R. « Community and ecosystem responses to recent climate change », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 365, 2010, pp. 2019-2024.

White, T.C.R. « The role of food, weather and climate in limiting the abundance of animals », *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 83, nº 3, 2008, pp. 227-248.

Whitney, F., H. Freeland et M. Robert. « Persistently declining oxygen levels in the interior waters of the eastern subarctic Pacific », *Progress in Oceanography*, vol. 75, 2007, pp. 179-199.

Wilson, S. *Canada's wealth of natural capital: Rouge National Park*, rapport présenté à la Fondation David Suzuki, 2012, 60 p., <www.davidsuzuki.org/publications/downloads/2012/report_Rouge_Natural_Capital_web.pdf>.

Winder, R., E.A. Nelson et T. Beardmore. « Ecological implications for assisted migration in Canadian forests », *The Forestry Chronicle*, vol. 87, 2011, pp. 731-744.

Yamamoto-Kawai, M., F.A. McLaughlin, E.C. Carmack, S. Nishino et K. Shimada. « Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: effects of ocean acidification and sea ice melt », *Science*, vol. 326, 2009, pp. 1098-1100.

CHAPITRE 7 : **SANTÉ HUMAINE**

Principaux auteurs :

Peter Berry et **Kaila-Lea Clarke** *(Santé Canada)*, **Manon D. Fleury** et **Stephen Parker** *(Agence de la santé publique du Canada)*

Collaborateurs :

Marie-Claire Brisbois *(experte-conseil en environnement)*, **Megan Duncan, Nigel Edmonds** et **Barry Jessiman** (Santé Canada), **Robbin Lindsay** *(Agence de la santé publique du Canada)*, **Paul Makar** *(Environnement Canada)*, **Toni Morris-Oswald** *(Santé Manitoba)*, **Nicholas Ogden** *(Agence de la santé publique du Canada)*, **Jaclyn Paterson** *(Santé Canada)*, **David Plummer** *(Environnement Canada)*, **Anastasia Rogaeva** *(Agence de la santé publique du Canada)*, **Craig Stephen** *(Centre for Coastal Health)*

Citation recommandée :

Berry, P., K. Clarke, M.D. Fleury et S. Parker. « Santé humaine », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 191-232.

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions 193

1. Introduction 194

2. Aperçu des principaux risques sanitaires liés aux changements climatiques 197
   - 2.1 Qualité de l'air 197
   - 2.2 Qualité des aliments et de l'eau 200
   - 2.3 Zoonoses et maladies à transmission vectorielle (MTV) 201
   - 2.4 Dangers naturels 203
   - 2.5 Rayonnements ultraviolets 208

3. Risques à l'échelle de la collectivité et de la région 210
   - 3.1 Populations à risque 212
   - 3.2 Collectivités urbaines et rurales 214
   - 3.3 Collectivités autochtones et nordiques 215
   - 3.4 Localités côtières 216

4. Gérer les risques sanitaires liés aux changements climatiques 217
   - 4.1 Mesures et stratégies d'adaptation visant à protéger la santé 217
   - 4.2 Adaptation du secteur de la santé au Canada 220

5. Conclusions 224

Références 225

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- Depuis 2008, les données démontrent de plus en plus que la large gamme de risques sanitaires, auxquels sont exposés les Canadiens, continue de s'accroître à mesure que le climat change. Par exemple, les maladies liées au climat telles que la maladie de Lyme et les vecteurs progressent en direction du nord au Canada et devraient continuer à gagner du terrain. En outre, de nouvelles études semblent indiquer que les changements climatiques aggraveront les problèmes de pollution atmosphérique dans certaines régions du pays. Une plus grande réduction des émissions de contaminants atmosphériques pourrait cependant compenser les effets des changements climatiques sur les niveaux d'ozone troposphérique et de particules en suspension.
- Les collectivités restent exposées à un certain nombre de dangers naturels liés au climat qui poseront de plus en plus de risques pour la santé. Par exemple, les inondations et les feux de friches survenus récemment ont gravement touché les collectivités en détruisant les infrastructures et en obligeant la population à se déplacer.
- De nombreuses mesures d'adaptation sont mises en œuvre de l'échelle locale à l'échelle nationale afin d'aider les Canadiens à se préparer en vue de faire face aux effets sur la santé des changements climatiques. La planification de l'adaptation doit tenir compte des grandes différences qui existent entre les facteurs qui entraînent des risque sanitaires dans les collectivités urbaines, rurales, côtières et nordiques.
- Les autorités sanitaires locales, territoriales et provinciales se familiarisent de plus en plus avec les changements climatiques et les risques sanitaires au moyen d'évaluations et d'études ciblées. Certaines administrations ont d'ailleurs commencé à inclure les enjeux relatifs aux changements climatiques dans leurs politiques et leurs programmes de santé. L'accent est également mis sur une plus grande sensibilisation du public aux moyens d'atténuer les risques sanitaires liés au climat.
- Combler les principales lacunes sur le plan des connaissances et consolider les efforts d'adaptation permettraient d'atténuer les risques de plus en plus importants qui découlent des changements climatiques et qui menacent tout particulièrement certaines personnes et certaines collectivités. Les mesures et les outils d'adaptation tels que les systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur, les projections relatives à l'expansion des maladies à transmission vectorielle et l'écologisation des milieux urbains, peuvent contribuer à protéger les Canadiens des effets actuels et futurs des changements climatiques.

1. INTRODUCTION

Les changements climatiques posent des risques importants pour la santé et le bien-être des gens, avec les effets des phénomènes météorologiques extrêmes, des dangers naturels, de la qualité de l'air, de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique et des maladies transmises par l'eau, les aliments, les vecteurs et les rongeurs (*voir* le tableau 1; Seguin, 2008; Costello *et al.*, 2009; OMS, 2012b). La vulnérabilité dépend de l'exposition aux risques associés aux changements de temps et de régime climatique, de la sensibilité de certaines populations et de la capacité des personnes et des collectivités à prendre des mesures de protection (Seguin, 2008; OMS, 2012b). Par exemple, certaines populations ou certaines régions, comme les Canadiens qui vivent dans le Nord, sont exposées à des risques sanitaires particuliers découlant d'une forte exposition aux dangers climatiques (Seguin et Berry, 2008). Les canicules exceptionnelles qui ont frappé l'Europe en 2003 et, plus récemment, la Russie en 2010, et qui auraient fait environ 125 000 morts (Robine *et al.*, 2008; Barriopedro *et al.*, 2011) démontrent que les pays qui ne sont pas bien préparés aux événements climatiques peuvent être lourdement touchés. À l'échelle des collectivités, les coûts économiques liés aux changements climatiques devraient augmenter (Stern, 2006; TRNEE, 2011) et ceux découlant des catastrophes d'ordre météorologique au Canada augmentent rapidement depuis déjà plusieurs dizaines d'années (*voir* la figure 2, chapitre 5). Les études canadiennes menées jusqu'à présent démontrent que le Canada est vulnérable aux changements climatiques en raison de leurs effets sur la santé, la société, la population et les conditions climatiques (Lemmen *et al.*, 2008; Seguin et Berry, 2008; Commissaire à l'environnement et au développement durable, 2010).

Au cours des dernières années, des efforts considérables ont été déployés par les responsables gouvernementaux de la santé publique et de la gestion des urgences, ainsi que par des organismes non gouvernementaux, afin de mieux préparer les Canadiens aux répercussions que les changements climatiques auront sur la santé (Berry, 2008; Paterson *et al.*, 2012; Poutiainen *et al.*, 2013). La stratégie d'adaptation en matière de santé est définie dans le présent chapitre comme étant toutes les mesures prises par les responsables du secteur de la santé, ainsi que ceux des secteurs connexes, en vue de comprendre, d'évaluer et de prévenir les effets sur la santé des changements climatiques – notamment sur les collectivités les plus exposées – et se préparer à y faire face. L'adaptation est une stratégie de grande envergure axée sur les risques relatifs aux changements climatiques qui soutient des objectifs plus vastes de durabilité et de résilience, alors que simplement faire face à ces risques se résume essentiellement à atténuer les dommages immédiats causés par un phénomène climatique. Les gestes posés en matière d'adaptation visent à mieux faire connaître les risques sanitaires et l'importance de prendre des mesures d'adaptation, ainsi qu'à fournir de l'information et des outils susceptibles d'aider à gérer les vulnérabilités actuelles et futures (Pajot et Aubin, 2012; Paterson *et al.*, 2012; Poutiainen *et al.*, 2013; OCFP, 2011).

Le présent chapitre présente les conclusions d'études menées récemment (après 2006) et portant sur les effets des changements climatiques sur la santé, sur la mesure dans laquelle les risques sanitaires pourraient s'aggraver si le climat continue à changer et sur les possibilités et les outils d'adaptation dont disposent les responsables gouvernementaux de la santé publique et de la gestion des urgences. Le degré de vulnérabilité à l'échelle régionale est mis en évidence lorsque les données le permettent. Des études de cas sur les répercussions et des initiatives d'adaptation sont également incluses. Les conclusions d'études concernant les facteurs et les circonstances qui accroissent la vulnérabilité de certaines personnes ou de certains groupes sont mises en évidence afin de mieux gérer les obstacles. Dans le présent chapitre, l'analyse s'appuie sur les données du chapitre 2 – *Un aperçu des changements climatiques au Canada*, ainsi que sur les conclusions d'évaluations menées antérieurement par le gouvernement du Canada (Lemmen *et al.*, 2008; Seguin, 2008) portant sur les risques sanitaires (*voir* le tableau 2).

Catégorie de risque sanitaire	Changements potentiels	Effets potentiels ou projetés sur la santé
Températures extrêmes	• Augmentation de la fréquence, de la gravité et de la durée des vagues de chaleur • Réchauffement général, mais conditions plus froides possibles dans certaines régions	• Morbidité et mortalité liées à la chaleur • Troubles respiratoires et cardiovasculaires • Changement dans la répartition des maladies et de la mortalité attribuables au froid
Phénomènes météorologiques extrêmes et dangers naturels	• Augmentation de la fréquence et de la violence des orages, augmentation de la gravité des ouragans, et autres formes de temps violent • Fortes pluies causant des glissements de terrain et des inondations • Élévation du niveau de la mer et instabilité du littoral • Accroissement des sécheresses dans certaines régions, ce qui aura une incidence sur les réserves en eau et la production agricole, et augmentera les risques de feux de friches • Perturbations sociales et économiques	• Décès, blessures et maladies attribuables aux orages violents, aux inondations, etc. • Effets psychologiques, y compris la santé mentale et les maladies liées au stress • Répercussions des pénuries de nourriture et d'eau sur la santé • Maladies liées à la contamination de l'eau potable • Effets du déplacement des populations et de la surpopulation dans les centres d'hébergement d'urgence • Effets indirects sur la santé des changements écologiques, des dommages à l'infrastructure et de l'interruption des services de santé
Qualité de l'air	• Pollution atmosphérique accrue : niveaux élevés d'ozone troposphérique et de particules en suspension, notamment la fumée et les particules produites par les feux de friches • Production accrue de pollens et de spores par les plantes	• Irritation des yeux, du nez et de la gorge, essoufflements • Aggravation des problèmes respiratoires • Asthme et maladie pulmonaire obstructive chronique • Aggravation des allergies • Risque accru de maladies cardiovasculaires (p. ex., crises cardiaques et cardiopathie ischémique) • Décès prématurés
Contamination des aliments et de l'eau	• Contamination accrue de l'eau potable et de l'eau utilisée à des fins récréatives par le ruissellement causé par les fortes pluies • Changements des milieux marins entraînant une prolifération d'algues et une augmentation des niveaux de toxines dans les poissons et les fruits de mer • Changements de comportement attribuables à la hausse des températures (prolongation des activités estivales – grillades, baignade), ce qui entraînera un risque plus élevé de maladies d'origine hydrique ou alimentaire • Pressions économiques accrues sur les consommateurs de produits de subsistance ayant de faibles revenus	• Cas sporadiques et flambées de maladies issues de souches de microorganismes pathogènes d'origine hydrique • Maladies d'origine alimentaire • Autres maladies diarrhéiques et intestinales • Répercussions de la disponibilité d'aliments traditionnels et locaux sur la nutrition
Transmission de maladies infectieuses par des insectes, tiques et rongeurs	• Changement de facteurs biologiques et écologiques propres à divers insectes, tiques et rongeurs vecteurs de maladies (notamment la répartition géographique) • Maturation plus rapide des pathogènes chez les insectes et tiques vecteurs de maladies • Prolongation de la saison de transmission des maladies	• Incidence accrue de maladies infectieuses à transmission vectorielle indigènes du Canada (p. ex., encéphalites équines de l'Est et de l'Ouest, fièvre pourprée des montagnes Rocheuses) • Introduction de nouvelles maladies infectieuses au Canada • Émergence possible de nouvelles maladies et d'autres, éradiquées par le passé au Canada
Appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique	• Appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique par certains gaz qui sont par ailleurs responsables des changements climatiques (p. ex., composés chlorocarbonés et hydrocarbures fluorés) • Changements dans la chimie de l'ozone stratosphérique liés à la température, ce qui retarderait la réparation du trou dans la couche d'ozone • Accroissement de l'exposition aux rayons UV en raison des changements de comportement liés à un climat plus chaud	• Augmentation du nombre de coups de soleil, de cancers de la peau, de cataractes et d'affections oculaires • Troubles divers du système immunitaire

TABLEAU 1 : Principaux enjeux sanitaires liés aux changements climatiques au Canada *(adapté de Seguin, 2008)*.

	Principales conclusions
Risques sanitaires	• Les changements climatiques provoqueront une aggravation des risques sanitaires liés aux phénomènes météorologiques extrêmes et autres événements d'ordre climatique tels que les inondations, les sécheresses, les feux de forêt et les vagues de chaleur • La qualité de l'air, qui constitue déjà un défi de taille en matière de santé publique dans de nombreuses collectivités canadiennes, devrait se détériorer du fait de l'apparition plus fréquente de smog et de feux de friches, de la production de pollen et de rejets plus importants de contaminants atmosphériques en raison des changements de comportement individuel • Les changements climatiques devraient aggraver les risques relatifs à certaines maladies infectieuses dans l'ensemble du pays, et pourraient entraîner l'apparition de maladies actuellement considérées comme rares ou exotiques au Canada • On s'attend à ce qu'en raison des changements climatiques, on enregistre plus souvent des niveaux élevés ou extrêmes de rayonnement ultraviolet, y compris dans le Grand Nord
Degré de vulnérabilité à l'échelle régionale	• L'effet des changements climatiques variera d'une région à l'autre. Par exemple, on enregistre généralement des températures plus élevées et des niveaux plus élevés de pollution atmosphérique dans les villes que dans les régions rurales • Les collectivités nordiques, qui font déjà état d'une dégradation de l'environnement et de risques connexes pour la santé et le bien-être (p. ex., l'altération des aliments, les coups de soleil, les déplacements dangereux) liés aux changements climatiques, prennent de nombreuses mesures d'adaptation • Les régions côtières peuvent être touchées par l'élévation du niveau de la mer causée par les changements climatiques, ce qui peut accroître les risques d'inondations attribuables aux ondes de tempête dans ces régions
Capacité d'adaptation	• Les effets combinés des tendances prévues en matière de santé, de démographie et de climat au Canada, ainsi que les changements liés aux conditions sociales et à l'infrastructure, pourraient accroître la vulnérabilité des Canadiens à l'égard des futurs risques sanitaires liés au climat si des stratégies d'adaptation efficaces ne sont pas mises en place • L'efficacité des mesures d'adaptation actuellement mises en place en vue d'atténuer les risques sanitaires de la variabilité du climat soulève des inquiétudes. En effet, les lacunes en matière de santé publique et de gestion des urgences qui ne sont pas corrigées réduiront la capacité de planification et de réaction du Canada à l'égard des changements climatiques • Bien que des mesures soient actuellement mises en place pour faire face aux effets sur la santé des changements climatiques, il existe certains obstacles à l'adaptation, notamment la méconnaissance des risques sanitaires, l'accès inégal aux mesures de protection, le manque de sensibilisation aux meilleures pratiques d'adaptation visant à protéger la santé et les défis relatifs à la mise en œuvre de nouvelles mesures d'adaptation
Besoins futurs	• Il est nécessaire de mettre davantage l'accent sur l'adaptation pour réduire les risques sanitaires. Les mesures devraient être conçues de manière à répondre aux besoins des Canadiens les plus à risque, soit les personnes âgées, les enfants et les bébés, les personnes défavorisées sur le plan social et les malades chroniques • Le secteur de la santé doit poursuivre ses efforts en vue de protéger la santé des effets des changements climatiques, incorporer les renseignements sur les changements climatiques et faire participer les autres secteurs à la planification de futurs programmes • Des évaluations des risques sanitaires doivent être menées à l'échelle régionale et communautaire dans le but de soutenir l'adaptation au moyen d'une atténuation préventive des risques • La recherche pluridisciplinaire et la collaboration entre les différents ordres de gouvernement peuvent favoriser l'acquisition de connaissances fondamentales sur la vulnérabilité aux changements climatiques et ainsi combler les lacunes en matière d'adaptation

TABLEAU 2 : Récapitulatif des risques sanitaires et du degré de vulnérabilité des Canadiens à l'égard des changements climatiques *(sources : Lemmen et al., 2008; Seguin et Berry, 2008).*

2. APERÇU DES PRINCIPAUX RISQUES SANITAIRES LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Depuis la publication d'évaluations antérieures menées par le gouvernement du Canada (Lemmen *et al.*, 2008; Seguin, 2008), des preuves plus solides sont venues étayer le fait que toute une gamme de répercussions d'ordre climatique menace la santé publique au Canada. Les sections suivantes s'appuient sur les récentes conclusions d'études issues de publications évaluées par un comité de pairs, ainsi que de rapports techniques et gouvernementaux.

2.1 QUALITÉ DE L'AIR

L'incidence directe et indirecte du climat sur la qualité de l'air au Canada est considérable et n'est plus à démontrer (McMichael *et al.*, 2006; Lamy et Bouchet, 2008; IOM, 2011; Union of Concerned Scientists, 2011). De récentes études confirment que les changements climatiques exacerberont les risques sanitaires existants liés à la mauvaise qualité de l'air en raison de l'accroissement des polluants atmosphériques (p. ex., l'O_3 et les particules en suspension; Frumkin *et al.*, 2008; Bambrick *et al.*, 2011), des aéroallergènes, des pathogènes et des contaminants biologiques (Greer et Fisman, 2008; Schenck *et al.*, 2010) causée par la chaleur et d'autres facteurs météorologiques. Les changements climatiques peuvent également altérer la qualité de l'air en raison du rôle qu'ils jouent dans la multiplication des feux de friches (*voir* la section 2.4.3), tandis que la qualité de l'air intérieur peut être perturbée par des conditions climatiques extrêmes et les efforts entrepris en vue de réduire l'empreinte carbone des bâtiments.

2.1.1 TENDANCES EN MATIÈRE DE POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES AU CANADA

La pollution atmosphérique pose des risques importants pour la santé des Canadiens (*voir* l'encadré 1). Si la qualité de l'air que respirent les Canadiens s'est améliorée depuis le début de la surveillance dans les années 1970 (Environnement Canada, 2013b), la concentration de certains polluants atmosphériques présentant un risque pour la santé s'accroît et varie selon les régions. Les niveaux moyens d'ozone troposphérique (O_3) ont augmenté de 10 % entre 1990 et 2010 (Environnement Canada, 2012a), bien que les niveaux records d'O_3 soient moins élevés (Santé Canada, 2012e). Si le climat constitue un facteur important dans la formation des polluants atmosphériques (p. ex., l'ozone) susceptibles de nuire à la santé (GIEC, 2007), on ne sait cependant pas exactement dans quelle mesure les niveaux de concentration de polluants atmosphériques au Canada sont attribuables aux changements climatiques. Les concentrations ambiantes de particules fines ($MP_{2,5}$) n'indiquaient pas de tendance nationale importante au Canada entre 2000 et 2010. En raison de leur proximité à d'importants points d'émission, certaines zones urbaines enregistrent de fortes concentrations ambiantes de $MP_{2,5}$ (Environnement Canada, 2012b). Le chauffage résidentiel au bois au Canada peut en outre contribuer à aggraver la pollution aux $MP_{2,5}$ à l'échelle locale (Larson *et al.*, 2007; Smargiassi *et al.*, 2012).

ENCADRÉ 1

EFFETS SUR LA SANTÉ LIÉS À L'OZONE TROPOSPHÉRIQUE (O_3) ET AUX PARTICULES EN SUSPENSION (MP)

Selon l'Association médicale canadienne (AMC), la pollution atmosphérique aurait causé 21 000 décès au Canada en 2008 (AMC, 2008). L'exposition à l'O_3 entraînerait une mortalité précoce (notamment en cas d'exposition grave), ainsi qu'une série d'effets d'ordre morbide. Les preuves attestent en particulier l'incidence de l'O_3 sur la fonction pulmonaire, les symptômes respiratoires, l'inflammation pulmonaire et les défenses immunitaires (Gouvernement du Canada, 2012). Il existe d'importantes corrélations entre l'exposition à court terme à l'ozone et les visites à l'hôpital et les consultations d'urgence en raison de problèmes respiratoires (en particulier en ce qui concerne l'asthme), ainsi que la mortalité prématurée (Gouvernement du Canada, 2012). De récentes preuves démontrent de plus en plus le lien entre l'ozone et certains effets cardiaques, les troubles respiratoires à long terme et la mortalité en cas d'exposition chronique (Gauderman *et al.*, 2004; Islam *et al.*, 2009; Jerrett *et al.*, 2009; Salam *et al.*, 2009; Zanobetti et Schwartz, 2011).

Les particules en suspension présentent également un risque grave pour la santé des Canadiens. Les particules sont généralement grossières ($MP_{10-2,5}$), fines ($MP_{2,5}$) ou ultrafines ($MP_{0,1}$). Les particules fines peuvent soit être le résultat de réactions avec d'autres polluants atmosphériques, soit être émises directement par les voitures, les industries, les feux de forêt, la combustion du bois de chauffage et l'incinération des déchets (Environnement Canada, 2012b). De récentes données épidémiologiques sont venues confirmer l'effet néfaste des MP, particulièrement des particules fines. Les études ont notamment confirmé la létalité de l'exposition à long terme aux MP, ainsi que l'existence d'un lien entre les troubles cardiaques et l'exposition aiguë ou chronique. Il existe en outre une forte corrélation entre les MP fines et les décès liés au cancer du poumon (Krewski *et al.*, 2005). La recherche semble indiquer que le rapport entre les MP et la morbidité se traduit par toute une série d'effets néfastes, notamment les mesures de restriction des activités, les symptômes respiratoires, les bronchites (aiguës ou chroniques), l'exacerbation de l'asthme, ainsi que les effets respiratoires et cardiaques, qui peuvent entraîner un nombre accru de consultations auprès des services d'urgence, d'admissions à l'hôpital et de décès prématurés (Gouvernement du Canada, 2012).

Certains groupes de population, notamment les enfants (asthmatiques ou non), les personnes âgées (notamment celles souffrant de troubles respiratoires ou cardiaques préexistants), les personnes ayant développé une hyperréactivité aux irritants respiratoires et celles qui font plus d'activités de plein air, sont particulièrement sujets aux effets néfastes de l'exposition aux MP et à l'O_3. Il est possible que les seuils d'effet à l'échelle des populations n'existent pas ou qu'ils n'existent qu'à de très faibles concentrations (Gouvernement du Canada, 2012).

2.1.2 PROJECTIONS EN MATIÈRE DE POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Si on ignore encore la pleine portée des répercussions possibles des changements climatiques sur la qualité de l'air au Canada, la modélisation à l'échelle régionale des changements climatiques et de la qualité de l'air a cependant considérablement évolué depuis la parution des premières études sur le sujet il y a une dizaine d'années. Les simulations tiennent désormais mieux compte de la variabilité interannuelle en ce qui a trait aux conditions météorologiques et prennent en considération l'ozone et les particules (p. ex., Tagaris *et al.*, 2007). Les simulations de dix saisons estivales effectuées par Kelly et ses collaborateurs (2012) à partir des données sur la qualité actuelle (environ 2000) et future (environ 2045) de l'air en Amérique du Nord indiquent que les concentrations en O_3 devraient grimper jusqu'à 9 ou 10 parties par milliard en volume (ppbv), du moment que le niveau d'émissions de polluants atmosphériques d'origine anthropique reste constant (*voir* la figure 1a, b). Les changements au Canada sont de manière générale moins importants que ceux enregistrés aux États-Unis, et les concentrations devraient augmenter de 4 à 5 ppbv dans le sud de l'Ontario, et de 1 à 2 ppbv dans plusieurs autres régions du pays. En revanche, si les émissions de polluants atmosphériques d'origine anthropique sont réduites, les concentrations d'O_3 pourraient diminuer de 5 à 15 ppbv dans une grande partie du Canada et des États-Unis, et ce, en dépit des répercussions des changements climatiques (*voir* la figure 1c).

Ces simulations prévoient des hausses de $MP_{2,5}$ de moindre ampleur (< 0,2 µg m^{-3}) dans la majeure partie de l'Amérique du Nord (*voir* la figure 2a et b). Les hausses importantes (> 1,0 µg m^{-3}) prévues au-dessus de la baie d'Hudson résulteront d'une augmentation des émissions d'aérosols naturels (sels marins), une conséquence du recul de la couverture de glace de mer combinée à une intensification des vents régionaux. Si on s'attend à ce que les $MP_{2,5}$ augmentent de manière générale avec les changements climatiques dans la plupart des villes, elles devraient cependant enregistrer une baisse si les effets des changements climatiques sont contrebalancés par d'éventuelles réductions des émissions d'origine anthropique (*voir* la figure 2c) (Kelly *et al.*, 2012).

Ces résultats semblent indiquer que si les changements climatiques ont une incidence négative sur la qualité de l'air, cette incidence peut cependant être atténuée par la réduction du niveau d'émissions de polluants atmosphériques. La réduction des polluants atmosphériques contribuera à réduire les épisodes graves relatifs à la qualité de l'air, les retombées acidifiantes et les dépôts d'ozone, et à atténuer leurs effets (p. ex., taux de mortalité, dommages causés aux immeubles et aux récoltes, etc.; Kelly *et al.*, 2012). Certains des coûts relatifs aux mesures de réduction des gaz à effet de serre (GES) peuvent être compensés lorsque ces mesures ont pour corollaire de réduire les émissions de polluants atmosphériques (Kelly *et al.*, 2012).

On peut s'attendre à ce que les changements à l'échelle mondiale, notamment le déplacement des polluants d'un continent à l'autre et la modification des caractéristiques des feux de friches, aient des répercussions sur la qualité de l'air au Canada. Ce point n'a toutefois pas été abordé dans le cadre de l'étude menée par Kelly et ses collaborateurs. Dans le cadre d'une étude régionale, on a effectué des projections en matière de pollution atmosphérique et d'épisodes de chaleur extrême, selon différents scénarios de changements climatiques, dans quatre villes du Canada, à savoir : Toronto, Calgary, Montréal et Vancouver. Les résultats ont révélé une hausse des concentrations d'O_3 attribuable au réchauffement, ce qui semble indiquer que les changements climatiques accroîtraient les risques sanitaires dans ces villes (TRNEE, 2011). L'utilisation accrue de biocarburants peut également avoir une incidence sur la santé (p. ex., maladies respiratoires ou cardiovasculaires et cancers), quoiqu'une récente étude ait laissé entendre que l'utilisation d'E10 (un mélange d'essence contenant 10 % d'éthanol) et de faibles mélanges de biodiesel n'aurait qu'un impact différentiel minime sur la santé des Canadiens (Santé Canada, 2013a, b).

Le carbone noir, qui est un composant des particules fines formé par la combustion incomplète de combustibles fossiles, de biocarburants et de biomasse, a été reconnu comme une cause de mortalité prématurée et de morbidité. Les gaz d'échappement (qui contiennent du carbone noir) des moteurs Diesel sont maintenant reconnus comme étant un cancérogène pour l'homme (OMS, 2012a). Le carbone noir est un agent de forçage climatique à courte durée de vie, dont la capacité de rétention de la chaleur est un million de fois supérieure à celle du dioxyde de carbone (Schmidt, 2011). Cet agent polluant, qui peut parcourir de grandes distances grâce aux courants aériens, accélère la fonte des glaces et de la neige dans les régions nordiques où il se dépose (Schmidt, 2011) et soulève des inquiétudes concernant la santé et la sécurité des collectivités des Premières Nations et des Inuits. Des études récentes ont traité des bienfaits potentiels et de l'incidence positive sur la santé qu'aurait l'atténuation des GES découlant des efforts déployés pour réduire les émissions de carbone noir (Anenberg *et al.*, 2012; US EPA, 2012; Shindell *et al.*, 2013).

2.1.3 AÉROALLERGÈNES ET PATHOGÈNES HUMAINS

Les aéroallergènes tels que le pollen des arbres, des graminées ou des herbes, les moisissures (intérieures et extérieures) et les acariens détriticoles, sont des substances présentes dans l'air qui peuvent déclencher une réaction allergique chez les personnes sensibles lorsqu'elles sont inhalées. On attribue à la formation accrue d'aéroallergènes l'exacerbation de maladies respiratoires (Frumkin *et al.*, 2008) telles que l'asthme ou encore la maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC), ce qui a pour conséquence d'accroître le nombre d'admissions à l'hôpital (Hess *et al.*, 2009).

Les répercussions prévues des changements climatiques sur les aéroallergènes devraient se traduire par le déclenchement hâtif de la saison du pollen dans les zones tempérées, augmentant ainsi la quantité de pollen produite, ainsi que l'allergénicité et la gravité de la réaction allergique (US EPA, 2008 *cité dans* Ziska *et al.*, 2009; Rosenzweig *et al.*, 2011; Ziska *et al.*, 2011). En Amérique du Nord, la saison de l'herbe à poux est de plus en plus longue, un phénomène courant dans les latitudes septentrionales. Cette espèce, envahissante dans les zones très peuplées du Canada, est à l'origine de rhinites allergiques saisonnières dans le nord-est de l'Amérique du Nord; il s'agit d'ailleurs de l'agent responsable d'environ 75 % des symptômes allergiques saisonniers (Ziska *et al.*, 2011). De 1995 à 2009, la saison de l'herbe à poux a été prolongée de 27 jours à Saskatoon et de 25 jours à Winnipeg (Ziska *et al.*, 2011).

Au Canada, la hausse des températures et les conditions plus sèches attribuables aux changements climatiques pourraient favoriser l'apparition de pathogènes fongiques à certains endroits (Greer *et al.*, 2008). Par exemple, le *Cryptococcus gattii*, un pathogène

O_3

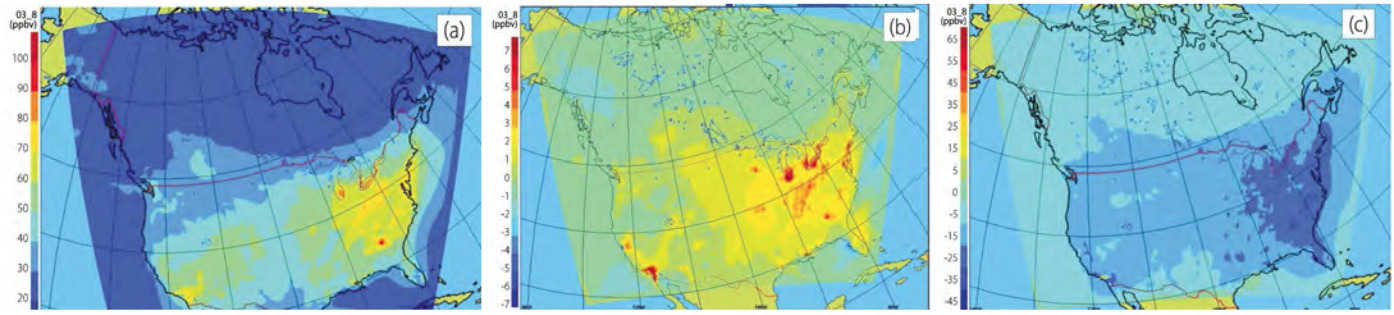


FIGURE 1 : a) La moyenne sur dix ans de la concentration moyenne quotidienne maximale « actuelle » d'O_3 sur huit heures durant la période estivale (juin, juillet, août); **b)** les changements projetés de la concentration moyenne quotidienne maximale d'O_3 sur huit heures durant la période estivale entre la situation « actuelle » et la situation « future », en fonction de modèles de changements climatiques basés sur des niveaux constants d'émissions de polluants atmosphériques; et **c)** la situation « actuelle » et la situation « future », compte tenu d'éventuelles diminutions des émissions de polluants atmosphériques *(source : Kelly et al., 2012)*. Il convient de remarquer que chaque panneau présente différentes équidistances entre les courbes.

$PM_{2,5}$

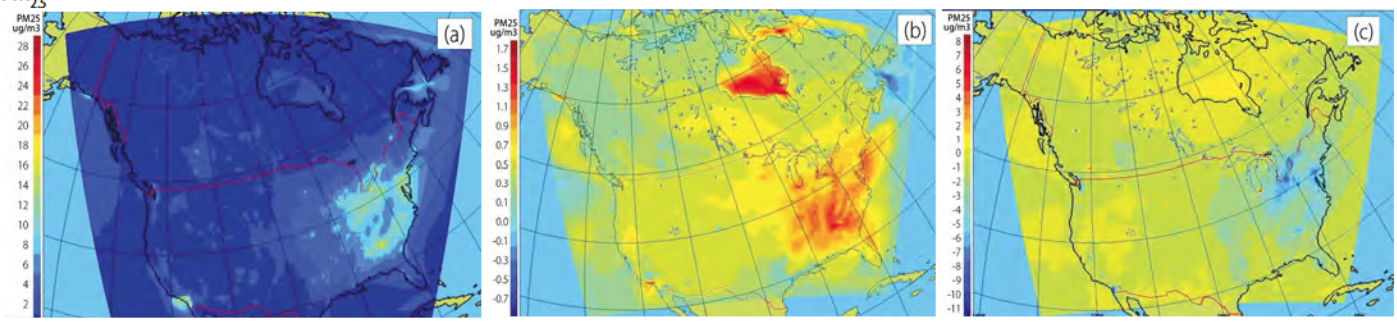


FIGURE 2 : a) La moyenne sur dix ans de la concentration moyenne quotidienne maximale « actuelle » de $MP_{2,5}$ sur 24 heures durant la période estivale (juin, juillet, août); **b)** les changements projetés de la concentration moyenne de $MP_{2,5}$ sur 24 heures durant la période estivale attribuables aux changements climatiques, en fonction de niveaux constants d'émissions de polluants atmosphériques; et **c)** les changements de la concentration de $MP_{2,5}$ projetés dans l'avenir, en tenant compte des effets climatiques et des éventuelles diminutions des émissions de polluants atmosphériques *(source : Kelly et al., 2012)*. Il convient de remarquer que chaque panneau présente différentes équidistances entre les courbes.

fongique que l'on trouve généralement dans des régions tropicales et subtropicales, a été découvert sur l'île de Vancouver en 1999 et prolifère depuis sur la partie continentale de la Colombie-Britannique. Sa prévalence peut être attribuée aux étés plus chauds et plus secs qu'a connus l'Ouest canadien (Kidd *et al.*, 2007; BC CDC, 2012). Les populations sensibles qui ont été exposées à ce champignon peuvent contracter une maladie cryptococcale (cryptococcose), laquelle peut avoir de graves conséquences et notamment dégénérer en pneumonie ou en méningite (BC CDC, 2012).

2.1.4 QUALITÉ DE L'AIR AMBIANT

Les efforts menés pour réduire l'empreinte écologique des immeubles ou pour faire face aux effets des changements climatiques peuvent avoir des répercussions inattendues sur la santé. La modification de la conception des bâtiments (résidentiels ou commerciaux), ainsi que des méthodes et des matériaux de construction, en vue de favoriser l'économie d'énergie peut avoir une incidence sur la santé, du fait de la détérioration de l'air à l'intérieur (IOM, 2011). Par exemple, certaines mesures destinées à protéger les immeubles des intempéries peuvent nuire à la circulation de l'air et à la ventilation et ainsi retenir les agents polluants venus de l'extérieur (p. ex., particules en suspension et composés organiques volatils [COV]) ou émis à l'intérieur (p. ex., fumée de tabac, radon, divers produits chimiques contenus dans les matériaux de construction, etc.; Potera, 2011).

Une hausse de la fréquence des épisodes de précipitations intenses (*voir* le chapitre 2) pourrait également présenter un risque pour la santé à l'intérieur des immeubles pour les Canadiens. La moisissure causée par l'infiltration de l'eau de pluie ou des inondations, les systèmes de ventilation et de climatisation mal conçus et le manque d'entretien des bâtiments peut favoriser la prolifération de contaminants biologiques tels que les bactéries fongiques et infectieuses, qui peuvent avoir des répercussions sur la santé (p. ex., maladies respiratoires; Değer *et al.*, 2010; Schenck *et al.*, 2010; Potera, 2011). L'humidité dans les bâtiments peut accroître les émissions de COV et de composés organiques semi-volatiles (COSV) provenant des matériaux de construction ou de produits susceptibles d'augmenter les risques d'asthme et d'allergies (Tuomainen *et al.*, 2004; Jaakola et Knight, 2008). La prise de mesures correctives inadéquates ou inadaptées en cas de catastrophe peut également nuire à la qualité de l'air intérieur (Chew *et al.*, 2006).

En outre, les pannes d'électricité provoquées par des phénomènes météorologiques extrêmes (p. ex., tempêtes de verglas) incitent les gens à utiliser des générateurs à essence ou des générateurs électriques portatifs (qui émettent du monoxyde de carbone), des chaudières à mazout ou à gaz, des foyers ou des bougies. Lorsqu'ils ne sont pas utilisés correctement, ces appareils constituent un risque d'incendie et peuvent provoquer d'importants rejets de polluants atmosphériques à l'intérieur, une hausse de la toxicité et des taux d'hospitalisation, voire la mort. Par exemple, les tempêtes de verglas dans l'Est canadien en 1998 ont causé la mort de 28 personnes, qui ont pour la plupart été victimes d'intoxication oxycarbonée (Berry *et al.*, 2008b).

2.2 QUALITÉ DES ALIMENTS ET DE L'EAU

2.2.1 MALADIES D'ORIGINE ALIMENTAIRE ET SÉCURITÉ DES ALIMENTS

Bien que des systèmes de surveillance soient en place pour cibler les maladies d'origine alimentaire et réduire le risque qu'elles représentent au sein des collectivités, il n'en demeure pas moins qu'un grand nombre de cas ne sont pas signalés. On estime à environ 4 millions le nombre de cas de maladies bactériennes d'origine alimentaire survenant chaque année au Canada (Thomas *et al.*, 2013). Chaque été, les maladies d'origine alimentaire signalées atteignent un sommet au pays (Isaacs *et al.*, 1998), en raison notamment des taux de réplication plus importants et d'une plus grande persistance des pathogènes en période de températures élevées, ainsi que du facteur saisonnier dans les habitudes alimentaires (les bactéries ayant plus de chance de survivre à la cuisson ou de produire des toxines nocives dans le cadre d'un barbecue ou d'un pique-nique).

Au Canada, les cas de salmonellose chez l'homme ont été associés à la hausse des températures et on a observé une augmentation des cas de maladies gastro-intestinales aiguës (MGA) lorsque les niveaux de précipitation sont élevés ou très bas, notamment pendant l'été et l'automne (Febriani *et al.*, 2010; Ravel *et al.*, 2010). Dans le cadre d'une étude visant à évaluer l'incidence de la température sur les maladies d'origine alimentaire au Royaume-Uni de 1981 à 2006 (Lake *et al.*, 2009), on a établi que les infections d'origine alimentaire sont toujours liées à la température, mais on a observé une importante baisse au fil du temps de la corrélation température-maladies d'origine alimentaire, possiblement du fait du renforcement des mesures en matière de salubrité alimentaire. Le réchauffement attribuable aux changements climatiques peut également avoir une incidence sur d'autres pathogènes et entraîner des éclosions plus importantes de maladies d'origine alimentaire tel le botulisme dans les collectivités de l'Arctique (Parkinson et Evengard, 2009).

Parmi les rares études qui traitent des répercussions des changements climatiques sur la sécurité alimentaire et de leurs effets corollaires sur la santé au Canada, la plupart sont axées sur l'Arctique canadien (Lemmen *et al.*, 2008; Seguin, 2008). Les changements et la variabilité climatiques (p. ex., les inondations, la sécheresse, le degré de température) peuvent avoir une incidence sur l'agriculture et les pêches au Canada (*voir* le chapitre 4 – *Production alimentaire*). En outre, la quasi-totalité des Canadiens consomme des compléments alimentaires importés. Les changements climatiques pourraient avoir des répercussions sur la disponibilité de certains aliments, contribuer à une augmentation des coûts et rendre certains produits moins accessibles aux personnes disposant de faibles revenus ou habitant dans des collectivités isolées (Meakin et Kurvits, 2009).

2.2.2 MALADIES D'ORIGINE HYDRIQUE ET SÉCURITÉ DE L'EAU

Les maladies d'origine hydrique résultent de l'exposition aux produits chimiques ou aux microbes présents dans les réserves d'eau potable contaminées, dans l'eau utilisée à des fins récréatives ou encore dans les aliments. Bien que le Canada ait formulé des recommandations visant à protéger la qualité de l'eau ainsi que l'eau potable, il y a toujours un risque de contamination pouvant causer des maladies (Santé Canada, 2012b). Les petits réseaux d'alimentation en eau potable peuvent être plus vulnérables aux changements climatiques, en raison des limitations relatives à des questions d'infrastructure et de finance, de technologie et de formation (Moffatt et Struck, 2011; Brettle *et al.*, 2013). Une étude publiée récemment par les responsables des services d'eau canadiens a démontré que plus de la moitié des répondants ne tenaient pas compte des défis en matière d'eau potable posés par les changements climatiques et n'avaient pas de plan pour s'adapter à leurs futures répercussions (ACEPU, 2012).

Au Canada, les éclosions de maladies d'origine hydrique sont liées aux événements météorologiques, notamment aux fortes précipitations et aux sécheresses, ainsi qu'à la hausse des températures (Thomas *et al.*, 2006; Seguin, 2008; Moffatt et Struck, 2011). Un fort épisode de pluie deux à quatre semaines avant l'apparition d'une maladie aurait contribué à accroître le nombre de consultations pour des troubles gastro-intestinaux dans deux collectivités inuites du Nunatsiavut, au Canada (Harper *et al.*, 2011). Si la plupart des recherches se concentrent sur l'effet qu'a le climat sur la contamination microbiologique, les changements climatiques pourraient toutefois aussi jouer un rôle dans le processus de contamination chimique. Les inondations, les tempêtes et les précipitations peuvent transporter des contaminants chimiques tels que des pesticides, des nutriments, des métaux lourds et des polluants organiques persistants dans les nappes d'eau (Hilscherova *et al.*, 2007; Harmon et Wyatt, 2008; Noyes *et al.*, 2009). Les concentrations de pesticides dans les réserves d'eau augmentent en fonction de l'intensité des orages, notamment en conséquence du ruissellement et des inondations qui en résultent (Chiovarou et Siewicki, 2007). C'est pourquoi la fréquence et l'intensité plus élevées des orages, les précipitations plus importantes et les inondations accrues liées aux changements climatiques peuvent accroître la contamination chimique des nappes d'eau et des bassins versants.

Les changements climatiques pourraient favoriser la prolifération au Canada des cyanobactéries, également connues sous le nom d'algues bleu-vert (Barbeau *et al.*, 2009; DesJarlais et Blondlot, 2010). Les cyanobactéries peuvent donner à l'eau un goût et une odeur désagréables, produire diverses toxines (cyanotoxines) qui altèrent la couleur de l'eau destinée à la consommation ou utilisée à des fins récréatives, et contaminent les poissons et les fruits de mer. Certaines cyanotoxines peuvent nuire à la santé de la population et des animaux en cas d'ingestion d'eau contaminée ou de leur inhalation lorsqu'elles sont présentes dans l'air. Dans d'autres cas, le contact avec les cellules algaires peut entraîner des réactions cutanées de type allergique (Santé Canada, 2000). Des proliférations d'algues bleu-vert ont été signalées dans toutes les provinces du Canada,

ainsi qu'au Yukon (Orihel *et al.*, 2012). Le foisonnement de cyanobactéries et d'algues bleu-vert filamenteuses a augmenté en Ontario au cours des 15 dernières années (Winter *et al.*, 2011). À l'échelle mondiale, ces proliférations algales accrues sont en grande partie attribuables à l'enrichissement en matières nutritives et à la hausse des températures (Heisler *et al.*, 2008; Paerl et Huisman, 2008). Des stratégies de gestion de l'eau ont été mises en place pour réduire les foisonnements néfastes de cyanobactéries et consistent notamment à réduire l'apport en nutriments dans les sources d'eau (Paerl et Huisman, 2009), ainsi qu'à faire appel à des processus tels que l'adsorption sur charbon actif en poudre, ou à des processus d'oxydation susceptibles de permettre le traitement efficace de l'eau potable (Barbeau *et al.*, 2009).

2.3 ZOONOSES ET MALADIES À TRANSMISSION VECTORIELLE (MTV)

Les changements climatiques peuvent accroître les risques sanitaires que posent les zoonoses (maladies transmises de l'animal à l'homme) et les maladies à transmission vectorielle (MTV – qui sont transmises de l'homme à l'homme ou bien de l'animal à l'homme par des arthropodes). Parmi les quatre principaux effets susceptibles d'accroître les risques sanitaires et pouvant survenir de manière isolée ou bien simultanée figurent : i) la modification de l'empreinte géographique de l'occurrence des cycles de transmission; ii) la modification de l'abondance des pathogènes et des vecteurs là où les cycles de transmission de MTV et de zoonoses sont déjà en place; iii) la modification de la sélection naturelle des pathogènes, ce qui pourrait avoir un effet sur leur transmissibilité à l'homme et leur capacité à causer des maladies; et iv) la modification des activités humaines qui change la fréquence à laquelle les gens sont exposés aux zoonoses et aux MTV (Ogden *et al.*, 2010).

Il existe quelques rares évaluations quantitatives des risques actuels et futurs que présentent les zoonoses et les MTV au Canada. En 2007, la maladie de Lyme (*voir* l'encadré 2) était en grande partie considérée comme un possible risque futur. Cependant, les cartes élaborées par Ogden *et al.* (2008a; *voir* la figure 3) qui mettent en évidence les risques actuels et les projections concernant la maladie de Lyme, en fonction de la répartition géographique des tiques vectrices *Ixodes scapularis* (ou tiques aux pattes noires), ont maintenant été validées sur le terrain. Selon ces études de validation (Ogden *et al.*, 2010; Bouchard *et al.*, 2011; Koffi *et al.*, 2012 ; Agence de la santé publique du Canada, 2014), on assiste à l'émergence du risque que représente la maladie de Lyme dans l'environnement canadien, avec une incidence annuelle qui est passée d'environ 30 cas par an à 315 en 2012.

Les données de surveillance révèlent que les vecteurs de la maladie de Lyme (qui constituent des facteurs de risque) gagnent entre 35 et 55 km chaque année au Canada et suivent des trajectoires géographiques déterminées par le climat (Leighton *et al.*, 2012), ce qui ne fait que valider l'hypothèse avancée par les cartes des risques (*voir* la figure 4).

Dans le cadre d'études similaires, on a évalué le risque de propagation du virus du Nil occidental (VNO) en fonction des changements climatiques au Canada (Hongoh *et al.*, 2012), le

ENCADRÉ 2

SYMPTÔMES DE LA MALADIE DE LYME

(source : Agence de la santé publique du Canada, 2013a)

La maladie de Lyme est une maladie grave qui se manifeste généralement par une éruption cutanée caractéristique à l'endroit de la morsure de la tique. La maladie peut être traitée à l'aide d'antibiotiques. Si elle n'est pas rapidement traitée, elle peut dégénérer en maladie de Lyme disséminée, dont les symptômes sont la faiblesse, de multiples éruptions cutanées, des courbatures, des articulations enflées ou douloureuses, un rythme cardiaque anormal, des troubles du système nerveux central et périphérique pouvant aller jusqu'à la paralysie, et une extrême fatigue.

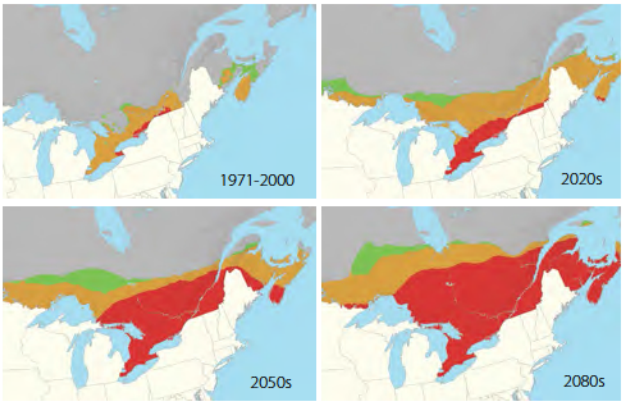


FIGURE 3 : Cartes des risques relatifs à l'implantation et la propagation du vecteur de la maladie de Lyme (*Ixodes scapularis*) dans le contexte climatique de 1971 à 2000 et dans un contexte projeté, soit de 2020 à 2080 d'après Ogden *et al.*, 2008a. La zone verte indique l'étendue principale des lieux où *I. scapularis* peuvent s'établir. La zone orange et la zone rouge indiquent les zones à risque plus élevé pour l'émergence de la population *I. scapularis*. La zone grise indique les zones où le risque d'émergence de la population *I. scapularis* est très faible *(source : Ogden et al., 2008a)*.

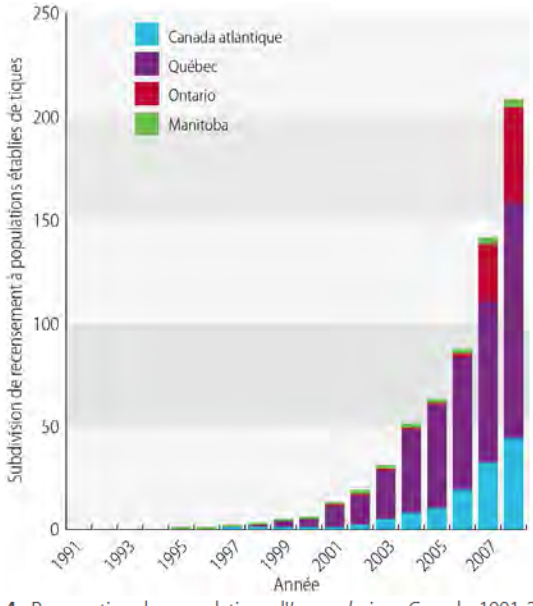


FIGURE 4 : Propagation des populations d'*I. scapularis* au Canada, 1991-2007 *(reproduit avec la permission de Leighton et al., 2012).*

risque présenté par la maladie de Lyme en Colombie-Britannique (Mak *et al.*, 2010), l'expansion de la tularémie et le risque présenté par la peste au Canada, ainsi que la propagation de maladies à partir des États-Unis (Nakazawa *et al.*, 2007). Des approches plus qualitatives ont été adoptées afin d'évaluer la mutation du risque émanant des MTV zoonotiques provoquées par des virus (arbovirus), en raison des changements climatiques et d'autres modifications de l'environnement. Hongoh et ses collaborateurs (2009) ont par exemple prédit un risque d'expansion vers le nord des MTV zoonotiques – qui passeraient ainsi des États-Unis, leur habitat actuel, au Canada – ainsi qu'une propagation vers le nord des arbovirus d'ores et déjà endémiques, à mesure que le climat continue d'évoluer. La récente propagation du virus de l'encéphalite équine de l'Est (VEEE) au Canada pourrait constituer une preuve de cette expansion (données inédites de L.R. Lindsay). À l'instar du VNO, cet arbovirus transmis par le moustique se sert des oiseaux à titre de réservoir hôte et s'est propagé des États-Unis vers la Nouvelle-Écosse, le Québec et l'Ontario au cours des dernières années. S'il a causé la mort de nombreux chevaux et émeus, aucun cas humain n'a été signalé jusqu'à présent.

Les risques relatifs aux autres maladies causées par la tique aux pattes noires (anaplasmose humaine causée par *l'Anaplasma phagocytophilum*, babésiose humaine causée par le *Babesia microti*) commencent également à faire leur apparition au Canada (Cockwill *et al.*, 2009; données inédites de L.R. Lindsay). Ces maladies ne faisant pas l'objet d'une surveillance nationale, on ne sait pas exactement si l'aggravation du risque environnemental donne lieu à une hausse du nombre de cas au sein de la population.

2.3.1 ZOONOSES CONTRACTÉES AU CONTACT DE LA FAUNE SAUVAGE

On ne compte qu'un nombre limité d'études menées récemment sur l'apparition de zoonoses contractées au contact de la faune sauvage et attribuables aux changements climatiques dans le sud du Canada (p. ex., Wobeser *et al.*, 2009; Jardine *et al.*, 2011). Les études ciblant certains aspects de l'écologie des zoonoses, comme la dispersion de la maladie de Lyme (Ogden *et al.*, 2008b, 2011), le risque relatif à l'hantavirus (Safronetz *et al.*, 2008) et celui lié au *Toxoplasma gondii* (Simon *et al.*, 2011), ont fourni des données qui permettront, ou ont déjà permis, d'évaluer les effets des changements climatiques sur le risque que présentent les zoonoses. L'accent a davantage été mis sur l'analyse du risque que présentent les zoonoses dans le nord du Canada dans le cadre d'études sur la faune sauvage (Simon *et al.*, 2011), sur les animaux domestiques (Salb *et al.*, 2008; Himsworth *et al.*, 2010a, b) et sur les humains (Messier *et al.*, 2009; Gilbert *et al.*, 2010; Campagna *et al.*, 2011; Sampasa-Kanyinga *et al.*, 2012). Ces études, qui présentent les zoonoses comme un problème de santé publique dans le nord, fournissent des évaluations qualitatives sur l'incidence que pourraient avoir les changements climatiques sur ces maladies. Ce que nous savons de l'écologie de ces maladies ne nous permet cependant pas de prédire en toute certitude la mesure de cette incidence sur les risques qui pèsent sur les populations des collectivités nordiques (Jenkins *et al.*, 2011). De récentes études ont également démontré que les maladies contractées par la faune sauvage, qui sont considérées comme endémiques au Canada, notamment les arbovirus tels que le virus Snowshoe hare, peuvent être pathogènes pour l'homme et tendent à être sensibles aux changements climatiques. Elles pourraient donc poser à l'avenir un risque considérable pour la santé publique, pour ce qui est du nombre de cas et de leur gravité (Meier-Stephenson *et al.*, 2007).

2.3.2 ZOONOSES EXOTIQUES ET MALADIES À TRANSMISSION VECTORIELLE

Certaines études ont commencé à porter sur la vulnérabilité du Canada à certaines zoonoses et MTV exotiques telles que le paludisme, le chikungunya, la dengue, l'encéphalite japonaise et la fièvre de la vallée du Rift, importées d'autres pays que les États-Unis. Ces études démontrent qu'à mesure que le thermomètre grimpe, le sud du Canada deviendra une zone de plus en plus propice à la transmission du paludisme dans les régions où les vecteurs porteurs sont déjà installés (Berrang-Ford *et al.*, 2009; *voir* la figure 5).

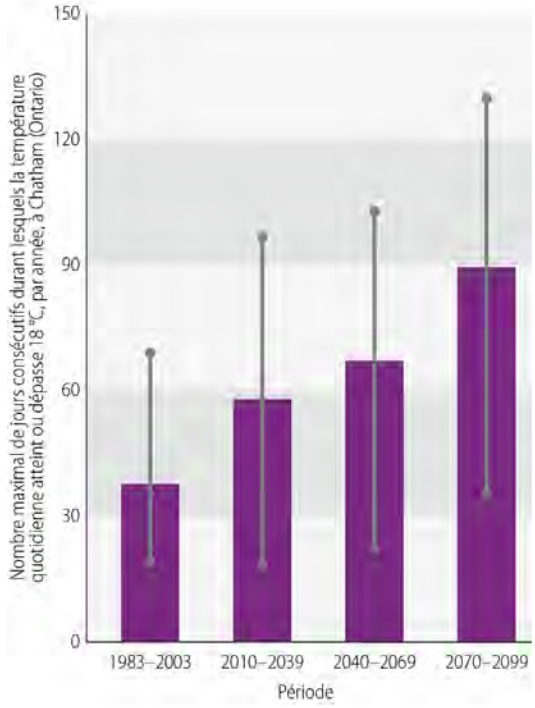


FIGURE 5 : Données récentes et projections (2010-2099) du nombre de journées consécutives par année où la température dépasse les 18 °C à Chatham, en Ontario. Le seuil thermique de transmission du parasite du paludisme, le *Plasmodium vivax*, se situe à 18 °C. À cette température, le développement du vecteur prend 30 jours, ce qui correspond à la durée limite de vie d'un moustique *(source : Berrang-Ford et al., 2009)*.

Tel qu'il fallait s'y attendre, le risque actuel de transmission du paludisme dans les collectivités du sud du Canada est plus élevé dans les collectivités qui comptent la plus grande proportion d'immigrés originaires de régions du monde où le paludisme est endémique (Eckhardt *et al.*, 2012). Les études ont également démontré la capacité des espèces de moustiques présentes au Canada à devenir des vectrices du virus de la fièvre de la vallée du Rift (Iranpour *et al.*, 2011). Des modèles utilisant l'analyse décisionnelle multicritères mettent en évidence la possibilité de voir apparaître au Canada des maladies exotiques transmises par vecteur non seulement du fait des changements climatiques, mais aussi par le biais d'immigrants infectés (Jackson *et al.*, 2010; Cox *et al.*, 2012). Les récentes épidémies de chikungunya en Italie (Angelini *et al.*, 2008) et de dengue en Floride (Bouri *et al.*, 2012) ont attiré l'attention sur les menaces que représentent les MTV importées et invasives. Les conditions climatiques de plus en plus favorables au Canada

devraient augmenter la probabilité de ces événements (Berrang-Ford *et al.*, 2009). Des moustiques infectés peuvent facilement être importés lors d'échanges commerciaux et de déplacements entre les pays (Medlock *et al.*, 2012). L'incidence des MTV exotiques devrait s'intensifier avec les changements climatiques, en particulier dans les pays en développement (Ermert *et al.*, 2012), et la migration de personnes infectées en provenance de pays en développement frappés par une catastrophe naturelle ou des difficultés économiques devrait s'accroître du fait des changements climatiques (McMichael *et al.*, 2012). Thielman et Hunter (2006) ont noté l'implantation au Canada d'espèces de moustiques exotiques et de moustiques vecteurs.

Parmi les outils qui permettent aux responsables de prendre des décisions en fonction du risque (c.-à-d. surveillance, prévention et contrôle) d'apparition ou de réapparition de zoonoses et de MTV figure l'analyse décisionnelle multicritères (*voir* l'étude de cas 1). La recherche se poursuit, afin de trouver de nouvelles techniques de surveillance des zoonoses et des MTV (p. ex., Pabbaraju *et al.*, 2009; Vrbova *et al.*, 2010), car les méthodes ainsi mises au point ne seront pas nécessairement toutes applicables sur le terrain (Millins *et al.*, 2011).

Les diagnostics tardifs attribuables au manque d'expertise et de capacité de diagnostic au sein de la profession médicale, en ce qui concerne les nouvelles zoonoses ou MTV exotiques inattendues, signifient que la maladie peut être très grave (Berrang-Ford *et al.*, 2009). Les efforts déployés pour gérer les MTV sont également entravés par le manque de personnel qualifié, ainsi que par un manque d'uniformité au niveau des dispositions cliniques et des mesures de santé publique en vigueur (Agence de la santé publique du Canada, 2013b).

ÉTUDE DE CAS 1

DESCRIPTION DES UTILISATIONS DE L'ANALYSE DÉCISIONNELLE MULTICRITÈRES

(Source : Cox et al., 2012)

L'analyse décisionnelle multicritères est un remarquable outil qui permet de tenir compte de différents paramètres dans la prise de décisions axées sur le risque. Dans le contexte de la sélection de méthodes de surveillance et de contrôle des maladies infectieuses émergentes, ces paramètres peuvent comprendre les répercussions sanitaires et environnementales, le rendement, l'acceptabilité et la rentabilité. L'analyse décisionnelle multicritères permet de pondérer l'importance d'un paramètre donné en fonction des besoins et des priorités de diverses administrations et de différents utilisateurs finaux. Elle encourage la recherche de consensus entre différentes administrations et tient compte de la perception qu'a le public des risques grâce à des analyses menées par des experts. L'analyse décisionnelle multicritères permet également de veiller à ce que les décisions soient prises de façon ouverte et transparente, et que les consultations documentées des experts, des intervenants et des utilisateurs finaux soient effectuées en fonction des pratiques de diligence établies. Les responsables du Programme national de santé publique du Québec ont mis cette approche à l'essai dans le cadre du processus de prise de décisions relatives au choix des méthodes de surveillance de la maladie de Lyme.

2.4 DANGERS NATURELS

Les changements climatiques, qui influent sur les phénomènes météorologiques et climatiques partout dans le monde (OMM, 2013), devraient entraîner un accroissement de la variabilité du climat, en modifiant la fréquence, l'intensité, l'étendue, la durée et le rythme de ces phénomènes (GIEC, 2012). Selon le rapport spécial du GIEC (2012) sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique, ces changements peuvent être à l'origine de phénomènes extrêmes « sans précédent » susceptibles d'avoir de graves répercussions sur les personnes et les collectivités, aussi bien des pays développés, que des pays en développement. Les projections semblent indiquer que le Canada peut s'attendre à une aggravation des tempêtes et des épisodes pluvieux intenses, ainsi qu'à des sécheresses et à des feux de friches plus fréquents. Les changements climatiques devraient également provoquer une augmentation de la fréquence des épisodes de chaleur extrême dans de nombreuses collectivités canadiennes (Lemmen *et al.*, 2008 ; Seguin, 2008; Santé Canada, 2011a; *voir* le chapitre 2).

La Base de données canadienne sur les catastrophes (BDC) fournit des renseignements sur la fréquence des catastrophes, notamment sur les catastrophes hydrométéorologiques au Canada[1]. Les publications sur les tendances relatives à la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes et sur leurs répercussions sont cependant rares. Les effets directs et indirects des phénomènes météorologiques extrêmes sur la santé au Canada sont peu suivis, et il y a une pénurie de données à l'échelle nationale, ces dernières n'étant d'ailleurs pas systématiquement recueillies. Les sections suivantes abordent les données probantes récemment recueillies au sujet des effets sur la santé des phénomènes météorologiques extrêmes, lesquels devraient s'intensifier du fait des changements climatiques au Canada.

2.4.1 TEMPÊTES ET INONDATIONS

Les Canadiens de partout au pays peuvent subir les effets sur la santé des orages et des éclairs, des tempêtes de neige, de la pluie verglaçante, des tornades, des ouragans et des tempêtes de grêle, notamment en cas de panne de courant de grande envergure (Environnement Canada, 2007) et dans les régions où les services de santé, les services sociaux et les services d'urgence ne sont pas suffisamment solides pour gérer des événements importants ou qui surviennent en même temps (Berry, 2008). Des éléments récents provenant des États-Unis démontrent que les tempêtes qui provoquent des dommages dus au vent et des inondations – comme les ouragans – sont souvent la cause de blessures physiques pouvant parfois entraîner la mort (Cretikos *et al.*, 2007; Brunkard *et al.*, 2008; Frumkin *et al.*, 2008; English *et al.*, 2009; Hess *et al.*, 2009),

[1] On considère une catastrophe un événement ayant de vastes répercussions environnementales, sanitaires ou économiques qui bouleverse le quotidien d'une collectivité au point où elle peut alors avoir besoin d'aide extérieure pour s'en remettre (GIEC, 2012).

de noyades (la principale cause de décès durant l'ouragan Katrina; Brunkard *et al.*, 2008; Frumkin *et al.*, 2008), d'aggravation des maladies chroniques (p. ex., du fait du manque de nourriture et d'eau potable; English *et al.*, 2009; Hess *et al.*, 2009; Bethel *et al.*, 2011), d'hypothermie (Cretikos *et al.*, 2007) et de maladies mentales telles que l'état de stress post-traumatique (ESPT; *voir* la section 2.4.5). Les événements pluvio-hydrologiques ont également été liés à l'exacerbation des troubles cardiaques (English *et al.*, 2009) et des maladies gastro-intestinales causées par la défaillance des réfrigérateurs et des congélateurs, ainsi que par l'incapacité à réchauffer les aliments (Cretikos *et al.*, 2007). Selon les observations effectuées, les tempêtes de pluie aggravent les symptômes de l'asthme (Hess *et al.*, 2009).

Les tempêtes peuvent également avoir des répercussions sur la santé, en raison de l'interruption des soins médicaux (Cretikos *et al.*, 2007; Brunkard *et al.*, 2008; Frumkin *et al.*, 2008) et des autres services sociaux attribuable aux dommages causés aux immeubles, à l'infrastructure et aux véhicules médicaux, ainsi qu'à l'indisponibilité du personnel du fait de contraintes physiques (p. ex., routes bloquées) ou du stress causé par l'événement (Cretikos *et al.*, 2007). Les hôpitaux, par exemple, peuvent être directement touchés (Cretikos *et al.*, 2007; Brunkard *et al.*, 2008; Clarke, 2009) et la continuité des soins médicaux, comme les analyses normales en laboratoire, le dépistage néonatal, les dialyses, l'assistance respiratoire et les thérapies intraveineuses à domicile peuvent être interrompues, ce qui fait peser un risque sanitaire plus important sur les patients (Cretikos *et al.*, 2007; Frumkin *et al.*, 2008). De nombreux hôpitaux au Canada ne disposent que de peu de moyens pour faire face à l'augmentation subite du nombre de patients en cas d'urgence en matière de santé publique (Gomez *et al.*, 2011).

Les épisodes de pluie verglaçante sont en hausse et cette tendance devrait se maintenir (Ebi et Paulson, 2010; Cheng *et al.*, 2011). Des données provenant des États-Unis démontrent que la pluie verglaçante présente un risque de perte d'équilibre et de chute (Frumkin *et al.*, 2008; Du *et al.*, 2010), de blessure ou de maladie que peut entraîner la défaillance des immeubles et des infrastructures essentielles (Du *et al.*, 2010; Auger *et al.*, 2011), ainsi que des défis relatifs à l'accès aux services de soins de santé (Auger *et al.*, 2011), et donne lieu à une hausse des accidents impliquant des véhicules, en raison du mauvais état des routes (Frumkin *et al.*, 2008).

Selon Cheng et ses collaborateurs (2011), le nombre de jours de pluie verglaçante dans les collectivités de l'Ontario de décembre à février augmentera de 35 à 100 % entre 2046 et 2065 par rapport aux conditions moyennes historiques, puis de 35 à 155 % entre 2081 et 2100. Plus on va vers le nord, plus la hausse projetée devrait être importante. Par exemple, entre 2046 et 2065, le nombre de jours de pluie verglaçante devrait s'accroître de 35 à 55 % à Toronto et à Windsor, en Ontario, de 50 à 70 % à Montréal et à Ottawa, et de 70 à 100 % à Kenora, à Thunder Bay et à Timmins.

Cunderlik et Ouarda (2009) ont démontré une intensification des précipitations entre 1974 et 2003 au Canada et on apporté une preuve non concluante que les inondations surviennent plus tôt dans l'année, tout particulièrement dans le sud du Canada. Le nombre d'inondations a augmenté au Canada tout au long du XX^{e} siècle, 70 % des événements ayant eu lieu après 1959 (Laforce *et al.*, 2011). Les inondations sont l'un des types de catastrophe naturelle les plus coûteux et les plus fréquents au Canada (Sécurité publique Canada, 2013a). La croissance démographique, la tendance continue à construire des logements sur des plaines inondables et l'urbanisation (qui réduit généralement la capacité des bassins versants à absorber le ruissellement des eaux d'orage) devraient accroître les risques d'inondation. Des études menées sur les récentes inondations ont permis de mieux comprendre leurs répercussions primaires et secondaires (à moyen et à long terme) sur la santé (*voir* le tableau 3).

On s'attend à ce que les changements climatiques contribuent à accroître de plusieurs façons l'ampleur des inondations, notamment par un écoulement printanier précoce (Bedsworth et Hanak, 2010), une intensification des ondes de tempête (Bedsworth et Hanak, 2010) et une augmentation des fortes précipitations (Cunderlik et Ouarda, 2009; DesJarlais et Blondlot, 2010; Ostry *et al.*, 2010). Les projections relatives aux inondations dans certaines régions du Canada sont rares. La ville de Toronto a récemment mené une étude sur les facteurs climatiques, qui prévoit une importante hausse des fortes tempêtes de pluie estivales d'ici 2040-2049 (Ville de Toronto, 2012). Les inondations dues aux fortes précipitations dans le sud de l'Ontario (bassins des rivières Grand, Humber et Rideau, et bassin du cours supérieur de la rivière Thames) entre les mois d'avril et de novembre devraient s'accroître de 10 à 35 % d'ici 2046-2065, et de 35 à 50 % d'ici 2081-2100 (Cheng *et al.*, 2011). Les inondations qui découleront des changements climatiques présentent également un risque considérable en Colombie-Britannique (Ostry *et al.*, 2010) et au Québec (DesJarlais et Blondlot, 2010).

Répercussions primaires des inondations sur la santé	
Répercussion	**Cause**
Mortalité	Noyade ou traumatisme aigu (p. ex., effondrement de débris ou d'un immeuble; Acharya *et al.*, 2007; Fundter *et al.*, 2008; Jonkman *et al.*, 2009) généralement imputable à un accident de la route ou à un comportement à risque dans une zone inondée (p. ex., nager, faire du surf; Haines *et al.*, 2006; English *et al.*, 2009; Du *et al.*, 2010; FitzGerald *et al.*, 2010)
Choc, hypothermie	Exposition à des eaux de crue se trouvant souvent à une température inférieure à celle du corps humain (Acharya *et al.*, 2007; Carroll *et al.*, 2010; Du *et al.*, 2010)
Hypertension artérielle, crises cardiaques et AVC	Effort et stress liés à l'événement (Acharya *et al.*, 2007; Jonkman *et al.*, 2009; Carroll *et al.*, 2010; Du *et al.*, 2010)
Blessures (lacérations, irritations cutanées, ecchymoses, infection de plaies)	Contact direct avec les eaux de crue (Acharya *et al.*, 2007; Fundter *et al.*, 2008; Carroll *et al.*, 2010; Du *et al.*, 2010)
Infection, œdème pulmonaire, irritation des poumons, infection fongique	Aspiration d'eau dans les poumons (Robinson *et al.*, 2011)
Entorses, foulures et problèmes orthopédiques	Contact avec des débris qui se trouvent dans l'eau, tentative de s'extraire de structures effondrées, chute d'échelles, tentative de porter secours à des personnes ou de sauver des biens, etc. (Acharya *et al.*, 2007; Fundter *et al.*, 2008; Carroll *et al.*, 2010; Du *et al.*, 2010)
Blessures d'origine électrique	Contact avec des câbles ou des lignes électriques tombés au sol, circuit ou équipement électrique en contact avec l'eau stagnante (Du *et al.*, 2010)
Brûlures (causées par le feu ou des produits chimiques) et blessures provoquées par une explosion	Perturbations des réservoirs et des conduites de propane ou de gaz naturel, des lignes électriques et des réservoirs de stockage de produits chimiques; émissions de gaz toxiques; canots de sauvetage entrant en contact avec des lignes électriques (Du *et al.*, 2010)
Répercussions secondaires des inondations sur la santé	
Répercussion	**Cause**
Exacerbation des maladies existantes, y compris des maladies chroniques	Perturbation et offre réduite de services de soins d'urgence et de services de santé continus, notamment si l'infrastructure de la santé est touchée, y compris la capacité réduite à fournir ou à recevoir des soins; le déplacement des patients et du personnel; la surveillance réduite des maladies, des blessures ou des expositions aux produits toxiques; la perte de dossiers médicaux; la perte de médicaments ou la défaillance des appareils médicaux (Haines *et al.*, 2006; Du *et al.*, 2010; Ebi et Paulson, 2010)
Intoxication oxycarbonée	Utilisation inappropriée de bacs de cuissons non ventilés (p. ex., barbecue), de pulvérisateurs puissants et de génératrices à essence (Du *et al.*, 2010)
Brûlures/inhalation de fumée	Incendies de maison déclenchés par des bougies (Du *et al.*, 2010)
Déshydratation, coup de chaleur, crise cardiaque, AVC	Exposition de populations à risque au stress environnemental durant les jours suivant l'événement (Jonkman *et al.*, 2009)
Maladies d'origine hydrique et alimentaire – troubles digestifs et gastro-intestinaux, maladies infectieuses ayant une période d'incubation plus longue, notamment la *Legionella pneumophila* (Marcheggiani *et al.*, 2010), *le norovirus, le rotavirus, l'hépatite A* et *C*	Contamination de l'eau et de la nourriture du fait soit du débordement des eaux usées; de l'inondation des terres agricoles; du transport de sédiments, d'engrais, de pesticides; de fuites de réservoirs contenant des produits du pétrole ou d'éléments provenant des lieux d'enfouissement (Haines *et al.*, 2006; Acharya *et al.*, 2007; Du *et al.*, 2010; Ebi et Paulson 2010; Ostry *et al.*, 2010; ten Veldhuis *et al.*, 2010); soit de la contamination chimique de l'eau (p. ex., du fait de l'inondation de sites industriels; Du *et al.*, 2010)
Symptômes/troubles respiratoires	Contaminants associés aux maladies respiratoires provenant de moisissures[2], de bactéries[3] et de proliférations fongiques sur les structures humides (Carroll *et al.*, 2010; Du *et al.*, 2010; Robinson *et al.*, 2011; Taylor *et al.*, 2011). Également attribuables à la *Legionella*, à la *Chlamydia*, à la pneumonie, au complexe *Burkholderia cepacia* et au complexe *Mycobacterium avium* (Taylor *et al.*, 2011)

TABLEAU 3 : Répercussions primaires et secondaires, à moyen et à long terme, des inondations sur la santé.

[2] On a noté la présence de *Cladosporium*, d'*Aspergillus*, de *Penicillium*, d'*Alternaria* et de *Stachybotrys* dans des immeubles humides et inondés (Taylor *et al.*, 2011).
[3] On a noté la présence de *Streptomyces*, de *Caulobacter* et d'agrobactéries (Taylor *et al.*, 2011).

2.4.2 CHALEUR EXTRÊME

À l'échelle mondiale, de récents événements ont mis en évidence les répercussions catastrophiques que la chaleur extrême peut avoir sur les collectivités des pays développés (Robine *et al.*, 2008; Barriopedro *et al.*, 2011). Les épisodes de chaleur extrême présentent des risques sanitaires importants pour les Canadiens. Ils sont par exemple associés à des hausses soudaines et de courte durée du nombre de décès, notamment chez les personnes âgées, les malades chroniques, les personnes prenant certains médicaments et celles qui sont défavorisées sur le plan social (Kovats et Hajat, 2008; Hajat et Kosatsky, 2010; Kenny *et al.*, 2010; ICIS, 2011; Santé Canada, 2011a). La canicule qui a frappé la Colombie-Britannique en 2009 a provoqué 156 décès en surnombre dans la région des basses-terres continentales (Kosatsky, 2010), tandis que celle qui a touché le Québec en 2010 y a causé 280 décès en surnombre (Bustinza *et al.*, 2013). Le rapport national sur les noyades (Centre canadien de recherche sur la prévention de la noyade, 2011) semble indiquer que l'augmentation du nombre de décès par noyade en 2005 (492), en 2006 (508) et en 2007 (480) s'écarte de la tendance à long terme de diminution du nombre de décès par noyade, et sont en partie attribuables aux conditions plus chaudes et plus sèches de ces années, qui ont incité un plus grand nombre de personnes à pratiquer des activités aquatiques.

Les études qui ont porté sur le lien entre les températures maximales quotidiennes et les décès en surnombre dans certaines villes canadiennes (*voir* la figure 6) démontrent que les fortes températures constituent un risque sanitaire. La latitude, l'altitude, la proximité de plans d'eau, les îlots thermiques urbains, l'accès à la climatisation, la démographie et l'acclimatation locale figurent parmi les facteurs qui ont une incidence sur la manière dont chaque ville vit un épisode de chaleur et sur la gravité des effets sur la santé (Martel *et al.*, 2010). Certaines villes, dont Toronto et Windsor, en Ontario, et Winnipeg, au Manitoba, ont évalué les répercussions de la canicule sur la santé en vue d'appuyer la mise au point ou la mise à jour de systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur (SAIC; Berry *et al.*, 2011a, c; Ville de Toronto, 2011).

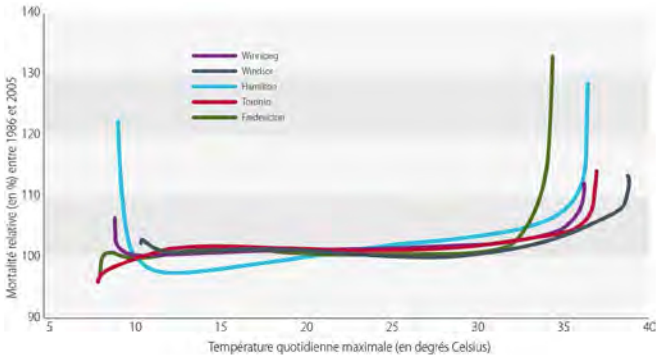


FIGURE 6 : Corrélation entre les températures maximales quotidiennes en juin, juillet et août et les décès non traumatiques dans certaines villes canadiennes, de 1986 à 2005 *(source : Casati et al., sous presse)*.

La chaleur extrême peut être à l'origine d'irritations cutanées, de crampes, de déshydratation, de syncopes, d'épuisement et de coups de chaleur. Elle peut également exacerber de nombreux états préexistants, notamment les maladies cardiovasculaires, vasculaires cérébrales et respiratoires, ainsi que les troubles neurologiques (Kenny *et al.*, 2010; Santé Canada, 2011b; Lowe *et al.*, 2011). Comme ces états ne font généralement pas partie des troubles liés à la chaleur dans la Classification internationale des maladies (CIM), l'ampleur des répercussions de la chaleur extrême sur la santé est souvent sous-estimée (Kravchenko *et al.*, 2013). Les épisodes de chaleur extrême donnent lieu à une utilisation accrue des services de soins de santé (Vida *et al.*, 2012; Anderson *et al.*, 2013). À Toronto, on a relevé une importante corrélation positive entre la chaleur et l'utilisation des services médicaux d'urgence par plusieurs groupes au cours des étés de 2009, 2010 et 2011, démontrant ainsi les répercussions de la chaleur sur la santé (Bassil, 2012). La canicule qui a frappé le Québec en 2010 a donné lieu à 3400 admissions supplémentaires aux services d'urgence, avec de grandes disparités entre les différentes régions (Bustinza *et al.*, 2013).

Le Canada peut s'attendre à ce que la durée, la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur s'accroissent, et il est probable qu'une journée extrêmement chaude observée tous les 20 ans se répète tous les 2 ans d'ici la fin du siècle (GIEC, 2012)[4]. Selon les projections, le nombre de jours où la température dépassera les 30 °C dans des villes comme Toronto et Windsor, en Ontario, et Winnipeg , au Manitoba, (*voir* la figure 7) devrait doubler entre 2011 et 2040, et entre 2071 et 2100. Dans bon nombre de collectivités, l'augmentation projetée du nombre de nuits chaudes fera en sorte qu'il y aura peu de répit (Santé Canada, 2012c). Ebi et Mills (2013) avancent que la mortalité liée à la chaleur causée par la hausse des températures attribuable aux changements climatiques devrait être plus importante que la diminution de la mortalité liée au froid.

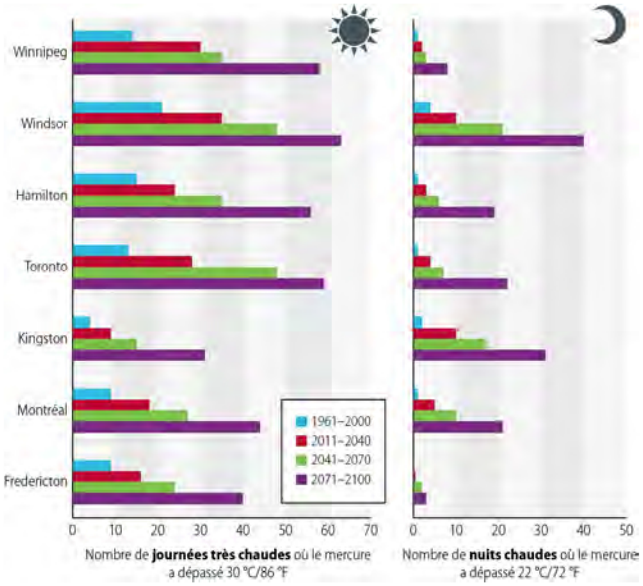


FIGURE 7 : Données historiques et nombre projeté de journées et de nuits chaudes dans certaines villes du Canada *(source : Casati et Yagouti, 2010)*.

[4] Fondé sur les scénarios d'émission A1B et A2 (GIEC, 2012).

2.4.3 FEUX DE FRICHES

Les feux de friches ou de forêt, qui sont communs au Canada (*voir* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*), présentent un risque pour des milliers de foyers et d'entreprises (Seguin, 2008). Au Canada, 5500 personnes en moyenne sont évacuées chaque année d'une dizaine de collectivités en raison de feux de friches, et une vingtaine de collectivités regroupant au total 70 000 personnes sont menacées par d'importants incendies chaque année (Flannigan et Wotton, 2010; *voir* l'étude de cas 2).

Les feux de végétation entraînent notamment des difficultés respiratoires (Künzli *et al.*, 2006; Moore *et al.*, 2006; Bambrick *et al.*, 2011) dues à l'inhalation de fumée, aux brûlures et aux lésions des voies respiratoires, ainsi qu'à une mauvaise oxygénation (Hess *et al.*, 2009; Robinson *et al.*, 2011; Johnston *et al.*, 2012). La chaleur rayonnante, la déshydratation et l'épuisement dus à la chaleur (Johnston, 2009) contribueraient également à la hausse de la mortalité (Künzli *et al.*, 2006; Johnston, 2009). Les feux de friches sont également souvent liés à une hausse du nombre de visites chez le médecin et aux services d'urgence (Henderson *et al.*, 2011), à un accès réduit aux services communautaires et aux services de santé, ainsi qu'à des problèmes sanitaires associés aux refuges temporaires ou d'urgence (Johnston, 2009). Les répercussions à moyen et à long terme des feux de friches sur la santé peuvent inclure l'épuisement mental, l'anxiété, la dépression et un état de stress post-traumatique (ESPT) liés à la perte de proches, du domicile et des moyens de subsistance (Johnston, 2009; Ostry *et al.*, 2010). Les services d'urgence et de santé peuvent devoir faire face à d'importants défis lorsque des collectivités entières sont touchées par des feux de friches et doivent évacuer.

Les feux de friches peuvent nuire considérablement à la qualité de l'air dans les collectivités environnantes et favoriser le transport de polluants sur de longues distances en Amérique du Nord (Committee on the Significance of International Transport of Air Pollutants, 2009), ce qui peut exacerber les maladies chroniques telles que l'asthme (notamment chez les enfants), la MPOC, la cardiopathie ischémique et autres maladies pulmonaires chroniques, et ainsi accroître le taux d'hospitalisation (Künzli *et al.*, 2006; Johnston, 2009; Robinson *et al.*, 2011). Les feux de friches ont également été liés à la hausse de la mortalité infantile en raison du risque accru de troubles cardiovasculaires et respiratoires mortels (Robinson *et al.*, 2011). Les feux de friches au Canada ont par le passé eu une incidence sur la qualité de l'air; le niveau moyen de $MP_{2,5}$ en 2010 au Canada excédant le niveau de 2009 de 24 % en raison des feux de forêt déclarés en Colombie-Britannique, en Saskatchewan et au Québec (Environnement Canada, 2012b). Les feux de friches dans la majeure partie de la couverture forestière au Canada devraient s'intensifier en raison de la hausse de températures et de la baisse saisonnière des précipitations projetées (Flannigan *et al.*, 2009; Bambrick *et al.*, 2011; *voir aussi* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*).

ÉTUDE DE CAS 2

RÉPERCUSSIONS SUR LA SANTÉ DES FEUX DE FORÊT DANS LE NORD DE L'ONTARIO, EN JUILLET 2011

Le 6 juillet 2011, un orage a déclenché une série de feux de forêt qui se sont rapidement propagés dans le nord-ouest de l'Ontario et n'ont été maîtrisés que le 23 juillet (120 incendies avaient été signalés en date du 20 juillet). Plusieurs collectivités des Premières Nations ont été directement menacées par les incendies, et un ordre d'évacuation a été donné pour celles qui étaient les plus exposées au risque d'inhalation de fumée, ainsi que celles touchées par les pannes de courant, les pénuries de vivres et la capacité réduite d'entreposage des aliments (Sécurité publique Canada, 2013a). Au total, 3292 personnes ont été évacuées de huit collectivités des Premières Nations (Sécurité publique Canada, 2013a), en plus de l'ensemble des collectivités des Premières Nations Keewaywin et Koocheching. Les résidents ont été déplacés vers 14 collectivités situées jusque dans le sud de l'Ontario et au Manitoba.

2.4.4 SÉCHERESSE

La sécheresse peut avoir d'importantes répercussions sur la santé (Wheaton *et al.*, 2008) du fait de la baisse du niveau phréatique et de l'écoulement fluvial, lesquels favorisent l'érosion éolienne et causent des craquelures dans les citernes et les fosses septiques, ce qui peut accroître la présence de sédiments et de pathogènes hydriques dans l'eau, et en favoriser la contamination (English *et al.*, 2009; Ostry *et al.*, 2010; Wittrock *et al.*, 2011), entraînant ainsi des cas de gastro-entérite (US CDC *et al.*, 2010). Certaines maladies à transmission vectorielle pourraient se propager plus facilement pendant les périodes de sécheresse (Frumkin *et al.*, 2008), et l'érosion éolienne et les tempêtes de poussières peuvent avoir des répercussions sur la santé (Wheaton *et al.*, 2008). La sécheresse peut faire baisser la production et les cultures agricoles (Wheaton *et al.*, 2008; *voir* le chapitre 4 – *Production alimentaire*), ce qui entraînerait une situation de nutrition sous-optimale en raison de pénuries alimentaires, de la raréfaction et de la hausse des prix des aliments (Horton *et al.*, 2010), notamment chez les personnes disposant d'un faible revenu et celles qui dépendent de la pêche ou de l'agriculture pour assurer leur subsistance (US CDC *et al.*, 2010). Il semble que les conditions de sécheresse auraient aussi une incidence sur l'accroissement du stress et des troubles mentaux, notamment chez les agriculteurs (US CDC *et al.*, 2010; Polain *et al.*, 2011; Wittrock *et al.*, 2011). L'assèchement estival des zones continentales, les risques de sécheresse et les zones touchées par la sécheresse sont autant de paramètres susceptibles de prendre de l'ampleur au Canada (Wheaton *et al.*, 2008; Wittrock *et al.*, 2011; *voir aussi* le chapitre 4 – *Production alimentaire*).

2.4.5 RÉPERCUSSIONS PSYCHOSOCIALES ET INCIDENCE SUR LA SANTÉ MENTALE

La hausse de la fréquence, de la gravité et de la durée des phénomènes météorologiques extrêmes peut avoir une incidence négative sur la santé mentale et des répercussions psychosociales (Fritze *et al.*, 2008; Berry *et al.*, 2009; Kjellstrom et Weaver, 2009; Vida *et al.*, 2012). Le terme « psychosocial » est associé aux aspects psychologiques et sociaux, ainsi qu'aux moyens de subsistance d'une personne, et reconnaît l'influence réciproque, ainsi que les liens qui existent entre le bien-être d'une personne et celui de la collectivité. Les dangers naturels peuvent avoir des répercussions psychosociales et une incidence sur la santé mentale en exposant les gens à des situations anxiogènes, ainsi qu'à des événements susceptibles d'avoir des effets sur leur santé physique, qu'il s'agisse de crises d'asthme provoquées par la fumée des feux de forêt, de blessures causées par des débris volants, ou d'interruption des services de soins de santé (Brunkard *et al.*, 2008; Auger *et al.*, 2011). Ils peuvent également avoir des répercussions négatives sur la santé mentale et sur le niveau de stress du fait, par exemple, de la perturbation des activités quotidiennes et du mode de subsistance à la suite d'une évacuation, et de l'accès limité aux services médicaux (Bethel *et al.*, 2011). En outre, ce type de répercussions peut découler de la perturbation du milieu naturel et de l'environnement social, à savoir, par exemple, la perte du sentiment d'avoir sa place et d'appartenir à une collectivité, en raison des dommages considérables subis par les espaces communautaires et du bouleversement des modes d'interaction sociale (Higginbotham *et al.*, 2007). La figure 8 illustre l'enchaînement de causalité par lequel les changements climatiques influent sur la santé mentale.

Les symptômes des effets psychologiques de phénomènes météorologiques extrêmes ou d'une catastrophe peuvent se présenter sous différentes formes, notamment la modification de l'humeur, des pensées et du comportement, un niveau de détresse accru et la réduction de la capacité d'une personne à vaquer à ses occupations quotidiennes (Berry *et al.*, 2008a). Les troubles cognitifs et émotionnels résultant d'une catastrophe peuvent se manifester sous la forme de problèmes de concentration, de trous de mémoire, de troubles de l'apprentissage, d'anxiété, de troubles de stress aigu, d'ESPT, de dépression, de troubles du sommeil, d'agressivité, d'abus de substances et de comportements à risque élevé chez les adolescents (Somasundaram et Van De Put, 2006; Boon *et al.*, 2011).

De nombreuses études ont porté sur le lien entre certains dangers naturels et leur incidence négative sur la santé mentale (Salcioglu *et al.*, 2007), notamment la sécheresse (US CDC *et al.*, 2010; Polain *et al.*, 2011; Wittrock *et al.*, 2011), les vagues de chaleur (Nitschke *et al.*, 2007; Hanson *et al.*, 2008; Bambrick *et al.*, 2011), les feux de friches (Johnston, 2009; Ostry *et al.*, 2010), les orages et les ouragans (Cretikos *et al.*, 2007; Bethel *et al.*, 2011; Boon *et al.*, 2011;), ainsi que la glace et la neige (Auger *et al.*, 2011). Les inondations, par exemple, ont été associées à une série de problèmes de santé mentale, notamment l'ESPT (Adhern *et al.*, 2005; Acharya *et al.*, 2007; Carroll *et al.*, 2009; Ebi et Paulson, 2010; Carnie *et al.*, 2011), des perturbations sociales plus importantes, des comportements violents (agressions), l'abus de substances (Ebi et Paulson, 2010) et la hausse du taux de suicide (Du *et al.*, 2010).

Aujourd'hui, on connaît davantage les mesures permettant de réduire efficacement les effets psychosociaux des phénomènes météorologiques extrêmes et des catastrophes (Berry *et al.*, 2009; Clarke, 2009). Un certain nombre de leçons, par exemple, ont été tirées de l'intervention et du rétablissement à la suite des inondations sans précédent qui sont survenues au Manitoba en 2011 (*voir* l'étude de cas 3).

2.5 RAYONNEMENTS ULTRAVIOLETS

Les niveaux de rayonnements ultraviolets (RUV) dans l'environnement varient selon les régions, les saisons, le moment de la journée, l'altitude, la couverture nuageuse et le niveau de pollution atmosphérique (Thomas *et al.*, 2012). Une gamme d'effets sanitaires à court terme (p. ex., dommage à l'ADN, immunosuppression; Norval et Halliday, 2011; Thomas *et al.*, 2012) et à long terme (p. ex., cancer de la peau, cataracte; de Albuquerque Alves, 2011; Thomas *et al.*, 2012), ainsi que certains bienfaits (p. ex., production de vitamine D; Dixon *et al.*, 2012) ont été associés à l'exposition aux RUV. On estime que 81 000 cas de cancer de la peau sans présence de mélanome et 5800 nouveaux cas avec présence de mélanome se seraient manifestés au Canada en 2012 (Société canadienne du cancer, 2012).

La hausse des températures associée aux changements climatiques pourrait accroître l'exposition de la population canadienne aux RUV, en raison des niveaux plus importants de RUV dans l'environnement, ainsi que des changements de comportement (p. ex., plus d'activités à l'extérieur, utilisation limitée de moyens de protection personnels; Thomas *et al.*, 2012). L'enquête canadienne sur l'exposition au soleil menée en 2006 a montré que les enfants âgés de 1 à 12 ans

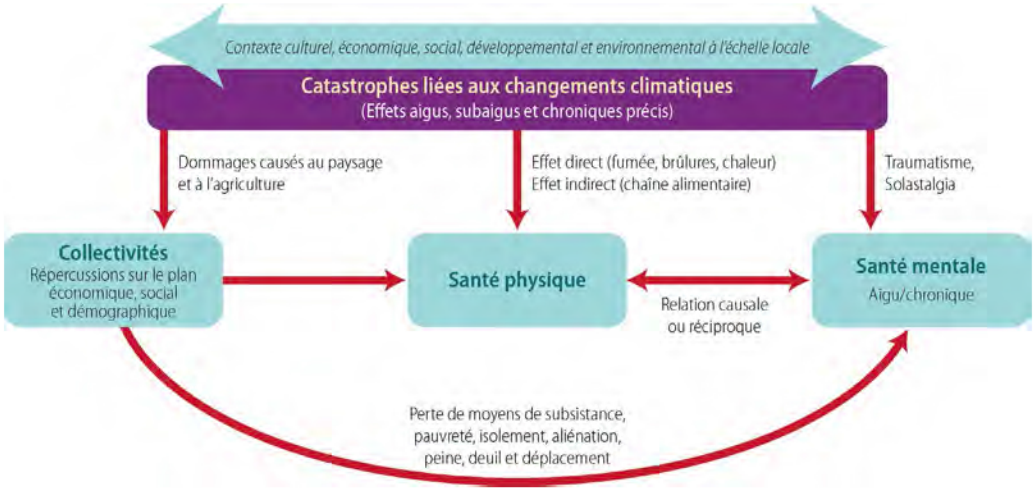


FIGURE 8 : Cadre montrant l'enchaînement de causalité entre les changements climatiques et la santé mentale *(source : Berry et al., 2009)*.

ÉTUDE DE CAS 3

INONDATIONS AU MANITOBA EN 2011 – FAVORISER UNE APPROCHE PROVINCIALE D'ADAPTATION PSYCHOSOCIALE À L'ÉGARD DES DANGERS NATURELS

Les inondations survenues au Manitoba en 2011 ont duré environ quatre mois, et de nombreuses petites collectivités, notamment chez les Premières Nations, ont dû être évacuées pour des périodes plus ou moins longues. Environ 1932 personnes n'étaient toujours pas rentrées après dix-huit mois, et une partie des évacués ne pourront sans doute jamais retourner chez eux. Parmi les répercussions psychosociales observées chez les personnes et au sein des familles figurait l'augmentation de la consommation d'alcool et de drogues, ainsi que de la violence domestique, et d'autres symptômes généraux d'un niveau élevé de stress tels que la dépression, l'anxiété, les troubles du sommeil et une augmentation des malaises physiques (communication personnelle [traduction], Gerry Delorme).

Le Bureau de gestion des opérations en cas de catastrophe de Santé Manitoba a travaillé avec les services sociaux d'urgence de la province pour déterminer et repérer les zones et les collectivités où on pouvait s'attendre à des répercussions psychosociales plus importantes. Les principaux acteurs (p. ex., Services sociaux d'urgence, Organisation des mesures d'urgence, Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, Agriculture, Alimentation et Initiatives rurales Manitoba, Services à la famille et Services ruraux Manitoba, Conservation et Gestion des ressources hydriques Manitoba) ont rapidement organisé une table ronde à l'échelle provinciale sur le rétablissement psychosocial après les inondations de 2011, de manière à instaurer une structure de planification et d'intervention, et à fournir l'orientation et le financement nécessaires à la gestion des différents niveaux de répercussions psychosociales (à l'échelle de la personne, de la collectivité et de la province). Quatre équipes de rétablissement régionales composées de trois ou quatre membres ont été déployées dans les zones de la province les plus touchées. Les leçons suivantes ont été tirées de cette expérience :

- *Leadership* – Une intervention efficace en cas d'inondation requiert non seulement une coordination centralisée, mais aussi des mesures communautaires.
- *Renforcement des capacités de gestion des répercussions psychosociales* – Les enjeux d'ordre psychosocial doivent être systématiquement pris en considération dans l'évaluation des risques, ainsi que dans la gestion de la planification et de l'intervention en cas de catastrophe.
- *Adapter la communication et le message* – Le personnel chargé de la communication doit être conscient des retombées psychosociales que peut avoir un message destiné aux résidents touchés, et avoir reçu une formation en ce sens afin d'atténuer plutôt que d'accroître la détresse des gens.
- *Populations à risque* – Les populations les plus à risque souffrent beaucoup plus des répercussions psychosociales et autres effets sur la santé (p. ex., personnes âgées, enfants, malades chroniques, personnes défavorisées et collectivités des Premières Nations). Une planification plus précise est nécessaire en vue de cerner et de renforcer la capacité de ces personnes.
- *Répercussions psychologiques et personnel d'intervention* – Les intervenants d'urgence, le personnel affecté au rétablissement psychosocial et les décisionnaires ont subi certaines répercussions psychosociales, allant de la fatigue à des réactions extrêmes au stress. Il faut que les travailleurs de la santé, le personnel de gestion des services d'urgence et les autres intervenants reçoivent un soutien psychosocial ciblé durant un événement de cette envergure.
- *Évaluation de l'intervention* – L'évaluation des interventions d'ordre psychosocial a été limitée du fait de la capacité réduite de planification et de collecte des données durant les activités d'intervention et de rétablissement.

Les inondations de 2011 ont mis en évidence la nécessité de mettre l'accent sur la planification pour gérer les répercussions psychosociales des événements et des catastrophes d'ordre climatique. Les inondations ont suscité la convocation d'une table ronde axée sur la planification pyschosociale regroupant plusieurs institutions provinciales (communication personnelle [traduction], Gerry Delorme), dont la tâche consiste à accroître la capacité d'intervention future de la province en cas de catastrophes.

n'utilisent pas régulièrement de protection solaire normale et privilégient largement l'écran solaire, ce qui témoigne d'un besoin de sensibilisation aux autres mesures tel le fait de se mettre à l'ombre et de porter des vêtements protecteurs (Pichora et Marrett, 2010).

Depuis les années 1990, l'appauvrissement de l'ozone s'est stabilisé et la situation commence à s'améliorer (Bais, 2011; OMM, 2011). Les récentes projections concernant l'irradiation UV pondérée en fonction de l'effet érythémateux – un indicateur couramment employé pour mesurer les propriétés érythémateuses des RUV qui sont directement proportionnelles à l'indice UV – semblent indiquer que d'ici les années 2090, l'irradiation sera environ 12 % inférieure en haute altitude, 3 % inférieure à des latitudes moyennes et 1 % supérieure sous les tropiques (Bais, 2011). Les valeurs projetées tiennent compte des changements climatiques et sont fonction d'un accroissement de la couverture nuageuse en haute altitude, ainsi que d'un rétablissement complet de la colonne d'ozone[5], laquelle absorbe la bande des UVB connus pour avoir des effets négatifs sur la santé. D'autres projections laissent entendre que d'ici 2095 dans le cas d'un scénario de ciel clair, l'indice UV diminuera de 9 % à des latitudes boréales élevées, augmentera de 4 % sous les tropiques et augmentera dans une proportion pouvant atteindre les 20 % à des latitudes australes élevées à la fin du printemps et au début de l'été (Hegglin et Shepherd, 2009). De nombreux doutes subsistent quant aux niveaux projetés de RUV et à sa composition spectrale, dans la mesure où on ne peut pas plus prédire les futurs niveaux de précipitation, de couverture nuageuse ou de concentration d'aérosols, que de diminution de la couverture de neige et de la glace de mer (Thomas *et al.*, 2012). Des modèles animaux montrent qu'une hausse de la température pourrait accroître les carcinogenèses liées aux RUV (van der Leun *et al.*, 2008). Il est cependant difficile de prévoir l'incidence qu'auront les changements climatiques sur les effets sur la santé des RUV.

[5] Les effets des changements climatiques sur l'ozone troposphérique sont présentés dans la section 2.1.

3. RISQUES À L'ÉCHELLE DE LA COLLECTIVITÉ ET DE LA RÉGION

L'exposition aux phénomènes météorologiques qui ont une incidence sur la santé est étroitement liée à la géographie, à la topographie et à l'utilisation du sol. Les effets de l'exposition au climat ou aux intempéries sur la santé humaine sont soit modulés, soit exacerbés par la sensibilité des populations et la capacité d'adaptation à l'échelle sous-régionale, locale et individuelle (Berry, 2008). Les collectivités et régions canadiennes présentent des caractéristiques très diverses, en ce qui a trait aux principaux facteurs de vulnérabilité qui sous-tendent les menaces que présentent les changements climatiques pour la santé. Les collectivités urbaines, rurales, côtières et nordiques possèdent des caractéristiques uniques qui les rendent vulnérables, chacune à leur manière, aux effets sur la santé. La disponibilité des données sanitaires, météorologiques, climatiques et socioéconomiques n'étant pas uniforme à l'échelle du pays, il est difficile d'évaluer et de comparer les risques sanitaires et les vulnérabilités liés aux changements climatiques à l'échelle régionale. Des exemples d'écarts régionaux, du point de vue des risques sanitaires et des vulnérabilités liés aux changements climatiques, sont présentés dans le tableau 4.

Catégorie de risque climatique	Exemples de régions où le risque est le plus élevé	Exemples de facteurs de risque et d'effets sur la santé liés au climat
Températures extrêmes	**Chaleur extrême** Corridor Windsor-Québec (Windsor, Hamilton, Toronto, Kingston, Montréal), régions bordant le lac Érié, le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent, Prairies (p. ex., Winnipeg), Canada atlantique (p. ex., Fredericton) et Colombie-Britannique (p. ex.,Vancouver) **Froid extrême** Arctique, Prairies, Ontario, est du Canada	Vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses et périodes plus longues de température plus chaude, possibilité de conditions plus froides à certains endroits Augmentation du taux annuel de décès liés à la chaleur au Québec en 2020, 2050 et 2080 (150, 550 et 1 400 décès annuels en surnombre respectivement), en fonction de la hausse moyenne de la température[6]
Phénomènes météorologiques extrêmes et dangers naturels	**Orages, foudre, tornades et tempêtes de grêle** Ensemble du Canada, zones de faible altitude du sud du Canada, de la Saskatchewan, du Manitoba, de la Nouvelle-Écosse, de l'Ontario, du Québec et de l'Alberta **Pluie verglaçante, tempêtes hivernales** Canada atlantique, Ontario, sud de la Saskatchewan, sud et nord-ouest de l'Alberta, région intérieure du sud-ouest de la Colombie-Britannique **Ouragans, ondes de tempête, élévation du niveau de la mer** Est du Canada (surtout le Canada atlantique), Arctique et Colombie-Britannique **Coulées de boue, glissements de terrain, coulées de débris et avalanches** Rocheuses, Alberta, Colombie-Britannique, Yukon, sud et nord-est du Québec et du Labrador, côte de l'Atlantique, Grands Lacs, rives du Saint-Laurent **Inondations** Nouveau-Brunswick, sud de l'Ontario, sud du Québec et Manitoba **Sécheresse** Prairies, sud du Canada **Feux de friches** Ontario, Québec, Manitoba, Saskatchewan, Colombie-Britannique, Territoires du Nord-Ouest, Yukon	Phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents et plus intenses, glissements de terrain, élévation du niveau de la mer, augmentation de la fréquence des inondations, des périodes de sécheresse et des feux de friches En janvier 2012, un épisode de pluie verglaçante à Montréal a causé 50 accidents de la route, dont un décès[7]; cet épisode est survenu immédiatement après un autre épisode météorologique semblable qui avait causé de nombreux accidents de la route, des hospitalisations et la fermeture de routes[8] Entre 2003 et 2011, on a recensé 60 cas de crue extrême au Canada, ce qui a forcé l'évacuation de 44 255 personnes. En juin 2012, une inondation en Colombie-Britannique a causé un décès, entraîné au moins 350 évacuations, créé des conditions dangereuses pour les déplacements et provoqué la fermeture de routes[9] Entre 2003 et 2011, on a recensé 34 feux de friches qui ont entraîné 113 996 évacuations et causé deux décès lors d'un événement[10]. Les feux de friches qui ont eu lieu à Kelowna (C.-B.) en 2003 ont été mis en cause dans la hausse de 78 % des consultations médicales en raison de problèmes respiratoires par rapport au nombre de visites des années précédentes[11]

Tableau 4 suite à la page suivante

[6] Gosselin *et al.*, 2008b.
[7] CBC *News, Snow, freezing rain causes accidents across Quebec*, 2012, URL <http://www.cbc.ca/news/canada/montreal/story/2012/01/13/weather-montreal.html>
[8] CBC *News, Freezing rain causes havoc on Montreal roads*, 2012, URL <http://www.cbc.ca/news/canada/montreal/story/2011/12/21/freezin-rain-causes-accidents-in-montreal.html>
[9] CBC News, Deadly B.C. *flooding prompts more evacuations, highway closures*, 2012, URL <http://www.theglobeandmail.com/news/british-columbia/deadly-bc-flooding-prompts-more-evacuations-highway-closures/article4368207/>
[10] SPC, 2012.
[11] Ostry. *et al.*, 2010.

Qualité de l'air	**Polluants atmosphériques extérieurs (ozone et particules)** Ontario (région des Grands Lacs), surtout en région urbaine au sud de l'Ontario (p. ex., Toronto), sud du Québec (p. ex., Montréal), Colombie-Britannique (p. ex., Vancouver, vallée du bas Fraser), Alberta (Calgary, Edmonton, Fort McMurray) et Manitoba (p. ex., Winnipeg) **Aéroallergènes (herbe à poux) et pathogènes fongiques** Sud du Québec et sud de l'Ontario, centre et sud de la Saskatchewan (p. ex., Saskatoon) et du Manitoba (p. ex., Winnipeg), Colombie-Britannique	Concentrations d'ozone troposphérique plus élevées, poussière en suspension dans l'air, production accrue de pollens et de spores par les plantes Un réchauffement des températures moyennes au Canada pourrait entraîner une hausse des concentrations d'ozone et ainsi donner lieu à une augmentation générale de 312 décès prématurés[12] Sur l'île de Montréal, près de 40 000 enfants souffrent de réactions allergiques à l'herbe à poux[13]
Contamination des aliments et sécurité de l'eau et des aliments	**Contamination hydrique** Milieux côtiers océaniques et d'eau douce ou bassins versants à l'échelle du Canada vulnérables à l'élévation du niveau de la mer ou à l'exposition aux eaux de ruissellement toxiques ou pathogènes (côte Ouest, côte Est, Arctique, Grands Lacs), régions vulnérables aux périodes de sécheresse (Prairies), ruissellement ou inondations contaminant les eaux de surface ou souterraines (p. ex., zones rurales agricoles, centres urbains) **Contamination alimentaire** Régions agricoles canadiennes (Prairies, Ontario, Québec), régions dont les collectivités sont vulnérables aux pannes d'électricité et aux vagues de chaleur (p. ex., les centres urbains tels que Toronto), régions exposées aux organismes marins toxiques (régions côtières de la Colombie-Britannique et des provinces de l'Atlantique), régions qui dépendent des températures extérieures froides pour conserver leur nourriture (Arctique) **Sécurité des aliments** Arctique et régions agricoles	Contamination accrue de l'eau potable et de l'eau utilisée à des fins récréatives par le ruissellement consécutif à de fortes pluies et prolifération d'algues dans les régions côtières Chaque année, 4 millions de personnes souffrent de maladies d'origine alimentaire au Canada[14]. En 2008, 7 provinces ont été touchées par une éclosion de listériose. Des 57 cas confirmés, 23 décès ont été déclarés (dont 75 % en Ontario)[15] En 2006, 30 % des enfants inuits au Canada ont connu la faim à un moment donné parce que la famille n'avait plus de nourriture ou d'argent pour s'en procurer[16]. En 2007-2008, 9,7 % des ménages canadiens avec enfants ont connu l'insécurité alimentaire[17]
Maladies infectieuses transmises par des insectes, des tiques et des rongeurs	**Maladie de Lyme** Sud et sud-est du Québec, sud et est de l'Ontario, sud-est du Manitoba, Nouveau-Brunswick et Nouvelle-Écosse, sud de la Colombie-Britannique **Virus du Nil occidental** Régions urbaines et semi-urbaines du sud du Québec et du sud de l'Ontario, populations rurales des Prairies, régions rurales et semi-urbaines de la Colombie-Britannique **Encéphalite équine de l'Est** De l'Ontario jusqu'à la Nouvelle-Écosse **Maladies transmises par les rongeurs (p. ex., hantavirus** Colombie-Britannique, Alberta, Saskatchewan et Manitoba, Territoires du Nord-Ouest, Ontario, Québec	Changement de la biologie et de l'écologie de divers insectes, tiques et rongeurs vecteurs de maladies; maturation plus rapide des pathogènes dans les insectes vecteurs de maladie et prolongation de la saison de transmission des maladies On prévoit que les changements climatiques entraîneront une expansion de l'aire de répartition des tiques vectrices de la maladie de Lyme à un rythme accru au cours des dix prochaines années et, par conséquent, une hausse du risque de contracter la maladie de Lyme, surtout dans l'est du Canada[18]
Appauvrissement de l'ozone stratosphérique	Dans certaines régions du Canada : dans les régions situées en haute altitude; dont les surfaces sont hautement réfléchissantes (en Arctique); sans ombre naturelle ou artificielle ni de particules atmosphériques (smog) qui pourraient bloquer les rayons UV (dans les régions rurales); dans le sud du Canada (dans les régions de basse latitude situées près de l'équateur)	Exposition accrue aux rayons UV causée par un changement de comportement humain occasionné par un climat plus chaud Le nombre de nouveaux cas de cancers de la peau sans présence de mélanome est estimé, pour 2008, à 40 000 chez les hommes et à 33 000 chez les femmes. Le nombre de décès est estimé à 160 chez les hommes et à 100 chez les femmes pour cette même année[19]

TABLEAU 4 : Écarts régionaux du point de vue des risques sanitaires et des effets liés aux changements climatiques *(sources : Lemmen et al., 2008; Seguin, 2008; IPSC, 2012; SPC, 2013a).*

[12] Lamy et Bouchet, 2008.
[13] Voir <http://www.santemontreal.qc.ca/fr/healthy-living/healthy-environment/ragweed/>.
[14] Thomas *et al.*, 2013.
[15] Agence de la santé publique du Canada, 2013c.
[16] Meakin et Kurvits, 2009.
[17] Santé Canada, 2013d.
[18] Leighton *et al.*, 2012.
[19] Agence de la santé publique du Canada, 2013d.

Les sections suivantes traitent des populations plus vulnérables aux effets sur la santé des changements climatiques et des facteurs de vulnérabilité à l'échelle régionale, dont il faut tenir compte pour planifier et mettre en œuvre les mesures d'adaptation qui protégeront la santé.

3.1 POPULATIONS À RISQUE

Les effets des changements climatiques menacent la santé de tous les Canadiens. On reconnaît toutefois que les personnes âgées, les enfants et les nourrissons, les personnes défavorisées sur le plan social et économique, les personnes atteintes de maladies chroniques et celles dont le système immunitaire est affaibli, les Autochtones et les résidents des collectivités nordiques et éloignées sont plus à risque (Lemmen *et al.*, 2008; Seguin, 2008; Bernstein et Myers, 2011). Les preuves confirment les conclusions antérieures, selon lesquelles les personnes souffrant de troubles respiratoires sont plus vulnérables aux effets de la pollution atmosphérique, et que les personnes âgées (Frumkin *et al.*, 2008; Balbus et Malina, 2009) et les enfants (Frumkin *et al.*, 2008; Ebi et Paulson, 2010) sont exposés à un risque plus élevé durant les épisodes de chaleur extrême. Les personnes qui consomment l'eau provenant d'un réseau d'alimentation en eau non traitée peuvent également courir un risque plus élevé, en cas de phénomènes météorologiques extrêmes (pluies abondantes et périodes de sécheresse).

Les changements climatiques posent des défis particuliers pour la santé des populations autochtones et des résidents des collectivités nordiques et éloignées en raison des effets sur les sources de nourriture traditionnelle et sur l'alimentation, de la dépendance à la terre et à un régime climatique relativement prévisible et stable, et des répercussions sur la culture (Furgal et Seguin, 2006; Furgal, 2008; Ford *et al.*, 2010a). On observe que les changements climatiques n'ont pas le même effet sur les Canadiens autochtones vivant dans le Nord, dans les réserves des collectivités du sud et en dehors des réserves. Les recherches sur les difficultés propres aux Autochtones vivant dans les collectivités du sud sont rares et d'autres études sont nécessaires pour définir les options d'adaptation.

Les résultats des études des effets sur la santé des phénomènes météorologiques extrêmes (*voir* la section 2.4) confirment que certains groupes sont davantage touchés par ces événements et fournissent de l'information sur la nature des vulnérabilités actuelles (Costello *et al.*, 2009; GIEC, 2012; OMS, 2012b). Par exemple, des données récentes indiquent que les personnes âgées sont plus vulnérables aux tempêtes et aux inondations parce qu'elles sont moins susceptibles d'évacuer leur maison en cas d'urgence, étant donné les fausses alertes déclenchées précédemment, la crainte de voir leur maison pillée ou la perturbation possible de leur routine médicale ou autre (Brunkard *et al.*, 2008). On observe aussi que les répercussions des inondations sont bien plus grandes pour les personnes dont le statut socioéconomique est plus faible et qui sont mal logées, qui ne peuvent remplacer leurs biens (parce qu'elles n'ont pas de couverture d'assurance) et qui n'ont pas accès aux services juridiques et autres (English *et al.*, 2009; Carroll *et al.*, 2010). On a constaté que les locataires risquent d'être moins préparés en cas d'urgence et semblent être plus vulnérables aux inondations (Coulston et Deeny, 2010). On reconnaît de plus en plus la vulnérabilité accrue des gens dont le travail consiste à aider les personnes en détresse lors d'une catastrophe tels les travailleurs de soutien (Carroll *et al.*, 2010), les policiers et les premiers répondants (Neria *et al.*, 2008) ainsi que les fournisseurs de soins de santé et de services sociaux (Hess *et al.*, 2009; Santé Canada, 2011b).

Protéger les groupes les plus à risque de la société contre les effets des changements climatiques exige une bonne compréhension de la sensibilité individuelle et du niveau d'exposition aux risques actuels, et des défis en matière d'adaptation (*voir* le tableau 5), ainsi qu'une connaissance des populations les plus à risque de façon à être en mesure de communiquer avec elles (Maibach *et al.*, 2011).

Des moyens novateurs ont été mis en place pour recenser les populations à risque, afin qu'elles reçoivent de l'aide avant et pendant les situations d'urgence et les catastrophes. Bernier et ses collaborateurs (2009) ont utilisé le traitement analytique spatio-temporel en ligne (SOLAP) pour analyser les données sur les changements climatiques et la vulnérabilité de la santé recueillies dans la ville de Québec. Le SOLAP permet aux décideurs de combiner les images spatiales des systèmes d'information géographique (SIG) avec les analyses complexes et temporelles nécessaires pour comprendre les effets sur la santé des changements climatiques et s'y adapter (Bernier *et al.*, 2009). La ville de Toronto a créé des cartes qui répertorient les zones de vulnérabilité à la chaleur (*voir* la figure 9) en vue de faciliter la mise en œuvre de son système d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur, qu'il s'agisse, par exemple, de communiquer l'information aux services ambulanciers afin qu'ils se préparent à intervenir pendant les journées de chaleur intense, d'appuyer les opérations de porte-à-porte ciblées afin de venir en aide aux personnes en détresse, de rassembler des renseignements favorisant la création de registres d'îlots thermiques ou de déterminer les meilleurs endroits pour ouvrir des centres de rafraîchissement (Bureau de santé publique de Toronto, 2011a).

Groupes vulnérables à la chaleur	Exemples de défis

Adultes plus âgés	• Caractéristiques physiologiques qui peuvent contribuer à accroître la vulnérabilité à la chaleur :
	  • sensation réduite de la soif
	  • niveau de conditionnement physique réduit
	  • capacité de sudation réduite
	  • plus susceptibles de souffrir de déshydratation chronique
	• Déficiences visuelles, cognitives et auditives
	• Difficultés liées à l'agilité et à la mobilité
	• Perceptions différentes des risques et des vulnérabilités d'après les expériences de vie
	• Niveau d'alphabétisation réduit
	• Isolement social

Nourrissons et jeunes enfants	• Caractéristiques physiologiques et comportementales qui peuvent accroître la vulnérabilité à la chaleur :
	  • chaleur corporelle plus élevée durant l'activité physique
	  • gain de chaleur plus rapide si la température de l'air est plus élevée que la température cutanée, en raison du rapport plus élevé entre la surface cutanée et le poids corporel
	  • incapacité d'augmenter le débit cardiaque
	  • sudation plus faible
	• Dépendance à l'égard d'une personne soignante qui reconnaîtra les effets de la chaleur et prendra les mesures recommandées

Personnes et collectivités défavorisées sur le plan social • **Faible revenu** • **Sans-abri** • **Personnes vivant seules**	• Ressources financières limitées pour prendre les mesures de protection appropriées • Accès réduit à de l'eau saine et à des endroits frais • Accès limité aux services de soins de santé et aux services sociaux • Exposition à l'environnement plus élevée (p. ex., sans-abri, personnes vivant aux étages supérieurs d'immeubles sans climatisation) • Taux plus élevés de dépendance à l'alcool et aux drogues • Isolement social

TABLEAU 5 : Exemples de groupes vulnérables à la chaleur et des défis que leur pose l'adaptation aux épisodes de chaleur extrême *(source : extrait modifié tiré de Santé Canada, 2012c)*.

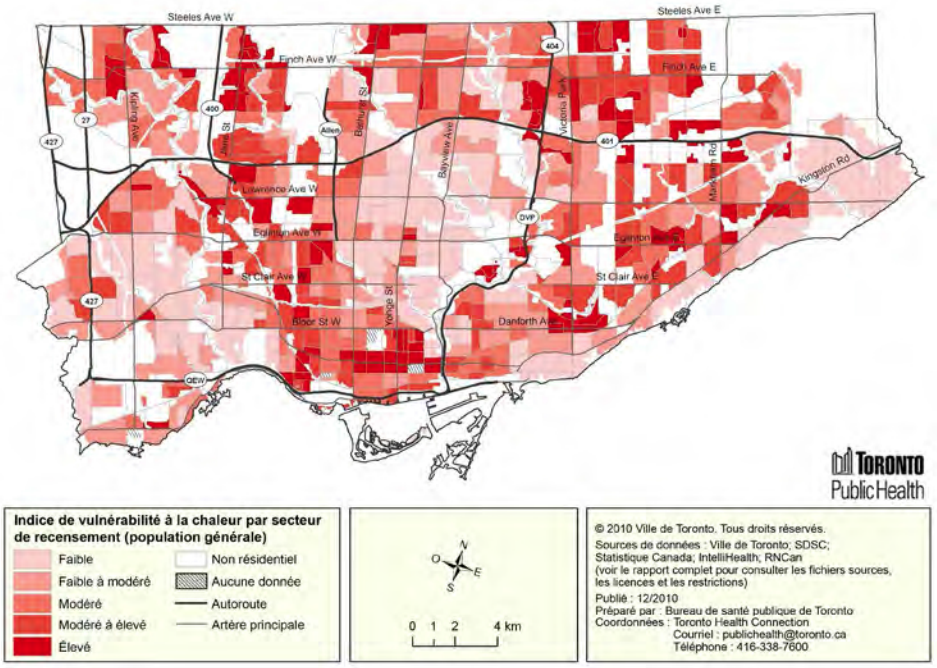


FIGURE 9 : Vulnérabilité à la chaleur à Toronto *(source : Bureau de santé publique de Toronto, 2011a)*.

3.2 COLLECTIVITÉS URBAINES ET RURALES

Le Canada urbain possède des caractéristiques de vulnérabilité propres qui prédisposent les résidents aux effets sur la santé de certains risques climatiques précis tels que l'exposition de la population générale à la chaleur extrême et à la pollution atmosphérique en raison de la densité de population élevée et de la nature de l'environnement bâti. Les villes sont en grande partie recouvertes d'asphalte, un matériau qui retient la chaleur. La densité élevée de la population, les hautes tours et la rareté des espaces verts font également en sorte que les centres urbains sont vulnérables aux épisodes de chaleur extrême (Hess *et al.*, 2009; Ostry *et al.*, 2010; Bambrick *et al.*, 2011; Bureau de santé publique de Toronto, 2011a; Gabriel et Endlicher, 2011; Huang *et al.*, 2011a). Certaines villes canadiennes prennent des mesures pour réduire les risques sanitaires liés au climat. Par exemple, Montréal a mis en place des mesures pour atténuer l'effet d'îlot thermique urbain en adoptant des règlements touchant les toits des maisons neuves ou rénovées et en ajoutant des espaces verts pour réduire le rayonnement solaire et la rétention de la chaleur dans les zones urbaines (Marsden, 2011).

Les risques d'inondation sont plus élevés en ville parce que l'eau ruisselle plus rapidement sur une surface aménagée. Les tempêtes peuvent endommager les routes ou les inonder, causer un trop-plein dans les réseaux d'égouts et inonder les immeubles, ce qui peut entraîner des conditions de transport non sécuritaires, mettre en péril les infrastructures essentielles et nuire à la qualité de l'air intérieur (Rosenzweig *et al.*, 2011). Les risques sont plus élevés dans les villes dont le système de drainage (p. ex., canalisations de déversement et réseaux d'égouts) n'est pas adapté en conséquence (McGranahan *et al.*, 2007). L'exposition aux phénomènes météorologiques extrêmes récurrents qui surviennent tous en même temps, au même endroit, produira des effets cumulatifs qui poseront des risques accrus pour la santé. Aux États-Unis, des températures très chaudes, des conditions de sécheresse et du temps orageux ont déformé les autoroutes, ramolli les pistes d'aéroport, courbé les rails des chemins de fer, réchauffé l'eau de refroidissement des centrales nucléaires et causé des pannes électriques qui ont touché des millions de personnes pendant l'été 2012 (Wald et Schwartz, 2012).

Dans les régions rurales où les moyens de subsistance des résidents sont étroitement liés aux ressources naturelles, les changements climatiques peuvent contribuer au déclin économique, aux perturbations sociales, au déplacement des populations et à d'autres problèmes semblables (Battisti et Naylor, 2009; Friel *et al.*, 2009; Holden, 2009; McLeman *et al.*, 2011; Clarke, 2012). Les collectivités rurales peuvent être davantage exposées à certains types de phénomènes météorologiques extrêmes ou ont peut-être une capacité d'intervention ou un accès plus limité aux services contribuant à protéger les gens (Berry, 2008; Ostry *et al.*, 2010). Par exemple, on note un risque accru de feux de friches et d'inondations dans les régions de l'ouest du Canada infestées par le dendroctone du pin ponderosa, soit une situation susceptible d'avoir des effets importants sur la santé des gens qui habitent dans ces régions rurales (Ostry *et al.*, 2010). Les preuves indiquent également que les terres agricoles inondées et le ruissellement de surface peuvent contaminer les sources d'eau locales et poser des risques pour la santé des populations qui habitent autour ou en aval de celles-ci ou des parcs d'engraissement (Haines *et al.*, 2006; Acharya *et al.*, 2007). Dans de telles situations, le cycle orofécal pose des risques pour la santé des agriculteurs, des ouvriers agricoles, des familles d'agriculteurs et des travailleurs en plein air (Acharya *et al.*, 2007; Du *et al.*, 2010). De manière générale, les collectivités qui consomment l'eau provenant d'un petit réseau d'alimentation en eau potable ou d'un réseau privé qui approvisionne une population de 5000 habitants ou moins peuvent être plus vulnérables aux éclosions de maladies d'origine hydrique (Moffatt et Struck, 2011).

Des sensibilités uniques liées à une réduction des services publics, aux changements démographiques et à la dépendance à l'endroit des ressources naturelles exercent une influence sur la capacité d'adaptation aux changements climatiques des populations rurales (Wall et Marzall, 2006). Le capital social, les réseaux et les compétences variées des collectivités rurales comptent parmi les forces relatives liées à la capacité (Clarke, 2012). Le tableau 6 présente certains facteurs de risques liés à la vulnérabilité de la santé découlant des répercussions des changements climatiques davantage observés dans les collectivités rurales et urbaines.

Principaux facteurs de vulnérabilité	Exemples de caractéristiques urbaines	Exemples de caractéristiques rurales
Exposition • **Géographie** • **Utilisation du sol** • **Climat**	• Infrastructure complexe, densité d'habitation élevée et paysage dominé par des surfaces imperméables • Densité de population plus élevée • Concentrations de polluants atmosphériques plus élevées	• Augmentation des risques sanitaires découlant de la contamination de l'eau en raison d'une dépendance accrue aux petits réseaux d'alimentation en eau potable • Nombre plus élevé de personnes travaillant à l'extérieur • Risque accru d'exposition aux glissements de terrain, aux feux de friches, aux maladies à transmission vectorielle et aux inondations
Sensibilité individuelle • **Âge et sexe** • **État de santé**	• Vieillissement de la population • Maladies cardiovasculaires et respiratoires dans les grands centres urbains causées par la pollution atmosphérique et la chaleur extrême	• Forte proportion de personnes âgées et incidence élevée de maladies chroniques, de tabagisme et d'obésité
Principaux facteurs liés à la capacité d'adaptation • **Statut socioéconomique** • **Services publics et programmes de communication des risques** • **Emploi**	• Nombre plus élevé de groupes de populations à risque élevé, dont la capacité d'adaptation est limitée (p. ex., faible statut socioéconomique) • Niveau élevé d'isolement social et accès limité aux services (p. ex., immigrants, membres des Premières Nations, sans-abri, personnes à faible revenu ou souffrant de troubles mentaux) • Dépendance élevée aux infrastructures essentielles pour la prestation de soins de santé et de services d'urgence qui sont vulnérables aux phénomènes météorologiques extrêmes	• Accès limité aux services pendant les phénomènes météorologiques extrêmes (p. ex., électricité, eau, nourriture et soins médicaux) • Disponibilité limitée des services et programmes publics et des moyens de communication pour transmettre des messages urgents reliés à la santé, et accessibilité limitée à ceux-ci • Forte dépendance à l'égard des ressources naturelles vulnérables aux perturbations causées par les phénomènes météorologiques extrêmes • Proportion plus faible de la population ayant obtenu un diplôme • Moyens de subsistance et diversification économique limités • Ressources et services limités aux fins d'intervention en cas de phénomènes météorologiques extrêmes et de prise en main des responsabilités sanitaires connexes • Accès limité aux services dans les collectivités éloignées

TABLEAU 6 : Caractéristiques urbaines et rurales qui accroissent la vulnérabilité aux changements climatiques et aux effets connexes.

3.3 COLLECTIVITÉS AUTOCHTONES ET NORDIQUES

Les changements climatiques contribuent aux changements sociaux, écologiques et économiques dans le Nord canadien et présentent d'importants risques sanitaires pour les collectivités autochtones (Parkinson 2010a, b; Downing et Ceurrier, 2011; Rylander *et al.*, 2011; The Aspen Institute, 2011; Santé Canada, 2012a). L'exposition aux changements climatiques rapides signifie que les collectivités nordiques devront faire face à des risques accrus liés à la réduction du couvert et de l'épaisseur de la glace de mer et de lac, au dégel du pergélisol, à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête, à l'érosion et aux glissements de terrain, aux régimes climatiques plus imprévisibles, aux épisodes de pluie verglaçante, aux feux de friches, à la diminution de la durée des conditions hivernales et aux étés plus chauds (Ford *et al.*, 2009; Boulton *et al.*, 2011). De telles répercussions posent des risques pour la santé en menaçant la salubrité et la sécurité alimentaires, l'approvisionnement en eau potable, la sécurité de l'eau et de la glace, la disponibilité des médecines traditionnelles et la stabilité de l'infrastructure (Santé Canada, 2012a). Les résidents des régions nordiques affirment que les changements climatiques ont une incidence sur leurs moyens de subsistance, leur rapport avec la terre, leur culture, leur santé mentale et leur bien-être (Ford *et al.*, 2010b; Lemelin *et al.*, 2010; Morse et Zakrison, 2010; Downing et Cuerrier, 2011; Andrachuk et Smit, 2012; McClymont et Myers, 2012).

Les changements climatiques menacent les pratiques alimentaires traditionnelles, comme la chasse et la cueillette. Par exemple, la transformation qui est survenue au chapitre de l'abondance et de la distribution des ressources, les menaces à la sécurité des transports au moment d'y accéder et la hausse des températures mettent en péril la sécurité des pratiques de conservation des aliments (Ford, 2009). Dans la collectivité des Premières Nations de Ross River (Yukon), le dégel précoce, des étés plus chauds et plus longs et une augmentation du nombre de feux de friches perturbent les aires d'alimentation, la répartition et l'abondance des populations de caribous, source de nourriture traditionnelle essentielle (Santé Canada, 2012f). Le développement des ressources, également touché par les changements climatiques, intensifie les effets sur les troupeaux de caribous (*voir* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*). Ces effets cumulatifs peuvent se répercuter sur la durabilité de l'habitat, entraîner une bioaccumulation de contaminants et, en fin de compte, menacer la salubrité alimentaire (Santé Canada, 2012a). Une étude sur la sécurité alimentaire réalisée dans le nord du Manitoba a permis de constater que l'amincissement de la couverture de glace causé par le réchauffement hivernal a eu une incidence sur le transport des marchandises, ce qui a provoqué une pénurie d'aliments sains dans la plupart des 25 collectivités nordiques de la province (Centre autochtone de ressources environnementales, 2006). À Iqaluit, au Nunavut, bon nombre de personnes préfèrent s'approvisionner en eau potable grâce aux méthodes traditionnelles, dans les rivières, les ruisseaux, les étangs et les lacs et à partir d'icebergs et de glace de mer, plutôt qu'à partir d'un réseau d'aqueduc. Cependant, ces ressources d'eau douce risquent d'être contaminées par les toxines qui pourraient être libérées en raison du dégel du pergélisol ainsi que de la migration nordique des animaux et des plantes transportant des pathogènes d'origine hydrique (Santé Canada, 2012d).

La dépendance envers les produits de subsistance, le niveau élevé de pauvreté, les capacités de surveillance et d'alerte rapide limitées, l'accès limité aux renseignements sur la santé, au diagnostic et au

traitement de maladies liées au climat, les contraintes liées aux secteurs de compétence et aux ressources et l'inégalité font partie des caractéristiques qui ont pour effet d'accroître la vulnérabilité des systèmes de santé autochtones aux changements climatiques (Ford *et al.*, 2010a). La moyenne d'âge (l'âge moyen de la population inuite est de 22 ans) et le niveau d'éducation relativement faible de la population, seuls 25 % des étudiants obtiennent un diplôme d'études secondaires, posent des défis au chapitre de la capacité d'adaptation (Statistique Canada, 2011). De plus, l'amélioration de l'accès aux logements n'a pas réglé les problèmes liés à la croissance démographique dans le Nord (Owens *et al.*, 2012). L'instabilité du sol causée par la dégradation du pergélisol et l'érosion côtière contribuent à la détérioration d'un grand nombre d'infrastructures dans cette région (Allard et Lemay, 2012).

3.4 LOCALITÉS CÔTIÈRES

Malgré le fait que le tiers des localités côtières canadiennes présentent une vulnérabilité modérée à élevée à l'élévation du niveau de la mer (Shaw *et al.*, 1998), relativement peu de recherches ont été menées sur les répercussions sanitaires et l'adaptation aux changements climatiques dans les régions côtières du Canada (Dolan *et al.*, 2005; Dolan et Walker, 2006). On observe des risques sanitaires et des vulnérabilités uniques dans les localités côtières. En effet, on prévoit que les effets combinés de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête plus dévastatrices et plus fréquentes, des conditions changeantes de la glace marine et du dégel du pergélisol causeront un ensemble de perturbations socioéconomiques et environnementales qui se répercuteront sur la santé. Certaines collectivités côtières se sont développées en région nordique, ou sont de petite taille et situées en région éloignée; elles sont toutefois toutes concernées par certains facteurs précis qui rendent ces types de collectivités vulnérables.

Les changements climatiques ont des répercussions sur la santé dans les régions côtières. La perte de terre provoquée par l'élévation du niveau de la mer, les inondations et l'érosion, de même que les changements de la biodiversité, qui se répercutent sur l'utilisation des ressources naturelles et les cultures, entraînent le déplacement des populations et une perturbation sur le plan social. Les tempêtes et le changement de l'état des glaces qui se répercutent sur la sécurité de l'eau, la sécurité au travail et les possibilités économiques, ainsi que les modifications du paysage, qui ont une incidence sur la répartition et la quantité de pollution biotique et abiotique dans l'environnement, peuvent aussi menacer la santé et la sécurité des populations (Dolan et Walker, 2006; Hess *et al.*, 2008; Rosenzweig *et al.*, 2011; Gouvernement de la Colombie-Britannique, 2012).

L'exposition aux phénomènes météorologiques extrêmes accroît la vulnérabilité des collectivités côtières aux changements climatiques (Dolan et Ommer, 2008). Par exemple, en 2010, l'ouragan Igor a perturbé les services d'intervention en cas d'urgence et les services de soins de santé d'urgence, en plus d'entraîner le déplacement de familles à Terre-Neuve-et-Labrador (Sécurité publique Canada, 2013b). Ainsi, 90 collectivités se sont retrouvées isolées, 22 ont déclaré l'état d'urgence, 300 familles ont été évacuées et une personne est décédée (Sécurité publique Canada, 2013b). Les grandes marées combinées aux pluies abondantes ont accru les risques d'inondation dans les collectivités des régions deltaïques, comme cela a été observé sur l'île de Vancouver, en 2009, lorsqu'une importante inondation a forcé la région à déclarer l'état d'urgence à l'échelle locale; 50 maisons ont été détruites et près de 900 personnes (300 maisons) ont été évacuées (Sécurité publique Canada, 2013c).

La dépendance aux ressources environnementales et les conditions socioéconomiques changeantes peuvent accroître la vulnérabilité des localités côtières aux effets sur la santé des changements climatiques (Dolan et Ommer, 2008). Par exemple, le niveau de production du saumon rouge dans le fleuve Fraser est en déclin, en raison des tendances qu'accusent les températures de l'eau (*voir* le chapitre 4 – *Production alimentaire*). Cette situation peut avoir des répercussions économiques et culturelles importantes sur les Canadiens, surtout en Colombie-Britannique (Hinch et Martins, 2011)[20].

Certaines villes de la côte Ouest, qui dépendaient des ressources forestières et des pêches, dépendent de plus en plus du tourisme et de l'aquaculture pour donner de l'emploi et toucher des revenus fiscaux. D'autres villes ont connu un déclin à mesure que la population s'est déplacée pour trouver du travail (Dolan et Ommer, 2008). Dans les localités côtières éloignées, la vulnérabilité est accrue par l'isolement social et le déclin du capital humain, causés en partie par la tendance à la migration urbaine (Frumkin *et al.* 2008). Les pressions liées à la migration et à l'aménagement du littoral viendront peut-être intensifier les futurs effets (McGranahan *et al.*, 2007; Rosenzweig *et al.*, 2011; GIEC, 2012). Les changements climatiques peuvent aussi présenter de nombreux avantages pour les collectivités côtières du moment que les changements liés à l'accès aux ressources naturelles et à leur utilisation créent de nouvelles possibilités économiques dans les secteurs de la pêche, du tourisme et de l'agriculture (Bigano *et al.*, 2008; Lemmen *et al.*, 2008; Organisation mondiale du tourisme, 2008; Sumaila *et al.*, 2011; *voir aussi* le chapitre 4 – *Production alimentaire*, et le chapitre 5 – *Industrie*).

Les ministères ou organismes ne faisant pas partie du réseau des services de santé publique, comme le ministère de l'Environnement, conçoivent habituellement à l'intention des localités côtières des plans d'adaptation précis qui font l'objet d'études ou de recherches, ou qui sont mis en œuvre. De telles initiatives ne tiennent pas souvent compte de la santé, mais certaines exceptions existent, comme c'est le cas dans le Nord canadien où l'on a mis en œuvre des programmes qui concernent la sécurité des aliments traditionnels et la santé (Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, 2008).

[20] Entre 1988 et 1998, la valeur totale au débarquement de la pêche commerciale du saumon en Colombie-Britannique est passée de 410 millions de dollars à 55 millions de dollars. Cette situation a eu une incidence sur le niveau de vie des gens qui dépendent de cette ressource (Dolan et Ommer, 2008).

4. GÉRER LES RISQUES SANITAIRES LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

« La plupart des effets possibles des changements climatiques sur la santé [...] peuvent être évités en renforçant les principales fonctions du système de santé et en améliorant la gestion des risques associés aux changements climatiques. » *[traduction] (OMS, 2012b, page V)*

À mesure que le climat continue de changer et que les effets sur la santé sont de plus en plus évidents (Costello *et al.*, 2009), il est nécessaire d'élaborer des plans d'adaptation afin de réduire les risques croissants pour les populations et les collectivités à risque (McMichael *et al.*, 2008; OMS, 2008; Ebi, 2009; Paterson *et al.*, 2012). L'Association médicale canadienne (2010) a invité les autorités sanitaires à aborder les effets des changements climatiques au Canada dans cinq domaines :

- l'éducation et le renforcement des capacités;
- la surveillance et la recherche;
- la réduction du fardeau de la maladie pour atténuer les effets des changements climatiques;
- la préparation aux situations d'urgence liées au climat; et
- la lutte contre les changements climatiques.

Une adaptation réussie nécessite une collaboration intersectorielle (p. ex., santé, environnement, planification, transport, infrastructure) afin de surveiller les résultats sur la santé liés aux changements climatiques, aborder les causes profondes qui limitent la préparation (p. ex., la pauvreté), repérer les populations à risque, réduire les incertitudes en menant des recherches approfondies sur les effets, renseigner le public et les décideurs sur les catastrophes possibles et les avantages liés à la préparation, et financer les mesures nécessaires (Seguin, 2008; OMS, 2010; Ebi, 2011; Frumkin, 2011). Les mesures d'adaptation sont très efficaces lorsqu'elles maximisent les avantages mutuels relativement aux préoccupations en matière de santé, comme, par exemple, l'augmentation du capital social ou l'amélioration de l'aménagement urbain (Cheng et Berry, 2012), et qu'elles sont intégrées aux programmes et aux plans existants.

4.1 MESURES ET STRATÉGIES D'ADAPTATION VISANT À PROTÉGER LA SANTÉ

On constate que la compréhension des options d'adaptation que peuvent choisir les responsables de la santé publique et de la gestion des urgences pour renforcer la résilience s'est accrue (Ebi *et al.*, 2012; Paterson *et al.*, 2012), même si les données sur la réussite en matière d'adaptation sont peu nombreuses (Lesnikowski *et al.*, 2011). Le tableau 7 présente les mesures cernées lors d'études récentes, qui peuvent être adoptées en vue de contrer les risques sanitaires liés aux changements climatiques, et se fonde sur la liste des mesures d'adaptation du secteur de la santé publique présentée par Seguin (2008)[21]. Les nouveaux secteurs d'intervention en matière d'adaptation privilégiés par les responsables de la santé publique et les chercheurs comprennent :

- l'évaluation de la vulnérabilité des populations à risque élevé (*voir* la section 4.2.1);
- les mesures permettant de contrer les effets secondaires sur la santé des risques climatiques tels les effets psychosociaux (*voir* l'étude de cas 3);
- le recours aux nouvelles technologies en vue de faciliter l'adoption de comportements adaptatifs individuels (p. ex, installation d'appareils automatisés dans les voitures pour mesurer la profondeur de l'eau [Fitzgerald *et al.*, 2010] ou dispositifs de détection précoce de glissements de terrain);
- des avis destinés aux fournisseurs de soins de santé concernant les mesures pouvant être prises pour réduire les risques sanitaires liés au climat;
- des plans de gestion des urgences adaptés afin d'améliorer la résilience des établissements de soins de santé aux changements climatiques; et
- la définition de mesures préventives visant à réduire les expositions dangereuses avant l'apparition de problèmes de santé (p. ex., développement d'infrastructures, comme les toits verts, auxquelles on a recours dans le but de réduire l'effet d'îlot thermique urbain).

[21] Consultez les pages 479–481 de l'ouvrage intitulé *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada* (Seguin, 2008) disponible à l'adresse : <http://publications.gc.ca/collections/collection_2008/hc-sc/H128-1-08-528F.pdf>

Chaleur extrême et pollution atmosphérique	
Effets	**Mesures d'adaptation**
Effets sur la santé liés aux températures plus élevées, à l'accroissement de la fréquence et de la gravité des vagues de chaleur et à l'augmentation du niveau de pollution atmosphérique	• Climatisation (Frumkin *et al.*, 2008; Balbus et Malina, 2009; Bedsworth et Hanak, 2010; Bambrick *et al.*, 2011), mais il faut d'abord étudier d'autres solutions, car cette mesure peut contribuer aux changements climatiques et à la pollution atmosphérique, en raison d'un plus grand recours aux combustibles fossiles (Ayres *et al.*, 2009; Maller et Strengers, 2011; Santé Canada, 2012c) • Parc de logements de meilleure qualité, infrastructure appropriée (Frumkin *et al.*, 2008; Ayres *et al.*, 2009; English *et al.*, 2009) en mesure de capter l'énergie et de recycler l'eau (Bambrick *et al.*, 2011) • Aménagement des infrastructures, p. ex., toits verts, surfaces réfléchissantes sur les routes et les immeubles, espaces verts urbains, étanchéité intérieure et utilisation d'un enduit de couverture à base d'élastomère (Huang *et al.*, 2011a; Maller et Strengers, 2011; Santé Canada, 2012c) • Campagnes de sensibilisation et d'information destinées au public dans le but de promouvoir les mesures de protection personnelle contre la pollution atmosphérique (p. ex., Cote air santé – CAS; Haines *et al.*, 2006; Seguin, 2008; Bedsworth et Hanak, 2010) et la réduction de l'utilisation des démarreurs à distance (Bélanger *et al.*, 2009) • Évaluations de la vulnérabilité des régions et des populations à risque élevé (Ostry *et al.*, 2010; Santé Canada, 2011a; Santé Canada, 2012c) • Attention des médecins accordée aux patients vulnérables, évaluations pré-estivales de la vulnérabilité, conseils sur les soins courants, renseignements sur les risques sanitaires et les comportements appropriés (Ayres *et al.*, 2009; Ebi et Paulson, 2010; Santé Canada, 2011b) • Conception et utilisation de cartes de vulnérabilité afin de cibler les populations à risque (Hess *et al.*, 2009; Santé Canada, 2011a) • Promotion du développement du capital social (Bambrick *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2011b)
Feux de friches	
Effets	**Mesures d'adaptation**
Contacts plus fréquents avec les incendies, les fronts et les évacuations	• Éviter de construire dans des endroits à risque (Bedsworth et Hanak, 2010) • Possibilité de se procurer des vêtements appropriés et accès aux abris contre le feu (p. ex., abris fortifiés) et à l'équipement (p. ex., masque de filtration des particules) dans les zones à risque élevé (Künzli *et al.*, 2006; Johnston, 2009) • Prévention des infections, surveillance des maladies et hébergement temporaire approprié (Johnston, 2009)
Hausse du niveau de pollution atmosphérique	• Déménagement vers des endroits où l'air est sain, comme des bureaux, des bibliothèques, etc. (Johnston, 2009) • Recours à la climatisation (Künzli *et al.*, 2006), particulièrement aux climatiseurs à cycle réversible réglés pour filtrer les particules (Johnston, 2009; voir la réserve émise ci-dessus) • Éviter la pratique d'exercice dans les milieux touchés (Johnston, 2009) • Passer moins de temps à l'extérieur (Künzli *et al.*, 2006) • Porter des masques à air (Künzli *et al.*, 2006)
Sécheresse	
Effets	**Mesures d'adaptation**
Disponibilité et qualité de l'eau réduites	• Distribution de documents de sensibilisation du public, diffusion de messages de service public et programmes d'éducation populaire (Morrissey et Reser, 2007; Wheaton *et al.*, 2008; Bonsal *et al.*, 2011; Wittrock *et al.*, 2011) • Déplacement physique des personnes et des familles vers des zones non touchées par la sécheresse (Wittrock *et al.*, 2011) • Programmes de santé mentale donnés dans les écoles des régions rurales, participation d'adultes de confiance qui comprennent les effets de la sécheresse, détection précoce des problèmes de santé mentale et recommandations (Carnie *et al.*, 2011; Hart *et al.*, 2011) • Formation sur les mécanismes d'adaptation (Morrissey et Reser, 2007)
Disponibilité réduite et hausse des coûts des fruits et des légumes frais (pour les consommateurs)	• Avancées technologiques en vue d'accroître la production dans de nouvelles conditions climatiques (Frumkin *et al.*, 2008) • Amélioration du réseau de distribution de produits alimentaires (Frumkin *et al.*, 2008)
Hausse du nombre de pathogènes d'origine hydrique et de la contamination de l'eau	• Avis d'ébullition d'eau (Wittrock *et al.*, 2011) • Surveillance des éclosions de gastro-entérite (Horton *et al.*, 2010)
L'augmentation du nombre d'épisodes de sécheresse et la hausse des températures favorisent l'apparition de maladies à transmission vectorielle	• Sensibilisation du public (Frumkin *et al.*, 2008) • Suppression des vecteurs (p. ex., pulvérisation anti-moustiques; Frumkin *et al.*, 2008) • Prophylaxie et traitement médicaux (Frumkin *et al.*, 2008) • Vaccins (Frumkin *et al.*, 2008)

Tableau 7 suite à la page suivante

Inondations	
Effets	**Mesures d'adaptation**
Effets de l'augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations sur la santé physique et mentale	• Normes de construction d'infrastructures et d'immeubles dans les zones à risque adaptées en fonction des inondations (p. ex., ponts et routes en remblai plus élevés, système d'alimentation électrique d'urgence résistant à l'eau; Fundter *et al.*, 2008; Du *et al.*, 2010; FitzGerald *et al.*, 2010) • Réseaux d'alerte rapide activés en fonction des prévisions d'inondations, de glissements de terrain et d'inondations riveraines et côtières (Alfieri *et al.*, 2012) • Plans d'évacuation en cas d'inondation, principalement pour les centres d'hébergement, les hôpitaux et les écoles (Hayes *et al.*, 2009; Jonkman *et al.*, 2009; Bedsworth et Hanak, 2010) • Conception et choix d'emplacements adéquats pour les infrastructures sanitaires (Du *et al.*, 2010) • Évaluation de la résilience des établissements de santé aux effets des changements climatiques (Paterson *et al.*, 2013) • Renseignements sur les risques sanitaires et les comportements adéquats transmis par les médecins (Ebi et Paulson, 2010) • Cartographie des populations situées dans des zones à risque élevé du point de vue des crues (période de récurrence de 100 ans et de 500 ans; English *et al.*, 2009) • Surveillance des maladies qui apparaissent après les inondations (Fewtrell et Kay, 2008) • Installation d'appareils automatisés dans les voitures pour mesurer la profondeur de l'eau (FitzGerald *et al.*, 2010) et dispositifs de détection précoce de glissements de terrain • Services de santé mentale en cas de catastrophes tenant compte du statut socioéconomique, du mode de subsistance, des traditions locales, de la culture et de la langue (Du *et al.*, 2010) • Réunion de famille immédiate et soutien, à savoir dans le cas de familles ayant été séparées pendant une catastrophe (Ebi et Paulson, 2010)
Augmentation des moisissures et des contaminants associés aux maladies respiratoires provenant de moisissures, de bactéries et de proliférations fongiques sur les structures humides	• Inspection des systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (CVCA) par un professionnel après une inondation (US CDC, 2012) • Assèchement des maisons à l'aide de ventilateurs ou de déshumidificateurs, lorsque le danger est passé, ou en ouvrant les portes et les fenêtres (US CDC, 2012)
Zoonoses et maladies à transmission vectorielle	
Effets	**Mesures d'adaptation**
Propagation des maladies à transmission vectorielle et des zoonoses, y compris les maladies exotiques	• Mise au point de nouveaux mécanismes de surveillance (Ogden *et al.*, 2011; Koffi *et al.*, 2012) • Diffusion de renseignements à l'intention des responsables de la santé publique et du public (Agence de la santé publique du Canada, 2013a) • Outils de prise de décisions axées sur le risque pour la gestion (c.-à-d. surveillance, prévention et lutte) des zoonoses ou des maladies à transmission vectorielle émergentes et récurrentes (p. ex., analyse décisionnelle multicritères; Hongoh *et al.*, 2011), établissement de l'ordre de priorité des zoonoses et des maladies à transmission vectorielle en vue de l'adoption de mesures de santé publique (Cox *et al.*, 2012; Ng et Sargeant, 2012) et prévision de la progression du virus du Nil occidental en fonction de la météo (Wang *et al.*, 2011)
Qualité des aliments et de l'eau	
Effets	**Mesures d'adaptation**
Contamination accrue de l'eau et augmentation du nombre de maladies d'origine hydrique, contamination des aliments	• Protocoles de gestion des risques liés aux produits chimiques et aux contaminants (Du *et al.*, 2010) • Surveillance des éclosions d'algues toxiques (Haines *et al.*, 2006; English *et al.*, 2009) • Avis d'ébullition d'eau (Haines *et al.*, 2006) • Élargissement du système de récupération d'eau pour compenser la réduction de l'offre, l'augmentation de la demande, ou les deux (Water Research Foundation, 2013) • Amélioration ou élargissement des régimes de traitement de l'eau (Water Research Foundation, 2013) • Adoption de sources d'énergie de remplacement dans les usines de traitement de l'eau (p. ex., diversifier les sources d'énergie, ajouter des pompes à haut rendement énergétique; Water Research Foundation, 2013) • Établissement de régimes de cogestion avec les distributeurs d'électricité (Water Research Foundation, 2013) • Abandon ou amélioration des infrastructures hydrauliques à risque (Water Research Foundation, 2013)

TABLEAU 7 : Mesures d'adaptation visant à réduire les risques sanitaires liés aux répercussions des changements climatiques.

4.2 ADAPTATION DU SECTEUR DE LA SANTÉ AU CANADA

Une comparaison à l'échelle internationale des activités d'adaptation du secteur de la santé parmi les pays développés[22] énumérés à l'annexe 1 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a permis de constater que le Canada est en avance sur plusieurs pays en ce qui concerne les efforts visant à protéger la santé contre les effets des changements climatiques. Le Canada se classe notamment parmi les principaux pays du monde en ce qui concerne le nombre de recherches menées sur la vulnérabilité aux effets des changements climatiques et les options d'adaptation dans le secteur de la santé. Il fait également partie des quelques pays qui reconnaissent les vulnérabilités des groupes autochtones et qui établissent à leur intention des options d'adaptation précises (Lesnikowski *et al.*, 2011). Aux fins du présent chapitre, on a analysé les efforts d'adaptation en matière de santé à l'échelle fédérale, provinciale, territoriale et locale, au niveau de l'évaluation des vulnérabilités, de la préparation aux effets des changements climatiques et de la communication des risques sanitaires aux Canadiens. Cette analyse n'a pas permis de dresser une liste exhaustive de toutes les mesures d'adaptation locales et régionales (p.ex., surveillance des maladies infectieuses, programmes de gestion des urgences), ni d'évaluer en détail la situation relative à l'adaptation du secteur de la santé au Canada. Par contre, cet examen a permis de mettre en évidence des renseignements que les collectivités pourraient utiliser en vue d'établir l'ordre de priorité, de choisir les approches adaptées et de les mettre en œuvre d'une manière durable, en complémentarité avec les programmes existants, de manière à protéger et à améliorer la santé dans leurs régions respectives. Le reste de la section présente les principales constatations de l'examen.

4.2.1 ÉVALUATION DES RÉPERCUSSIONS ET DES VULNÉRABILITÉS

Les évaluations des changements climatiques et des risques sanitaires aident les responsables de la santé publique à cerner les populations à risque dans leur collectivité et leur région, à évaluer l'efficacité des mesures d'intervention et des programmes actuels, à proposer des mesures supplémentaires pour faire face aux changements climatiques, à renforcer les capacités dans le but de se donner les moyens d'intervenir et à fournir des données de référence grâce auxquelles il est possible de surveiller les progrès en matière d'adaptation (Clarke et Berry, 2011; Santé Canada, 2011a; OMS, 2012b). L'Organisation mondiale de la santé a récemment publié de nouvelles lignes directrices relatives à l'évaluation des vulnérabilités aux changements climatiques et aux options d'adaptation (OMS, 2012b), et Santé Canada a publié des lignes directrices relatives à l'évaluation de la vulnérabilité des collectivités et des personnes à la chaleur extrême (Santé Canada, 2011a; *voir* la figure 10).

De telles évaluations reposent sur des données de suivi et de surveillance, qui illustrent les tendances des effets sur la santé associés à la variabilité et aux changements climatiques. Des lacunes au niveau des données disponibles existent en ce qui concerne de nombreux effets liés aux changements climatiques qui préoccupent les Canadiens (*voir* la section 2.0). L'étude de Cheng et Berry (2013) a permis de définir une gamme d'indicateurs de changements climatiques et de santé pouvant être utilisés par les autorités sanitaires en vue d'assurer le suivi des effets sur la santé au fil du temps.

À l'heure actuelle, peu d'autorités sanitaires à l'échelle régionale et locale ont mené des évaluations de la vulnérabilité en matière de santé liée aux changements climatiques. Une analyse des effets possibles des changements climatiques sur la santé a été entreprise en Colombie-Britannique (Ostry *et al.*, 2010) et au Québec (Gosselin, 2010). Dans le

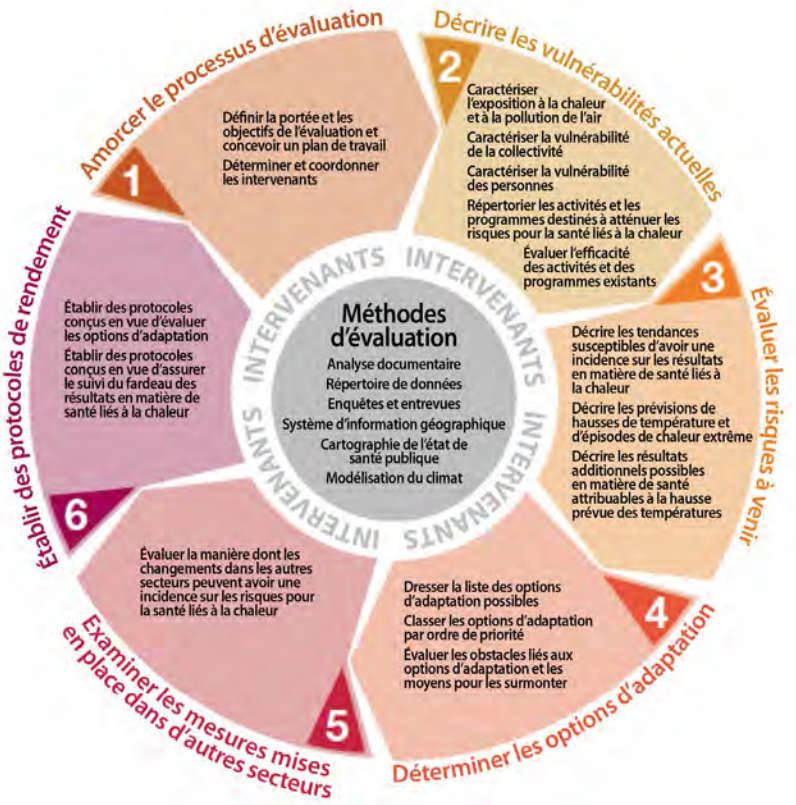


FIGURE 10 : Étapes de l'évaluation de la vulnérabilité en matière de santé liée à la chaleur extrême *(source : Santé Canada, 2011a)*.

[22] Pour consulter la liste des pays énumérés dans l'annexe 1 de la CCNUCC, voir le site Web à l'adresse : http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/annex_i/items/2774.php.

document *Faire face au changement climatique : stratégie d'adaptation et plan d'action de l'Ontario 2011 - 2014*, on reconnaît que les périodes de chaleur extrême constituent un des principaux enjeux sanitaires et on s'est engagé à mettre au point un outil servant à évaluer la vulnérabilité à la chaleur (Gouvernement de l'Ontario, 2011). À l'échelle locale, le bureau de santé publique de Peel (Ontario) s'est fondé sur les nouvelles lignes directrices de l'OMS pour mener une évaluation de la vulnérabilité en matière de santé (Pajot et Aubin, 2012), qui contribuera à la mise en œuvre de la stratégie d'adaptation aux changements climatiques de la région de Peel (Région de Peel, 2011). En outre, certaines autorités sanitaires et leurs partenaires ont entrepris ou entreprennent actuellement des projets de recherche qui contribueront à accroître le niveau de connaissances dans le domaine des vulnérabilités à certains effets sur la santé à l'échelle locale (p. ex., Gosselin, 2010; Kosatsky, 2010; Bureau de santé publique de Toronto, 2011a, b). L'expertise sur les enjeux relatifs aux changements climatiques et à la santé se développe et bon nombre d'universités et d'organismes canadiens entreprennent des recherches dans ce domaine.

4.2.2 SE PRÉPARER AUX RÉPERCUSSIONS

Pour protéger la santé contre les effets des changements climatiques, il faut systématiquement les prendre en considération à toutes les étapes des activités d'évaluation et de gestion des risques (Kovats *et al.*, 2009; Clarke et Berry, 2011). L'intégration est fondée sur une adaptation « variable » et un apprentissage institutionnel qui tiennent compte des risques pour la santé, des surprises climatiques et des vulnérabilités, aussi bien individuelles que collectives (New York Panel on Climate Change, 2010; Ebi, 2011; Hess *et al.*, 2011). L'intégration vise à réduire les redondances et les contradictions entre les mesures d'intervention actuelles des services de santé publique et les nouvelles mesures d'adaptation adoptées pour faire face aux changements climatiques (Haq *et al.*, 2008).

L'orientation stratégique la plus importante du document intitulé *Le Québec en action – vert 2020 : stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020*, qui intègre l'adaptation aux changements climatiques à l'administration gouvernementale en modifiant, au besoin, le contenu des lois, des règlements, des stratégies, des politiques et des outils de planification (Gouvernement du Québec, 2012), figure parmi les signes d'intégration aux politiques, instruments réglementaires et outils de planification provinciaux et territoriaux observés. Au Nunavut, le plan d'adaptation aux changements climatiques invite tous les ministères et organismes à intégrer « [...] les projections, les impacts et les pratiques exemplaires liés aux changements climatiques à tous les paliers de leurs processus de prise de décisions, permettant de mettre en œuvre une réponse globale aux changements climatiques » (Gouvernement du Nunavut, date inconnue). Une étude menée en Ontario révèle des preuves d'adaptation obtenues grâce à l'intégration des changements climatiques aux programmes de santé publique existants (Paterson *et al.*, 2012). Outre les mesures prises par le gouvernement, on observe que le Bureau d'assurance du Canada s'affaire à mettre au point un outil d'évaluation des risques à l'échelle municipale qui peut aider les décideurs de la collectivité à utiliser les données sur les changements climatiques en vue d'évaluer les vulnérabilités des infrastructures aux inondations prévues (Bureau d'assurance du Canada, 2013; *voir aussi* l'étude de cas 2, chapitre 5).

D'autres initiatives contribuent également à réduire les risques sanitaires liés aux changements climatiques. De nombreuses autorités sanitaires ont recours aux systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur (SAIC), aux activités de surveillance du niveau de pollution atmosphérique et aux programmes de sensibilisation de la population aux maladies à transmission vectorielle, ce qui aide à gérer une gamme de répercussions liées aux changements climatiques (Berry, 2008). Par exemple, le Manitoba, le Québec et la Nouvelle-Écosse se sont dotés d'un SAIC, alors que l'Alberta s'apprête à le faire. Les autorités sanitaires en Ontario collaborent afin de maximiser l'efficacité et l'intégration des systèmes locaux. En outre, certaines activités qui n'avaient pas été mises en œuvre dans l'optique de protéger la santé, comme le plan d'intervention en cas de sécheresse élaboré par l'Inter-Agency Drought Working Group de la Colombie-Britannique (Gouvernement de la Colombie-Britannique, 2010), peuvent indirectement contribuer à améliorer la santé et le bien-être et, par conséquent, aider à atténuer les effets des changements climatiques.

On a élaboré de nouvelles stratégies et de nouveaux outils pour faciliter les efforts visant à aider les groupes à risque au Canada et à améliorer la compréhension des options d'adaptation à l'échelle individuelle et collective. Le document intitulé *Building community resilience to disasters: a roadmap to guide local planning* (*voir* le tableau 8) en est un exemple. Il présente des activités que les responsables de la santé publique et de la gestion des urgences peuvent entreprendre en vue d'aider les collectivités à se rétablir plus rapidement après une catastrophe et à résister à des phénomènes météorologiques plus violents à l'avenir.

Motif	Activités
Bien-être	Garantir l'accès préventif aux services de santé et la continuité des soins après un incident
Accès	Offrir des « premiers soins psychologiques » ou prendre d'autres mesures d'intervention en matière de santé psychologique ou comportementale tout de suite après une catastrophe
Sensibilisation	Renforcer la capacité d'adaptation aux situations difficiles et le bien-être psychologique en élaborant des campagnes de santé publique axées sur ces messages
Mobilisation	Renforcer la capacité des organismes de services sociaux et bénévoles (c.-à-d. les organismes non gouvernementaux), afin qu'ils puissent à leur tour mobiliser les citoyens et les inciter à participer à une action collective en vue de régler un problème (comme un projet de développement ou de service communautaire)
Autosuffisance	Concevoir des programmes qui reconnaissent le rôle essentiel que les citoyens peuvent et doivent jouer en tant que « premiers répondants », afin d'aider leur famille et leurs voisins durant les heures et les jours qui suivent une catastrophe
Partenariat	Mobiliser les organismes établis et locaux (p. ex., groupes culturels, civiques et religieux, écoles et entreprises), ainsi que les réseaux sociaux aux fins de diffusion de renseignements concernant les préparatifs d'urgence et de distribution de matériel
Qualité	S'assurer que tous les plans d'intervention en cas d'urgence contiennent des éléments de données communs (p. ex., points de repère pour les opérations en cas de catastrophe), dans le but de faciliter le suivi et l'évaluation intégrés de l'état de la santé, de la santé comportementale et des services sociaux avant, pendant et après un incident
Efficacité	Élaborer des politiques sur la gestion efficace des dons et communiquer des directives claires à ce sujet

TABLEAU 8 : Exemples d'activités destinées à renforcer la résilience des collectivités en cas de catastrophes *(source : Rand, 2011)*.

La hausse des températures dans certaines régions peut contribuer à la pollution de l'air et, par conséquent, nuire aux efforts déployés pour en améliorer la qualité (Kleeman *et al.*, 2010; Union of Concerned Scientists, 2011). Les résultats décrits dans le présent chapitre tendent à montrer que cela pourrait être le cas au Canada (*voir* la section 2.1.2). Il est possible d'obtenir des avantages indirects importants au niveau de la santé au moyen d'efforts ciblés en vue de réduire les émissions de GES (Frumkin et McMichael, 2008; Haines *et al.*, 2009; Kjellstrom et Weaver, 2009) et de s'adapter aux effets des changements climatiques (Rosenzweig *et al.*, 2011). Par exemple, on obtiendra des avantages immédiats au chapitre de la santé en favorisant les moyens de transport actif et le transport en commun rapide, lesquels sont susceptibles de contribuer à la réduction des émissions de GES, des contaminants atmosphériques et de l'effet d'îlot thermique urbain. Cette mesure permettra d'enfreindre l'apparition d'une vaste gamme de maladies associées à l'inactivité physique et à l'exposition à la pollution atmosphérique chez la population (Environnement Canada, 2002; Frumkin et McMichael, 2008; Haines *et al.*, 2009; Cheng et Berry, 2012; OMS, 2012b).

Bon nombre de provinces et de territoires établissent un lien entre les efforts déployés en vue de réduire les émissions de GES et ceux déployés dans le but de s'adapter aux changements climatiques en améliorant la qualité de l'air. Par exemple, le Plan d'action sur les changements climatiques 2007-2012 du Nouveau-Brunswick contient des mesures à mettre en place, comme les campagnes de sensibilisation du public destinées à réduire la marche au ralenti des véhicules, en vue de réduire les émissions de GES et de protéger la santé et l'environnement (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, date inconnue). Le plan d'action sur les changements climatiques de la Nouvelle-Écosse propose des mesures pour réduire et surveiller les émissions de GES, y compris la Cote air santé (CAS), afin de protéger la santé humaine contre la pollution atmosphérique (Gouvernement de la Nouvelle-Écosse, 2009). Certains efforts en vue de réduire les émissions de GES au Canada sont explicitement déployés, du moins en partie, dans le but de maximiser les avantages indirects pour la santé (Ville de Calgary, 2011).

L'efficacité de nombreuses interventions, qui ont été faites et qui peuvent aider à réduire les risques sanitaires liés aux changements climatiques, n'a pas été évaluée (AMC, 2010; OMS, 2012b). Une étude menée par l'Institut canadien d'information sur la santé (ICIS) sur la portée des interventions effectuées en milieu urbain, en vue d'atténuer les inégalités dans le domaine de la santé pouvant être exacerbées par la chaleur extrême et la pollution atmosphérique, a permis de constater que 86 % d'entre elles n'avaient pas été évaluées (ICIS, 2012). Il importe d'intégrer des mesures d'évaluation aux plans d'adaptation conçus en vue de réduire les risques sanitaires liés aux changements climatiques (Kovats *et al.*, 2009).

4.2.3 SENSIBILISER LE PUBLIC AUX RISQUES SANITAIRES

Les personnes ont un rôle prépondérant à jouer en ce qui concerne l'adaptation aux effets sur la santé des changements climatiques. Des facteurs psychologiques tels que la perception du risque et la capacité d'adaptation perçue, peuvent exercer une influence importante au moment de déterminer le niveau d'adaptation aux changements climatiques (Grothmann et Patt, 2005; Osberghaus *et al.*, 2010). Des activités adéquates et ciblées entourant les changements climatiques, de même que l'éducation et la sensibilisation du public en matière de santé, peuvent encourager les gens à adopter des comportements protecteurs (Maibach *et al.*, 2011). Une enquête menée auprès des Canadiens en 2008 a révélé que, même si la plupart des gens sont au courant et se préoccupent des changements climatiques, ils en connaissent très peu les risques concrets pour la santé (Berry *et al.*, 2011b). Les autorités sanitaires et les responsables de la gestion des urgences communiquent au public davantage de renseignements sur la façon de réduire les risques sanitaires liés aux effets concrets des changements climatiques, y compris ceux analysés dans le présent chapitre (*voir* l'étude de cas 4).

Il existe relativement peu d'évaluations officielles concernant les efforts de sensibilisation du public visant à réduire les risques sanitaires liés aux changements climatiques (Centre national de collaboration en santé environnementale, 2008). Celles qui ont été réalisées ont donné des résultats mitigés. Une analyse de la campagne de sensibilisation menée à Montréal (Québec) a démontré que les gens qui ont pris connaissance des documents de sensibilisation étaient plus susceptibles de prendre des mesures pour se protéger de la chaleur, par exemple en portant des vêtements légers, en évitant toute activité ardue, en prenant une douche ou un bain pour se rafraîchir et en s'hydratant (Gosselin *et al.*, 2008a). D'autres études montrent cependant que, même si la plupart des gens sont au courant de l'avertissement de chaleur (plus de 90 %), les mesures de protection qu'ils prennent sont inadéquates (Sheridan, 2006), la perception des risques sanitaires est faible et l'adoption de mesures préventives n'est pas généralisée (Gower et Mee, 2011). Les recherches sur les niveaux de sensibilisation du public et sur l'efficacité des campagnes de promotion de la santé relatives aux avis sur la qualité de l'air (Association pulmonaire du Canada, 2008; Fondation des maladies du cœur et de l'AVC, 2008), à la salubrité alimentaire (Mancini, 2008) et à la réduction des risques associés aux maladies à transmission vectorielle (Région de Peel, 2006) ont également donné des résultats mitigés. Les messages de sensibilisation du public sur les risques liés au climat peuvent être contradictoires (p. ex., faire de l'exercice en fin de journée pour éviter la chaleur extrême, mais ne pas sortir le soir pour éviter de contracter le virus du Nil occidental). Les programmes de promotion de la santé doivent transmettre un message uniforme en matière de santé dans le but d'en maximiser l'efficacité (Hill, 2012).

L'analyse des activités d'adaptation en matière de santé au Canada montre que l'on adopte un ensemble de mesures, tant à l'échelle locale que

ÉTUDE DE CAS 4

GÉRER LES RISQUES SANITAIRES LIÉS À UNE MAUVAISE QUALITÉ DE L'AIR GRÂCE À LA COTE AIR SANTÉ (CAS)

Les changements climatiques devraient avoir pour effet d'accroître les risques pour la santé des Canadiens liés à la mauvaise qualité de l'air (*voir* la section 2.1). Soixante collectivités, réparties dans dix provinces, ont maintenant accès aux données locales de la CAS. La CAS est un outil de gestion de la santé qui transmet des renseignements par Internet (http://www.airsanté.ca) et qui permet aux gens de prendre des décisions éclairées en vue de réduire leur exposition à la pollution atmosphérique. Les messages sur la santé sont transmis au public et adaptés aux groupes à risque, comme les parents d'enfants et de nourrissons, les personnes âgées et les personnes qui souffrent de maladies cardiovasculaires et respiratoires (Environnement Canada, 2013a). Météomédia communique également les données locales de la CAS en ligne et durant le bulletin des prévisions locales diffusé à la télévision. La Société canadienne de l'asthme communique également les données de la CAS en temps réel par l'intermédiaire d'un widget de bureau que les gens peuvent télécharger à partir de son site Web.

nationale, en vue de réduire les risques sanitaires liés aux changements climatiques, y compris bon nombre des activités présentées dans des évaluations antérieures du gouvernement du Canada (Lemmen *et al.*, 2008; Seguin, 2008) et recensées par l'OMS (2010) et des experts internationaux. Maintenant que certaines autorités sanitaires canadiennes se sont mises à évaluer les vulnérabilités possibles en matière de santé, des efforts commencent à être déployés en vue d'intégrer les considérations liées aux changements climatiques aux politiques et programmes existants, et des mesures sont prises pour améliorer la compréhension du public en ce qui concerne les risques sanitaires liés au climat. Cependant, on observe que les activités d'adaptation ne sont pas uniformes dans l'ensemble du Canada, et cela fait en sorte que certaines personnes et collectivités sont plus à risque que d'autres. Les initiatives mises en place dans l'intention de protéger les Canadiens contre les effets des changements climatiques tireront avantage des mesures mises en place en vue d'accroître l'efficacité des mesures d'adaptation en matière de santé. Les effets des changements climatiques sur le système de santé ou sur la résilience des personnes peuvent contribuer à réduire la capacité des collectivités et des régions à adopter de telles mesures à l'avenir.

4.2.4 BESOINS EN MATIÈRE DE RECHERCHE

Au cours des 15 dernières années, la nécessité d'intensifier les efforts de recherche sur les risques sanitaires liés aux changements climatiques (Duncan *et al.*, 1997; Riedel, 2004; Seguin, 2008) s'est traduite par la création d'un important dossier de recherche qui servira à orienter les mesures prises en vue de protéger la santé des Canadiens (Berrang-Ford *et al.*, 2011; Gosselin *et al.*, 2011). De grands progrès ont été faits en ce qui a trait à la qualité de l'air, à la chaleur extrême et à la compréhension de la nature de certaines maladies infectieuses liées au climat. Bien qu'il importe de comprendre et de reconnaître tout le travail accompli par le Canada, force est de constater que la progression de l'acquisition des connaissances n'est pas uniforme d'un enjeu à l'autre, ni dans l'ensemble des régions du pays (Berrang-Ford *et al.*, 2011). Les besoins en matière de recherche destinée à étayer les mesures d'adaptation aux effets des changements climatiques, qui sont recensés dans le présent chapitre, sont présentés dans le tableau 9.

Préoccupation en matière de santé	Besoins en matière de recherche
Qualité de l'air	• Estimer la contribution des émissions de carbone noir au Canada qui proviennent de sources comme la combustion de biomasse à ciel ouvert et le chauffage au poêle à bois • Connaître les tendances en matière de prolifération, de répercussion et d'allergénicité des plantes produisant des aéroallergènes, à mesure que se poursuit le réchauffement • Connaître et surveiller les maladies fongiques potentiellement invasives, qui pourraient s'établir en raison des changements climatiques • Comprendre les effets liés aux mesures d'atténuation des GES et d'adaptation (p. ex., compromis en matière d'efficacité énergétique, toits verts) sur la qualité de l'air ambiant et de l'air intérieur et les effets connexes sur la santé • Comprendre comment la chaleur et la mauvaise qualité de l'air interagissent et ont une incidence sur la santé et comprendre les stratégies d'adaptation susceptibles de réduire les risques sanitaires • Déterminer comment l'humidité et la température ont une incidence sur la dégradation des matériaux de construction et comment les produits conçus pour être utilisés à l'intérieur peuvent entraîner une exposition aux produits chimiques
Qualité des aliments et de l'eau	• Comprendre l'effet des contaminants hydriques sur la santé humaine et surveiller les maladies • Surveiller les cas de maladies d'origine alimentaire pour réduire la sous-déclaration et accorder une attention à l'apparition ou à la réapparition de maladies précises • Connaître les effets des changements climatiques sur la sécurité de l'eau et de la nourriture dans le nord et le sud du Canada • Comprendre les capacités et le niveau de préparation des services d'approvisionnement en eau en matière d'adaptation aux changements climatiques • Définir les caractéristiques de systèmes de gestion de l'eau et de produits alimentaires résilients
Zoonoses et MTV	• Surveiller les zoonoses, les vecteurs et les maladies à transmission vectorielle, y compris l'apparition de nouvelles maladies • Mener des recherches fondamentales et appliquées, en vue d'appuyer l'élaboration de méthodes de surveillance, de prévention et de contrôle, de vaccins et de produits homologués de lutte contre les vecteurs • Renforcer la capacité de former du personnel hautement qualifié qui participera aux activités de recherche et à celles dans le secteur de la santé publique
Dangers naturels	• Améliorer les prévisions de phénomènes météorologiques extrêmes liés aux changements climatiques et modéliser les effets possibles sur la santé • Surveiller les effets directs et indirects des phénomènes météorologiques extrêmes sur la santé • Mener des recherches pluridisciplinaires (psychologie, travail social, développement communautaire, promotion de la santé et gestion des urgences) concernant les effets des dangers naturels sur la santé psychosociale • Comprendre comment les infrastructures résistantes au climat protègent la santé humaine
Populations à risque	• Définir des indicateurs robustes des effets des changements climatiques sur la santé environnementale, afin de surveiller les répercussions sur les personnes et les collectivités et d'élaborer des mesures d'adaptation • Comprendre la nature évolutive des vulnérabilités associées aux effets des changements climatiques sur la santé de groupes précis, afin d'orienter les nouvelles mesures destinées à les protéger • Comprendre comment les perceptions et les attitudes actuelles associées aux changements climatiques et aux risques sanitaires influent sur l'adoption de mesures d'adaptation • Mener des études longitudinales sur divers groupes démographiques (enfants, personnes âgées, milieu urbain et rural, personnes qui travaillent à l'extérieur) en vue de recenser les effets sur la santé des dangers à évolution lente (p. ex., période de sécheresse) et les effets cumulatifs des changements climatiques (p. ex., chaleur extrême, sécheresse et feux de friches)

TABLEAU 9 : Changements climatiques et besoins en matière de recherche au Canada.

5. CONCLUSIONS

Depuis 2008, des preuves plus étoffées attestent que les risques sanitaires liés à la variation météorologique et aux changements climatiques augmentent au Canada. Par exemple, de nouveaux éléments ont permis de confirmer les effets de la pollution atmosphérique et de la chaleur extrême sur la santé. Des études récentes montrent que les effets sur la pollution de l'air ambiant liés à l'augmentation de la concentration des substances aéroallergènes, de l'ozone, des particules et du nombre de feux de friches s'intensifieront à mesure que le climat continuera d'évoluer. Les projections relatives à la qualité de l'air en 2050 indiquent qu'à moins de réduire la concentration de contaminants atmosphériques d'origine anthropique, la pollution atmosphérique dans bon nombre de collectivités canadiennes augmentera en raison de la hausse des concentrations d'ozone et de particules. L'augmentation du nombre de phénomènes météorologiques extrêmes susceptibles d'avoir des répercussions sur les milieux intérieurs (p. ex., moisissures après une inondation) aura une incidence sur la qualité de l'air intérieure.

On s'attend à ce que les changements climatiques entraînent une augmentation des risques de maladies d'origine alimentaire à mesure que les températures s'élèveront et que le nombre de phénomènes météorologiques extrêmes augmentera. L'incidence des changements climatiques sur la sécurité alimentaire des Canadiens n'a pas encore été établie, même si des éléments probants semblent indiquer que les populations autochtones du Nord en subissent déjà les effets et profiteraient de mesures d'adaptation précoces. Il a également été prouvé qu'il existe un lien entre les changements climatiques et les effets sur la qualité de l'eau au Canada, par le biais de la contamination microbienne, de l'écoulement de produits dangereux, comme des pesticides, lors de phénomènes météorologiques extrêmes et de la croissance des cyanobactéries.

Les prévisions de 2008 faisant état de l'expansion de l'aire de répartition des tiques vectrices de la maladie de Lyme au Canada ont été validées sur le terrain et les cas d'infection chez les humains sont en hausse. La propagation du virus de l'encéphalite équine de l'Est au Canada constitue une autre preuve de l'expansion des maladies à transmission vectorielle qui pourraient être en partie causées par les changements climatiques. En outre, les chercheurs ont commencé à se pencher sur la vulnérabilité du Canada à l'égard de certaines zoonoses et MTV exotiques telles que le paludisme, le chikungunya, la dengue, l'encéphalite japonaise et la fièvre de la vallée du Rift, importées d'autres pays que les États-Unis, tout en faisant remarquer qu'à mesure que le thermomètre grimpe, le sud du Canada deviendra une zone de plus en plus propice à la transmission du paludisme.

L'augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes continuera d'avoir une incidence sur la santé des Canadiens, même si l'ampleur et la gravité de ces effets sont difficiles à déterminer au moyen des mécanismes de surveillance actuels. Les données obtenues, en raison de la surveillance accrue des effets sur la santé des phénomènes météorologiques extrêmes, faciliteront les éventuels efforts d'adaptation. Une meilleure compréhension des effets sur la santé des inondations, des épisodes de chaleur extrême et d'autres phénomènes météorologiques extrêmes met en évidence la nécessité de renforcer la résilience des populations à risque, en particulier si l'on tient compte des répercussions que devraient avoir les changements climatiques dans la plupart des régions du pays. L'analyse des récentes catastrophes naturelles au Canada et aux États-Unis a permis d'accroître le niveau de connaissances au sujet des effets psychosociaux de ces événements et sur les mesures pouvant être prises en vue de protéger la santé.

Les changements climatiques et la variation météorologique ont une incidence sur la santé de tous les Canadiens, mais les facteurs de vulnérabilité qui prédisposent des personnes à des risques accrus varient considérablement d'une région à l'autre et d'une population à l'autre. La région du Nord canadien est l'une des plus vulnérables aux effets sur la santé humaine, en raison d'une plus grande exposition aux changements climatiques brusques et d'une capacité d'adaptation plus limitée. Des différences marquées sur le plan des infrastructures, de la conception des services communautaires, de la prestation des soins de santé et des services sociaux, des ressources communautaires ainsi que des tendances démographiques et sanitaires nécessitent l'adoption de stratégies d'adaptation en matière de santé publique, tant à l'échelle locale que régionale, pour les collectivités urbaines, rurales, nordiques et côtières (p. ex., atténuer l'effet d'îlot thermique urbain, améliorer l'accès à la nourriture traditionnelle dans le Nord, protéger les sources d'eau potable contre l'élévation du niveau de la mer sur la côte).

Les autorités gouvernementales à l'échelle fédérale, provinciale, territoriale et locale au Canada prennent des mesures pour faire face aux effets sur la santé qu'entraînent les changements climatiques en intégrant les risques sanitaires aux plans relatifs aux changements climatiques et en intégrant les enjeux relatifs aux changements climatiques dans leurs politiques et programmes conçus en vue de protéger la santé. Or, il faut intensifier les efforts en matière d'adaptation étant donné que les changements climatiques présentent des risques croissants, qui rendent certaines personnes et collectivités extrêmement vulnérables aux effets connexes. Les responsables de la santé publique et de la gestion des services d'urgence au Canada ont maintenant accès à un ensemble de mesures et d'outils facilitant l'adaptation aux effets sur la santé des changements climatiques, notamment des lignes directrices en matière d'évaluation de la vulnérabilité, des cartes des zones de vulnérabilité et des outils d'aide à la prise de décisions. Une collaboration accrue et un échange d'information entre les partenaires des milieux gouvernementaux, non gouvernementaux et universitaires auront pour effet d'améliorer les efforts visant à protéger les Canadiens des répercussions sur leur santé des changements climatiques.

RÉFÉRENCES

ACEPU (Association canadienne des eaux potables et usées). *Understanding the preparedness of Canadian water utilities for the impacts of climate change*, rapport rédigé pour Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2012.

Acharya, M.P., R.G. Kalischuk, K.K. Klein et H. Bjornlund. « Health impacts of the 2005 flood events on feedlot farm families in southern Alberta, Canada », *Water Resources Management* IV, WIT Press, 2007, pp. 253-262, doi:10.2495/WRM070241.

Adhern, M.M., R.S. Kovats, P. Wilkinson, R. Few et F. Matthies. « Global health impacts of floods: epidemiologic evidence », *Epidemiologic Reviews*, vol. 27, nº 1, 2005, pp. 36-46.

Agence de la santé publique du Canada. *Fiche de renseignements sur la maladie de Lyme*, Agence de la santé publique du Canada, 2013a, <http://www.phac-aspc.gc.ca/id-mi/lyme-fs-fra.php>.

Agence de la santé publique du Canada. *Cartes et statistiques* – Virus du Nil occidental moniteur, Agence de la santé publique du Canada, 2013b, <http://www.phac-aspc.gc.ca/wnv-vwn/index-fra.php>.

Agence de santé publique du Canada. *Évaluation des activités de prévention, de détection et de lutte contre les maladies entériques d'origine alimentaire à l'Agence de la santé publique du Canada*, Agence de santé publique du Canada, 2013c, <http:/www.phac-aspc.gc.ca/about_apropos/evaluation/reports-rapports/2011-2012/feipdra-pdimeoa/app-ann-c-fra.php>.

Agence de la santé publique du Canada. *Cancer de la peau non mélanique*, Agence de santé publique du Canada, 2013d, <http:/www.phac-aspc.gc.ca/cd-mc/cancer/cancer_peau_non_melanique-non_melanoma_skin_cancer-fra.php>.

Agence de la santé publique du Canada. *Maladie de Lyme et autres maladies transmises par les tiques : renseignements à l'intention des professionnels de la santé*, Agence de santé publique du Canada, 2014, <http://www.phac-aspc.gc.ca/id-mi/tickinfo-fra.php>.

Alfieri, L., P. Salamon, F. Pappenberger, F. Wetterhall et J. Thielen. « Operational early warning systems for water-related hazards in Europe », *Environmental Science and Policy*, vol. 21, 2012, pp. 35-49.

AMC (Association médicale canadienne). L'air qu'on respire — *Le coût national des maladies attribuables à la pollution atmosphérique – Sommaire du rapport*, Association canadienne médicale, Ontario, 2008, <http://www.cma.ca/multimedia/CMA/Content_Images/Inside_cma/Office_Public_Health/ICAP/CMA_ICAP_sum_f.pdf>.

AMC (Association médicale canadienne). *Les changements climatiques et la santé humaine*, Association médicale canadienne, Ottawa (Ontario), 2010.

Anderson, G.B., F. Dominici, Y. Wang, M.C. McCormack, M.L. Bell et R.D. Peng. « Heat-related emergency hospitalizations for respiratory diseases in the Medicare population », *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, sous presse, 2013.

Andrachuk, M. et B. Smit. « Community-based vulnerability assessment of Tuktoyaktuk, NWT, Canada to environmental and socio-economic changes », *Regional Environmental Change*, 2012, pp. 867-885.

Anenberg, S., J. Schwartz, D. Shindell, M. Amann, G. Faluvegi, Z. Klimont, G. Janssens-Maenhout, L. Pozzoli, R. Van Dingenen, E. Vignati, L. Emberson, N.Z. Muller, J.J. West, M. Williams, V. Demkine, W.K. Hicks, J. Kuylenstierna, F. Raes et V. Ramanathan. « Global air quality and health co-benefits of mitigating near-term climate change through methane and black carbon emission controls », *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, nº 6, 2012, pp. 831-839.

Angelini, P., P. Macini, A.C. Finarelli, C. Pol, C. Venturelli, R. Bellini et M. Dottori. « Chikungunya epidemic outbreak in Emilia-Romagna (Italy) during summer 2007 », *Parassitologia*, vol. 50, nº 1-2, 2008, pp. 97-98.

Association pulmonaire du Canada. *La majorité des Canadiens ne connaît pas l'Indice de la qualité de l'air: sondage de l'Association pulmonaire*, Association pulmonaire du Canada, 2008, <http://www.poumon.ca/media-medias/news-nouvelles_f.php?id=114>.

Auger, N., R. Kuehne, M. Goneau et M. Daniel. « Preterm birth during an extreme weather event in Québec, Canada: a natural experiment », *Maternal and Child Health Journal*, vol. 15, nº 7, 2011, pp. 1088-1096.

Ayres, J.G., B. Forsberg, I. Annesi-Maesano, R. Dey, K.L. Ebi, P.J. Helm, M. Medina-Ramón, M. Windt et F. Forastiere. « Climate change and respiratory disease: European respiratory society position statement », *European Respiratory Journal*, vol. 34, nº 2, 2009, pp. 295-302.

Bais, A.F., K. Tourpali, A. Kazantzidis, H. Akiyoshi, S. Bekki, P. Braesicke et Y. Yamashita. « Projections of UV radiation changes in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 11, 2011, pp. 7533-7545.

Balbus, J.M. et C. Malina. « Identifying vulnerable subpopulations for climate change health effects in the United States », *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, American College of Occupational and Environmental Medicine, vol. 51, nº 1, 2009, pp. 33-37.

Bambrick, H.J., A. Capon, G. Barnett, R. Beaty et A. Burton. « Climate change and health in the urban environment: adaptation opportunities in Australian cities », *Asia-Pacific Journal of Public Health*, vol. 23, nº 2, 2011, pp. 67S-79S.

Barbeau, B., A. Carrière, M. Prévost, A. Zamyadi et P. Chevalier. *Changements climatiques au Québec méridional : Analyse de la vulnérabilité des installations québécoises de production d'eau potable aux cyanobactéries toxiques – Résumé*, Gouvernement du Québec, 2009.

Barriopedro, D., E.M. Fischer, J. Luterbacher, R.M. Trigo et R. García-Herrera. « The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe », *Science*, vol. 332, nº 6026, 2011, pp. 220-224.

Bassil, K. *The Association between Heat, Air Pollution and Emergency Medical Service Calls in Toronto*, 2009-2011, rapport technique, 2012.

Battisti, D.S. et R.L. Naylor. « Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat », *Science*, vol. 323, nº 5911, 2009, pp. 240-244.

BC CDC (British Columbia Centre for Disease Control). *Cryptococcus gattii*, 2012, <http://www.bccdc.ca/dis-cond/a-z/_c/CryptococcalDisease/overview/default.htm>.

Bedsworth, L.W. et E. Hanak. « Adaptation to climate change: a review of challenges and tradeoffs in six areas », *Journal of the American Planning Association*, vol. 76, nº 4, 2010, pp. 477-495.

Bernier, E., P. Gosselin, T. Badard et Y. Bédard. « Easier surveillance of climate-related health vulnerabilities through a web based spatial OLAP application », *International Journal of Health Geographics*, vol. 8, nº 18, 2009, pp. 1-18.

Bernstein, A.S. et S.S. Myers. « Climate change and children's health », *Current Opinion in Pediatrics*, vol. 23, nº 2, 2011, pp. 221-226.

Berrang-Ford, L., D. MacLean, T. Gyorkos, J. Ford et N.H. Ogden. « Climate change and malaria in Canada: a systems approach », *Interdisciplinary Journal on Infectious Diseases*, 2009, 13 p.

Berrang-Ford, L., J. Ford et J. Paterson. « Are we adapting to climate change? », *Global Environmental Change*, vol. 21, 2011, pp. 25-33.

Berry, H.L., K. Bowen et T. Kjellstrom. « Climate change and mental health: a causal pathways framework », *International Journal of Public Health*, vol. 55, nº 2, 2009, pp.123-132.

Berry, H.L., B. Kelly, I. Hanigan, J. Coates, A. McMichael, J. Welsh et T. Kjellstrom. *Rural mental health impacts of climate change*, The Australian National University, Canberra, Australie, 2008a.

Berry, P. « Vulnérabilités, adaptation et capacité d'adaptation au Canada », chapitre 8 dans *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2008.

Berry, P., K.-L. Clarke, M. Brisbois et A. Rogaeva. *Assessment of Vulnerability to the Health Impacts of Extreme Heat in the City of Winnipeg*, 2011a.

Berry, P., K.L. Clarke, M. Pajot et D. Hutton. « Risk, perception, health communication and adaptation to the health impacts of climate change in Canada », chapitre 14 dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: From Theory to Practice*, J.D. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), 2011b.

Berry, P., G. McBean, et J. Seguin. « Vulnérabilités aux dangers naturels et aux conditions météorologiques extrêmes », chapitre 3 dans *Santé et changements climatiques: évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2008b.

Berry, P., K. Richters, K.-L. Clarke et M. Brisbois. *Assessment of Vulnerability to the Health Impacts of Extreme Heat in the City of Windsor*, 2011c.

Bethel, J.W., A.N. Foreman et S.C. Burke. « Disaster preparedness among medically vulnerable populations », *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 40, nº 2, 2011, pp.139-143.

Bigano, A., F. Bosello, R. Roson et R.S.J. Tol. « Economy-wide impacts of climate change: A joint analysis for sea level rise and tourism », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 13, nº 8, 2008, pp. 765-791.

Bonsal, B.R., E.E. Wheaton, A.C. Chipanshi, C. Lin, D.J. Sauchyn et L. Wen. « Drought research in Canada: A review », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, nº 4, 2011, pp. 303-319.

Boon, H.J., L.H. Brown, K. Tsey, R. Speare, P. Pagliano, K. Usher et C. Brenton. « School disaster planning for children with disabilities: a critical review of the literature », *International Journal of Special Education*, vol. 26, nº 3, 2011, pp. 223-237.

Bouchard, C., G. Beauchamp, S. Nguon, L. Trudel, F. Milord, L.R. Lindsay et N.H. Ogden. « Associations between *Ixodes scapularis* ticks and small mammal hosts in a newly endemic zone in southeastern Canada: implications for Borrelia burgdorferi transmission », *Ticks and Tick-Borne Diseases*, vol. 2, nº 4, 2011, pp. 183-190.

Boulton, K., M. Lougheed, J. Ford, S. Nickels et J. Shirley. *Ce qui est connu, non connu et nécessaire à connaître relativement au changement climatique au Inuit Nunangat : une analyse documentaire systématique et une analyse de l'écart*, rapport rédigé pour le Ministère des Affaires indiennes et du Nord Canada, Ottawa (Ontario), 2011.

Bouri, N., T.K. Sell, C. Franco, A.A. Adalja, D.A. Henderson et N.A. Hynes. « Return of epidemic dengue in the United States: Implications for the public health practitioner », *Public Health Reports*, vol. 127, nº 3, 2012, pp. 259-266.

Brettle, M., P. Berry, J. Paterson, G. Yasvinski et P. Kertland. *Determining the preparedness of Canadian water utilities for the impacts of climate change, rapport rédigé pour Santé Canada*, Ottawa (Ontario), 2013.

Brunkard, J., G. Namulanda et R. Ratard. « Hurricane Katrina deaths, Louisiana, 2005 », *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, vol. 2, nº 4, 2008, pp. 215-223.

Bureau d'assurance du Canada. *Outil d'évaluation du risque pour les municipalités*, Bureau d'assurance du Canada, 2013, <http://www.ibc.ca/fr/Natural_Disasters/Municipal_Risk_Assessment_Tool.asp>.

Bureau de santé publique de Toronto. *Implementation of a Map-Based Heat Vulnerability Assessment and Decision Support System*, Final Project Report and Map Series, Bureau de santé publique de Toronto, 2011a.

Bureau de santé publique de Toronto. *Protecting vulnerable people from health impacts of extreme heat*, Bureau de santé publique de Toronto, 2011b, <http://www.toronto.ca/health/heatalerts/pdf/backgroundfile-39469.pdf>.

Bustinza, R., G. Lebel, P. Gosselin, D. Bélanger et F. Chebana. « Health impacts of the July 2010 heat wave in Quebec, Canada », *BMC Public Health*, vol. 13, nº 56, 2013.

Campagna, S., B. Lévesque, E. Anassour-Laouan-Sidi, S. Côté, B. Serhir, B.J. Ward et É. Dewailly. « Seroprevalence of 10 zoonotic infections in 2 Canadian Cree communities », *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, vol. 70, nº 2, 2011, pp. 191-199.

Carnie, T.L., H.L. Berry, S.A. Blinkhorn et C.R. Hart. « In their own words: young people's mental health in drought-affected rural and remote NSW », *Australian Journal of Rural Health*, vol. 19, nº 5, 2011, pp. 244-248.

Carroll, B., H. Morbey, R. Balogh et G. Araoz. « Flooded homes, broken bonds, the meaning of home, psychological processes and their impact on psychological health in a disaster », *Health and Place*, vol. 15, 2009, pp. 540-547.

Carroll, B., R. Balogh, H. Morbey et G. Araoz. « Health and social impacts of a flood disaster: responding to needs and implications for practice », *Disasters*, vol. 34, nº 4, 2010, pp.1045-1063.

Casati, B. et A. Yagouti. *Analysis of extreme temperature indices in nine Canadian communities using the Canadian Regional Climate Model projections for public health planning*, Ouranos, 2010.

Casati, B., A. Yagouti et D. Chaumont. « Analysis of extreme temperature indices in 9 Canadian communities using the Canadian Regional Climate Model projections for public health planning », article accepté par le *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, sous presse.

Centre autochtone de ressources environnementales. *Climate Change Impacts on Ice, Winter Roads, Access Trails, and Manitoba First Nations Study*, Centre autochtone de ressources environnementales, 2006.

Centre canadien de recherche sur la prévention de la noyade. *Rapport national sur les noyades – édition 2011*, Centre canadien de recherche sur la prévention de la noyade, Société de sauvetage, 2011.

Centre canadien de recherche sur la prévention de la noyade. *Rapport national sur les noyades – édition 2011*, Centre canadien de recherche sur la prévention de la noyade, Société de sauvetage, 2011.

Centre de collaboration nationale en santé environnementale. *Données probantes actuelles sur l'efficacité des interventions en cas d'épisode de chaleur*, Centre de collaboration nationale en santé environnementale, Vancouver, 2008, <http://www.ncceh.ca/sites/default/files/Interventions_et_grand_chaleur_sept_2008.pdf>.

Cheng, C.S., H. Auld, Q. Li et G. Li. « Possible impacts of climate change on extreme weather events at local scale in south-central Canada », *Climatic Change*, vol. 112, nº 3-4, 2011, pp. 963-979.

Cheng, J. et P. Berry. « Health co-benefits and risks of public health adaptation strategies to climate change: a review of current literature », *International Journal of Public Health*, vol. 58, 2012, pp. 305-311.

Cheng, J. et P. Berry. *Development of Key Indicators to Track the Health Impacts of Climate Change on Canadians*, Ottawa, 2013.

Chew, G.L., J. Wilson, F.A. Rabito, F. Grimsley, S. Iqbal, T. Reponen, M.L. Muilenberg, P.S. Thorne, D.G. Dearborn, R.L. Morley. « Mold and endotoxin levels in the aftermath of Hurricane Katrina: a pilot project of homes in New Orleans undergoing renovation », *Environmental Health Perspectives*, vol. 114, 2006, pp. 1883-1889.

Chiovarou, E.D. et T.C. Siewicki. « Comparison of storm intensity and application timing on modeled transport and fate of six contaminants », *Science of the Total Environment*, vol. 389, nº 1, 2007, pp. 87-100.

Christensen, R. Water proof 2: *Canada's drinking water report card*, Sierra Legal Defense Fund, <http://www.ecojustice.ca/publications/reports/waterprrof-2/attachment>.

Clarke, K.L. « Infrastructures de santé critiques en cas de catastrophe – Leçons apprises », dans *Gestion des urgences : une perspective de santé*, Bulletin de recherche sur les politiques de santé, Santé Canada, nº 15, avril 2009, <http://www.hc-sc.gc.ca/sr-sr/pubs/hpr-rpms/bull/2009-emergency-urgence/index-fra.php>.

Clarke, K.L. *Climate-related stresses on human health in a remote and rural region of Ontario, Canada*, thèse présentée au département de géographie, Université d'Ottawa, 2012.

Clarke, K.L. et P. Berry. « From theory to practice: a Canadian case study of the utility of climate change adaptation frameworks to address health impacts », *International Journal of Public Health*, vol. 57, nº 1, 2011, pp.167-174.

Cockwill, K.R., S.M. Taylor, E.C. Snead, R. Dickinson, K. Cosford, S. Malek, L. Robbin Lindsay et P.P. Visotto de Paiva Diniz. « Granulocytic anaplasmosis in three dogs from Saskatoon, Saskatchewan », *Revue vétérinaire canadienne*, vol. 50, nº 8, 2009, pp. 835-840.

Commissaire à l'environnement et au développement durable. « L'adaptation aux impacts climatiques », chapitre 3 dans *Automne 2010 – Rapport du commissaire à l'environnement et au développement durable*, Commissaire à l'environnement et au développement durable, 2010.

Committee on the Significance of International Transport of Air Pollutants. *Global sources of local pollution: an assessment of long-range transport of key air pollutants to and from the United States*, National Research Council, 2009, <http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12743>.

Costello, A., M. Abbas, A. Allen, S. Ball, S. Bell, R. Bellamy, S. Friel, N. Groce, A. Johnson, M. Kett, M. Lee, C. Levy, M. Maslin, D. McCoy, B. McGuire, H. Montgomery, D. Napier, C. Pagel, J. Patel, J.A. Puppim de Oliveira, N. Redcliff, H. Rees, D. Rogger, J. Scott, J. Stephenson, J. Twigg, J. Wolff et C. Patterson. « Managing the health effects of climate change », Lancet and University College London Institute for Global Health Commission, *The Lancet*, vol. 373, nº 9676, 2009, pp.1693-1733.

Coulston, J.E. et P. Deeny. « Prior exposure to major flooding increases individual preparedness in high-risk populations », *Prehospital and Disaster Medicine*, vol. 25, nº 4, 2010, pp. 289-295.

Cox, R., C.W. Revie et J. Sanchez. « The use of expert opinion to assess the risk of emergence or re-emergence of infectious diseases in Canada associated with climate change », *PLoS ONE*, vol. 7, nº 7, 2012.

Cretikos, M.A., T.D. Merritt, K. Main, K. Eastwood, L. Winn, L. Moran et D.N. Durrheim. « Mitigating the health impacts of a natural disaster – the June 2007 long-weekend storm in the hunter region of new South Wales », Medical Journal of Australia, vol. 187, nº 11-12, 2007, pp. 670-673.

Cunderlik, J.M. et T.B.M.J. Ouarda. « Trends in the timing and magnitude of floods in Canada », *Journal of Hydrology*, vol. 375, nº 3-4, 2009, pp. 471-480.

de Albuquerque Alves, L.F., B.F. Fernandes, J.V. Burnier, P. Zoroquiain, D.T. Eskenazi et M.N. Burnier Jr. « Incidence of epithelial lesions of the conjunctiva in a review of 12,102 specimens in Canada (Quebec) », *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, vol. 74, nº 1, 2011, pp. 21-23.

Değer, L., C. Plante, S. Goudreau, A. Smargiassi, S. Perron, R.L. Thivierge et L. Jacques. « Home environmental factors associated with poor asthma control in Montreal children: a population-based study », *Journal of Asthma*, vol. 47, nº 5, 2010, pp. 513-520.

DesJarlais, C. et A. Blondlot. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, Ouranos, Montréal, 2010, <http://www.ouranos.ca/fr/publications/ouvrages-generaux.php>.

Dixon, K.M., V.B. Sequeira, A.J. Camp et R.S. Mason. « Vitamin D and skin cancer », dans *Handbook of Diet, nutrition and the skin*, V. Preedy (éd.), Wageningen Academic Publishers, vol. 2, 2012, pp. 394-411.

Dolan, A.H. et I.J. Walker. *Understanding Vulnerability of Coastal Communities to Climate Change Related Risks*, Itajai, SC – Brazil, (SI 39), 2006.

Dolan, A.H. et R. Ommer. « Climate change and community health: lessons from Canada's east and west coasts », *Journal of Rural and Community Development*, vol. 3, nº 2, 2008, pp. 27-46.

Dolan, A.H., M. Taylor, B. Neis, R. Ommer, J. Eyles, D. Schneider et B. Montevecchi. « Restructuring and health in Canadian coastal communities », *EcoHealth*, vol. 2, nº 3, 2005, pp. 195-208.

Downing, A. et A. Cuerrier. « A synthesis of the impacts of climate change on the First Nations and Inuit of Canada », *Indian Journal of Traditional Knowledge*, vol. 10, nº 1, 2011, pp. 57-70.

Du, W., G.J. FitzGerald, M. Clark et X.Y. Hou. « Health impacts of floods », *Prehospital and Disaster Medicine*: the Official Journal of the National Association of EMS Physicians and the World Association for Emergency and Disaster Medicine in Association with the Acute Care Foundation, vol. 25, nº 3, 2010, pp. 265-272.

Duncan, K., T. Guidotti, W. Cheng, K. Naidoo, G. Gibson, L. Kalkstein, S. Sheridan, D. Waltner-Toews, S. MacEachern et J. Last. « Étude pancanadienne sur la variabilité et le changement climatique – secteur de la santé », dans *Impacts et adaptation à la variabilité et au changement du climat*, G. Koshida et W. Avis (éd.), Environnement Canada, Étude pancanadienne sur la variabilité et le changement climatique, tome VII, 1997, pp. 501-620.

Ebi, K.L. « Resilience to the health risks of extreme weather events in a changing climate in the United States », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 8, nº 12, 2011, pp. 4582-4595.

Ebi, K.L. « Managing the changing health risks of climate change », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 1, nº 1, 2009, pp. 107-110.

Ebi, K.L. et J.A. Paulson. « Climate change and child health in the United States », *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*, vol. 40, nº 1, 2010, pp. 2-18.

Ebi, K., E. Lindgren, J.E. Suk et J.C. Semenza. « Adaptation to the infectious disease impacts of climate change », *Climatic Change*, vol. 118, nº 2, 2012, pp. 355-365.

Ebi, K.L. et D. Mills. « Winter mortality in a warming climate: a reassessment », *Willey Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 4, nº 3, 2013, pp. 203-212.

Eckhardt, R., L. Berrang-Ford, N.A. Ross, D.R. Pillai et D.L. Buckeridge. « A spatial analysis of individual- and neighborhood-level determinants of malaria incidence in adults, Ontario, Canada », *Emerging Infectious Diseases*, vol. 18, nº 5, 2012, pp. 775-782.

English, P.B., A.H. Sinclair, Z. Ross, H. Anderson, V. Boothe, C. Davis, K. Ebi, B. Kagey, K. Malecki, R. Schultz et E. Simms. « Environmental health indicators of climate change for the United States: findings from the State Environmental Health Indicator Collaborative », *Environmental Health Perspectives*, vol. 117, nº 11, 2009, pp. 1673-1681.

Environnement Canada. *Les transports écologiquement viables : une étude de cas du corridor Québec-Windsor*, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 2002, <http://publications.gc.ca/publications/site/eng/109360/publication/html>.

Environnement Canada. *Changing weather patterns, uncertainty and infrastructure risks: emerging adaptation requirements*, publication hors-série nº 9, Environnement Canada, Toronto (Ontario), 2007, <http://publications.gc.ca/collections/collection_2011/ec/En57-41-9-2007-eng.pdf>.

Environnement Canada. *Niveaux ambiants d'ozone troposphérique*, Environnement Canada, 2012a, <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=9EBBCA88-1>.

Environnement Canada. *Niveaux ambiants de particules fines*, Environnement Canada, 2012b, <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=029BB000-1>.

Environnement Canada. *À propos de la cote air santé*, Environnement Canada, 2013a, <http://www.ec.gc.ca/cas-aqhi/default.asp?lang=Fr&n=065BE995-1>.

Environnement Canada. *Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique*, Environnement Canada, 2013b, <http://www.ec.gc.ca/rnspa-naps/Default.asp?lang=Fr&n=5C0D33CF-1>.

Ermert, V., A.H. Fink, A.P. Morse et H. Paeth. « The impact of regional climate change on malaria risk due to greenhouse forcing and land-use changes in tropical Africa », *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, nº 1, 2012, pp. 77-84.

Febriani, Y., P. Levallois, S. Gingras, P. Gosselin, S.E. Majowicz et M.D. Fleury. « 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*, vol. 10, nº 48, 2010.

Fewtrell, L. et D. Kay (éd.). *A Guide to the Health Impact Assessment for Sustainable Water Management*, International Water Association, Amsterdam, ISBN 9781843391333, 2008, 320 p., <http://www.iwapublishing.com/template.cfm?name=isbn1843391333>.

FitzGerald, G., W. Du, A. Jamal, M. Clark et X-Y. Hou. « Flood fatalities in contemporary Australia (1997-2008) », *Emergency Medicine Australasia*, vol. 22, 2010, pp. 180-186.

Flannigan, M.D., M.A. Krawchuk, W.J. de Groot, B.M. Wotton et L.M. Gowman. « Implications of changing climate for global wildland fire », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, 2009, pp. 483-507.

Flannigan, M. et M. Wotton. « Forest fire activity in Canada during 2030s-2050s », *Wildland Fire Canada*, 2010, <http://www.wildlandfirecanada.ca/Presentations/Thursday/Morning/Systems/Mike/Wildland%20Fire%20Canada%202010%20Flannigan%20&%20Wotton%20v2.pdf>.

Fondation des maladies du cœur et de l'AVC. *La santé du cœur des Canadiens pompe l'air, dit le Bulletin de santé de 2008 des Canadiens et Canadiennes de la Fondation des maladies du cœur*, Fondation des maladies du cœur et de l'AVC, 2008.

Ford, J.D. « Dangerous climate change and the importance of adaptation for the arctic's inuit population », *Environmental Research Letters*, vol. 4, nº 2, 2009.

Ford, J.D., L. Berrang-Ford, M. King et C. Furgal. « Vulnerability of Aboriginal health systems in Canada to climate change », *Global Environmental Change*, vol. 20, nº 4, 2010a, pp. 668-680.

Ford, J.D., W.A. Gough, G.J. Laidler, J. MacDonald, C. Irngaut et K. Qrunnut. « Sea ice, climate change, and community vulnerability in northern Foxe Basin, Canada », *Climate Research*, vol. 38, nº 2, 2009, pp. 137-154.

Ford, J.D., T. Pearce, F. Duerden, C. Furgal et B. Smit. « Climate change policy responses for Canada's Inuit population: the importance of and opportunities for adaptation », *Global Environmental Change*, vol. 20, nº 1, 2010b, pp. 177-191.

Friel, S., A.D. Dangour, T. Garnett, K. Lock, Z. Chalabi, I. Roberts, A. Butler, C. Butler, J. Waage, A. McMichael et A. Haines. « Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: food and agriculture », *The Lancet*, vol. 374, nº 9706, 2009, pp. 2016-2025.

Fritze, J.C., G.A. Blashki, S. Burke et J. Wiseman. « Hope, despair and transformation: climate change and the promotion of mental health and wellbeing », *International Journal of Mental Health Systems*, vol. 2, nº 13, 2008.

Frumkin, H. « Bumps on the road to preparedness », *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 40, nº 2, 2011, pp. 272-273.

Frumkin, H. et A.J. McMichael. « Climate change and public health: thinking, communicating, acting », *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 35, nº 5, 2008, pp. 403-410.

Frumkin, H., J. Hess, G. Luber, J. Malilay et M. McGeehin. « Climate change: the public health response », *American Journal of Public Health*, vol. 98, nº 3, 2008, pp. 435-445.

Fundter, D.Q., B. Jonkman, S. Beerman, C.L. Goemans, R. Briggs, F. Coumans, J.W. Lahaye et J. Bierens. « Health impacts of large-scale floods: governmental decision-making and resilience of the citizens », *Prehospital and Disaster Medicine*: The Official Journal of the National Association of EMS Physicians and the World Association for Emergency and Disaster Medicine in Association with the Acute Care Foundation, vol. 23, nº 4, 2008, s70-73.

Furgal, C. « Les effets des changements climatiques sur la santé dans le Nord canadien », chapitre 7 dans *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2008.

Furgal, C. et J. Seguin. « Climate change, health, and vulnerability in Canadian northern Aboriginal communities », *Environmental Health Perspectives*, vol. 114, nº 12, 2006, pp. 1964-1970.

Gabriel, K.M. et W.R. Endlicher. « Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany », *Environmental Pollution*, vol. 159, nº 8-9, 2011, pp. 2044-2050.

Gauderman, W.J., E. Avol, F. Gilliland, H. Vora, D. Thomas, K. Berhane, R. McConnell, N. Kuenzli, F. Lurmann, E. Rappaport, H. Margolis, D. Bates et J. Peters. « The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age », *New England Journal of Medicine*, vol. 351, 2004, pp. 1057-1067.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2012, <https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/srex/downloads/SREX_SPM_French.pdf>.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changements climatiques 2007 : les éléments scientifiques*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.

Gilbert, N.L., O.K. Dare, M.D. Libman, P.K. Muchaal et N.H. Ogden. « Hospitalization for trichinellosis and echinococcosis in Canada, 2001-2005: the tip of the iceberg? », *Revue canadienne de santé publique*, vol. 101, nº 1, 2010, pp. 337-340.

Gomez, D., B. Haas, N. Ahmed, H. Tien et A. Nathens. « Disaster preparedness of Canadian trauma centres: the perspective of medical directors of trauma », *Journal canadien de chirurgie*, vol. 54, nº 1, 2011, pp. 9-15.

Gosselin, C., T. Kosatsky, M. Fournier, L. Richard, M. Pinard, N. King, D. Bonney et J. Gaudet. *Evaluation of the "It's summer. be cool!" education campaign*, Ressources naturelles Canada, 2008a.

Gosselin, P. « La santé des populations », dans *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, Ouranos, Montréal (Québec), 2010.

Gosselin, P., D. Belanger et B. Doyan. « Les effets des changements climatiques sur la santé au Québec », dans *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2008b.

Gosselin, P., D. Bélanger, V. Lapaige et Y. Labbe. « The burgeoning field of transdisciplinary adaptation research in Quebec (1998-): a climate change-related public health narrative », *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, vol. 4, 2011, pp. 337-348.

Gouvernement de l'Ontario. *Faire face au changement climatique : stratégie d'adaptation et plan d'action de l'Ontario 2011-2014*, Gouvernement de l'Ontario, 2011.

Gouvernement de Nunavut. *Upagiaqtavut paver la voie : impacts et adaptation liés aux changements climatiques*, Gouvernement de Nunavut, Iqaluit (Nunavut), n.d., <http://env.gov.nu.ca/sites/default/files/3154-315_climate_french_sm.pdf>.

Gouvernement du Canada. *Évaluation scientifique canadienne du smog : faits saillants et messages clés*, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2012.

Gouvernement du Nouveau-Brunswick. *Plan d'action sur les changements climatiques 2007-2012, Il est temps d'agir!*, Gouvernement du Nouveau-Brunswick, n.d.

Gouvernement du Québec. *Le Québec en action – vert 2020 : stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques*, Gouvernement du Québec, 2012.

Government of British Columbia. *Preparing for climate change: British Columbia's adaptation strategy*, Government of British Columbia, 2010.

Government of British Columbia. *BC climate action toolkit*, Government of British Columbia, 2012, <http://www.toolkit.bc.ca/adaptation-challenges-and-opportunities>.

Government of Nova Scotia. *Toward a greener future: Nova Scotia's climate change action plan*, Government of Nova Scotia, 2009, <http://climatechange.gov.ns.ca/content/WhatNSIsDoing>.

Government of the Northwest Territories. *NWT climate change impacts and adaptation report 2008*, Government of Northwest Territories, 2008.

Gower, S. et C. Mee. *Hot weather protection: public knowledge and perceptions leading to public action in Toronto*, 2011.

Greer, A., V. Ng et D. Fisman. « Climate change and infectious diseases in North America: the road ahead », *Journal de l'Association médicale canadienne*, vol. 178, nº 6, 2008, pp. 715-722.

Grothmann, T. et A. Patt. « Adaptive capacity and human cognition: the process of individual adaptation to climate change », *Global Environmental Change*, vol. 15, nº 3, 2005, pp. 199-213.

Haines, A., R.S. Kovats, D. Campbell-Lendrum et C. Corvalan. « Climate change and human health: impacts, vulnerability and mitigation », *The Lancet*, vol. 367, no 9528, 2006, pp. 2101-2109

Haines, A., A.J. McMichael, K.R. Smith, I. Roberts, J. Woodcock, A. Markandya, B.G. Armstrong, A.D. Campbell-Dangour, M. Davies, N. Bruce, C. Tonne, M. Barrett et P. Wilkinson. « Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: overview and implications for policy makers », *The Lancet*, vol. 374, nº 9707, 2009, pp. 2104-2114.

Hajat, S. et T. Kosatky. « Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity », *Journal of Epidemiology and Community Health*, vol. 64, nº 9, 2010, pp. 753-760.

Hanson, A., P. Bi, M. Nitschke, P. Ryan, D. Pisaniello et G. Tucker. « The effect of heat waves on mental health in a temperate Australian city », *Environmental Health Perspectives*, vol. 116, 2008, pp. 1369-1375.

Haq, G., J. Whitelegg et M. Kohler. *Growing Old in a Changing Climate: Meeting the Challenges of an Ageing Population and Climate Change*, Stockholm Environment Institute, Stockholm, 2008.

Harmon, S.M. et D.E. Wyatt. « Evaluation of post-Katrina flooded soils for contaminants and toxicity to the soil invertebrates *Eisenia fetida* and *Caenorhabditis elegans* », *Chemosphere*, vol. 70, nº 10, 2008, pp. 1857-1864.

Harper, S.L., V.L. Edge, C.J. Schuster-Wallave, O. Berke et S.A. McEwen. « Weather, water quality and infectious gastrointestinal illness in two Inuit communities in Nunatsiavut, Canada: potential implications for climate change », *EcoHealth*, vol. 8, 2011, pp. 93-108.

Hart, C.R., H.L. Berry et A.M. Tonna. « Improving the mental health of rural New South Wales communities facing drought and other adversities », *Australian Journal of Rural Health*, vol. 19, nº 5, 2011, pp. 231-238.

Hayes, J., J. Mason, F. Brown et R. Mather. « Floods in 2007 and older adult services: lessons learnt », *Psychiatric Bulletin*, vol. 33, nº 9, 2009, pp. 332-336.

Hegglin, M.I. et T.G. Shepherd. « Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux », *Nature Geoscience*, vol. 2, 2009, pp. 687-691.

Heisler, J., P.M. Glibert, J.M. Burkholder, D.M. Anderson, W. Cochlan, W.C. Dennison, Q. Dortch, C.J. Gobler, C.A. Heil, E. Humphries, A. Lewitus, R. Magnien, H.G. Marshall, K. Sellner, D.A. Stockwell, D.K. Stoecker et M. Suddleson. « Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus », *Harmful Algae*, vol. 8, nº 1, 2008, pp. 3-13.

Henderson, S.B., M. Brauer, Y.C. MacNab et S.M. Kennedy. « Three measures of forest fire smoke exposure and their associations with respiratory and cardiovascular health outcomes in a population-based cohort », *Environmental Health Perspectives*, vol. 119, nº 9, 2011, pp. 1266-1271.

Hess, J., K.L. Heilpern, T. Davis et H. Frumkin. « Climate change and emergency medicine: impacts and opportunities », *Academic Emergency Medicine*, vol. 16, nº 8, 2009, pp. 782-794.

Hess, J., J.Z. McDowell et G. Luber. « Integrating climate change adaptation into public health practice: using adaptive management to increase adaptive capacity and build resilience », *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, nº 2, 2011, pp. 171-179.

Hess, J.J., J.N. Malilay et A.J. Parkinson. « Climate change: the importance of place », *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 35, nº 5, 2008, pp. 468-478.

Higginbotham, N., L. Connor, G. Albrecht, S. Freeman et K. Agho. « Validation of an environmental distress scale », *EcoHealth*, vol. 3, 2007, pp. 245-254.

Hill, J. *Analysis of climate change and health promotion campaigns in relation to heat health messages*, rapport rédigé pour Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2012.

Hilscherova, K., L. Dusek, V. Kubik, P. Cupr, J. Hofman, J. Klanova et I. Holoubek. « Redistribution of organic pollutants in river sediments and alluvial soils related to major floods », *Journal of Soils and Sediments*, vol. 7, nº 3, 2007, pp. 167-177.

Himsworth, C.G., E. Jenkins, J.E. Hill, M. Nsungu, M. Ndao, R.C.A. Thompson, C. Covacin, A. Ash, B.A. Wagner, A. McConnell, F.A. Leighton et S. Skinner. « Short report: emergence of sylvatic *echinococcus granulosus* as a parasitic zoonosis of public health concern in an indigenous community in Canada », *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 82, nº 4, 2010b, pp. 643-645.

Himsworth, C.G., S. Skinner, B. Chaban, E. Jenkins, B.A. Wagner, N.J. Harms, F.A. Leighton, R.C.A. Thompson et J.E. Hill. « Short report: multiple zoonotic pathogens identified in canine feces collected from a remote Canadian indigenous community », *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 83, nº 2, 2010a, pp. 338-341.

Hinch, S.G. et E.G. Martins. *Examen des effets potentiels des changements climatiques sur la survie des saumons rouges du fleuve Fraser et analyse des tendances interannuelles de la mortalité en cours de migration et avant la fraye*, Commission d'enquête Cohen sur les déclins des populations de saumon rouge du fleuve Fraser, rapport technique 9, 2011, <http://www.cohencommission.ca/fr/pdf/TR/Project9-Report.pdf>.

Holden, C. « Climate change: higher temperatures seen reducing global harvests », *Science*, vol. 323, nº 5911, 2009, p. 193.

Hongoh, V., L. Berrang-Ford, N.H. Ogden, R. Lindsay, M.E. Scott et H. Artsob. « A review of environmental determinants and risk factors for avian-associated mosquito arboviruses in Canada », *Biodiversity*, vol. 10, nº 2-3, 2009, pp. 83-91.

Hongoh, V., L. Berrang-Ford, M.E. Scott et L.R. Lindsay. « Expanding geographical distribution of the mosquito, *Culex pipiens*, in Canada under climate change », *Applied Geography*, vol. 33, nº 1, 2012, pp. 53-62.

Hongoh, V., A.G. Hoen, C. Aenishaenslin, J.-P. Waaub, D. Bélanger et P. Michel. « Spatially explicit multi-criteria decision analysis for managing vector-borne diseases », *International Journal of Health Geographics*, vol. 10, 2011.

Horton, G., L. Hanna et B. Kelly. « Drought, drying and climate change: emerging health issues for ageing Australians in rural areas », *Australasian Journal on Ageing*, vol. 29, nº 1, 2010, pp. 2-7.

Huang, C., A.G. Barnett, X. Wang, P. Vaneckova, G. Fitzgerald et S. Tong. « Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: a systematic review », *Environmental Health Perspectives*, vol. 119, nº 12, 2011a, pp. 1681-1690.

Huang, C., P. Vaneckova, X. Wang, G. FitzGerald, Y. Guo et S. Tong. « Constraints and barriers to public health adaptation to climate change: a review of the literature », *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 40, nº 2, 2011b, pp. 183-190.

ICIS (Institut canadien d'information sur la santé). *Environnements physiques en milieu urbain et inégalités en santé*, Institut canadien d'information sur la santé, Ottawa (Ontario), 2011.

ICIS (Institut canadien d'information sur la santé). *Environnements physiques en milieu urbain et inégalités en santé : examen de la portée des interventions*, Institut canadien d'information sur la santé, Ottawa (Ontario), 2012.

IOM (Institute of Medicine). *Climate Change, the Indoor Environment and Health*, The National Academies Press, Washington (DC), 2011.

IPSC (nstitut de prévention des sinistres catastrophiques). *Telling the weather story*, Institut de prévention des sinistres catastrophiques, 2012, <http://iclr.org/images/Telling_the_weather_story.pdf>.

Iranpour, M., M.J. Turell et L.R. Lindsay. « Potential for Canadian mosquitoes to transmit Rift Valley fever virus », *Journal of the American Mosquito Control Association*, vol. 27, nº 4, 2011, pp. 363-369.

Isaacs, S., C. LeBer et P. Michel. « La distribution des toxi-infections alimentaires selon le milieu d'exposition – Ontario », *Relevé des maladies transmissibles au Canada*, vol. 24, nº 8, 1998, pp. 61-64.

Islam, T., K. Berhane, R. McConnell, W.J. Gauderman, E. Avol, J.M. Peters et F.D. Gilliland. « Glutathione-S-transferase (GST) P1, GSTM1, exercise, ozone and asthma incidence in school children », *Thorax*, vol. 64, 2009, pp. 197-202.

Jaakkola, J.J. et T.L. Knight. « The role of exposure to phthalates from polyvinyl chloride products in the development of asthma and allergies: a systematic review and meta-analysis », *Environmental Health Perspectives*, vol. 116, nº 7, 2008, pp. 845-853.

Jackson, Y., L. Gétaz, H. Wolff, M. Holst, A. Mauris, A. Tardin, J. Sztajzel, V. Besse, L. Loutan, J.M. Gaspoz, J. Jannin, P. Albajar Vinas, A. Luquetti et F. Chappuis. « Prevalence, clinical staging and risk for blood-borne transmission of Chagas disease among Latin American migrants in Geneva, Switzerland », *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 4, nº 2, 2010.

Jardine, C., L.R. Lindsay, V.M. Nicholson, D. Ojkic et J.F. Prescott. « Longitudinal study on the seroprevalence of avian influenza, leptospirosis, and tularemia in an urban population of raccoons (Procyon lotor) in Ontario, Canada », *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, vol. 11, nº 1, 2011, pp. 37-42.

Jenkins, E.J., J.M. Schurer et K.M. Gesy. « Old problems on a new playing field: Helminth zoonoses transmitted among dogs, wildlife, and people in a changing northern climate », *Veterinary Parasitology*, vol. 182, nº 1, 2011, pp. 54-69.

Jerrett M., R.T. Burnett, C.A. Pope III, K. Ito, G. Thurston, D. Krewski, Y. Shi, E. Calle et M. Thun. « Long-term ozone exposure and mortality », *New England Journal of Medicine*, vol. 360, nº 11, 2009, pp.1085-1095.

Johnston, F.H. « Bushfires and human health in a changing environment », *Australian Family Physician*, vol. 38, nº 9, 2009, pp. 720-724.

Johnston, F.H., S.B. Henderson, Y. Chen, J.T. Randerson, M. Marlier, R.S. Defries, P. Kinney, D.M. Bowman et M. Brauer. « Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires », *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, nº 5, 2012, pp. 695-701.

Jonkman, S.N., B. Maaskant, E. Boyd et M.L. Levitan. « Loss of life caused by the flooding of New Orleans after Hurricane Katrina: Analysis of the relationship between flood characteristics and mortality », *Risk Analysis*, vol. 29, nº 5, 2009, pp. 676-698.

Kelly, J., P.A. Makar et D.A. Plummer. « Projections of mid-century summer air-quality for North America: effects of changes in climate and precursor emissions », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, nº 12, 2012, pp. 5367-5390.

Kenny, G.P., J. Yardley, C. Brown, R.J. Sigal et O. Jay. « Heat stress in older individuals and patients with common chronic diseases », *Journal de l'Association médicale canadienne*, vol. 182, nº 10, 2010, pp. 1053-1060.

Kidd, S.E., Y. Chow, S. Mak, P.J. Bach, H. Chen, A.O. Hingston, J.W. Kronstad et K.H. Bartlett. « Characterization of environmental sources of the human and animal pathogen *Cryptococcus gattii* in British Columbia, Canada, and the Pacific Northwest of the United States », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 73, nº 5, 2007, pp. 1433-1443.

Kjellstrom, T. et H.J. Weaver. « Climate change and health: impacts, vulnerability, adaptation and mitigation », *New South Wales Public Health Bulletin*, vol. 20, nº 1-2, 2009, pp. 5-9.

Kleeman, M.J., S. Chen et R.A. Harley. *Climate change impact on air quality in California*, rapport rédigé pour le California Air Resources Board, projet nº 04-349, 2010.

Koffi, J.K., P.A. Leighton, Y. Pelcat, L. Trudel, L.R. Lindsay, F. Milord et N.H. Ogden. « Passive surveillance for I. scapularis ticks: enhanced analysis for early detection of emerging Lyme disease risk », *Journal of Medical Entomology*, vol. 49, nº 2, 2012, pp. 400-409.

Kosatsky, T. « Hot day deaths, summer 2009: what happened and how to prevent a recurrence », *British Columbia Medical Journal*, vol. 52, nº 5, 2010, p. 261.

Kovats, R.S. et S. Hajat. « Heat stress and public health: a critical review », *Annual Review of Public Health*, vol. 29, 2008, pp. 41-55.

Kovats, S., P.T. Toelupe, M. Alam et A.J. Mohamed. « Developing effective adaptation strategies », chapitre 3 dans *Commonwealth Health Ministers' Update 2009*, 2009, pp. 49-54.

Kravchenko, J., A.P. Abernethy, M. Fawzy et H.K. Lyerly. « Minimization of heat wave morbidity and mortality », *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 44, nº 3, 2013, pp. 274-282.

Krewski, D., R. Burnett, M. Jerrett, C.A. Pope, D. Ranham, E. Calle, G. Thurston et M. Thun. « Mortality and long-term exposure to ambient air pollution: ongoing analyses based on the American Cancer Society cohort », *Journal of Toxicology and Environmental Health – Part A*, vol. 68, 2005, pp. 1093-1109.

Künzli, N., E. Avol, J. Wu, W.J. Gauderman, E. Rappaport, J. Millstein, J. Bennion, R. McConnell, F.D. Gilliland, K. Berhane, F. Lurmann, A. Winer et J.M. Peters. « Health effects of the 2003 southern California wildfires on children », *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 174, nº 11, 2006, pp. 1221-1228.

Laforce, S., M. Simard, R. Leconte et F. Brissette. « Climate change and floodplain delineation in two southern Quebec river basins », *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 47, nº 4, 2011, pp. 785-799.

Lake, I.R., I.A. Gillespie, G. Bentham, G.L. Nichols, C. Lane, G.K. Adak et E.J. Threlfall. « A re-evaluation of the impact of temperature and climate change on foodborne illness », *Epidemiology and Infection*, vol. 137, nº 11, 2009, pp. 1538-1547.

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

Larson T., J. Su, A.M. Baribeau, M. Buzzelli, E. Setton et M. Brauer. « A spatial model of urban winter woodsmoke concentrations », *Environmental Science & Technology*, vol. 41, 2007, pp. 2429-2436.

Leighton, P.A., J.K. Koffi, Y. Pelcat, L.R. Lindsay et N.H. Ogden. « 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*, vol. 49, nº 2, 2012, pp. 457-464.

Lemelin, H., D. Matthews, C. Mattina, N. McIntyre, M. Johnston, R. Koster et Weenusk First Nation at Peawanuck. « Climate change, wellbeing and resilience in the Weenusk First Nation at Peawanuck: the Moccasin telegraph goes global », *Rural and Remote Health*, vol. 10, nº 2, 2010, p. 1333.

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

Lesnikowski, A.C., J.D. Ford, L. Berrang-Ford, J.A. Paterson, M. Barrera et S.J. Heymann. « Adapting to health impacts of climate change: a study of UNFCCC Annex I parties », *Environmental Research Letters*, vol. 6, nº 4, 2011.

Lowe, D., K.L. Ebi et B. Forsberg. « Heatwave Early Warning Systems and Adaptation Advice to Reduce Human Health Consequences of Heatwaves », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 8, 2011, pp. 4623-4648.

Maibach, E., M. Nisbet et M. Weathers. *Conveying the human implications of climate change: a climate change communication primer for public health professionals*, George Mason University Center for Climate Change Communication, Fairfax, Virginie, 2011.

Mak, S., M. Morshed et B. Henry. « Ecological niche modeling of Lyme disease in British Columbia, Canada », *Journal of Medical Entomology*, vol. 47, nº 1, 2010, pp. 99-105.

Maller, C.J. et Y. Strengers. « Housing, heat stress and health in a changing climate: promoting the adaptive capacity of vulnerable households, a suggested way forward », *Health Promotion International*, vol. 26, nº 4, 2011, pp. 492-498.

Mancini, R. « Kitchen violations: doing the right thing at home », *The Canadian Journal of Canadian Medical Education*, vol. 20, nº 1, 2008, pp. 47-48.

Marcheggiani, S., C. Puccinelli, S. Ciadamidaro, V.Della Bella, M. Carere, M.F. Blasi, N. Pacini, E. Funari et L. Mancini. « Risks of water-borne disease outbreaks after extreme events », *Toxicological and Environmental Chemistry*, vol. 92, nº 3, 2010, pp. 593-599.

Marsden, W. « Cities Feeling the Heat », *Montreal Gazette*, 29 janvier, 2011.

Martel, B., J. Giroux, P. Gosselin, F. Chebana, T. Ouarda et C. Charron. *Indicateurs et seuils météorologiques pour les systèmes de veille-avertissement lors de vagues de chaleur au Québec*, Institut national de santé publique du Québec, INRS-ETE, 2010.

McClymont Peace, D. et E. Myers. « Community-based participatory process – climate change and health adaptation program for Northern First Nations and Inuit in Canada », *International Journal of Circumpolar Health*, vol. 71, 2012, p. 18412.

McGranahan, G., D. Balk et B. Anderson. « The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones », *Environment & Urbanization*, vol. 19, nº 1, 2007, pp. 17-37.

McLeman, R., M. Brcklacich, M. Woodrow, K. Vodden, P. Gallaugher et R. Sander-Regier. « Opportunities and barriers for adaptation and local adaptation planning in Canadian rural and resource-based communities », *Climate Change Adaptation in Developed Nations*, vol. 42, 2011, pp. 449-459.

McMichael, A.J., M. Neira et D.L. Heymann. « World health assembly 2008: climate change and health », *The Lancet*, vol. 371, nº 9628, 2008, pp. 1895-1896.

McMichael, A.J., A.R. Woodruff et S. Hales. « Climate change and human health: present and future risks », *The Lancet*, vol. 367, nº 9513, 2006, p. 842.

McMichael, C., K.M. Barnett et A.J. McMichael. « An ill wind? Climate change, migration and health », *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, nº 5, 2012, pp. 646-654.

Meakin, S. et T. Kurvits. *Assessing the impacts of climate change on food security in the Canadian Arctic*, 2009, <http://www.grida.no/files/publications/foodsec_updt_LA_lo.pdf>.

Medlock, J.M., K.M. Hansford, F. Schaffner, V. Versteirt, G. Hendrickx, H. Zeller et W.V. Bortel. « A review of the invasive mosquitoes in Europe: ecology, public health risks and control options », *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, vol. 12, nº 6, 2012.

Meier-Stephenson, V., J.M. Langley, M. Drebot et H. Artsob. « Encéphalite sévissant durant l'été : un cas d'infection par le virus snowshoe hare (sérogroupe Californie) en Nouvelle-Écosse », *Relevé des maladies transmissibles au Canada*, vol. 33, nº 11, 2007, pp. 23-26.

Messier, V., B. Lévesque, J. Proulx, L. Rochette, M.D. Libman, B.J. Ward, B. Serhir, M. Couillard, N.H. Ogden, E. Dewailly, B. Hubert, S. Déry, C. Barther, D. Murphy et B. Dixon. « Seroprevalence of toxoplasma gondii among Nunavik Inuit (Canada) », *Zoonoses and Public Health*, vol. 56, nº 4, 2009, pp. 188-197.

Millins, C., A. Reid, P. Curry, M.A. Drebot, M. Andonova, P. Buck et F.A. Leighton. « Evaluating the use of house sparrow nestlings as sentinels for West Nile Virus in Saskatchewan », *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, vol. 11, nº 1, 2011, pp. 53-58.

Moffatt, H. et S. Struck. *Les éclosions de maladies d'origine hydrique dans les petits réseaux d'alimentation en eau potable au Canada*, 2011.

Moore, D., R. Copes, R. Fisk, R. Joy, K. Chan et M. Brauer. « Population health effects of air quality changes due to forest fires in British Columbia in 2003: estimates from physician-visit billing data », *Revue canadienne de santé publique*, vol. 97, nº 2, 2006, pp. 105-108.

Morrissey, S.A. et J.P. Reser. « Natural disasters, climate change and mental health considerations for rural Australia », *Australian Journal of Rural Health*, vol. 15, nº 2, 2007, pp. 120-125.

Morse, B.W. et M. Zakrison. « The impact on the Inuit of environmental degradation to the Canadian Arctic », *Common Law World Review*, vol. 39, nº 1, 2010, pp. 48-68.

Nakazawa, Y., R. Williams, A.T. Peterson, P. Mead, E. Staples et K.L. Gage. « Climate change effects on plague and tularemia in the United States », *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, vol. 7, nº 4, 2007, pp. 529-540.

Neria, Y., A. Nandi et S. Galea. « Post-traumatic stress disorder following disasters: a systematic review », *Psychological Medicine*, vol. 38, nº 4, 2008, pp. 467-480.

New York Panel on Climate Change. « Climate change adaptation in New York City: building at risk management response », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1196, 2010, pp. 1-3.

Ng, V. et J.M. Sargeant. « A stakeholder-informed approach to the identification of criteria for the prioritization of zoonoses in Canada », *PLoS ONE*, vol. 7, nº 1, 2012.

Nitschke, M., G.R. Tucker et P. Bi. « Morbidity and mortality during heat waves in Metropolitan Adelaide », *Medical Journal of Australia*, vol. 187, nº 11-12, 2007, pp. 662-665.

Norval, M. et G.M. Halliday. « The consequences of UV-induced immunosuppression for human health », *Hotochemistry and Photobiology*, vol. 87, nº 5, 2011, pp. 965-977.

Noyes, P.D., M.K. McElwee, H.D. Miller, B.W. Clark, L.A. Van Tiem, K.C. Walcot, K.N. Erwint et E.D. Levin. « The toxicology of climate change: environmental contaminants in a warming world », *Environment International*, vol. 35, nº 6, 2009, pp. 971-986.

OCFP (Ontario College of Family Physicians). *Health effects of climate change: an information brochure for family physicians*, Ontario College of Family Physicians, Toronto (Ontario), 2011.

Ogden, N.H., C. Bouchard, K. Kurtenbach, G. Margos, L.R. Lindsay, L. Trudel, S. Nguon et F. Milford. « Active and passive surveillance and phylogenetic analysis of Borrelia burgdorferi elucidate the process of Lyme disease risk emergence in Canada », *Environmental Health Perspectives*, vol. 118, nº 7, 2010, pp. 909-914.

Ogden, N.H., L.R. Lindsay, K. Hanincová, I.K. Barker, M. Bigras-Poulin, D.F. Charron, A. Heagy, C.M. Francis, C.J. O'Callaghan, I. Schwartz et R.A. Thompson. « Role of migratory birds in introduction and range expansion of *Ixodes scapularis* ticks and of *Borrelia burgdorferi* and *Anaplasma phagocytophilum* in Canada », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 74, 2008b, pp. 1780-1790.

Ogden, N.H., G. Margos, D.M. Aanensen, M.A. Drebot, E.J. Feil, K. Hanincová, I. Schwartz, S. Tyler et L.R. Lindsay. « Investigation of genotypes of *Borrelia burgdorferi* in *Ixodes scapularis* ticks collected during surveillance in Canada, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 77, nº 10, 2011, pp. 3244-3254.

Ogden, N.H., L. St.-Onge, I.K. Barker, S. Brazeau, M. Bigras-Poulin, D.F. Charron, C.M. Francis, A. Heagy, L.R. Lindsay, A. Maarouf, P. Michel, F. Mllford, C.J. O'Callaghan, L. Trudel et R.A. Thompson. « Risk maps for range expansion of the Lyme disease vector, *Ixodes Scapularis*, in Canada now and with climate change », *International Journal of Health Geographics*, vol. 7, nº 24, 2008a.

OMM (Organisation météorologique mondiale). *Scientific assessment of ozone depletion: 2010*, Organisation météorologique mondiale, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 52, Genève, Suisse, 2011.

OMM (Organisation météorologique mondiale). *Le compte rendu annuel de l'OMM sur l'état du climat confirme que 2012 se classe parmi les dix années les plus chaudes*, Organisation météorologique mondiale, communiqué de presse nº 972, 2013, <http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_972_fr.html>.

OMS (Organisation mondiale de la santé). *Protecting Health from Climate Change*, Organisation mondiale de la santé, Genève, Suisse, 2008.

OMS (Organisation mondiale de la santé). *Protéger la santé dans un environnement mis à mal par le changement climatique : cadre d'action régional européen*, Organisation mondiale de la santé, Copenhague, Danemark, 2010.

OMS (Organisation mondiale de la santé). *Le gaz d'échappement des moteurs diesel cancérogènes*, Organisation mondiale de la santé, Centre international de recherche sur le cancer, communiqué de presse nº 213, 2012a, <http://www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2012/pdfs/pr213_F.pdf>.

OMS (Organisation mondiale de la santé). *Protecting health from climate change: vulnerability and adaptation assessment*, Organisation mondiale de la santé, Genève, Suisse, 2012b, <http://www.who.int/globalchange/publications/Final_Climate_Change.pdf>.

Organisation mondiale du tourisme. *Climate change and tourism: responding to global challenges*, Organisation mondiale du tourisme, Madrid, Espagne, 2008, <http://www.e-untwo.org/content/kk9027/?p=d7a22d4758ad49e08d57c5d0d0e8b956&pi=0>.

Orihel, D.M., Bird, D.F., M. Brylinsky, H. Chen, D.B. Donald, D.Y. Huang, A. Giani, D. Kinniburgh, H. Kling, B.G. Kotak, P.R. Leavitt, C.C. Neilson, S. Reedyk, R.C. Rooney, S.B. Watson, R.W. Zurawell et R.D. Vinebrooke. « High microcystin concentrations occur only at low nitrogen-to-phosphorus ratios in nutrient-rich Canadian lakes », *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 69, nº 9, 2012, pp. 1457-1462.

Osberghaus, D., E. Finkel et M. Pohl. *Individual adaptation to climate change: the role of information and perceived risk*, Discussion Paper No. 10-061, Centre for European Economic Research, 2010.

Ostry, A., M. Ogborn, K.L. Bassil, T.K. Takaro et D.M. Allen. « Climate change and health in British Columbia: projected impacts and a proposed agenda for adaptation research and policy », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 7, nº 3, 2010, pp. 1018-1035.

Pabbaraju, K., K.C.F. Ho, S. Wong, J.D. Fox, B. Kaplen, S. Tyler, M. Drebot et P.A.G. Tilley. « Surveillance of mosquito-borne viruses in Alberta using reverse transcription polymerase chain reaction with generic primers », *Journal of Medical Entomology*, vol. 46, nº 3, 2009, pp. 640-648.

Paerl, H.W. et J. Huisman. « Climate: Blooms like it hot – A link exists between global warming and the worldwide proliferation of harmful cyanobacterial blooms », *Science*, vol. 320, nº 5872, 2008, pp. 57-58.

Paerl, H.W et J. Huisman. « Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms », *Environmental Microbiology Reports*, vol. 1, nº 1, 2009, pp. 27-37.

Pajot, M. et L. Aubin. *Assessing health vulnerability to climate change in the region of Peel – Summary*, Region of Peel, Ontario, 2012.

Parkinson, A.J. « Sustainable development, climate change and human health in the Arctic », *International Journal of Circumpolar Health*, vol. 69, nº 1, 2010a, pp. 99-105.

Parkinson, A.J. « Arctic human health initiative: a contribution to the International Polar Year », *Circumpolar Health Supplements*, nº 6, 2010b, pp. 1-46.

Parkinson, A.J. et B. Evengard. « Climate change, its impact on human health in the Arctic and the public health response to threats of emerging infectious diseases », *Global Health Action*, vol. 2, 2009, pp. 1-3.

Paterson, J.A., P. Berry, L. Varangu et K. Waddington. *Preparing health care facilities in Canada for climate change*, rapport rédigé pour le ministère de l'Environnement de la Nouvelle-Écosse, Climate Change Adaptation Fund, 2013.

Paterson, J.A., J.D. Ford, L. Berrang Ford, A. Lesnikowski, P. Berry, J. Henderson et J. Heymann. « Adaptation to climate change in the Ontario public health sector », *BMC Public Health*, vol. 12, 452 p., 2012.

Pichora, E.C. et L.D. Marrett. « Sun behaviour in Canadian children: results of the 2006 National Sun Survey », *Revue canadienne de santé publique*, vol. 101, nº 4, 2010, pp. 14-18.

Polain, J.D., H.L. Berry et J.O. Hoskin. « Rapid change, climate adversity and the next 'big dry': Older farmers' mental health », *Australian Journal of Rural Health*, vol. 19, nº 5, 2011, pp. 239-243.

Potera, C. « Indoor air quality: climate change impacts indoor environment », *Environmental Health Perspectives*, vol. 119, nº 9, 2011, p. A382.

Poutiainen, C., L. Berrang-Ford, J. Ford et J. Heymann. « Civil society organizations and adaptation to the health effects of climate change in Canada », *Public Health*, 2013, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0033350613000711>.

RAND. *Building community resilience to disasters: a roadmap to guide local planning, research highlights*, RAND Health, 2011.

Ravel, A., E. Smolina, J.M. Sargeant, A. Cook, B. Marshall, M.D. Fleury et F. Pollari. « Seasonality in human salmonellosis: assessment of human activities and chicken contamination as driving factors », *Foodborne Pathogens and Disease*, vol. 7, nº 7, 2010, pp. 785-794.

Region of Peel. *West Nile Virus in the Region of Peel*, Region of Peel, Ontario, 2006.

Region of Peel. *Peel Climate Change Strategy: a Strategic Plan for Climate Change for the Geographic Region of Peel*, Region of Peel, Ontario, 2011.

Riedel, D. « La santé et le bien-être humains », dans *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*, D.S. Lemmen et F.J. Warren (éd.), Ressources naturelles Canada, Ottawa, 2004.

Robine, J.M., S.L. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.P. Michel et F.R. Herrmann. « Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003 », *Comptes Rendus Biologies*, vol. 331, nº 2, 2008, pp. 171-178.

Robinson, B., M.F. Alatas, A. Robertson et H. Steer. « Natural disasters and the lung », *Respirology*, vol. 16, nº 3, 2011, pp. 386-395.

Rosenzweig, C., W.D. Solecki, S.A. Hammer et S. Mehrotra. *Climate change and cities: first assessment report of the urban climate change research network*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2011.

Rylander, C., Odland, J.O. et T.M. Sandanger. « Climate change and environmental impacts on maternal and newborn health with focus on Arctic populations », *Global Health Action*, vol. 4, 2011.

Safronetz, D., M.A. Drebot, H. Artsob, T. Cote, K. Makowski et L.R. Lindsay. « Sin Nombre virus shedding patterns in naturally infected deer mice (*Peromyscus maniculatus*) in relation to duration of infection », *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, vol. 8, nº 1, 2008, pp. 97-100.

Salam, M.T., T. Islam, J. Gauderman et F.D. Gilliland. « Roles of arginase variants, atopy, and ozone in childhood asthma », *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 123, 2009, pp. 596-602, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0091674908024354>.

Salb, A.L., H.W. Barema, B.T. Elkin, R.C. Thompson, D.P. Whiteside, S.R. Black, J.P. Dubey et S.J. Kutz. « Dogs as sources and sentinels of parasites in humans and wildlife, Northern Canada », *Emerging Infectious Diseases*, vol. 14, nº 1, 2008, pp. 60-63.

Salcioglu, E., M. Basoglu et M. Livanou. « Post-traumatic stress disorder and comorbid depression among survivors of the 1999 earthquake in Turkey », *Disasters*, vol. 31, nº 2, 2007, pp. 115-129.

Sampasa-Kanyinga, H., B. Lévesque, E. Anassour-Laouan-Sidi, S. Côté, B. Serhir, B.J. Ward, M.D. Libman, M.A. Drebot, M. Ndao et E. Dewailly. « Zoonotic infections in Native communities of James Bay, Canada », *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, vol. 12, nº 6, 2012, pp. 473-481.

Santé Canada. *Adaptation aux périodes de chaleur accablante : lignes directrices pour évaluer la vulnérabilité en matière de santé*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2011a.

Santé Canada. *Lignes directrices à l'intention des travailleurs de la santé pendant les périodes de chaleur accablante : un guide technique*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2011b.

Santé Canada. *Climate telling*, Santé Canada, 2012a, <http://climatetelling.ca/>.

Santé Canada. *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada – Documents techniques*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2012b, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/index-fra.php>.

Santé Canada. *Élaboration de systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur afin de protéger la santé : guide des pratiques exemplaires*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2012c.

Santé Canada. *Iqaluit (NRI): building local capacity to monitor microbiological water quality in the streams and rivers of Iqaluit Nunavut: towards protecting drinking water resources in a changing climate*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2012d, <http://climatetelling.ca/community/iqaluit-nri/>.

Santé Canada. *Notre santé, notre environnement : un aperçu de la santé environnementale au Canada*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2012e, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/contaminants/sehc-asec/index-fra.php>.

Santé Canada. *Ross River First Nation, Yukon: caribou, culture and climate change*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2012f, <http://climatetelling.ca/community/ross-river-caribou/>.

Santé Canada. *Les algues bleues (cyanobactéries) et leurs toxines*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2000, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/cyanobacter-fra.php>.

Santé Canada. *Risques et bénéfices pour la santé liés à l'usage d'essence contenant 10 % d'éthanol au Canada*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2013a, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/ethanol-fra.php>.

Santé Canada. *Évaluation des risques pour la santé humaine liés à la production, la distribution et l'utilisation de biodiesel au Canada – Sommaire exécutif*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2013b, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/biodiesel-fra.php>.

Santé Canada. *Insécurité alimentaire des ménages au Canada en 2007-2008 : statistiques et graphiques clés*, Santé Canada, 2013d, <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/surveill/nutrition/commun/insecurit/key-stats-cles-2007-2008-fra.php>.

Schenck, P., K.A. Ahmed, A. Bracker et R. DeBernardo. *Climate change, indoor air quality and health*, 2010.

Schmidt, C.W. « Black carbon: the dark horse of climate change drivers », *Environmental Health Perspectives*, vol. 119, nº 4, 2011, pp. A172-A175.

Sécurité publique Canada. *Base de données canadienne sur les catastrophes*, Sécurité publique Canada, 2013a, <http://cdd.publicsafety.gc.ca/dtpg-eng.aspx?cultureCode=en-Ca&provinces=9&eventTypes=%27WF%27&eventStartDate=%2720110101%27%2c%272.0111231%27&normalizedCostYear=1&dynamic=false&eventId=1025>.

Sécurité publique Canada. *Base de données canadienne sur les catastrophes*, Sécurité publique Canada, 2013b, <http://cdd.publicsafety.gc.ca/dtpg-eng.aspx?cultureCode=en-Ca&provinces=2&eventTypes=%27FL%27&eventStartDate=%2720090101%27%2c%27200912 31%27&normalizedCostYear=1&eventId=1030>.

Sécurité publique Canada. *Base de données canadienne sur les catastrophes*, Sécurité publique Canada, 2013c, <http://cdd.publicsafety.gc.ca/dtpg-eng.aspx?cultureCode=en-Ca&provinces=5&eventTypes=%27HU%27&eventStartDate=%2720100101%27%2c%27201012 31%27&normalizedCostYear=1&dynamic=false&eventId=555>.

Seguin, J. *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2008.

Seguin, J. et P. Berry. « Rapport de synthèse », dans *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2008.

Shaw, J., R.B. Taylor, D.L. Forbes, S. Solomon et M.H. Ruz. *Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise*, Commission géologique du Canada, Ottawa (Ontario), Bulletin 505, 1998, 79 p.

Sheridan, S.C. « A survey of public perception and response to heat warnings across four North American cities: an evaluation of municipal effectiveness », *International Journal of Biometeorology*, vol. 52, nº 1, 2006, pp. 3-15.

Shindell, D., J.C.I. Kuylenstierna, E. Vignati, R. van Dingenen, M. Amann, Z. Klimont, S.C. Anenberg, N. Muller, G. Janssens-Maenhout, F. Raes, J. Schwartz, G. Faluvegi, L. Pozzoli, K. Kupiainen, L. Höglund-Isakssom, L. Emberson, D. Streets, V. Ramanathan, K. Hicks, N. Oanh, G. Milly, M. Williams, V. Demkine et D. Fowler. « Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security », *Science*, vol. 335, nº 6065, 2013, pp. 183-189.

Simon, A., M. Chambellant, B.J. Ward, M. Simard, J.F. Proulx, B. Levesque, M. Bigras-Poulin, A.N. Rousseau et N.H. Ogden. « Spatio-temporal variations and age effect on *Toxoplasmagondii* seroprevalence in seals from the Canadian Arctic », *Parasitology*, vol. 138, nº 11, 2011, pp. 1362-1368.

Smargiassi, A., A. Brand, M. Fournier, F. Tessier, S. Goudreau, J. Rousseau et M.A. Benjamin. « A spatiotemporal land-use regression model of winter fine particulate levels in residential neighbourhoods », *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 22, nº 4, 2012, pp. 331-338.

Société canadienne du cancer. *Statistiques canadiennes sur le cancer 2012*, Société canadienne du cancer, Toronto (Ontario), 2012.

Somasundaram, D.J. et W.A. Van De Put. « Management of trauma in special populations after a disaster », *Journal of Clinical Psychiatry*, vol. 67, supplément nº 2, 2006, pp. 64-73.

SPC (Sécurité publique Canada), *Base de données canadienne sur les catastrophes*, Sécurité publique Canada, 2012, <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrcs/cndn-dsstr-dtbs/index-fra.aspx>.

SPC (Sécurité publique Canada). *Base de données canadienne sur les catastrophes*, Sécurité publique Canada, 2013a, <http://bdc.securitepublique.gc.ca/dtpg-fra.aspx?cultureCode=en-Ca&provinces=9&eventTypes=%27WF%27&eventStartDate=%272011010l%27%2c%2720111231%27&normalizedCostYear=1&dynamic=false&eventId=1025>.

SPC (Sécurité publique Canada). *Base de données canadienne sur les catastrophes*, Sécurité publique Canada, 2013b, <http://bdc.securitepublique.gc.ca/dtpg-fra.aspx?cultureCode=en-Ca&provinces=2&eventTypes=%27FL%27&eventStartDate=%2720090101%27%2c%2720091231%27&normalizedCostYear=1&eventId=1030>.

SPC (Sécurité publique Canada). *Base de données canadienne sur les catastrophes*, Sécurité publique Canada, 2013c, <http://bdc.securitepublique.gc.ca/dtpg-fra.aspx?cultureCode=en-Ca&provinces=5&eventTypes=%27HU%27&eventStartDate=%2720100101%27%2c%2720101231%27&normalizedCostYear=1&dynamic=false&eventId=555>.

Statistique Canada. *Recensement*, Statistique Canada, 2011, <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/index-fra.cfm>.

Stern, N. *The Stern review on the economics of climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2006.

Sumaila, U.R., W. Cheung, V. Lam, D. Pauly et S. Herrick. « Climate change impacts on the biophysics and economics of world fisheries », *Nature Climate Change*, 2011.

Tagaris, E., K. Manomaiphiboon, K.-J. Liao, L.R. Leung, J.-H. Woo, S. He, P. Amar et A.G. Russell. « Impacts of global climate change and emissions on regional ozone and fine particulate matter concentrations over the United States », *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, nº D14312, 2007.

Taylor, J., K.M. Lai, M. Davies, D. Clifton, I. Ridley et P. Biddulph. « Flood management: prediction of microbial contamination in large-scale floods in urban environments », *Environment International*, vol. 37, nº 5, 2011, pp. 1019-1029.

ten Veldhuis, J.A.E., F.H.L.R. Clemens, G. Sterk et B.R. Berends. « Microbial risks associated with exposure to pathogens in contaminated urban flood water », *Water Research*, vol. 44, nº 9, 2010, pp. 2910-2918.

The Aspen Institute. *The shared future: a report of the Aspen Institute Commission on Arctic climate change*, The Aspen Institute, Energy and Environment Program, 2011.

Thielman, A. et F.F. Hunter. « Establishment of Ochlerotatus japonicus (Diptera: Culicidae) in Ontario, Canada », *Journal of Medical Entomology*, vol. 43, nº 2, 2006, pp. 138-142.

Thomas, M.K., D.F. Charron, D. Waltner-Toews, C.J. Schuster, A.R. Maarouf et J.D. Holt. « A role of high impact weather events in waterborne disease outbreaks in Canada », *International Journal of Environmental Health Research*, vol. 16, nº 3, 2006, pp. 167-180.

Thomas, M.K., R. Murray, L. Flockhart, K. Pintar, F. Pollari, A. Fazil, A. Nesbitt et B. Marshall. « Estimates of the burden of foodborne illness in Canada for 30 specified pathogens and unspecified agents, circa 2006 », *Foodborne Pathogens and Disease*, vol. 10, nº 7, 2013, pp. 639-648, <http://www.phac-aspc.gc.ca/efwd-emoha/efbi-emoa-eng.php>.

Thomas, P., A. Swaminathan et R.M. Lucas. « Climate change and health with an emphasis on interactions with ultraviolet radiation: a review », *Global Change Biology*, vol. 18, nº 8, 2012, pp. 2392-2405.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Le prix à payer : répercussions économiques du changement climatique pour le Canada*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 2011.

Tuomainen, A., S. Markku et A. Sieppi. « Indoor air quality and health problems associated with damp floor coverings », *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 77, 2004, pp. 222-226.

Union of Concerned Scientists. *Climate Change and Your Health: Rising Temperatures, Worsening Ozone Pollution*, Union of Concerned Scientists, 2011.

US CDC (United States Centers for Disease Control and Prevention), Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Agency et American Water Works Association. *When every drop counts: protecting public health during drought conditions – a guide for public health professionals*, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, 2010, <http://www.cdc.gov/nceh/ehs/Docs/When_Every_Drop_Counts.pdf>.

US CDC (United States Centers for Disease Control and Prevention). *Reentering your flooded home*, United States Centers for Disease Control and Prevention, 2012, <http://emergency.cdc.gov/disasters/mold/reenter.asp>.

US EPA (United States Environmental Protection Agency). *Health security through healthy environments*, United States Environmental Protection Agency, Briefing Note 01, 2008.

US EPA (United States Environmental Protection Agency). « Benefits of reducing BC emissions », chapitre 6 dans *Report to Congress on Black Carbon*, Department of the Interior, Environment and Related Agencies Appropriations Act, 2010, 2012, 388 p., <http://www.epa.gov/blackcarbon/>.

van der Leun, J.C., R.D. Piacentini et F.R. de Gruijl. « Climate change and human skin cancer », *Photochemical and Photobiology Science*, vol. 7, 2008, pp. 730-733.

Vida, S., M. Durocher, T.B. Ouarda et P. Gosselin. *Relationship between ambient temperature and humidity and visits to mental health emergency departments in Québec*, Department of Psychiatry, McGill University et McGill University Health Centre, Montréal, Québec, vol. 63, nº 11, 2012, pp. 1150-1153, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23117515>.

Ville de Calgary. *Calgary community GHG reduction plan*, Ville de Calgary, 2011, <http://www.calgary.ca/UEP/ESM/Documents/ESM-Documents/Calgary_GHG_Plan_Nov_2011.pdf>.

Ville de Toronto. *Map-based heat vulnerability assessment: implementation of a map-based heat vulnerability assessment and decision support system*, Ville de Toronto, 2011, <http://www.climateontario.ca/doc/ORAC_Products/TPH/Mapping%20Tool%20-%20User%20Manual%20for%20Heat%20Vulnerability%20Mapping%20Tool.pdf>.

Ville de Toronto. *Toronto's future weather and climate driver study: outcomes report*, Ville de Toronto, 2012, <http://www.toronto.ca/teo/pdf/tfwcds-summary.pdf>.

Vrbova, L., C. Stephen, N. Kasman, R. Boehnke, M. Doyle-Waters, A. Chablitt-Clark, B. Gibson, M. FitzGerald et D.M. Patrick. « Systematic review of surveillance systems for emerging zoonoses », *Transboundary and Emerging Diseases*, vol. 57, nº 3, 2010, pp. 154-161.

Wald, M.L. et J. Schwartz. « Weather extremes leave parts of U.S. grid buckling », *The New York Times*, 25 juillet, 2012.

Wall, E. et K. Marzall. « Adaptive capacity for climate change in Canadian rural communities », *Local Environment*, vol. 11, nº 4, 2006, pp. 373-397.

Water Research Foundation. *Opportunities for managing climate change by applying adaptive management*, Water Research Foundation, Denver, Colorado, 2013.

Wang, J., N.H. Ogden et H. Zhu. « The impact of weather conditions on Culex pipiens and Culex restuans (Diptera: Culicidae) abundance: a case study in Peel Region », *Journal of Medical Entomology*, vol. 48, nº 2, 2011, pp. 468-475.

Wheaton, E., S. Kulshreshtha, V. Wittrock et G. Koshida. « Dry times: hard lessons from the Canadian drought of 2001 and 2002 », *Le Géographe canadien*, vol. 52, nº 2, 2008, pp. 241-262.

Winter, J.G., A.M. DeSellas, R. Fletcher, L. Heintsch, A. Morley, L. Nakamoto et K. Utsumi. « Algal blooms in Ontario, Canada: increases in reports since 1994 », *Lake and Reservoir Management*, vol. 27, 2011, pp. 105-112.

Wittrock, V., S.N. Kulshrestha et E. Wheaton. « Canadian prairie rural communities: their vulnerabilities and adaptive capacities to drought », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 16, nº 3, 2011, pp. 267-290.

Wobeser, G., G.D. Campbell, A. Dallaire et S. McBurney. « Tularemia, plague, yersiniosis, and Tyzzer's disease in wild rodents and lagomorphs in Canada: a review », *Revue vétérinaire canadienne*, vol. 50, nº 12, 2009, pp. 1251-1256.

Zanobetti, A. et J. Schwartz. « Ozone and survival in four cohorts with potentially predisposing diseases », *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 184, nº 7, 2011, pp. 836-841.

Ziska, L.H., P.R. Epstein et W.H. Schlesinger. « Rising CO_2, climate change, and public health: exploring the links to plant biology », *Environmental Health Perspectives*, vol. 117, nº 2, 2009, pp. 155-158.

Ziska, L., K. Knowlton, C. Rogers, D. Dalan, N. Tierney, M.A. Elder, W. Filley, J. Shropshire, L.B. Ford, C. Hedberg, P. Fleetwood, K.T. Hovanky, T. Kavanaugh, G. Fulford, R.F. Vrtis, J.A. Patz, J. Portnoy, F. Coates, L. Bielory et D. Frenz. « 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*, vol. 108, nº 10, 2011, pp. 4248-4251.

CHAPITRE 8 : INFRASTRUCTURE HYDRAULIQUE ET INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

Principaux auteurs :

Jean Andrey *(University of Waterloo)*, **Pamela Kertland** et **Fiona Warren** *(Ressources naturelles Canada)*

Collaborateurs :

Linda Mortsch *(Environnement Canada)*, **Adam Garbo** et **Julien Bourque** *(Ressources naturelles Canada)*

Citation recommandée :

Andrey, J., P. Kertland et F.J. Warren. « Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014. pp. 233-252.

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions. 235

1. Introduction 236

2. Infrastructure hydraulique 238
   - 2.1 Ressources et approvisionnement en eau 239
   - 2.2 Qualité de l'eau 240
   - 2.3 Gestion des eaux pluviales et des eaux usées 242
   - 2.4 Résilience et capacité d'adaptation 242

3. Infrastructure de transport 244
   - 3.1 Principaux enjeux relatifs à l'infrastructure de transport 245
   - 3.2 Enjeux spécifiques des régions du Nord 246
   - 3.3 Enjeux spécifiques des localités côtières 247
   - 3.4 Transport de marchandises sur les Grands Lacs 247
   - 3.5 Stratégies d'adaptation 248

4. Conclusion 249

Références 250

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- Une infrastructure bien entretenue résiste mieux aux changements climatiques. C'est d'autant plus vrai face aux changements graduels des variations de températures et de précipitations, contre lesquels il suffit généralement d'effectuer un entretien régulier et de respecter les cycles normaux de mise à jour ou de modifier les politiques et les procédures d'exploitation et d'entretien. Les phénomènes météorologiques extrêmes, qui constituent les principaux facteurs de vulnérabilité, peuvent mettre l'infrastructure hydraulique à rude épreuve et provoquer des inondations ou polluer l'eau, ou encore endommager le réseau de transport, perturbant ainsi, tant les possibilités d'accès, que la chaîne d'approvisionnement.

- Le travail effectué au cours des cinq dernières années par le Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) a permis de mieux comprendre la façon de procéder afin d'adapter les infrastructures du Canada aux changements climatiques. Le protocole d'évaluation axé sur les risques mis au point par le CVIIP a une portée générale et permet aux ingénieurs et aux planificateurs d'observer et de traiter les changements climatiques comme un facteur parmi tant d'autres ayant une incidence sur la résilience du système, et d'agir en conséquence.

- La prise en considération des changements climatiques dans la gestion adaptative des ressources permet de mieux tenir compte des facteurs climatiques au niveau de la surveillance continue du système, et de prendre des décisions éclairées sur les approches les plus rentables en matière de conception, d'exploitation et d'entretien d'infrastructures.

- Bien que les codes, normes et autres instruments (CNAI) soient considérés comme étant un important outil potentiel d'adaptation de l'infrastructure, rares sont les exemples de CNAI au Canada qui ont été élaborés en tenant compte des changements climatiques passés ou futurs. Les risques climatiques actuels et futurs qui pèsent sur les systèmes d'infrastructures doivent faire l'objet d'une analyse approfondie, afin d'établir la nature des changements requis de manière à ce que l'on puisse procéder à l'élaboration de codes et de normes qui tiennent compte des changements climatiques.

1. INTRODUCTION

Les systèmes d'infrastructures constituent un élément clé de l'adaptation, compte tenu de l'importance du rôle qu'ils jouent dans le soutien d'un vaste ensemble d'enjeux sociaux, économiques et environnementaux, notamment la santé publique, la sécurité, le développement économique et la protection de l'environnement. La salubrité et la fiabilité des réserves en eau, la protection contre les inondations et la fiabilité des réseaux de transports sont essentiels à l'ensemble des secteurs économiques abordés dans les différents chapitres du présent rapport. Le Canada consacre chaque année des milliards de dollars à la réparation, à l'amélioration et à l'expansion de l'infrastructure publique. Par exemple, en 2011, 1,336 milliard de dollars ont été affectés à l'amélioration d'usines de traitement des eaux en place, ainsi qu'à la construction de nouvelles stations (Statistique Canada, 2013). Les récents budgets du gouvernement comprenaient d'importants investissements à long terme dans le financement d'infrastructures, mais il semblerait que les besoins ne soient pas encore comblés.

Les infrastructures sont conçues pour durer entre 10 et 100 ans et, au fil du temps, doivent être adaptées aux différentes mutations qui se manifestent, tant dans le domaine technologique, que dans le domaine social ou commercial (CCI, 2008). Les changements climatiques représentent toute une série de défis touchant la conception, la construction, l'exploitation et l'entretien des installations, et il s'agit-là d'un facteur supplémentaire à prendre en considération à mesure que le Canada s'efforce d'entretenir et d'améliorer l'infrastructure existante (figure 1; Félio, 2012).

Les répercussions des changements climatiques sur les infrastructures ont été observées dans toutes les régions du pays et ont été présentées dans l'évaluation canadienne de 2008 intitulée *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (Lemmen *et al.*, 2008). En outre, la synthèse de ce rapport dénonçait la vulnérabilité aux changements climatiques des collectivités et des infrastructures essentielles. Depuis 2008, de plus en plus de documentation révisée par les pairs met l'accent sur l'adaptation et les infrastructures au Canada, notamment sur l'analyse de la résilience de systèmes d'infrastructures spécifiques (la majeure partie de ce travail a été effectuée à l'aide du protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques [CVIIP]; *voir* l'encadré 1). En outre, les renseignements sur l'incidence des changements climatiques et les mesures d'adaptation adoptées ont été intégrés à différents documents de planification (p. ex., le plan d'action de la région de Durham face aux changements climatiques), et leur intégration s'est soldée par la mise en place de changements opérationnels et structurels (p. ex., la nécessité de revoir la conception des ponceaux de l'infrastructure routière de Transports Québec, afin de tenir compte de la hausse probable de la fréquence et de l'intensité des événements de précipitations imputables aux changements climatiques; Ouranos, 2010). Ces renseignements ont également permis de dégager des orientations politiques à l'échelle régionale (*voir* l'étude de cas 2). La documentation scientifique n'a cependant pas fait grand cas de cette avancée.

Le présent chapitre, qui se veut une introduction à ce nouveau domaine d'étude, met l'accent sur les installations hydrauliques (approvisionnement en eau, eaux pluviales et eaux usées), ainsi que sur certains aspects des transports. Il s'articule autour de l'incidence des changements climatiques et de l'adoption de mesures d'adaptation sur l'infrastructure lourde proprement dite, plutôt que sur les ressources en eau ou les systèmes de transport plus vastes dont elle fait partie[1]. Des études de cas permettent d'aborder les principales vulnérabilités, répercussions et mesures d'adaptation, afin de fournir de nouveaux détails sur les efforts d'adaptation.

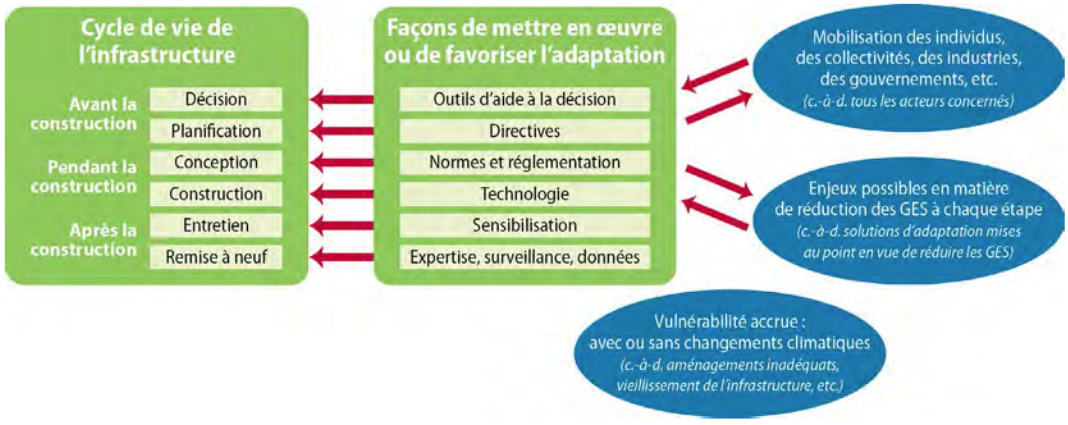


FIGURE 1 : L'adaptation dans le cycle de vie de l'infrastructure *(source : Larrivée et Simonet, 2007).*

[1] Il convient également de remarquer qu'une évaluation plus exhaustive de l'incidence des changements climatiques et des mesures d'adaptation mises en place dans le secteur canadien des transports est en cours.

ENCADRÉ 1

COMITÉ SUR LA VULNÉRABILITÉ DE L'INGÉNIERIE DES INFRASTRUCTURES PUBLIQUES (CVIIP) DU CANADA

(http://www.pievc.ca/f/index_.cfm?)

Le Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) est un comité national chargé de mener une évaluation technique de la vulnérabilité des infrastructures publiques du Canada aux répercussions du changement climatique. Il comprend tous les ordres de gouvernement, des spécialistes, ainsi que des organisations non gouvernementales. Le CVIIP a pour objectif de faire en sorte que les changements climatiques soient toujours pris en considération dans la planification, la conception, la construction, l'exploitation, l'entretien et la remise en état des infrastructures publiques au Canada.

Le CVIIP s'est, dans un premier temps, penché sur quatre aspects de l'infrastructure publique du Canada, à savoir : les bâtiments, les routes et structures connexes, les réseaux d'acheminement des eaux pluviales et des eaux usées, et les ressources en eau. Le Comité a notamment mis au point un protocole d'ingénierie, qui a permis d'instaurer un processus applicable à n'importe quel type d'infrastructure dans le but d'en évaluer la vulnérabilité technique, ainsi que le degré de risque relatif aux répercussions climatiques actuelles et futures (figure 2). En septembre 2013, près de 30 études de cas avaient été réalisées à l'aide du protocole dans l'ensemble du pays (tableau 1) et d'autres sont en cours. Les résultats obtenus à l'aide du protocole du CVIIP sont versés dans une base de connaissances nationale entretenue par Ingénieurs Canada, et ont été en outre utilisés dans le cadre d'une évaluation des codes, des normes et de la conception des infrastructures.

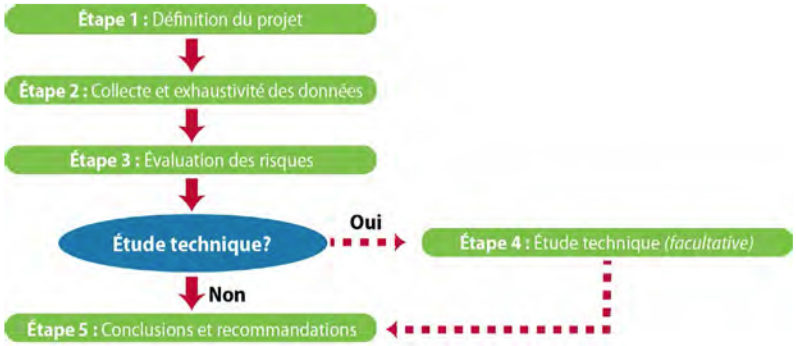


FIGURE 2 : Aperçu du processus en cinq étapes du CVIIP permettant d'analyser la vulnérabilité technique d'une infrastructure particulière face à des paramètres climatiques actuels et futurs *(source : CVIIP, 2007)*.

Sujet de l'étude de cas	Hôte / Partenaire
Bâtiments	
Fondation à thermosiphon dans un pergélisol tiède	Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest
Complexe du Pré Tunney du gouvernement du Canada	Travaux publics et Services gouvernementaux Canada
Trois bâtiments publics dans le sud-ouest de l'Ontario	Infrastructure Ontario
Bâtiment actuel de la Faculté de génie et nouvel ajout	Université de Saskatoon
Logement communautaire à Toronto : 285, rue Shuter	Toronto Community Housing Corporation
Énergie	
Infrastructure de livraison et d'alimentation électrique de Toronto Hydro	Toronto Hydro
Transport	
Pont Quesnell	Ville d'Edmonton
Infrastructure routière de la ville de Sudbury	Ville de Sudbury
Route de Coquihalla – tronçon de Hope à Merritt	Ministère du transport et de l'infrastructure de la C. B.
Route 3 à l'ouest de Yellowknife	Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest
Ponceaux	Service des transports de la Ville de Toronto
Route 16 de Yellowhead (C. B.), entre Vanderhoof et Priestly Hill	Ministère du transport et de l'infrastructure de la C. B.
Infrastructure de l'aéroport Pearson de Toronto	Autorité aéroportuaire du Grand Toronto

Encadré 1 suite à la page suivante

Sujet de l'étude de cas	Hôte / Partenaire
Eaux de ruissellement et eaux usées	
Infrastructure des digues et des ouvrages longitudinaux à Placentia	Ville de Placentia et gouvernement de Terre-Neuve et Labrador
Infrastructure du réseau d'assainissement de Vancouver	Vancouver Métro
Infrastructure du réseau d'assainissement du Fraser	Vancouver Métro
Barrages d'écrêtement des crues Claireville et G. Ross Lord	Toronto and Region Conservation Authority
Mise à niveau de l'usine de traitement des eaux d'égout de Sandy Point	Municipalité de la district de Shelburne
Infrastructure des eaux de ruissellement	Ville de Castlegar
Réseau d'égouts séparatifs	Ville de Prescott
Évaluation des réseaux d'évacuation des eaux de surface dans le secteur de Trois-Rivières-Centre	Trois-Rivières
Évaluation du réseau de la Ville de Laval de collecte des eaux pluviales	Ville de Laval
Infrastructure des eaux de ruissellement et des eaux usées	Ville de Welland
Ressources en eau	
Infrastructure des ressources en eau	Ville de Portage la Prairie
Infrastructure d'alimentation en eau	Ville de Calgary

TABLEAU 1 : Études de cas réalisées à l'aide du protocole d'ingénierie du CVIIP. Les rapports et les récapitulatifs peuvent être consultés à l'adresse suivante : http://www.pievc.ca/e/doc_list.cfm? dsid=3.

2. INFRASTRUCTURE HYDRAULIQUE

Au Canada, certaines des répercussions des changements climatiques les plus importantes et les plus susceptibles de se faire sentir seront liées aux ressources hydriques (Lemmen *et al.*, 2008). L'évaluation de 2008 a cerné les principales menaces qui pèsent sur les installations hydrauliques, notamment les phénomènes extrêmes (inondations, sécheresses, tempêtes), la dégradation du pergélisol dans les régions du Nord et la baisse des niveaux de l'eau dans de nombreuses régions du pays, en raison d'une hausse des températures. Les collectivités éloignées et les communautés des Premières Nations seront particulièrement concernées par la baisse saisonnière de la qualité et de la quantité de l'eau qu'enregistrera le Canada dans son ensemble (p. ex., Bourque et Simonet, 2008; Walker et Sydneysmith, 2008). Le rôle crucial joué par les ressources hydriques dans de nombreux domaines, notamment l'agriculture, la production d'énergie, le transport, les collectivités et les activités récréatives, est également abordé dans Lemmen *et al.* (2008), ainsi que dans les précédents chapitres du présent rapport.

De récentes études de cas, qui ont déterminé avec plus de précision la nature des vulnérabilités possibles des installations hydrauliques aux changements climatiques, ont préconisé des approches favorisant l'adaptation (CCI, 2008; Associated Engineering, 2011). L'infrastructure hydraulique permet d'approvisionner les collectivités, l'industrie et le secteur agricole, de gérer les eaux pluviales et de contrôler les inondations à l'intérieur des terres et sur les côtes.

Bien que le premier Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes (Félio, 2012) n'ait pas tenu compte de la portée des futurs changements climatiques, il a toutefois fourni un aperçu de l'état des systèmes d'infrastructures actuels en se fondant sur ses propres données. Les systèmes de gestion des eaux pluviales constituent la catégorie d'infrastructure la mieux analysée, ainsi qu'en témoigne la cote « très bonne » qu'elle a reçue dans l'ensemble. Cependant, 12,5 % des systèmes ne sont pas considérés comme étant en bon état, notamment à cause des inquiétudes que soulèvent les canalisations (tableau 2). Les réseaux d'alimentation en eau potable, qui comprennent les usines, les réservoirs, les stations de pompage et les canalisations de transmission et de distribution, sont jugés satisfaisants dans l'ensemble, avec environ 15 % des systèmes d'approvisionnement en eau potable considérés comme étant mauvais, voire très mauvais, en fonction de l'état de certains éléments du système d'infrastructure (tableau 2). L'infrastructure de gestion des eaux usées a également été considérée comme étant bonne dans l'ensemble, bien que la proportion d'installations jugées insatisfaisantes, voire très mauvaises, soit bien plus élevée (p. ex., environ 30 à 40 %) que pour les réseaux d'alimentation en eau potable ou d'acheminement des eaux pluviales (Félio, 2012). Ces résultats reposent sur la contribution volontaire de données provenant de 123 municipalités de l'ensemble des provinces, ce qui représente entre 40,7 et 59,1 % de la population canadienne (en fonction du type d'infrastructure).

	Évaluation				
Type de système	**Très bon**	**Bon**	**Acceptable**	**Mauvais**	**Très mauvais**
Eau potable					
• Usines, stations de pompage et réservoirs	12,6 %	73,1 %	9,8 %	4,3 %	0,3 %
• Canalisations de transmission et de distribution	4,2 %	80,5 %	14,4 %	0,3 %	0,7 %
Eaux pluviales					
• Stations de pompage et installations de gestion des eaux pluviales	56,8 %	30,7 %	6,9 %	5,0 %	0,6 %
• Systèmes de collecte	40,5 %	36,2 %	17,7 %	4,9 %	0,8 %
Eaux usées					
• Usines, stations de pompage et stockage	16,0 %	43,7 %	34,5 %	5,7 %	0,1 %
• Systèmes de collecte	33,7 %	36,1 %	22,4 %	6,5 %	1,2 %

TABLEAU 2 : Synthèse du Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes pour l'eau potable, les eaux pluviales et les eaux usées (Félio, 2012).

L'adaptation des infrastructures passe par différentes approches, souvent combinées, et allant de changements structurels à des mesures non structurelles ou plus « douces » telles que la modification des politiques et des procédures suivies à différentes étapes du cycle de vie de l'infrastructure, notamment lors de la planification, de la remise en état et du remplacement des installations (figure 1). Ces mesures peuvent aborder directement les problèmes en reconcevant ou en améliorant l'infrastructure, afin qu'elle soit en mesure d'affronter certains changements climatiques (p. ex., en agrandissant les ponceaux pour qu'ils puissent faire face à des phénomènes de précipitations plus intenses), ou en améliorant la résilience du système aux changements climatiques en général (p. ex., entretien régulier des canalisations, réduction du ruissellement des eaux pluviales).

ENCADRÉ 2

CODES, NORMES ET AUTRES INSTRUMENTS (CNAI)

Le projet du CVIIP s'est penché sur ses études de cas portant sur les installations de ressources en eau afin d'établir des recommandations en matière de codes, de normes et autres instruments (CNAI). Les installations de ressources en eau sont régies par de nombreux CNAI, notamment des règlements, des codes, des normes, des règlements d'autorités locales, ainsi que des directives nationales. Selon le CVIIP, les données climatiques utilisées pour élaborer des CNAI n'étaient pas toujours faciles à obtenir ou à cerner, ce qui signifie qu'il ne suffit pas d'actualiser les données climatiques pour mettre à jour les CNAI. Les recommandations en matière de mesures relatives aux CNAI reflètent l'instabilité du climat et favorisent l'adaptation de manière à : 1) améliorer les données climatiques; 2) faire en sorte que les CNAI tiennent compte d'options progressives tout au long du cycle de vie de l'infrastructure; 3) étendre la portée des CNAI de façon à couvrir le rendement physique, fonctionnel et opérationnel; et 4) garder une marge de manœuvre dans les travaux de conception entrepris en vue de s'adapter aux changements climatiques (CVIIP, 2012).

2.1 RESSOURCES ET APPROVISIONNEMENT EN EAU

Il est essentiel que les installations hydrauliques soient robustes et fiables afin d'assurer l'acheminement d'eau propre. L'évolution du climat peut avoir une incidence sur les ressources en eau, notamment en raison du changement saisonnier du débit fluvial (p. ex., fonte et ruissellement printanier précoces), d'événements de précipitations plus intenses, de périodes sèches plus longues et d'épisodes de sécheresse plus fréquents, ainsi que de la baisse du niveau des lacs (CCI, 2008; *voir aussi* le chapitre 2). Il est en outre essentiel de tenir compte de l'évolution de l'état de la glace. Les périodes de frasil (accumulation de cristaux de glace dans l'eau) peuvent, par exemple, causer le blocage des tuyaux de captage d'eau (Associated Engineering, 2011).

Les principaux enjeux d'approvisionnement tournent généralement autour de demandes concurrentielles en matière d'eau, en particulier face à la diminution des ressources imputable au climat, alors même que les besoins de la population, du secteur agricole et de l'industrie, accusent une hausse. Plusieurs études menées d'un bout à l'autre du Canada ont démontré une diminution des ressources hydriques attribuable aux changements climatiques (p. ex., Forbes *et al.*, 2011; Tanzeeba et Gan, 2012; *voir aussi* le chapitre 2 – *Un aperçu des changements climatiques au Canada*), et certaines régions font même preuve d'un haut degré de vulnérabilité à cet égard, y compris le sud de l'intérieur de la Colombie-Britannique, le sud des Prairies et le sud de l'Ontario. Les systèmes d'approvisionnement en eau peuvent être limités, soit par les restrictions de prélèvement d'eau, soit par les priorités établies en vertu de droits relatifs à l'eau, notamment durant les longues périodes de sécheresse (Genivar, 2007; Associated Engineering, 2011). Dans ce type de cas, l'adaptation doit être axée sur les mesures de conservation de l'eau par les particuliers et l'industrie. La ville de Calgary s'est fixée comme objectif d'optimiser son utilisation de l'eau et d'ainsi réduire la demande qui pèse sur le réseau d'alimentation en eau de 30 % en 30 ans, afin de pouvoir faire face à la croissance démographique future tout en maintenant la quantité d'eau prélevée dans la rivière aux niveaux de 2003 (Ville de Calgary, 2007). Varier les sources et les points de captage peut également favoriser la résilience, en permettant aux opérateurs de passer d'un point à l'autre si l'une des sources devenait inutilisable (Associated Engineering, 2011) en raison, par exemple, du faible niveau de l'eau ou d'un blocage formé par la glace.

2.2 QUALITÉ DE L'EAU

Le climat et les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent avoir une incidence sur la qualité de l'eau de diverses façons. Parmi les changements climatiques qui soulèvent le plus de préoccupations figurent les inondations, qui ont des effets immédiats et à plus long terme sur la qualité de l'eau; la turbidité et la contamination de l'eau, provoquées par les précipitations et les épisodes de sécheresse plus intenses, tous deux susceptibles de faire baisser le niveau de l'eau qui est ainsi moins diluée; et la salinisation des eaux souterraines dans les régions côtières, attribuable à l'élévation du niveau de la mer.

Les inondations peuvent non seulement influer sur la qualité de l'eau lors du captage vers le système de traitement, mais peuvent aussi présenter un danger au niveau de l'infrastructure lourde et du matériel, notamment dans le cas des produits chimiques utilisés pour traiter l'eau stockés sur place (Genivar, 2007). Les phénomènes de précipitations intenses peuvent ajouter des contaminants provenant de sources rurales et urbaines à l'eau prélevée. Les pluies intenses et l'érosion qui s'ensuit peuvent également accroître la turbidité de l'eau prélevée. Le problème se pose un peu moins dans les régions telles que les Prairies, qui connaissent déjà des périodes de fortes turbidités, car des cuves de sédimentation sont habituellement rattachées aux systèmes de traitement de l'eau. Cependant, même dans ces régions, il pourrait falloir apporter des changements à la façon dont le système est exploité et éventuellement faire appel à des techniques de traitement supplémentaires (Genivar, 2007; Associated Engineering, 2011).

La hausse des températures peut provoquer une altération du goût et de l'odeur, et ainsi exiger le recours à un traitement supplémentaire (Associated Engineering, 2011). Les feux de friches peuvent également nuire à la qualité de l'eau de source pendant plusieurs années. Par exemple, quatre ans après l'incendie de Lost Creek survenu en 2003, en Alberta, la turbidité et la teneur en carbone organique total et en azote provenant du ruissellement ont augmenté, notamment durant la fonte printanière et les débits de pointe suivant les pluies torrentielles (Emelko *et al.*, 2011). Ce type de changements peut accroître les coûts de traitement de l'eau (p. ex., produits chimiques) dans les systèmes déjà en mesure de gérer de telles répercussions, ou peut exiger une amélioration de l'infrastructure, lorsque les systèmes de traitement de l'eau ne suffisent pas à la tâche (Associated Engineering, 2011, Emelko *et al.*, 2011). Si les réservoirs à l'heure actuelle peuvent répondre aux besoins durant des périodes ponctuelles de hausse de la demande (p. ex., sécheresse ou vague de chaleur), leur vulnérabilité pourrait se faire sentir en cas d'augmentation de la fréquence de ces périodes (comme, par exemple, lors d'une succession de phénomènes météorologiques extrêmes), car les systèmes ne seraient alors pas en mesure de réapprovisionner les réservoirs (Associated Engineering, 2011).

En cas d'utilisation de chlore, les doses devront être augmentées pour pallier le fait que le chlore se décompose plus rapidement dans l'eau à des températures plus chaudes. Si l'analyse des usines de traitement des eaux au Québec a révélé que la plupart (80 %) étaient en mesure de traiter les maximums historiques de *microcystines-LR*, et qu'une hausse de cette toxine en raison des changements climatiques ne représenterait pas une menace sérieuse, d'autres toxines pourraient poser problème si les méthodes de traitement actuelles ne font pas leurs preuves (Carrière *et al.*, 2010). Il faudrait alors faire appel à d'autres méthodes de traitement chimique ou à d'autres technologies.

Les études de cas du CVIIP menées à Portage La Prairie (Genivar, 2007), au Manitoba, et à Placentia, dans les Territoires du Nord-Ouest, ont mis en évidence des risques causés par l'évolution du climat qui pèsent sur certains éléments du système de traitement des eaux, notamment l'incidence de plusieurs facteurs climatiques tels que les inondations, la hausse des températures, les fortes pluies, les épisodes de sécheresse, les tempêtes de verglas et les vents violents, sur les activités de prétraitement, d'adoucissement, de clarification, de désinfection, de stockage, de stockage chimique, ainsi que sur les vannes et les canalisations (CCI, 2008). Les études de cas indiquent que des investissements devront être faits en vue d'éviter la perte de réputation ou d'autres répercussions plus graves. Une étude similaire réalisée à Calgary, en Alberta, et portant sur les principaux risques climatiques qui pèsent sur le réseau d'alimentation en eau, a conclu que le réseau était dans l'ensemble apte à faire face aux changements climatiques (*voir* l'étude de cas 1).

En ce qui concerne les collectivités qui dépendent des ressources en eau souterraine, comme l'Île-du-Prince-Édouard, ou encore 90 % de la population rurale de l'Ontario, du Manitoba et de la Saskatchewan, des études antérieures ont démontré que des changements dans la configuration des précipitations peuvent entraîner une diminution de la recharge, notamment dans les aquifères peu profonds (p. ex., Lemmen *et al.*, 2008). Dans les collectivités côtières, l'intrusion d'eau salée devrait avoir lieu plus souvent du fait de l'élévation du niveau de la mer (p. ex., Vasseur et Catto, 2008). De récentes analyses portant sur l'approvisionnement en eau souterraine à plusieurs endroits de la Nouvelle-Écosse et de l'Île-du-Prince-Édouard ont conclu que, jusqu'à présent, la salinité était davantage imputable à des facteurs géologiques et anthropiques tels que la demande en eau et la surexploitation des ressources, qu'aux changements climatiques et à l'élévation du niveau de la mer (Ferguson et Beebe, 2012; Solutions d'adaptation aux changements climatiques de l'Atlantique, s.d.). Une étude portant sur Richibucto, au Nouveau-Brunswick, démontre que, si l'élévation du niveau de la mer a bel et bien joué un rôle dans l'intrusion latérale d'eau salée dans les aquifères peu profonds ou de profondeur moyenne, les effets sont toutefois moins importants que ceux causés par les changements climatiques sur la recharge d'eau souterraine ou le pompage accru (MacQuarrie *et al.*, 2012). L'amélioration de la cartographie et des méthodes d'évaluation des ressources en eau souterraine permettrait aux gestionnaires des réseaux d'alimentation en eau de déterminer plus précisément la nature de l'incidence de l'activité humaine, des facteurs géologiques et des changements climatiques sur la disponibilité et la qualité des ressources en eau.

ÉTUDE DE CAS 1

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DU RÉSEAU D'ALIMENTATION EN EAU DE LA VILLE DE CALGARY

(source : Associated Engineering, 2011)

En 2011, la ville de Calgary a mené, en collaboration avec Ingénieurs Canada, une évaluation de la vulnérabilité au risque de son réseau d'alimentation en eau. Cette étude visait à déterminer les composants du réseau d'alimentation en eau potable vulnérables aux futurs changements climatiques et aux phénomènes météorologiques extrêmes. Le protocole du CVIIP a permis d'estimer dans quelle mesure l'infrastructure serait exposée aux futurs changements climatiques, notamment pour les années 2020 et 2050. L'évaluation a porté sur l'ensemble du réseau appartenant à la ville et géré par cette dernière dans les limites de sa juridiction, ainsi que sur les bassins versants des rivières Elbow et Bow.

L'équipe a eu recours aux données historiques et aux prévisions relatives aux changements climatiques issues d'un ensemble de modèles mondiaux, afin de déterminer quelles étaient les conditions climatiques représentant le plus grand risque pour la conception, la construction, l'exploitation et la gestion du réseau d'alimentation en eau, ainsi que pour en évaluer les répercussions sur les bassins versants, en ce qui a trait tant à la qualité qu'à la quantité de l'eau. Les variables climatiques susceptibles d'avoir une incidence sur la capacité et sur l'intégrité du réseau d'alimentation en eau sont décrites au tableau 3.

Composants de l'infrastructure		Variables environnementales	
Source d'eau			
• Bassins versants • Barrage et réservoir de Glenmore • Barrages et réservoirs de Ghost et de Bearspaw		• Hausse de la température minimale • Inondation • Sécheresse	• Changements du débit fluvial • Diminution de la couverture neigeuse • Phénomènes cumulés – feux de forêt
Stations de pompage et de captage d'eau brute			
• Station de captage et de pompage d'eau brute de Glenmore • Stations de captage et d'élévation d'eau brute de Bearspaw		• Inondation • Augmentation des cycles de gel et de dégel	
Processus de traitement			
• Installations de prétraitement • Filtration • Désinfection	• Stockage • Systèmes de dosage des produits chimiques • Traitement des résidus	• Phénomènes cumulés – feux de forêt • Hausse de la température minimale • Inondation • Sécheresse	
Stockage et distribution			
• Infrastructure linéaire • Vannes/canalisations		• Augmentation des cycles de gel et de dégel	
Infrastructure de soutien			
• Soutien de l'infrastructure lourde • Administration/exploitation • Électricité et transmission • Transport		• Hausse de la température extrême • Inondation	

TABLEAU 3 : Composants du réseau d'alimentation en eau de la ville de Calgary et effets négatifs attribués à des variables climatiques.

Les résultats de l'évaluation ont démontré que, dans l'ensemble, le réseau d'alimentation en eau de la ville de Calgary est robuste et peut affronter les effets graduels des futurs changements climatiques, notamment grâce à la redondance constatée au sein des usines de traitement des eaux de la ville, des sources d'eau brutes et des réseaux de distribution, qui favorise la résilience de l'infrastructure. Une plus grande vulnérabilité aux phénomènes extrêmes (inondations, sécheresses), ainsi qu'aux phénomènes cumulés, a cependant été observée. L'équipe chargée de l'évaluation a en outre mis en évidence les éléments nécessitant une recherche plus approfondie.

L'inondation record qu'a connu Calgary en juin 2013 a mis à l'épreuve la résilience du réseau d'alimentation en eau, ainsi que les installations d'acheminement des eaux pluviales et des eaux usées. Au moment de finaliser le présent chapitre, aucune publication sur l'incidence de l'inondation sur le rendement du réseau n'était encore disponible. Toutefois, les deux usines de traitement des eaux de Calgary, Bearspaw et Glenmore, ont pu fournir de l'eau potable tout au long de l'événement, malgré un débit de pointe de 1:500 survenu en amont de l'usine de Glenmore, sur la rivière Elbow, et un phénomène ayant une période de récurrence de 100 ans observé sur la rivière Bow. Un certain nombre de nouveaux processus de traitement mis en place à la suite de récentes mises à niveau ont été sérieusement mis à l'épreuve en raison de la forte turbidité provoquée par cet événement. Des restrictions ont été mises en place dans le but de maintenir à un bas niveau la demande en eau durant l'inondation (P. Fesko, communication personnelle; Ville de Calgary, 2013).

2.3 GESTION DES EAUX PLUVIALES ET DES EAUX USÉES

L'infrastructure de gestion des eaux pluviales et des eaux usées représente la deuxième plus grande catégorie d'investissement de capitaux dans l'infrastructure au Canada (CCI, 2008). Ces infrastructures, qui sont souvent reliées par leurs réseaux de collecte et de transmission, sont toutes deux touchées par la croissance démographique, les modifications de l'utilisation du sol et les changements climatiques.

La vulnérabilité des réseaux d'acheminement des eaux usées découle d'un ensemble de facteurs. La fréquence accrue d'épisodes de dégel en hiver peut accroître le débit du ruissellement de surface froid dans les réseaux d'assainissement mixtes, et ainsi réduire la température de l'eau. Ces chocs peuvent compromettre le bon fonctionnement des processus d'élimination biologique de l'azote et de clarification secondaire (Plosz *et al.*, 2009). Une augmentation dans l'intensité des événements pluvieux ou dans la fréquence des épisodes de pluie sur le sol gelé devrait accroître le risque d'infiltration d'eaux pluviales dans les réseaux sanitaires, ce qui devrait engendrer des trop-pleins plus importants et plus fréquents dans les déversoirs d'orage (Urban Systems, 2010; Genivar, 2011). L'accroissement du débit nécessitera en outre un pompage plus important, entraînant ainsi des dépenses additionnelles au chapitre de l'énergie (Kerr Wood Leidal Associates Limited, 2009) et pourra, dans certains cas, dépasser la capacité de pompage. Les stations de pompage pourraient également enregistrer des pannes électriques durant les vagues de chaleur estivale extrême, du fait de la surchauffe des systèmes électriques dans les bâtiments (Genivar, 2011). Parmi les répercussions physiques directes qu'auront les pluies plus intenses sur les réseaux, figure le déplacement de débris susceptibles de bloquer les ponceaux et les bassins hydrographiques; une telle situation pourrait causer des inondations ou de l'érosion dans certaines zones environnantes, soit des phénomènes qui à leur tour pourraient endommager les infrastructures.

On s'accorde de plus en plus à dire qu'il faudra, face à l'évolution du climat, faire preuve de collaboration interdisciplinaire accrue, si l'on veut mettre en place des solutions innovantes de gestion des eaux pluviales et des eaux usées (Smith, 2009; Pyke *et al.*, 2011). Les inondations survenues en milieu urbain au cours des 20 dernières années, ainsi que les renseignements portant sur les futurs changements climatiques, ont incité les chercheurs à mieux définir les zones de risque, à améliorer la surveillance et l'entretien des réseaux d'évacuation des eaux, à prôner la séparation des réseaux d'évacuation des systèmes sanitaires, et à limiter l'impact du développement (Marsalek et Schreier, 2009; Pyke *et al.*, 2011).

Le développement à incidence limitée permet de gérer les eaux pluviales à la source, de façon à réduire les contaminants qu'elles contiennent et à ralentir le ruissellement en modifiant l'imperméabilité de la surface et des matériaux dans lesquels l'eau s'écoule. Une étude a démontré qu'une augmentation de l'intensité des précipitations de 20 % avait la même incidence sur les réseaux d'assainissement mixtes qu'une hausse de 40 % dans une zone imperméable (Kleindorfer *et al.*, 2009). Une autre étude a conclu que réduire la surface imperméable de 25 à 16 % peut considérablement réduire le ruissellement des eaux pluviales (Pyke *et al.*, 2011).

De nombreuses villes ont des plans et des programmes tels que le débranchement des descentes pluviales, afin de séparer le réseau d'acheminement des eaux pluviales des systèmes sanitaires et d'ainsi réduire le débit d'eau pluviale dans le réseau d'acheminement des eaux usées. La ville de Toronto a mis l'accent sur la surveillance et l'entretien de ses ponceaux, tandis que les collectivités sujettes aux inondations, comme Cambridge et Milton, en Ontario, effectuent des évaluations économiques des répercussions qu'auront les changements climatiques sur la conception des systèmes d'évacuation (Scheckenberger *et al.*, 2009). Ces mesures peuvent gagner en efficacité si elles sont mises en place de manière coopérative à l'échelle du bassin (AMEC Environment and Infrastructure, 2012).

2.4 RÉSILIENCE ET CAPACITÉ D'ADAPTATION

Le peu d'information dont on dispose rend difficile la tâche d'entreprendre un examen exhaustif de la résilience de l'infrastructure hydraulique face aux changements climatiques à l'échelle du Canada, mais de récentes études semblent indiquer que les réseaux bien entretenus font preuve d'une importante résilience. Le CVIIP a conclu qu'une infrastructure correctement entretenue résiste mieux aux changements climatiques en permettant au réseau de fonctionner tel que prévu (CCI, 2008). Ce point a été confirmé dans des études de cas menées par la suite, et concorde avec une évaluation plus globale de l'état des infrastructures canadiennes, conclusion qui souligne d'ailleurs la nécessité d'améliorer la gestion des ressources (Félio, 2012). Plusieurs provinces du Canada ont accru les exigences municipales relatives à la planification de la gestion des ressources et ont fourni des orientations en ce sens (*voir* Gouvernement de l'Ontario, 2012).

Le CVIIP a également mis en lumière le besoin de revoir les pratiques d'ingénierie en vue d'adapter la conception et l'exploitation des infrastructures aux changements climatiques. Ingénieurs Canada a ébauché un ensemble de principes en matière d'adaptation aux changements climatiques à l'intention des ingénieurs en infrastructure. Le document en question a été soumis aux fins d'étude aux membres de la profession (David Lapp, communication personnelle). Des outils et des lignes directrices destinés à aider les propriétaires d'infrastructures font également leur apparition. Par exemple, un nouveau guide d'évaluation des effets hydrologiques des changements climatiques en Ontario a été publié (EBNFLO Environmental AquaResource Inc, 2010) et enrichi d'une formation en ligne.

La communication entre les propriétaires, les opérateurs et les ingénieurs de toutes les régions peut se révéler utile, dans la mesure où des conditions qui apparaissent pour la première fois à un endroit donné peuvent déjà avoir été observées ailleurs. En Colombie-Britannique, des efforts de collaboration s'étendant sur plusieurs années, dans le but de revoir les directives provinciales relatives aux digues marines, ont permis de mettre au point un guide sur l'élévation du niveau de la mer, qui peut tout aussi bien s'appliquer à d'autres régions côtières (*voir* l'étude de cas 2).

Des enquêtes révèlent l'état de préparation actuel des opérateurs de systèmes face aux changements climatiques. En 2012, l'Association canadienne des eaux potables et usées a interrogé une centaine de services d'eau canadiens desservant des populations de tailles diverses dans le but de déterminer leur degré de préparation en matière de gestion des répercussions prévues des changements climatiques. Les services plus importants (desservant des populations d'au moins 150 000 personnes) étaient mieux préparés à reconnaître les risques liés aux changements climatiques. De nombreux répondants ont souligné la nécessité de combler les lacunes au niveau des besoins en information au sujet des incidences des changements climatiques et des risques connexes pour les systèmes de distribution d'eau. Une autre enquête a été menée en 2012 auprès de 244 cadres supérieurs de services d'eau d'une dizaine de pays, afin d'évaluer leur degré de préparation face aux défis que pose l'approvisionnement en eau à l'horizon 2030. Si les préoccupations variaient d'une région à l'autre, la majeure partie des cadres supérieurs s'attendaient à voir s'intensifier

ÉTUDE DE CAS 2

LIGNES DIRECTRICES DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE SUR LES DIGUES MARINES

Des mesures mises en place en Colombie-Britannique au cours des six dernières années ont favorisé la prise en considération de données scientifiques sur l'évolution du niveau de la mer dans les processus de planification et d'élaboration de politiques. L'analyse du déplacement vertical de la terre à l'échelle régionale (attribuable à la tectonique, au rebond glaciaire, à la charge sédimentaire et à d'autres facteurs) et les prévisions de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale ont permis d'établir de nouvelles estimations de l'évolution future du niveau de la mer (Bornhold, 2008; Thomson *et al.*, 2008); ces estimations ont une incidence considérable sur le système actuel de digues marines, qui protège d'importantes infrastructures et propriétés de la province. D'autres analyses ont par la suite été entreprises par le ministère de l'Exploitation des forêts, des terres et des ressources naturelles de la Colombie-Britannique, l'association provinciale des ingénieurs et des géoscientifiques professionnels, ainsi que d'autres, afin d'aider les décideurs et les planificateurs à tenir compte de l'élévation du niveau de la mer dans l'évaluation des risques d'inondation, la cartographie des zones côtières inondables, la conception de digues marines et l'aménagement du territoire. Des lignes directrices sur les digues marines, établies en fonction d'élévations prévues du niveau de la mer de 0,5 m, de 1 m et de 2 m à l'échelle régionale, ont été établies, respectivement, pour les années 2050, 2100 et 2200.

Cette analyse a notamment permis d'établir :

- Une courbe de planification de l'élévation du niveau de la mer indiquant que l'aménagement du littoral doit prendre en considération une élévation du niveau de la mer de 0,5 m d'ici 2050, de 1 m d'ici 2100 et de 2 m d'ici 2200.
- Des rapports techniques servant à calculer la cote en crête des digues marines et les niveaux de constructions en prévision d'inondations, en tenant compte de l'élévation du niveau de la mer, de la dénivellation due au vent, des ondes de tempête et de la remontée des vagues (figure 3).
- Des directives de planification relative à l'élévation du niveau de la mer, notamment la désignation par les autorités locales de « domaines de planification ayant trait à l'élévation du niveau de la mer ».
- Un rapport de comparaison des coûts de différentes options d'adaptation, allant de la construction de digues, à la protection contre les inondations et le recul stratégique. Selon les estimations présentées dans cette étude, il faudrait environ 9,5 millions de dollars pour mettre à niveau l'infrastructure des 250 km de côte endiguée et celle des zones de faible altitude du district régional du Grand Vancouver, afin de faire face à une élévation d'un mètre du niveau de la mer, ainsi que d'apporter les modifications sismiques requises.
- Des lignes directrices de pratique à l'intention des ingénieurs et des géoscientifiques, afin qu'ils tiennent compte des changements climatiques dans les évaluations des risques en matière d'inondation.
- Des directives axées sur les facteurs à prendre en considération dans la conception sismique de digues construites dans les zones particulièrement exposées du sud-ouest de la Colombie-Britannique.

Cette analyse régionale a incité les municipalités à prendre des mesures. En effet, la ville de Vancouver a tenu des ateliers sur l'adaptation de l'infrastructure côtière à l'intention des ingénieurs, des responsables de l'aménagement et des employés municipaux. Ces ateliers ont également incité le conseil municipal de la ville à revoir ses politiques en matière de protection contre les inondations et à prendre des mesures provisoires. L'une de ces mesures consiste à encourager les promoteurs de projets entrepris dans des zones à risque d'inondation à atteindre un niveau de construction provisoire par rapport aux inondations supérieur de 1 m au niveau actuel de construction par rapport aux inondations (Ville de Vancouver, 2012).

En se fondant sur ces résultats, un groupe de travail composé de spécialistes et de représentants des autorités locales, provinciales et fédérales, ainsi que de l'industrie et du milieu universitaire a mis au point un guide national sur l'élévation du niveau de la mer (disponible en anglais uniquement : www.env.gov.bc.ca/cas/adaptation/pdf/SLR-Primer.pdf) comprenant des exemples provenant de la Colombie-Britannique, du Québec et des provinces de l'Atlantique. Le guide aide les collectivités à cerner, évaluer et comparer les options d'adaptation, et propose différents instruments de planification et de réglementation, de modification ou de restriction de l'aménagement du territoire, ainsi que des outils de nature structurelle et non structurelle.

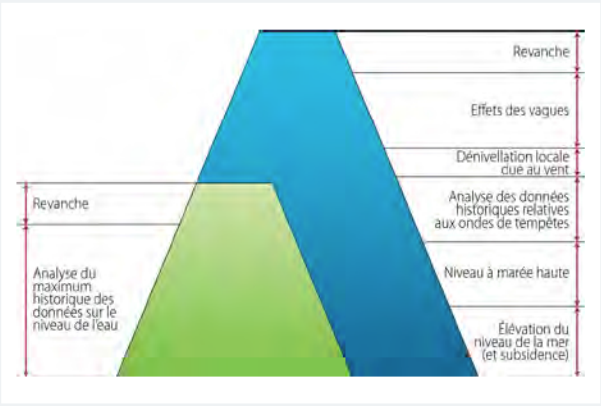


FIGURE 3 : Différences de conception entre les anciens et les nouveaux modèles de digues marines *(source : BC Ministry of Forest, Lands and Natural Resource Operations, 2012).*

le stress hydrique d'ici 2030, et considéraient la gestion de la demande comme étant une mesure essentielle pour y remédier (Economist Intelligence Unit, 2012). Ces enquêtes démontrent que, même si l'on est de plus en plus conscient du risque que représentent les changements climatiques au niveau de l'infrastructure de gestion de l'eau, l'accent continue cependant à être mis sur des enjeux tels que le remplacement des installations vieillissantes, la gestion de la croissance démographique et l'évolution des exigences réglementaires. L'évolution des codes, des normes et des instruments connexes (*voir* l'encadré 2) n'a pas pour sa part soulevé autant d'intérêt.

On accorde en outre de plus en plus d'importance au rôle que joue l'interdépendance entre les systèmes d'infrastructure, ainsi que les systèmes de gestion, dans la planification de l'adaptation (Zimmerman et Faris, 2010; études de cas du CVIIP). Par exemple, les réseaux d'alimentation en eau dépendent souvent de sources superficielles qui servent aussi à des fins de production d'électricité et de protection contre les inondations. L'exploitation du réseau doit donc se faire à la lumière de besoins multiples susceptibles d'entrer en conflit les uns avec les autres. L'accès à l'électricité, y compris aux systèmes d'alimentation électrique de secours, représente désormais un risque important pour les réseaux de traitement et de gestion des eaux. Plusieurs études de cas soulignent la nécessité de protéger les réseaux d'alimentation électrique, afin d'assurer le fonctionnement continu des systèmes de traitement, de gestion et de régulation des eaux, dans le cadre de toute stratégie d'adaptation (Genivar, 2007; Associated Engineering, 2011). Les phénomènes météorologiques extrêmes et les dangers connexes peuvent également empêcher les opérateurs d'accéder aux installations hydriques sur lesquelles ils travaillent. À cet égard, on a mis en place à Calgary un programme de formation polyvalente pour faire en sorte que des employés ou des opérateurs de système qualifiés soient disponibles en tout temps (Associated Engineering, 2011).

3. INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

Le transport est de par sa nature sensible au climat, et nombreux sont les exemples de perturbations et de retards liés à des phénomènes climatiques et aux conditions saisonnières (tableau 4) qui nuisent à ce secteur. Ce type de phénomènes s'est avéré être une des principales préoccupations associées aux changements climatiques dans de nombreux chapitres du présent rapport consacrés aux secteurs. En effet, comme dans le cas de l'infrastructure hydraulique, l'incidence des changements climatiques sur l'infrastructure de transport touche pour ainsi dire la plupart des secteurs au Canada, notamment les ressources naturelles, l'agriculture, la pêche, le tourisme, l'assurance et la santé, qui dépendent tous de la sûreté et de la fiabilité du réseau. En outre, le réseau de transport canadien, qui comprend quatre éléments (aérien, maritime, ferroviaire et routier), est sensible aux changements qui surviennent dans d'autres secteurs en matière de demande et d'exploitation. Les services de transport représentent 4,2 % du PIB canadien (Transports Canada, 2011), le réseau de transport canadien ayant une valeur d'actifs dépassant les 100 milliards de dollars.

Résumé	Date	Référence
Routes du Manitoba se transformant en bourbier l'hiver	3 janv. 2012	CTV News (2012)
Vols annulés en raison du brouillard et de la faible visibilité	17 janv. 2012	Ptashnick et Hayes (2012)
Ouverture d'un gouffre de 5 m de profondeur sur 200 m sur l'autoroute 83 au Manitoba en raison d'un glissement souterrain causé par le ruissellement pluvial	3 juil. 2012	CBC News (2012c)
Accumulation de glace dans l'est de l'Arctique qui endommage un navire et en ralentit le déchargement	29 juil. 2012	CBC News (2012d)
Ralentissement de la circulation, annulation de vols et danger sur les routes et les trottoirs causés par une tempête d'hiver précoce en Alberta	23 oct. 2012	Zickefoose (2013)
Wawa en état d'urgence en raison du ruissellement pluvial (total des dommages supérieur à 10 millions de dollars)	27 oct. 2012	Metro News (2012)
Annulation de vols dans le Canada atlantique en raison de l'ouragan Sandy	29 oct. 2012	The Telegram (2012)
Fermeture de la Transcanadienne à Terre-Neuve en raison des dommages causés par un glissement d'un terrain	19 nov. 2012	CBC News (2012e)
Traversées annulées à partir de l'Île de Vancouver en raison du vent, de la hauteur des vagues et de l'état de la mer	19 déc. 2012	Lavoie (2013)
Chutes de neige record perturbant le transport dans le sud du Québec	27 déc. 2012	Radio-Canada (2012)
VIA Rail a recours au « Snow Fighter » pour dégager la voie ferrée durant les tempêtes de neige	24 janv. 2013	Pinsonneault (2013)
Routes fermées dans le nord-ouest de l'Ontario en raison de la poudrerie sur des autoroutes déjà touchées par la pluie verglaçante	30 janv. 2013	CBC News (2013a)
Retard dans le transport maritime et routier en raison du climat hivernal	18 févr. 2013	National Post (2013a)
Fort Chipewyan risque d'être coupé du reste de l'Alberta en raison de températures anormalement chaudes enregistrées pendant la journée dans cette collectivité du Nord	25 févr. 2013	CBC News (2013b)
Fermeture des routes et des autoroutes à proximité de Fort McLeod et annulation de nombreux vols en raison du manque de visibilité et des routes verglacées	4 mars 2013	National Post (2013b)
Inondations des routes à la suite de fortes pluies	3 juin 2013	Radio-Canada (2013)
Interruption de l'approvisionnement par barges dans l'ouest de l'Arctique en raison de la glace	3 sept. 2013	CBC News (2013c)

TABLEAU 4 : Articles de presse concernant l'incidence du climat sur le transport en 2012-2013.

Les normes de conception et de construction, les montants alloués à la gestion des ressources et les résultats obtenus en matière de mobilité et de sûreté reflètent bien la sensibilité du réseau de transport au climat. Il s'agit de répercussions liées aussi bien à des phénomènes météorologiques tels que les vagues de chaleur et les fortes pluies, qu'à des changements plus progressifs tels que la fonte du pergélisol, la hausse des températures, l'élévation du niveau de la mer et la baisse du niveau de l'eau dans les systèmes d'eau douce. Des analyses antérieures menées sur les changements climatiques, notamment celles citées dans les différents chapitres de Lemmen *et al.* (2008), indiquent que les perturbations imputables à des phénomènes extrêmes tels que les inondations, les incendies et les tempêtes, constituent dans la plupart des régions les principales préoccupations d'ordre climatique en ce qui concerne les transports et que certains réseaux les plus à risque au Canada sont essentiels aux collectivités éloignées et à celles qui dépendent des ressources, notamment dans le Nord et dans les zones côtières, ainsi qu'au transport de ressources naturelles (*voir aussi* le chapitre 3 – *Ressources naturelles*). De plus récentes études démontrent en outre que les changements climatiques entraînent des répercussions importantes sur l'exploitation et l'entretien des réseaux de transport dans les régions les plus densément peuplées du Canada (*voir* la section 3.1).

La présente section du rapport aborde les principaux risques que les changements climatiques font peser sur l'ensemble de l'infrastructure des transports, ainsi que sur certains enjeux qui concernent plus précisément les réseaux de transport dans le Nord, les régions côtières, ainsi que le transport de marchandises sur les Grands Lacs (en ce qui a trait à l'infrastructure plutôt qu'au système dans son ensemble). L'objectif n'est donc pas de présenter ici une évaluation exhaustive des répercussions et des enjeux d'adaptation touchant au secteur des transports. Une analyse plus détaillée sera présentée sur ces points dans la prochaine évaluation du réseau de transport (2015-2016) dirigée par Transports Canada et Ressources naturelles Canada.

3.1 PRINCIPAUX ENJEUX RELATIFS À L'INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

Au cours des six dernières années, la communauté internationale des ingénieurs a prêté une attention croissante aux répercussions des changements climatiques. L'accent a davantage été mis sur les prévisions en matière de vagues de chaleur, de fortes pluies et autres phénomènes extrêmes tels que le vent, compte tenu de leur incidence sur les normes et les directives de conception (Auld, 2008; Vajda *et al.*, 2012), ainsi que sur les risques que comportent les changements climatiques pour l'ensemble du système (p. ex., Capano, 2013; Dzikowski, 2013).

Les projections en matière d'extrêmes de température prévoient une augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des vagues de chaleur dans la majeure partie de l'Amérique du Nord (*voir* le chapitre 2). Cette situation peut aggraver le stress lié à la chaleur, menant notamment à l'apparition d'ornières sur la chaussée, au flambage des voies et à la surchauffe des cargos. Mills *et al.* (2007, 2009) confirment que les prévisions en matière de températures estivales dans le sud du Canada (p. ex., Windsor, en Ontario) devraient, par moments et par endroits, causer un ramollissement, une déformation ou un débordement de la chaussée, ou encore exiger le recours à une qualité différente de pétrole utilisé pour le ciment asphaltique. Les municipalités et la communauté des ingénieurs se penchent de plus en plus sur ces questions, notamment en ce qui a trait aux voies réservées au transport routier (Meyer *et al.*, 2010), et les organismes commencent à revoir la conception et les matériaux de construction des routes (p. ex., ponceaux, liants d'asphalte) en fonction de la tendance au réchauffement (Jacobs *et al.*, 2013).

Les fortes pluies peuvent entraîner des inondations, du ravinement, ainsi que des glissements de talus, et même provoquer des glissements de terrain d'envergure. L'augmentation de la fréquence des fortes pluies prévue dans la majeure partie du Canada pourrait, dans certains cas, exiger que l'on revoit les pratiques de conception et d'entretien. Par exemple, en Colombie-Britannique, on a noté que l'« intensification des précipitations pourrait exiger la mise à jour des politiques et des procédures relatives à la conception et à l'entretien de l'infrastructure routière [traduction] » (Nyland *et al.*, 2011). Environnement Canada (2013) a établi, dans 563 sites à l'échelle du Canada, des courbes d'intensité-durée-fréquence qui ont, dans le cas d'un certain nombre d'entre elles, récemment été mises à jour. Peck *et al.* (2012) estiment que ces mises à jour ne suffisent cependant pas pour se faire une idée de la future configuration des pluies. Si de récentes études ont permis d'améliorer le niveau de compréhension au sujet des extrêmes pluviométriques passés (p. ex., Cheng *et al.*, 2009), de grandes incertitudes persistent concernant la simulation des futurs extrêmes de précipitations (Maraun *et al.*, 2010). Certains éléments attestent en outre du fait que d'autres facteurs météorologiques susceptibles de perturber les réseaux de transport et leur exploitation peuvent devenir plus fréquents du fait des changements climatiques. Il semble, par exemple, que les phénomènes de pluie verglaçante soient appelés à se multiplier dans le centre-sud du Canada (Cheng *et al.*, 2007; 2011). La succession de phénomènes (p. ex., de la pluie après de la pluie verglaçante, ou encore de la pluie sur de la neige) peut également présenter des risques pour les transports. Il faudra, selon les chercheurs, trouver un moyen d'incorporer les tendances toujours plus marquées de phénomènes météorologiques extrêmes dans les normes de conception de l'infrastructure (Cheng *et al.*, 2012).

La plupart des transporteurs de marchandises et une grande partie des infrastructures de fret (p. ex., voies ferrées, aéroports, ports maritimes) sont gérés par des sociétés sans but lucratif ni capital-actions, ou par des intérêts privés, ce qui fait que les risques et les possibilités liés aux changements climatiques sont moins souvent abordés tant dans la littérature grise accessible que dans les publications à comité de lecture. L'examen des questionnaires du Carbon Disclosure Project – auxquels ont répondu Chemin de fer Canadien Pacifique (CFCP) et la Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada (CN) –, ainsi que des comptes rendus de réunions, notamment le sommet réunissant les principaux acteurs du transport de marchandises aux États-Unis, y compris le CN (Camp *et al.*, 2013), contribue à une meilleure compréhension du sujet. Une grande partie des risques mentionnés au cours de ce sommet avaient trait aux extrêmes météorologiques susceptibles de causer la fermeture des réseaux, ainsi que des retards d'expédition. Le CN a désigné en particulier les précipitations, comme étant la principale préoccupation du secteur ferroviaire en matière de climat, en raison des risques associés aux inondations, à l'érosion et aux glissements de terrain, ainsi qu'aux feux de friches, car ces derniers peuvent perturber le service et endommager les ponts en bois (Camp *et al.*, 2013). Ces types de phénomènes ont déjà eu des conséquences sur les réseaux ferroviaires; ainsi, par exemple, les inondations qui ont touché Calgary au printemps 2013 ont fragilisé un pont, ce qui a entraîné le déraillement d'un train (Graveland et Krugel, 2013). Les fortes températures présentent également un risque au niveau de l'intégrité des voies ferrées (Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2013a, b). Il en va de même pour les vagues de chaleur, qui peuvent

accroître la fréquence d'épisodes de flambage des voies et donner lieu à des limitations de vitesse (National Research Council, 2008; CBC News, 2012b; CSIRO, s.d.).

3.2 ENJEUX SPÉCIFIQUES DES RÉGIONS DU NORD

Il est communément admis que les réseaux de transport de surface qui desservent le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest et le Nunavut, ainsi que le nord de nombreuses provinces, sont vulnérables aux changements climatiques à plus d'un égard. La plupart de ces régions reposent sur du pergélisol, n'ont accès à la mer que durant une période estivale relativement brève et dépendent, pour ce qui est du transport, de routes de glace, de barges, de services aériens et d'un accès ferroviaire limité destiné aux activités commerciales et à l'approvisionnement de la collectivité. Étant donné la nature éparse de l'infrastructure de transport dans le Nord, les interruptions de services peuvent avoir de graves conséquences. L'évaluation des systèmes de transport dans le Nord (Prolog Canada, 2011) donne un aperçu des rôles, de l'utilisation et de l'importance de certains éléments du réseau de transport dans le Nord canadien, et définit un ensemble de stratégies telle l'adoption d'un autre parcours, dont l'objet consiste à garantir un accès, peu importe les conditions climatiques.

On sait désormais mieux comment fonctionnent les processus dans les régions froides, et comment reconcevoir l'infrastructure des transports en vue d'en améliorer la résilience face aux extrêmes climatiques et à l'évolution des régimes de températures et d'humidité (p. ex., Doré et Zubeck, 2008; McGregor *et al.*, 2010). On compte en outre plusieurs exemples d'évaluations de la vulnérabilité et d'études d'établissement de cartes des risques dans le Nord ayant trait à l'infrastructure de transport (TRNEE, 2009; Champalle *et al.*, 2013). Des évaluations ponctuelles des conditions et de la dégradation du pergélisol ont été menées en fonction de l'infrastructure de transport existante, allant des aéroports du nord du Québec (Fortier *et al.*, 2011; L'Hérault *et al.*, 2011) aux routes du Yukon (Lepage *et al.*, 2010) et des Territoires du Nord-Ouest (*voir* l'étude de cas 3).

ÉTUDE DE CAS 3

INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT DES TERRITOIRES DU NORD-OUEST

Le réseau de transport des Territoires du Nord-Ouest, qui comprend 2200 km de routes tous temps et 1450 km de routes d'hiver, revêt une importance capitale à l'échelle locale, régionale et nationale. Les routes favorisent le rapprochement des collectivités et offrent aux habitants un accès moins cher, plus facile, et plus sûr aux services régionaux tels les soins de santé, l'éducation et les activités récréatives.

Le ministère des Transport des Territoires du Nord-Ouest (GNWT-DOT) a reconnu que l'infrastructure de transport était vulnérable aux effets des changements climatiques (GNWT-DOT, 2012). Une étude de cas du CVIIP (*voir* l'encadré 1) portant sur un tronçon de 100 km de l'autoroute 3 reliant Behchoko (Rae-Edzo) et Yellowknife a été menée à cet endroit, du fait que la route traverse un territoire extrêmement variable dans une zone de pergélisol chaud et discontinu. De nombreux tronçons de l'autoroute faisaient preuve de différents signes d'instabilité du remblai, allant de tassements différentiels, à la déformation des accotements et au craquement de la surface du revêtement (figure 4; Stevens *et al.*, 2012). Cette étude de cas a porté sur plus de 1100 combinaisons de phénomènes climatiques et de composantes d'infrastructure, afin de cerner les vulnérabilités potentielles et de quantifier le risque lié aux répercussions des changements climatiques (GNWT-DOT, 2011).

Les auteurs de l'évaluation de la vulnérabilité ont démontré que les tronçons de l'autoroute bâtis sur du pergélisol à forte teneur en glace étaient les plus à risque et ont recommandé qu'on obtienne plus de renseignements de base sur ces tronçons (GNWT-DOT, 2011). Des techniques de télédétection ont par la suite été utilisées afin d'analyser un tronçon de 48 km de l'autoroute, en vue d'y déceler des modifications du corridor routier et de cibler les tronçons qui pourraient exiger le recours à des mesures de correction et d'adaptation (Wolfe, 2012). Le remblai de l'autoroute a été jugé stable, en dépit des variations saisonnières, sur 67 % des 48 km analysés. Un léger glissement (de l'ordre de 3 à 6 cm par an) a été observé sur 2 % du tronçon. Dans de nombreux cas, le degré d'inclinaison des pentes latérales du remblai était supérieur aux recommandations, du fait du déplacement de surface causé par le dégel des terrains renfermant du pergélisol riche en glace (Stevens *et al.*, 2012).

Définir les zones les plus touchées par les changements climatiques permet de planifier l'entretien annuel des routes, d'évaluer l'efficacité des projets de restauration d'autoroutes et de déterminer les zones au sujet desquelles il faut obtenir plus de données. Par exemple, des sites témoins, déterminés en fonction de l'évaluation de la vulnérabilité, ont été établis le long de l'autoroute 3, et font l'objet d'une surveillance soutenue de la part du gouvernement des Territoires du Nord-Ouest. Cette analyse permettra en dernier lieu de réduire les coûts de construction et les frais d'entretien des autoroutes, ainsi que d'assurer des conditions routières favorables.

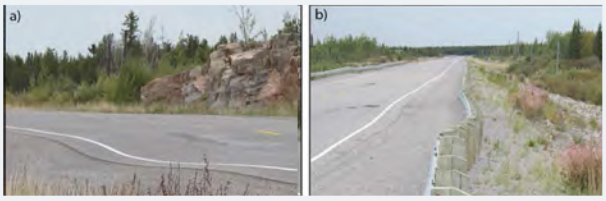


FIGURE 4 : Photographies de l'autoroute 3 illustrant **a)** la subsidence différentielle du revêtement et **b)** le déplacement de la glissière de sécurité provoqué par le glissement rotationnel des pentes latérales du remblai (Stevens *et al.*, 2012).

Les routes d'hiver (aussi appelées « routes de glace »), qui font office de réseaux de transport saisonniers, sont tracées sur la surface des lacs, des rivières et des baies. Ces routes, que l'on retrouve dans les Territoires du Nord-Ouest, au Manitoba, en Ontario et, dans une moindre mesure, au Yukon, au Nunavut, en Alberta, en Saskatchewan, au Québec et à Terre-Neuve-et-Labrador, relient les collectivités et offrent un accès aux exploitations minières. Si l'on compte peu de publications scientifiques traitant des routes de glace saisonnières et leur utilisation (*voir* Lemmen *et al.*, 2008), la presse et la littérature grise apportent cependant des preuves du raccourcissement des saisons (p. ex., CBC News, 2012a), proposent des stratégies en vue de contrer les effets de ce phénomène telles que l'arrosage des routes de glace, le déneigement des routes afin de favoriser le gel et la limitation du transport de matériaux ou de marchandises à certaines heures, et démontrent les avantages des solutions de rechange telles que le transport de marchandises par voie aérienne (p. ex., Winnipeg Free Press, 2013a, b). La route de glace qui relie Tibbitt à Contwoyto dans les Territoires du Nord-Ouest, l'une des plus longues routes d'hiver pour le transport lourd, illustre bien les défis et les possibilités d'adaptation liés aux changements climatiques. En 2006, environ 1200 chargements ont été transportés par voie aérienne durant l'été et l'automne, en raison d'une saison d'utilisation plus brève de la route de glace (JVTC, 2013). La coentreprise Tibbitt to Contwoyto Joint Venture mène une étude à l'aide d'un géoradar (Mesher *et al.*, 2008) avec, comme objectif à long terme, l'optimisation de la capacité de chargement et de la vitesse des véhicules, en fonction des données sur les propriétés de la glace et sur la profondeur de l'eau. En outre, on procède à la mise au point d'un nouveau cadre de gestion des ressources, fondé sur un système de données géographiques, et la recherche a été étendue à d'autres routes, ponts et plateformes de glace du Canada (Proskin *et al.*, 2011).

Le transport maritime dans les régions du Nord est également important. Si les opérations maritimes sont susceptibles de rester tributaires des restrictions saisonnières dans la majeure partie de l'Arctique, des changements sont en cours (p. ex., Stroeve *et al.*, 2012; *voir aussi* les chapitres 2 et 5) et leurs répercussions sur la marine marchande continuent à faire l'objet d'études.

3.3 ENJEUX SPÉCIFIQUES DES LOCALITÉS CÔTIÈRES

L'évolution prévue du niveau de la mer, de la couverture de glace de mer, ainsi que de l'intensité et de la fréquence des tempêtes (*voir* le chapitre 2) accroîtra le risque d'érosion côtière, ainsi que d'inondation et de submersion causées par les ondes de tempêtes. Des évaluations antérieures ont mis en évidence la vulnérabilité de l'infrastructure de transport du Canada atlantique et de certaines régions côtières de la Colombie-Britannique à ces risques (Warren *et al.*, 2004; Lemmen *et al.*, 2008).

Des études ont analysé les effets des vents et des ondes de tempête sur différents types d'activités et à plusieurs endroits de la côte atlantique. En ce qui concerne le transport maritime, les analyses semblent indiquer que les dangers observés à Channel-Port aux Basques, à Terre-Neuve, sont susceptibles d'avoir des répercussions économiques négatives sur les réseaux de transport de la région (Catto *et al.*, 2006). Une évaluation des risques menée sur trois routes côtières en Nouvelle-Écosse a permis d'élaborer des recommandations, notamment la mise en place de mesures de protection étudiée du littoral et l'éloignement de certaines routes par rapport à la côte (McGillis *et al.*, 2010). Un certain nombre de plans d'adaptation aux changements climatiques, mis au point au cours de cinq dernières années, font directement référence à l'infrastructure côtière de transport, notamment le port d'Halifax (Forbes *et al.*, 2009; Halifax Regional Municipality *et al.*, 2010; Richardson, 2010); Stratford, dans l'Île-du-Prince-Édouard (Greene et Robichaud, 2010); et Yarmouth, en Nouvelle-Écosse (Manuel *et al.*, 2012).

Sur la côte du Pacifique, les effets des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le transport se concentrent dans des régions où le terrain est relativement plat, comme à Roberts Bank, dans le delta du fleuve Fraser de la région du Grand Vancouver, et la côte nord-est de l'île Graham, à Haida Gwaii (Walker et Sydneysmith, 2008). Du point de vue des ressources en matière de transports, Vancouver est la ville canadienne la plus exposée à l'élévation du niveau de la mer. Un récente étude a démontré que Vancouver figurait parmi les 20 villes les plus vulnérables au monde aux inondations liées aux changements climatiques (Hallegatte *et al.*, 2013). En juillet 2012, Vancouver est devenue la première municipalité canadienne à adopter une stratégie globale d'adaptation aux changements climatiques (Ville de Vancouver, 2012), comptant l'évaluation des risques d'inondation côtière au nombre des premières tâches à accomplir.

3.4 TRANSPORT DE MARCHANDISES SUR LES GRANDS LACS

La voie maritime Grands Lacs–Saint-Laurent, qui s'étend sur 3700 km, de la tête du Lac Supérieur jusqu'au golfe du Saint-Laurent, est une importante voie de transport internationale dans l'une des régions les plus industrialisées d'Amérique du Nord. Des navires transportant des marchandises en vrac liquides ou solides doivent respecter les restrictions de taille sur la voie maritime, et il s'agit-là de la principale préoccupation en matière de changements climatiques (Millerd, 2008, 2011). On s'attend à ce que les prévisions de températures plus chaudes se traduisent par une baisse du niveau de l'eau dans le réseau des Grands Lacs, malgré les tendances passées et les prévisions futures de précipitations accrues (McBean et Motiee, 2008). La baisse du niveau de l'eau entraînera à son tour des changements sur les tirants d'eau des navires. Les estimations concernant l'évolution du niveau de l'eau varient considérablement en fonction du scénario et du modèle de changements climatiques (p. ex., Angel et Kunkel, 2010; CMI, 2013); cette situation a pour conséquence d'engendrer des incertitudes au sujet de l'ampleur des répercussions économiques connexes et de la nécessité de s'adapter. La presse a récemment souligné l'ampleur et la gravité des répercussions de la baisse du niveau de l'eau, en particulier étant donné les lacunes actuelles que l'on remarque en matière de dragage d'entretien (Barrett et Porter, 2012; Associated Press, 2013). Une étude conclut, par exemple, qu'à chaque fois que le niveau d'eau baisse d'un centimètre, la capacité des navires diminue de six conteneurs, soit de 60 tonnes (Transports Québec, 2012).

3.5 STRATÉGIES D'ADAPTATION

Les organismes de transport ont de plus en plus recours à des systèmes de gestion des ressources à des fins de surveillance et de prise de décisions dans le but de déterminer la façon la plus rentable de concevoir et d'entretenir le réseau de transport. Tel que mentionné dans Meyer *et al.* (2010), « le principal défi relatif à l'utilisation du cadre de gestion des ressources pour faire face aux changements climatiques consiste à prendre en considération l'évaluation des risques axés sur les changements climatiques dans la gestion des ressources [traduction] ». Il est difficile pour le moment d'affirmer que ce défi a été relevé de manière globale, bien que les répercussions des changements climatiques sur l'infrastructure de transport soient de plus en plus souvent abordées lors des réunions professionnelles et dans le cadre des projets de recherche.

En ce qui concerne le réseau routier, le projet canadien le plus ambitieux à ce chapitre a été entrepris par Mills *et al.* (2007, 2009) dans le but de comprendre l'incidence des futurs changements climatiques prévus sur les processus de détérioration de la chaussée des autoroutes canadiennes. Le rapport, qui quantifie l'évolution et les résultats des processus de détérioration de la chaussée, définit également des stratégies d'adaptation relatives à la construction et à l'entretien. Les stratégies de gestion des ressources peuvent également être appliquées à d'autres modes de transport, notamment dans les infrastructures portuaires et aéroportuaires.

Les écarts de restrictions de chargement constituent également une question d'importance en ce qui a trait aux changements climatiques et au transport routier, notamment au printemps, sur les routes empruntées pour le transport des ressources. En raison du faible taux de circulation qui les caractérise, ces routes ne justifient pas un changement de conception plus coûteux. Cependant, durant le dégel printanier, des altérations physiques peuvent affaiblir la structure de la chaussée et ainsi en accélérer la détérioration. De récentes recherches, ainsi que d'autres toujours en cours, favorisent la mise au point de modèles d'étalonnage de l'affaiblissement dû au dégel, en fonction du site, afin de mieux définir la période de restriction de chargement au printemps (Baiz *et al.*, 2008). Étant donné la variabilité du climat, ce type d'adaptation présente des avantages immédiats et à long terme, à mesure que l'évolution se poursuit, et pourrait être mis en œuvre à l'échelle du pays.

Dans les Grands Lacs, où le niveau de l'eau demeure une préoccupation constante, un ensemble de mesures d'adaptation pourrait être appliqué par les opérateurs et les autorités. Il s'agit de mesures de nature aussi bien structurelle (p. ex., relocalisation d'installations, modernisation des quais et des rampes d'accès à l'eau) que non structurelle (dragage, utilisation d'outils d'aide à la navigation et de pilotage). Les approches de gestion adaptative (*voir* l'étude de cas 4), qui comprennent la surveillance, l'ajustement, l'expérimentation et la réévaluation, sont indiquées, compte tenu de l'incertitude inhérente aux prévisions concernant les Grands Lacs. De même, de récentes études portant sur l'adaptation relative aux dangers climatiques dans le Nord (p. ex., en ce qui concerne les routes de glace et l'état de la glace) soulignent l'importance de revoir continuellement les plans en fonction des changements climatiques (Pearce *et al.*, 2010).

ÉTUDE DE CAS 4

RECOURS À UNE STRATÉGIE DE GESTION ADAPTATIVE FACE À L'ÉVOLUTION DU NIVEAU DE L'EAU DES GRANDS LACS

L'évolution du niveau de l'eau des Grands Lacs imputable aux changements climatiques, ainsi qu'à d'autres facteurs, a été identifiée dans l'évaluation de 2008 comme étant un problème d'importance majeure, tant à l'échelle régionale (Chiotti et Lavender, 2008) qu'internationale (Bruce et Haites, 2008) Dans le cadre de l'Étude internationale des Grands Lacs d'amont (ÉIGLA), on a depuis évalué la gestion du débit et du niveau de l'eau dans les Grands Lacs d'amont en vue de répondre aux enjeux actuels et futurs. L'analyse a révélé l'incidence minime en aval de la régularisation du niveau d'eau du Lac Supérieur. Si la construction d'une nouvelle infrastructure dans le but d'assurer une meilleure gestion du débit et du niveau d'eau multilacustre a été envisagée, cette possibilité a finalement été écartée à cette époque en raison du coût des travaux, ainsi que des importantes contraintes liées à l'environnement et aux exigences institutionnelles. L'étude a en revanche préconisé une stratégie adaptative de gestion des zones côtières fondée sur la surveillance et la recherche, afin de détecter et de gérer les nouveaux risques liés aux changements climatiques (Leger et Read, 2012).

La gestion adaptative (*voir* l'étude de cas 4 du chapitre 9) repose sur un processus itératif structuré permettant de pallier les incertitudes liées aux changements climatiques et aux possibles phénomènes extrêmes. L'Équipe de travail internationale sur les Grands Lacs et le fleuve Saint Laurent (2013) a présenté un plan détaillé et des dispositions institutionnelles qui visent la mise en œuvre de deux principaux éléments : i) la surveillance et l'évaluation continue du rendement des plans de régularisation et ii) l'élaboration de nouvelles solutions, allant au-delà de la régularisation du niveau d'eau des lacs, en réponse aux niveaux d'eau extrêmes prévus. Cette approche requiert la collaboration de multiples partenaires à la grandeur du bassin, afin d'assurer la collecte et la mise en commun de données, l'accès à l'information, la compréhension des répercussions, la mise au point de stratégies d'adaptation et l'évaluation des résultats obtenus

4. CONCLUSION

Le bon fonctionnement des infrastructures et des réseaux est essentiel à la prospérité sociale et économique du Canada. Les différents secteurs sont tributaires de la fiabilité de l'accès à de l'eau propre, de la gestion efficace des eaux pluviales, du traitement efficace des eaux usées, ainsi que de la sécurité et de l'efficacité du réseau de transport. Tel qu'en fait état le présent chapitre, l'évolution du climat présente, à plus d'un égard, un risque pour ces services. Les phénomènes extrêmes constituent la principale préoccupation, comme le démontrent les nombreux exemples de dépassement des capacités de gestion des eaux de pluies et de perturbation des réseaux de transport en raison de fortes précipitations. Il est toutefois important de prendre également en considération différents facteurs dont le changement se produit de façon progressive tels que la hausse des températures et du niveau de la mer, la fonte du pergélisol et la baisse du niveau de l'eau des lacs, dans la conception, l'exploitation et l'entretien des infrastructures. L'étude des enjeux relatifs à l'eau et aux transports s'est articulée autour des risques, tandis que la recherche n'a accordé que peu d'attention aux éventuelles possibilités.

Des progrès ont été réalisés au cours des cinq dernières années en matière d'infrastructure et d'adaptation aux changements climatiques. La portée et l'ampleur de la recherche ont été approfondies, et les milieux professionnels se sont davantage mobilisés, en partie grâce au programme du CVIIP. Les changements climatiques commencent donc à être pris en considération par les ingénieurs et les planificateurs, ainsi que par les hydrologistes et les opérateurs responsables du traitement de l'eau et des eaux usées, lorsqu'il s'agit de concevoir et d'entretenir les infrastructures au Canada. L'adaptation a jusqu'à présent généralement été envisagée dans le cadre de l'entretien continu et de la mise à niveau, ce qui, dans bien des cas, suffira à composer avec les changements climatiques, notamment s'il s'agit de changements progressifs. Certaines mesures d'adaptation particulières tiennent compte de l'évolution du climat. La recherche scientifique permettra de faire en sorte que l'adaptation future repose sur des avancées technologiques plus poussées et intègre les changements climatiques dans les normes de conception et les pratiques d'entretien. Une évaluation indépendante des transports au Canada, elle aussi en cours, permettra de mieux comprendre les répercussions des changements climatiques et de définir des mesures d'adaptation adéquates qui s'imposent pour le secteur.

RÉFÉRENCES

AMEC Environment and Infrastructure. *City of Welland stormwater and wastewater infrastucture assessment report; AMEC Environment & Infrastructure*, AMEC Environment and Infrastructure, nº TP111002-011, 2012.

Angel, J.R. et K. Kunkel. « The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron », *Journal of Great Lakes Research*, vol. 26, 2010, pp. 51-58.

Associated Engineering. *City of Calgary water supply infrastructure - Climate change vulnerability risk assessment*, Associated Engineering, 2011.

Associated Press. *Lake Huron, Lake Michigan hit lowest water levels on record*, CBC News, 2013, <www.cbc.ca/news/canada/windsor/lake-huron-lake-michigan-hit-lowest-water-levels-on-record-1.1380357>.

Auld, H.E. « Adaptation by design: the impact of changing climate on infrastructure », *Journal of Public Works and Infrastructure*, vol. 1, nº 3, 2008, pp. 276-288.

Baiz, S., S.L. Tighe, C.T. Haas, B. Mills et M. Perchanok. « Development of frost and thaw depth predictors for decision making about variable load restrictions », *Transportation Research Record*, vol. 2053, 2008, pp. 1-8.

Barrett, J. et Porter, C. *Drought hits shippers on Great Lakes*, Wall Street Journal, 2012, <http://online.wsj.com/article/SB10000872396390444752504578024920103784566.html>.

BC Ministry of Forest, Lands and Natural Resource Operations. *Cost of adaptation: sea dikes and alternative strategies*, BC Ministry of Forest, Lands and Natural Resource Operations, 2012, <www.env.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/pdfs_word/cost_of_adaptation-final_report_oct2012.pdf>.

Bornhold, B.D. *Projected sea level changes for British Columbia in the 21st century*, Gouvernement du Canada, 2008, 9 p., <www.env.gov.bc.ca/cas/pdfs/sea-level-changes-08.pdf>.

Bourque, A. et G. Simonet. « Québec », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush, Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2008, pp. 171-226.

Bruce, J.P. et E. Haites. « Le Canada dans le contexte international », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush, Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2008, pp. 382-424.

Bureau de la sécurité des transports du Canada. *Rapport d'enquête ferroviaire R05H0013*, 2013a, <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/2005/r05h0013/r05h0013.pdf>.

Bureau de la sécurité des transports du Canada. *Rapport d'enquête ferroviaire* R02M0050, 2013b, <http://www.bst-tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/2002/r02m0050/r02m0050.pdf>.

Camp, J., M. Abkowitz, G. Hornberger, L. Benneyworth et J.C. Banks. « Climate change and freight transportation infrastructure: current challenges for adaptation », *Journal of Infrastructure Systems*, 2013.

Capano, N. *City of Toronto climate change risk assessment*, Congrès et exposition de l'Association des transports du Canada, Table ronde, Winnipeg, 24 septembre 2013, 2013.

Carrière, A., M. Prévost, A. Zamyadi et P. Chevalier. « Vulnerability of Quebec drinking-water treatment plants to cyanotoxins in a climate change context », *Journal of Water and Health*, vol. 98, 2010, pp. 455-465.

Catto, N., D. Foote, D. Kearney, W. Locke, B. DeYoung, E. Edinger, D. Ingram, D. Foote, G. Lines, B. Whiffen, J. Karn et J. Straatman. *Impacts of storms and winds on transportation in southwestern Newfoundland*, CCIAP Project A-804, 2006, <www.mun.ca/geog/research/CCIAP_Project_A_804.pdf>.

CBC News. *Shorter ice-road season in northern Manitoba in 2011-2012*, CBC News, 2012a, <www.cbc.ca/news/canada/manitoba/story/2012/03/13/mb-winter-ice-road-closures.html>.

CBC News. *Trains delayed as heat warps railroad tracks*, CBC News, 2012b, <www.cbc.ca/news/canada/ottawa/story/2012/05/28/ottawa-train-tracks-warped-by-heat-delay-trains.html>.

CBC News. *200-metre crater sinks Manitoba highway*, CBC News, 2012c, <www.cbc.ca/news/canada/manitoba/story/2012/07/03/mb-collapsed-road-assessippi-park-manitoba.html?cmp=rss>.

CBC News. *Ice damages hull of sealift ship near Iqaluit*, CBC News, 2012d, www.cbc.ca/news/canada/north/story/2012/07/26/north-sealift-ship-damage.html.

CBC News. *TCH blocked by landslide could be closed for nearly a week*, CBC News, 2012e, www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/story/2012/11/19/nl-landslide-blasting-tch-clarenville-1119.html.

CBC News. *Poor driving conditions span northeastern Ontario*, CBC News, 2013a, <www.cbc.ca/news/canada/sudbury/story/2013/01/30/sby-road-conditions-school-bus-cancellations-sudbury.html>.

CBC News. *Warm weather threatens ice road to Fort Chipewyan*, CBC News, 2013b, <www.cbc.ca/news/canada/edmonton/story/2013/02/25/edmonton-fort-chipewyan-ice-roads.html>.

CBC News. *Ice delays supply barge for Western Arctic communities*, CBC News, 2013c, <http://www.cbc.ca/news/canada/north/ice-delays-supply-barge-for-western-arctic-communities-1.1397771>.

Champalle, C., P. Tudge, E. Sparling, R. Riedlsperger, J. Ford et T. Bell. *Adapting the built environment in a changing northern climate: a systematic review of climate hazard-related mapping and vulnerability assessments of the built environment in Canada's North to inform climate change adaptation*, rapport remis à Ressource naturelles Canada, Division des impacts et de l'adaptation aux changement climatiques, Ottawa, Canada, 2013, <www.jamesford.ca/wp-content/uploads/2013/05/NRCAN_FinalReport_VAHMBuiltEnvironmentMay16.pdf>.

Cheng, C.S., H. Auld, J. Klassen et Q. Li. « Possible impacts of climatic change on freezing rain in south-central Canada using downscaled future climate scenarios », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 7, 2007, pp. 71-87.

Cheng, C.S., G. Li, Q. Li et H. Auld. « A synoptic weather typing approach to simulate daily rainfall and extremes in Ontario, Canada: potential for climate change projections », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 49, 2009, pp. 845-866.

Cheng, C.S., G. Li et H. Auld. « Possible impacts of climate change on freezing rain using downscaled future climate scenarios: updated for eastern Canada », *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, nº 1, 2011, pp. 8-21.

Cheng, C., Q. Li, G. Li et H. Auld. « Climate change and heavy rainfall-related water damage insurance claims and losses in Ontario, Canada », *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 4, 2012, pp. 49-62.

Chiotti, Q. et B. Lavender. « Ontario », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush, Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2008, pp. 227-274.

CMI (Commission mixte internationale). *Climate change adds to future uncertainty regarding water levels*, Commission mixte internationale, 2013, <http://ijc.org/files/tinymce/uploaded/documents/IJC-Great-Lakes-Day-Water-Levels-Fact-Sheet.pdf>.

Conseil canadien des ingénieurs (CCI). *Adapting to climate change: Canada's first national engineering vulnerability assessment of public infrastructure*, Conseil canadien des ingénieurs, 2008, <www.pievc.ca/e/Adapting_to_climate_Change_Report_Final.pdf>.

CSIRO (The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). *Adaptation science, opportunities and responses to climate change*, The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, www.csiro.au, sans date.

CTV News. *Warm winter, no ice roads shows new roads needed: chief*, CTV News, 2012, <www.ctvnews.ca/warm-winter-no-ice-roads-shows-new-roads-needed-chief-1.748146>.

CVIIP (Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques). *PIEVC case studies: codes, standards and related instruments (CSRI) review for water infrastructure and climate change*, rapport remis à Ingénieurs Canada, Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques, 2012, www.pievc.ca/e/2012_PIEVC_CSRI_Water_report_Final.pdf.

CVIIP (Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques). *Protocole d'ingénierie du CVIIP - Version du 10 octobre 2011- 1ère partie*, Canadian Council of Professional Engineers, 2007, <http://www.pievc.ca/f/doc_list.cfm?dsid=43>.

Doré, G. et H. Zubeck. *Cold Regions Pavement Engineering*, McGraw-Hill/ASCE Press, 2008, ISBN: 0071600884/9780071600880.

Dzikowski, P. *Changing climate, changing risks, Alberta transportation*, Congrès et exposition de l'Association des transports du Canada, Table ronde, Winnipeg, 24 septembre 2013, 2013.

EBNFLO Environmental AquaResource Inc. *Guide for assessment of hydrologic effects of climate change in Ontario*, rapport remis au Ministère des richesses naturelles de l'Ontario et le ministère de l'environnement en partenariat avec Credit Valley Conservation, 2010, 234 p., <http://waterbudget.ca/climatechangeguide>.

Economist Intelligence Unit. *Water for all? A study of water utilities' preparedness to meet supply challenges to 2030*, The Economist Intelligence Unit Limited, 2012, <www.oracle.com/us/industries/utilities/utilities-water-for-all-ar-1865053.pdf>.

Emelko, M.B., U. Silins, K.D. Bladon et M. Stone. « Implications of land disturbance on drinking water treatability in a changing climate: demonstrating the need for "source water supply and protection" strategies », *Water Research*, vol. 45, 2011, pp. 461-472.

Environnement Canada. Ensembles de données climatiques en génie, *Environnement Canada*, 2013, <http://climat.meteo.gc.ca/prods_servs/engineering_f.html>.

Équipe de travail internationale sur les Grands Lacs et le fleuve Saint Laurent. *Building collaboration across the Great Lakes–St. Lawrence River System, an adaptive management plan for addressing extreme water levels; breakdown of roles, responsibilities and proposed tasks*, Équipe de travail internationale sur les Grands Lacs et le fleuve Saint Laurent, 2013, 72 p.

Félio, G. *Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes: 2012, routes et systèmes d'eau potable, d'eaux usées et d'eaux pluviales municipaux*, l'Association canadienne de la construction, Association canadienne des travaux publics, Société canadienne de génie civil et Fédération canadienne des municipalités, 2012.

Ferguson, G. et Beebe, C. *Vulnerability of Nova Scotia's groundwater supplies to climate change*, Atlantic Climate Solutions Association, 2012, 10 p., <http://atlanticadaptation.ca/sites/discoveryspace.upei.ca.acasa/files/Nova%20Scotia%20ACAS%20groundwater%20report%20_0.pdf>.

Forbes, D.L., G.K. Manson, J. Charles, K.R. Thompson et R.B. Taylor. *Halifax Harbour extreme water levels in the context of climate change: scenarios for a 100-year planning horizon*, Commission géologique du Canada, 2009, <www.halifax.ca/regionalplanning/documents/HRM-OF_v5.pdf>.

Forbes, K. A., S.W. Kienzle, C.A. Coburn, J.M. Byrne et J. Rasmussen. « Simulating the hydrological response to predicted climate change on a watershed in southern Alberta Canada », *Climatic Change*, vol. 105, nº 3-4, 2011, pp. 555-576.

Fortier, R., A.M. LeBlanc et W. Yu. « Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada », *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 48, nº 5, 2011, pp. 720-740.

Genivar. *City of Portage La Prairie water resources infrastructure assessment phase II- pilot study*, rapport remis à la ville de Portage la Prairie, Genivar, 2007, <www.pievc.ca/e/doc_project_single.cfm? dsid=3&projid=1>.

Genivar. *National engineering vulnerability assessment of public infrastructure to climate change: climate change vulnerability assessment of the town Oo Prescott's sanitary sewage system - Final case study report*, Genivar, 2011.

Gouvernement de l'Ontario. *Construire ensemble : guide relatif à l'élaboration des plans de gestion des infrastructures municipales*, Gouvernement de l'Ontario, 2012, <http://www.moi.gov.on.ca/fr/infrastructure/building_together_mis/plan.asp>.

GNWT-DOT (Government of the Northwest Territories, Department of Transportation). *Business Plan 2012-2013*, Government of the Northwest Territories, Department of Transportation, 2012, <www.dot.gov.nt.ca/_live/documents/content/DOT%202012-13%20Business%20Plan.pdf>.

GNWT-DOT (Government of the Northwest Territories, Department of Transportation). *Climate change vulnerability assessment for NWT Highway 3 - Final report*, Government of Northwest Territories, Department of Transportation, 2011, <www.pievc.ca/e/casedocs/nwt-yellowknife/2GNWT%20Hwy%203%20West_Yellowknife_Report.pdf>.

Graveland, B. et L. Krugel. *Train Derails in Calgary on Bridge, Carries Petroleum Product*, La Presse canadienne, affiché: 06/27/2013, 2013, <www.huffingtonpost.ca/2013/06/27/train-derails-calgary-bridge_n_3509067.html>.

Greene, K. et A.G. Robichaud. *Mainstreaming climate change tools for the professional planning community: climate change adaptation action plan for Stratford, PEI*, Institut canadien des urbanistes, Ressources naturelles Canada, et Atlantic Planners Institute, 2010, <www.fcm.ca/documents/reports/PCP/climate_change_adaptation_action_plan_for_stratford_pei_EN.pdf>.

Halifax Regional Municipality, Commission géologique du Canada et Ressources naturelles Canada, *Sea level risk adaptation planning for Halifax Harbour*, Commission géologique du Canada et Ressources naturelles Canada, 2010, <www.halifax.ca/regionalplanning/documents/SLRCowFeb92010revisedforwebsite.pdf>.

Hallegatte, S., C. Green, R.J. Nicholls et J. Corfee-Morlot. « Future flood losses in major coastal cities », *Nature Climate Change*, vol. 3, 2013, pp. 802-806.

Jacobs, J.M., P.H. Kirchen et J.S. Daniel. « Considering climate change in road and building design », *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 94, no 30, 2013, 264 p.

JVTC (Joint Venture Tibbitt to Contwoyto). *The Tibbitt to Contwoyto Winter Road*, Joint Venture Tibbitt to Contwoyto, 2013, <www.jvtcwinterroad.ca/jvwr/>.

Kerr Wood Leidal Associates Limited. *Infrastructure vulnerability to climate change - Fraser sewerage area*, Kerr Wood Leidal Associates Limited, 2009, <www.pievc.ca/e/casedocs/fraser/Metro%20Vancouver%20-%20Fraser%20Sewarage_Final%20Report.pdf>.

Kleindorfer, M., M. Möderi, R. Sitzenfrei, C. Urich et W. Rauch. « A case independent approach on the impact of climate change effects on combined sewer system performance », *Water and Science Technology*, vol. 60, no 6, 2009, pp. 1555-1564.

L'Hérault, E., M. Allard, G. Dare, C.Barrette, J. Verreault, D. Sarrazin, J. Doyon et A. Guimond *Assessment of permafrost conditions under northern Quebec's airports: an integrative approach for the development of adaptation strategies to climate warming*, AGU Fall Meeting, San Francisco, Californie, États-Unis, 5-9 décembre 2011, 2011.

Larrivée, C. et G. Simonet. « Testing the assumptions: assessing infrastructures vulnerability to climate change », *Municipal World*, vol. 117, nº 6, 2007, pp. 27-28.

Lavoie, J. *Storm stops 75 ferry sailings*, Times Colonist, 2013, <www.timescolonist.com/news/local/storm-stops-75-ferry-sailings-1.31854>.

Leger, W. et J. Read. *Adaptive management: strategy and legacy, Lake Superior regulation: addressing uncertainty in Upper Great Lakes water levels*, rapport remis au Conseil d'étude internationale des Grands Lacs d'amont by the Adaptive Management Technical Work Group, 2012, 167 p.

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

Lepage, J., G. Doré et F. Fortier. *Experimentation of mitigation techniques to reduce the effects of permafrost degradation on transportation infrastructures at Beaver Creek experimental road site (Alaska Highway, Yukon)*, 63e Conférence annuelle de la Société canadienne de géotechnique et 6e Conférence canadienne sur le pergélisol, Calgary, Canada, 2010, p.526-533.

MacQuarrie, K., K. Butler, E. Mott et N. Green. *A case study of coastal aquifers near Richibucto, New Brunswisk: saline groundwater occurrence and potential impacts of climate change on seawater intrusion*, Solutions d'adaptation aux changements climatiques de l'Atlantique, 2012.

Manuel, P., E. Rapaport, M. Cochran, J. Critchley, J.A. Johnston, J. Muise et Z. Wollenberg. *Yarmouth: a case study in climate change adaptation, Solutions d'adaptation aux changements climatiques de l'Atlantique*, <http://atlanticadaptation.ca/sites/discoveryspace.upei.ca.acasa/files/Yarmouth%20Part%202%20-%20Section%206%20-%20Municipal%20Capacity-%20August%2030_0.pdf>.

Maraun, D., F. Wetterhall, A.M. Ireson, R.E. Chandler, E.J. Kendon, M. Widmann, S. Brienene, H.W. Rust, T. Sauter, M. Themessl, V.K.C. Venema, K.P. Chun, C.M. Goodess, R.G. Jones, C. Onof, M. Vrac et I. Thiele-Eich. « Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user », *Reviews of geophysics,* American Geophysical Union, vol. 48, nº 3, 2010.

Marsalek, J. et H. Schreier. « Innovation in stormwater management in Canada: the way forward », *Water Quality Research Journal of Canada*, vol. 44, nº 1, v-x, 2009.

McBean, E. et H. Motiee. « Assessment of impact of climate change on water resources: A long term analysis of the great lakes of North America », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 12, nº 1, 2008, pp. 239-255.

McGillis, A., W.F. Baird, Associates Coastal Engineers Ltd. et I. MacCallum. *Infrastructure risk assessment of coastal roads in Nova Scotia*, Actes de la conférence annuelle de l'Association des transports du Canada, Halifax, 2010.

McGregor, R., D. Hayley, G. Wilkins, E. Hoeve, E. Grozic, V. Roujanski, A. Jansen et G. Dore. *Guidelines for development and management of transportation infrastructure in permafrost regions*, l'Association des transports du Canada, Ottawa, 2010, 177 p.

Mesher, D.E., S.A. Proskin et E. Madsen. *Ice road assessment, modeling and management*, Actes de la conférence annuelle de l'Association des transports du Canada, Toronto, 2008.

Metro News. *Northern Ontario road repairs progressing after Wawa washout*, Metro News, 2012, <http://metronews.ca/news/toronto/418819/wawa-road-repairs-progressing-after-washout/>.

Meyer, M.D., A. Amekudzi et J.P. O'Har. « Transportation asset management systems and climate change: adaptive systems management approach », *Transportation Research Record*, vol. 2160, 2010, pp. 12-20.

Millerd, F. « The estimated economic impact of climate change on Canadian commercial navigation on the Great Lakes », dans *SERA North Economics of Weather, Climate and Climate Change: a Meeting Synthesis*, B. Mills (éd.), , Environnement Canada, Adaptation and Impacts Research Section (AIRS), Waterloo, Ontario, 2008, pp. 31-33.

Millerd, F. « The potential impact of climate change on Great lakes international shipping », *Climatic Change*, vol. 104, 2011, pp. 629-652.

Mills, B., S.L. Tighe, J. Andrey, J.T. Smith, S. Parm et K. Huen. *The road well-traveled: implications of climate change for pavement infrastructure in southern Canada*; Gouvernement du Canada, Environnement Canada, Adaptation and Impacts Research Section, Waterloo, Ontario, 2007.

Mills, B., S.L. Tighe, J. Andrey, J.T. Smith et K. Huen. « Climate change implications for flexible pavement design and performance in southern Canada », *Journal of Transportation Engineering,* vol. 135, nº 10, 2009, pp. 773-782.

National Post. *Strong winds, snow pounds Atlantic Canada as thousands lose power*, National Post, 2013a, <news.nationalpost.com/2013/02/18/strong-winds-snow-snarls-transport-and-causes-power-outages-in-atlantic-canada/>.

National Post. *Massive Alberta snowstorm cripples traffic, causes flight cancellation, National Post*, 2013b, <news.nationalpost.com/2013/03/04/massive-alberta-snowstorm-cripples-traffic-causes-flight-cancellations/>.

National Research Council. *Potential impacts of climate change on U.S. transportation*, National Research Council of the National Academies, Transportation Research Board, Washington D.C., 2008.

Nyland, D., J.R. Nodelman et J.Y.H. Nodelman. *Climate change engineering vulnerability assessment of transportation infrastructure in British Columbia*, Conférence annuelle de l'Association des transports du Canada, Edmonton, 28 juin, 2011.

Ouranos. *Savoir s'adapter*, Ouranos, 128 p., <www.ouranos.ca/fr/pdf/53_sscc_21_06_lr.pdf>.

Pearce, T., B. Smit, F. Duerden, J.D. Ford, A. Goose et F. Kataoyak. « Inuit vulnerability and adaptive capacity to climate change in Ulukhaktok, Northwest Territories, Canada », *Polar Record*, vol. 46, 2010, pp.157–177.

Peck, A., P. Prodanovic et S.P. Simonovic. « Rainfall intensity duration frequency curves under climate change: city of London, Ontario, Canada », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 37, nº 3, 2012, pp. 177-189.

Pinsonneault, D. *Ce ne sont pas quelques pieds de neige qui nous arrêteront!*, VIA Rail Canada, 2013, <http://www.viaevolution.ca/fr/2013/01/24/ce-ne-sont-pas-quelques-pieds-de-neige-qui-nous-arreteront/>.

Plosz, B.G., H. Liltved et H. Ratnaweera. « Climate change impacts on activated sludge wastewater treatment: A case study from Norway », *Water Science and Technology*, vol. 60, nº 2, 2009, pp. 533-541.

Prolog Canada, en association avec EBA Engineering Consultants Ltd. *The northern transportation systems assessment, executive summary*, rapport préparé pour Transport Canada, 2011.

Proskin, S.A., N.S. Parry et P. Finlay. Applying GPR in assessing the ice bridges, ice roads and ice platforms, CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 16th workshop on River Ice, Winnipeg Manitoba, 18-22 septembre, 2011.

Ptashnick, V. et M. Hayes. *Dozens of Toronto flights cancelled due to fog*, The Star, 2012, <www.thestar.com/news/gta/2012/01/17/dozens_of_toronto_flights_cancelled_due_to_fog.html>.

Pyke, C., M.P. Warren, T. Johnson, J. LaGro, fils, J. Scharfenberg, P. Groth, R. Freed, W. Schroeer et E. Main. « Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change », *Landscape and Urban Planning*, vol. 103, 2011, pp. 166-173.

Radio Canada. *Des chutes de neige records*, Radio Canada, 2012, <www.radio-canada.ca/nouvelles/environnement/2012/12/27/001-neige-tempete-27decembre2012.shtml>.

Radio Canada. *Violents orages au Québec: inondations et pannes de courant*, Radio Canada, 2013, <www.radiocanada.ca/regions/Montreal/2013/06/01/003-orage-pluie-pannes.shtml>.

Richardson, G.R.A. *S'adapter aux changements climatiques : une introduction à l'intention des municipalités canadiennes*, Ressources naturelles Canada, Ottawa, Ontario, 2010, 40 p.

Scheckenberger, R.B., A.C. Farrel et M. Senior. *Economic assessment of climate change scenarios on drainage infrastructure design*, Conférence annuelle de l'Association des transports du Canada, Vancouver, 2009.

Smith, B.R. « Re-thinking wastewater landscapes: combining innovative strategies to address tomorrow's urban wastewater treatment challenges », *Water Science and Technology*, vol. 60, 2009, pp. 1465-1473.

Solutions d'adaptation aux changements climatiques de l'Atlantique. *Climate change and saltwater intrusion in a small municipality*, Solutions d'adaptation aux changements climatiques de l'Atlantique, 2 p.

Statistique Canada. *Enquête sur les usines de traitement de l'eau potable*, Statistique Canada, Catalogue no 16-403-X, 2013, pp. 7, <http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/statcan/16-403-x/16-403-x2013001-fra.pdf>.

Stevens, C.W., N. Short et S.A. Wolfe. *Seasonal surface displacement and highway embankment grade derived from InSAR and LiDAR, Highway 3 west of Yellowknife, Northwest Territories*, Commission géologique du Canada, Dossier public 7087, 1 DVD, 2012.

Stroeve, J., M.C. Serreze, M. Holland, J.E. Kay, J. Malanik et A.P. Barrett. « The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis », *Climatic Change*, vol. 110, 2012, pp. 1005-1027.

Tanzeeba, S. et T.Y. Gan. « Potential impact of climate change on the water availability of South Saskatchewan River basin », *Climatic Change*, vol. 112, nº 2, 2012, pp. 355-386.

The Telegram. *Fog, wind, hurricane conditions play havoc with flight schedules*, The Telegram, 2012, <www.thetelegram.com/News/Local/2012-10-29/article-3109374/Fog-wind-hurricane-conditions-play-havoc-with-flight-schedules/1>.

Thomson, R.E., B.D. Bornhold et S. Mazzotti. *An examination of the factors affecting relative and absolute sea level in British Columbia*, Pêches et Océans Canada – Institut des sciences de la mer, Rapports techniques canadiens sur l'hydrographie et les sciences océaniques 260, Sidney, Colombie-Britannique, 2008.

Transport Canada. *Les transports au Canada 2011 - Rapport approfondi*, Ministère des Travaux publics et Services gouvernementaux, Canada, 2011, <http://www.tc.gc.ca/media/documents/politique/Transports_au_Canada_2011.pdf >.

Transports Québec. *Niveaux d'eau du Saint-Laurent*, Transports Québec, 2012, <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/environnement/changements_climatiques/adapter_transports_impacts_changements_climatiques/niveaux_eau_saint-laurent>.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *True North: adapting infrastructure to climate change in northern Canada*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 2009, <http://emrlibrary.gov.yk.ca/NRTEE%20documents/NRTEE%20Reports%20and%20Publications%20by%20Year/2009/2009-NRTEE%20Reports%20and%20Publications/NRTEE-True%20North_Adapting%20Infrastructure%20to%20Climate%20Change%20in%20Northern%20Canada.pdf>.

Urban Systems. *Stormwater infrastructure climate change vulnerability assessment*, rapport préparé pour la ville de Castlegar, 2010.

Vajda, A., H. Tuomenvirta et P. Jokinen. Observed and future changes of extreme winter events in Europe with implications for road transportation, Actes de SIRWEC, 22-25 mai, Helsinki, Finlande, 2012, <www.sirwec.org/Papers/helsinki/40.pdf>.

Vasseur, L. et N. Catto. « Canada Atlantique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush, Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2008, pp. 119-170.

Ville de Calgary. *Flood Recovery Operations*, City of Calgary Flood Recovery Framework, 2013, <www.calgary.ca/General/flood-recovery/Documents/flood-recovery-operations-framework.pdf>

Ville de Calgary, *Water Efficiency Plan, 30-in-30, by 2033*, City of Calgary, Water Resources Calgary, 2007, <www.calgary.ca/UEP/Water/Documents/Water-Documents/water_efficiency_plan.pdf>.

Ville de Vancouver. *Climate change adaptation strategy*, City of Vancouver, 2012, <http://vancouver.ca/green-vancouver/climate-change-adaptation-strategy.aspx>.

Walker, I. et R. Sydneysmith. « Colombie-Britannique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush, Gouvernement du Canada, Ottawa, ON, 2008, pp. 328-386.

Warren, F., E. Barrow, R. Schwartz, J. Andrey, B. Mills et D. Riedel. *Impacts et adaptation liés aux changement climatique : perspective canadienne*, Gouvernement du Canada, Ressources naturelles Canada, Division des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques, 2004.

Winnipeg Free Press. *Airships to fly our friendly skies?*, Winnipeg Free Press, 2013a, <www.winnipegfreepress.com/business/airships-to-fly-our-friendly-skies-197265951.html>.

Winnipeg Free Press. *Ice roads, airships could work together*, Winnipeg Free Press, 2013b, <www.winnipegfreepress.com/opinion/analysis/ice-roads-airships-could-work-together-204044251.html>.

Wolfe, S.A. *Geoscience information for northern highways: from planning to remediation*, Quebec Climate Forum 2012, 2012, <www.mrifce.gouv.qc.ca/northernforum/acts/ppt/Wolfe_Presentation_EN.ppt>.

Zickefoose, S. *Heavy snow delays flights and transit, weather warning continues*, Calgary Herald, 2013, <www.calgaryherald.com/technology/Heavy+snow+delays+flights+transit+weather+warning+continues/7431774/story.html#ixzz2UeILrJzn>.

Zimmerman, R. et C. Faris. « Chapter 4: infrastructure impacts and adaptation challenges », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1196, 2010, pp. 63-85.

CHAPITRE 9 : ADAPTATION : ÉTABLIR UN LIEN ENTRE LA RECHERCHE ET LA PRATIQUE

Principaux auteurs :

Jimena Eyzaguirre *(ESSA Technologies Ltd.)* et **Fiona Warren** *(Ressources naturelles Canada)*

Collaborateurs :

Alain Bourque *(Ouranos)*, **Al Douglas** *(Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources)*, **Jenny Fraser** *(British Columbia Ministry of Environment)*, **James MacLellan** *(University of New Brunswick)*, **Annette Morand** *(Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources)*, **Linda Mortsch** *(Environnement Canada)*, **Laurisse Noel** *(Ressources naturelles Canada)*, **Marie Raphoz** *(Ouranos)*, **Gregory Richardson** *(Santé Canada)*, **James Wellstead** *(British Columbia Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations)*

Citation recommandée :

Eyzaguirre, J. et F.J. Warren. « Adaptation : établir un lien entre la recherche et la pratique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 253-286.

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusion 255

1. Introduction 256

2. Évaluations précédentes 256

3. Contexte international 257

4. État de l'adaptation au Canada 258
   - 4.1 Recherche et pratique 258
   - 4.2 Obstacles et difficultés 269

5. Surmonter les obstacles et faciliter l'adaptation 274
   - 5.1 Accroître la sensibilisation 274
   - 5.2 Renforcer les capacités 276

6. Synthèse 280

Références 281

Notes en fin de chapitre 286

PRINCIPALES CONCLUSIONS

Depuis 2008, les recherches et les pratiques en matière d'adaptation au Canada se sont caractérisées par une hausse au chapitre de la mobilisation, de la diversité et de la complexité. En effet, on note que le niveau de compréhension du processus d'adaptation s'est amélioré, qu'un plus grand nombre de groupes participent aux discussions sur l'adaptation et qu'un nombre croissant d'activités d'adaptation est consigné. Ces progrès nous amènent à formuler les conclusions suivantes :

- Des mesures d'adaptation sont entreprises au Canada afin d'atteindre toute une série d'objectifs, par exemple, renforcer les capacités d'adaptation, améliorer la résilience à certains phénomènes climatiques (surtout aux phénomènes climatiques extrêmes) et accroître la capacité de prospérer dans des conditions climatiques différentes. De tous les secteurs, ceux qui démontrent une sensibilité et une exposition marquées aux aléas climatiques sont habituellement ceux qui s'emploient le plus activement à prendre des mesures en vue de comprendre, d'étudier et de gérer la vulnérabilité et les risques liés aux changements climatiques.

- L'adaptation n'est plus seulement un enjeu local, bien que les exemples à l'échelle municipale soient les plus nombreux. Il existe des mesures adoptées par tous les ordres de gouvernement, les groupes communautaires et l'industrie, dont la plupart représentent des initiatives de collaboration.

- La compréhension des obstacles et des difficultés liés à l'adaptation s'est améliorée, tout en réalisant qu'il faut tenir compte de facteurs autres que les déterminants fondamentaux de la capacité adaptative si l'on veut accroître la volonté de s'adapter et augmenter le taux de réussite des mesures d'adaptation. Cela exige que l'on examine les valeurs et la perception du risque au moment de cerner les problèmes et de trouver des solutions. Par conséquent, le niveau de compréhension, en ce qui concerne la façon de surmonter les principaux obstacles et de faciliter l'adaptation, s'est amélioré.

- Pour le moment, les exercices de planification et d'élaboration de politiques, le renforcement des capacités et les projets de sensibilisation représentent la majorité des mesures d'adaptation documentées. On note qu'il y a relativement peu d'exemples de mise en œuvre de changements particuliers visant à réduire la vulnérabilité aux éventuels changements climatiques ou à profiter des occasions qui se présentent. Par conséquent, la mise en place des mesures d'adaptation au Canada n'en est qu'à ses débuts.

- De nombreux facteurs peuvent contribuer à accélérer la transition entre la prise de conscience et la mise en place de mesures, notamment un leadership solide, des facilitateurs efficaces, des campagnes de sensibilisation ciblées et des stratégies ou des politiques de soutien. Le fait de vivre un événement extrême et d'observer les effets des changements graduels, comme l'élévation du niveau de la mer, contribue également à stimuler le recours aux mesures d'adaptation.

1. INTRODUCTION

Le concept de l'adaptation a évolué depuis qu'il a été initialement reconnu comme une réaction potentielle aux changements climatiques dans les années 1990 et les attitudes ont changé tant et si bien qu'elle est maintenant considérée comme un complément essentiel aux mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Klein *et al.*, 2007; Lemmen *et al.*, 2008). Au sein de la communauté de recherche, le centre d'intérêt dépasse maintenant les répercussions biophysiques, assorties de listes de mesures d'adaptation possibles, pour s'étendre aux études qui analysent le processus d'adaptation sous divers angles (p. ex., social, environnemental, économique et psychologique; p.ex, Burch et Robinson, 2007; Jantarasami *et al.*, 2010; Berrang-Ford *et al.*, 2011; Gifford, 2011; Brisley *et al.*, 2012; O'Brien, 2012). Au Canada, plusieurs organisations ont des mandats précis ayant pour but d'acquérir et de communiquer des connaissances concernant l'adaptation, et tous les ordres de gouvernement commencent à élaborer et à mettre en œuvre des stratégies d'adaptation, des plans et des cadres stratégiques (p. ex., Ville de Toronto, 2007; Gouvernement du Canada, 2011; Gouvernement du Québec, 2012). La campagne de mobilisation s'est étendue au gouvernement, à l'industrie, aux organisations non gouvernementales et à l'ensemble de la population, qui reconnaissent de plus en plus qu'il incombe à tous de contribuer aux mesures d'adaptation.

Malgré ces progrès, on a pourtant peu d'exemples documentés des mesures d'adaptation qui ont été expressément mises en œuvre dans le but précis de réduire la vulnérabilité aux futures conditions climatiques. Au cours des dernières années, un nombre croissant de recherches ont porté sur les obstacles et les difficultés liés à l'adaptation qui nuisent à la mise en place des mesures. Ces obstacles découlent de certains enjeux tels que l'information, les ressources, la gouvernance et les valeurs. Parallèlement, on observe une amélioration au niveau de l'acquisition de connaissances au sujet de la façon de favoriser une adaptation efficace en sensibilisant davantage la population, en renforçant la volonté de s'adapter, ainsi que les capacités, et en créant un environnement propice.

Le présent chapitre porte sur l'état actuel de l'adaptation au Canada sur le plan de la recherche et des pratiques, à la lumière des publications scientifiques et de la littérature grise. La section 2 examine la situation qui prévalait en 2007, lors de la dernière évaluation (Lemmen *et al.*, 2008), et la section 3 présente un compte rendu des approches d'adaptation à l'échelle internationale. La section 4 examine les progrès réalisés au Canada depuis 2007, à l'aide de discussions sur les changements aux chapitres de la recherche, de l'engagement, des mesures d'adaptation et de la compréhension des obstacles. L'élimination des obstacles et la facilitation des mesures sont abordées dans la section 5. Des études de cas sont incorporées au chapitre afin d'approfondir une vaste gamme de sujets.

2. ÉVALUATIONS PRÉCÉDENTES

Dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (Lemmen *et al.*, 2008), les auteurs concluent que, bien qu'elle en soit encore à ses débuts, l'adaptation se produit à divers degrés dans chaque région du pays. Même si la définition de l'adaptation à ce moment était plutôt générale – et englobait toute activité, initiative ou intention visant à accroître la résilience à la variabilité et aux changements climatiques actuels et futurs – l'évaluation a permis de mettre en valeur l'importance croissante accordée à l'adaptation par divers groupes, notamment les collectivités, les échelons supérieurs des gouvernements (provincial/territorial et fédéral), le secteur industriel (associations et sociétés) et les organisations professionnelles. Le potentiel élevé d'adaptation était manifeste dans l'ensemble du Canada, bien qu'on ait mis en évidence certaines disparités régionales au chapitre des niveaux d'exposition, de sensibilité et de capacité, et souligné qu'un degré élevé de capacité adaptative ne se traduit pas toujours par l'adoption de mesures d'adaptation efficace. Des conclusions semblables ont été tirées du Quatrième rapport d'évaluation du GIEC (Field *et al.*, 2007).

Les auteurs (Lemmen *et al.*, 2008) ont surtout abordé l'adaptation dans le contexte des options possibles, des stratégies ou des besoins, mais ont aussi présenté des exemples d'initiatives en matière d'adaptation, qui ont été mises en œuvre en réaction à un événement climatique ou à un risque actuel ou perçu. Par exemple, la ville de Regina a présenté des plans d'urgence en cas de sécheresse après avoir subi les effets de celle qui est survenue en 1988 (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008) et la ville de Toronto a élaboré un plan d'intervention en cas de canicule pour lui aider à faire face aux vagues de chaleur qui surviennent fréquemment (Chiotti et Lavender, 2008). Au Québec, les critères de conception applicables aux ouvrages de transport d'énergie électrique ont été revus après la tempête de verglas survenue en 1998, afin de réduire la vulnérabilité aux phénomènes météorologiques graves (Bourque et Simonet, 2008). Les observations sur l'évolution des risques ont également conduit à des adaptations. Par exemple, des immeubles sur pilotis ont été construits dans les régions côtières, afin de limiter les dommages causés par les inondations associées aux ondes de tempêtes (Vasseur et Catto, 2008), et les exploitants d'entreprises de tourisme hivernal des Prairies diversifient leurs activités dans le but d'ajouter des activités de loisir estivales (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). Ces exemples ont démontré que l'adaptation aux changements climatiques ne repose pas nécessairement sur une évaluation approfondie des variations des paramètres climatiques, ni des prévisions précises. Elle s'appuie plutôt sur de simples hypothèses voulant que les événements d'ordre climatique (comme les tempêtes, les inondations et les épisodes de sécheresse), l'augmentation de la température et les répercussions liées à l'élévation du niveau de la mer (érosion et inondation) réapparaissent, continuent ou s'intensifient à l'avenir.

L'évaluation de 2008 a également mis en lumière le rôle que jouent les prévisions climatiques détaillées, en tant qu'exigences pour certains types de plans de mise en œuvre de mesures d'adaptation. Les ingénieurs et les gestionnaires des ressources ont souvent besoin de données utilisables et accessibles sur les changements climatiques à venir (p. ex, température, quantité de précipitations) et le niveau de la mer afin d'élaborer des mesures d'adaptation opportunes, appropriées et rentables. Par exemple, les données sur les tendances passées et les prévisions sur le climat peuvent être requises pour étayer les décisions concernant la mise à niveau et le remplacement des infrastructures (telles que les oléoducs, les ponceaux et les structures qui protègent les rives), la planification de l'emplacement ou de la rénovation des installations hydroélectriques, et le choix des essences d'arbre des exploitations forestières. Les praticiens ont fait remarquer que le manque de disponibilité de ces données nuisait à l'élaboration de mesures d'adaptation.

Il existe de nombreux exemples d'initiatives qui ont permis d'améliorer la résilience générale ou de renforcer les capacités d'adaptation, tout en n'abordant pas la question des répercussions liées à des changements climatiques précis. L'amélioration du rendement de l'utilisation de l'eau ou de l'efficacité énergétique, la diversification des activités économiques au sein des collectivités qui dépendent des ressources et la résolution des problèmes sous-jacents qui rendent les populations vulnérables (p. ex, la pauvreté, la mauvaise santé, l'accès limité à l'information et à la formation scolaire) sont des exemples que l'on désigne souvent comme étant des options de type « sans regrets » ou « gagnant-gagnant », car ils sont conçus de manière à procurer des avantages sans tenir compte des résultats climatiques.

Plusieurs intervenants, notamment des personnes et des ménages, des entreprises et l'industrie, des organismes communautaires, ainsi que tous les échelons du gouvernement (municipal, provincial, territorial et fédéral), ont étudié et adopté des mesures d'adaptation (*voir* le tableau 2 dans Burton, 2008). Les gouvernements municipaux semblent être les plus prompts à adopter des mesures d'adaptation (Field *et al.*, 2007; Lemmen *et al.*, 2008), si l'on considère les actions déclenchées principalement par les dégâts observés suite aux phénomènes climatiques passés (p. ex., inondations, épisodes de sécheresse, canicules) et les initiatives stratégiques mises en place par les échelons supérieurs des gouvernements dans le but d'encourager ou d'exiger l'élaboration de plans ou de stratégies d'adaptation. L'évaluation faisait état de quelques exemples des mesures d'adaptation aux changements climatiques mises en place par l'industrie et les entreprises, car celles-ci commencent tout juste à figurer au programme de l'industrie et des organisations professionnelles (Burton, 2008), et de quelques preuves d'investissements dans l'adaptation (Field *et al.*, 2007). Au nombre des principales raisons qui ont incité l'industrie à adopter des mesures d'adaptation, on compte la protection des investissements, la réduction des risques et l'amélioration de la réputation de l'entreprise (Burton, 2008).

Bien que plusieurs chapitres de l'évaluation réalisée en 2008 recommandaient d'intégrer l'adaptation à toutes les sphères d'activité, très peu d'exemples concrets à cet effet ont été présentés. L'intégration a trait à l'inclusion des changements climatiques au processus actuel de prise de décisions, afin qu'ils soient pris en considération dans toutes les décisions qui s'appliquent aux activités sensibles aux variations climatiques. L'intégration a aussi parfois trait à la notion « d'intégration stratégique ». Des approches de gestion des risques faisaient en outre souvent l'objet de recommandations dans le rapport de 2008; celles-ci comprennent une série d'étapes, allant de l'analyse préliminaire à l'estimation et à l'évaluation du risque, aux contrôles des risques, puis à la mise en place des mesures et à la surveillance (Bruce *et al.*, 2006). Selon les auteurs de l'évaluation, ces approches constituaient un mécanisme décisionnel efficace face à l'incertitude inhérente aux variations climatiques.

3. CONTEXTE INTERNATIONAL

Une analyse des recherches effectuées sur l'état de l'adaptation à l'échelle internationale fournit d'importants éléments de contexte pouvant servir à analyser la situation au Canada. De nombreux articles portent sur les politiques et les approches en matière d'adaptation à l'échelle internationale, dans lesquels on analyse, par exemple le type de mesure d'adaptation envisagée (Ford *et al.*, 2011), l'existence et le rôle des plans et des stratégies (Biesbroek *et al.*, 2010; Preston *et al.*, 2010; Bauer *et al.*, 2012), ainsi que les tendances en matière de planification et de mise en œuvre de mesures d'adaptation (Gagnon-Lebrun et Agrawala, 2007).

Une conclusion commune ressort de cette recherche : on commence à mettre en œuvre des mesures d'adaptation dans la plupart, sinon dans l'ensemble, des pays développés. La recherche et les connaissances sur les politiques d'adaptation, les plans et les stratégies ont considérablement progressé au cours des cinq à dix dernières années. Malgré cela, peu d'exemples de mise en œuvre de mesures d'adaptation ont été documentés (Biesbroek *et al.*, 2010; Lesnikowski *et al.*, 2011; Bauer *et al.*, 2012; Webb et Beh, 2013). Parmi les difficultés communes associées aux étapes de l'adaptation qui vont de la planification à la mise en œuvre, on note la prise en considération des incertitudes, la coordination efficace des mesures d'adaptation, aussi bien au niveau de l'ensemble des secteurs que par le biais des divers ordres de gouvernement, et le fait de faire de l'adaptation un sujet prioritaire pour les décideurs (OCDE, 2012). Le financement et les budgets insuffisants consacrés à l'adaptation ont également été cités comme principaux obstacles à la mise en œuvre (Bauer *et al.*, 2011). Le manque d'exemples sur la mise en œuvre des mesures d'adaptation peut s'expliquer, d'une part, par les délais observés entre les actions, la recherche et la publication et, d'autre part, par l'absence de mécanismes établis et normalisés pour surveiller et évaluer les progrès de l'adaptation (OCDE, 2012).

De nombreux pays, dont l'Australie, l'Allemagne, le Royaume-Uni et la Norvège, ont élaboré des stratégies d'adaptation nationales, qui correspondent généralement à des cadres souples servant à orienter les politiques publiques en matière d'adaptation. Les stratégies d'adaptation nationales tendent à être axées sur la progression de l'adaptation, soit en encourageant la production et la diffusion de données et de renseignements, soit en définissant les priorités sur le plan de l'adaptation. Les mécanismes qui appuient les priorités du cadre comprennent des lignes directrices pour la coordination entre les ministères, un organe de coordination centralisé chargé d'élaborer et de mettre en œuvre le cadre, un engagement en vue d'améliorer l'intégration des

connaissances scientifiques (p. ex., par l'intermédiaire des évaluations) et la création d'un comité consultatif scientifique permanent pouvant fournir des renseignements et des avis susceptibles d'aider à la prise de décisions stratégiques (Bauer *et al.*, 2012). Malgré l'absence de stratégies d'adaptation nationales, l'OCDE (2012) juge que le Canada, la Nouvelle-Zélande, la Slovénie, la Suède et les États-Unis comptent parmi les pays développés qui jouent un rôle actif sur le plan de l'adaptation.

Dans une étude des stratégies d'adaptation adoptées dans sept pays européens, Biesbroek *et al.* (2010) ont conclu que ces stratégies étaient utiles, en ce sens qu'elles démontraient un engagement politique à l'égard des enjeux relatifs aux changements climatiques, mais qu'elles ne s'étaient pas forcément traduites par la mise en œuvre de mesures d'adaptation. La Commission européenne elle-même appuie ces conclusions qui affirment que, même si 15 États membres ont élaboré des stratégies d'adaptation nationales, et que d'autres sont en cours d'élaboration, on compte « relativement peu d'exemples de mesures d'adaptation concrètes dans la réalité [traduction] » (Commission européenne, 2013). L'Union européenne a élaboré une stratégie d'adaptation européenne, qui s'applique à tous les États membres et qui complète les stratégies nationales.

Bien que les mandats légaux relatifs à l'adaptation aux changements climatiques soient rares, quelques exemples ont fait leur marque. La *Climate Change Act* (loi sur les changements climatiques) du Royaume-Uni permet de couvrir un sous-comité sur l'adaptation formé au sein du comité consultatif scientifique sur les changements climatiques et exige que l'évaluation des risques des changements climatiques et le programme national d'adaptation soient renouvelés tous les cinq ans (Committee on Climate Change, s. d.). Par conséquent, tous les ministères du pays ont adopté un plan ministériel d'adaptation et le Trésor britannique fournit une orientation, en ce qui a trait à l'adoption de mesures d'adaptation aux changements climatiques. Le gouvernement est également en mesure d'exiger la publication d'un compte rendu sur les initiatives d'adaptation mises en œuvre par les fournisseurs de services publics (p. ex., eau potable, électricité) et près de 90 organisations ont transmis des rapports pendant la première ronde (Committee on Climate Change, s. d.). Malgré les exigences prévues par la loi en matière d'adaptation, le passage de l'étape de la planification à celle de la mise en œuvre est freiné par un certain nombre de défis tels que l'évaluation et le financement (Boyd *et al.*, 2011). Parmi d'autres exemples notables, on compte le *Delta Act* des Pays-Bas, qui exige la mise en œuvre d'initiatives d'adaptation liées à la gestion de l'eau (p. ex., sécurité face aux risques d'inondation et approvisionnement en eau potable; Delta Programme Commissioner, s. d.) et l'exigence formulée par la Norvège, en vertu de laquelle les municipalités doivent incorporer l'analyse de la vulnérabilité et des risques relatifs aux changements climatiques aux projets d'aménagement du territoire. La Commission européenne a indiqué qu'elle étudierait la possibilité d'adopter un instrument juridiquement contraignant si les progrès réalisés d'ici 2017 au chapitre des mesures d'adaptation sont insuffisants (Commission européenne, 2013).

4. ÉTAT DE L'ADAPTATION AU CANADA

Au Canada, on constate que le niveau de mobilisation de certains groupes en ce qui a trait à l'adaptation a considérablement augmenté depuis l'évaluation de 2008. Toutefois, dans la plupart des cas, les nombreuses initiatives qui sont mises en œuvre en vue de renforcer la capacité des Canadiens à s'adapter n'ont toujours pas été évaluées et les enseignements qu'elles procurent n'ont pas été synthétisés à des fins scientifiques. Des méthodes prédéfinies, dont l'objet consiste à suivre et à évaluer les mesures prises dans le but de réduire les risques et la vulnérabilité associés aux changements climatiques, n'existent pas encore, ce qui empêche de dresser des comparaisons significatives entre les secteurs. Malgré tout, en établissant un lien entre la recherche et la pratique, on constate une amélioration du niveau de compréhension au sujet de l'adaptation en tant que processus.

4.1 RECHERCHE ET PRATIQUE

L'adaptation devient un sujet de recherche scientifique et d'analyse appliquée de plus en plus important. Un nombre croissant de disciplines entreprennent des recherches sur l'adaptation au Canada et se penchent sur des domaines et des problèmes variés (*voir* l'encadré 1). Les connaissances sur l'adaptation proviennent également des analyses régionales et sectorielles des répercussions, de la vulnérabilité et des risques relatifs aux changements climatiques commandées par le gouvernement (p. ex., Séguin, 2008; Williamson *et al.*, 2009; Desjarlais et Blondlot, 2010; Crawford et MacNair, 2012), les organisations dont le mandat précis est d'enrichir les connaissances à ce sujet (p. ex., Ouranos, Pacific Climate Impacts Consortium, Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources et le Collectif des Prairies pour la recherche en adaptation) et par le biais de programmes gouvernementaux (p. ex., Ressources naturelles Canada, 2012, Environnement Canada, 2013). Les groupes de recherche universitaires et les cabinets d'experts-conseils répondent à une nouvelle demande dans le domaine de l'analyse appliquée, y compris l'évaluation ciblée des risques relatifs aux changements climatiques (OCCIAR, 2013) et la compilation d'un recueil d'études de cas et d'outils (Nelitz *et al.*, 2013).

Bien que les efforts déployés en vue d'acquérir une meilleure compréhension des effets des changements climatiques et de la vulnérabilité demeurent importants, les discussions sur l'adaptation ont évolué. On ne s'interroge plus sur le fait de savoir si l'on doit s'adapter, mais on se pose plutôt des questions sur la façon de procéder pour s'adapter. Fondés sur des travaux exploratoires qui examinent les politiques en matière d'adaptation et les cadres décisionnels (p. ex., Willows et Connell, 2003; Lim et Spanger-Siegfried, 2005), de nombreux guides et modèles canadiens décrivant le processus d'adaptation sont maintenant disponibles (p. ex., Ministère de la Sécurité publique du Québec, 2008; Ressources naturelles Canada, 2009; Jackson *et al.*, 2011; CREXE, 2012), dont certains sont étroitement liés au contexte (Gleeson *et al.*, 2011). On propose donc un processus d'adaptation général axé sur la sensibilisation, la préparation, la mise en œuvre et l'apprentissage itératif, et se

ENCADRÉ 1

TENDANCES DANS LE DOMAINE DE LA RECHERCHE SUR L'ADAPTATION AU CANADA

Plusieurs disciplines de recherche contribuent à produire des renseignements et à acquérir des connaissances qui appuient le processus d'adaptation. Dans le but de cerner les tendances générales dans le domaine de la recherche sur l'adaptation entre 2000 et 2012, un examen structuré des articles scientifiques publiés par les chercheurs de la communauté canadienne a été entrepris, selon les méthodes décrites dans MacLellan (2008). Une recherche initiale dans la base de données a permis d'identifier 743 articles potentiellement utiles, puis de n'en garder que 428 qui avaient un rapport direct avec la planification de l'adaptation aux changements climatiques. Ces articles ont ensuite été classés selon cinq facteurs : 1) les secteurs; 2) les risques climatiques abordés; 3) les disciplines; 4) les théories et les méthodes employées (p. ex., modélisation climatique et des effets, évaluation de la vulnérabilité, méthodes participatives, analyse coût-avantages); et 5) l'importance accordée à la géographie ou à l'écosystème. À partir de ces analyses, il est possible d'avancer les conclusions suivantes :

- Le nombre d'ouvrages sur l'adaptation aux changements climatiques a augmenté de façon exponentielle. Entre 2000 et 2012, le nombre d'articles portant sur l'adaptation aux changements climatiques publiés par des chercheurs associés à un établissement canadien a presque décuplé, dépassant les tendances observées en ce qui a trait au nombre d'articles publiés en général dans tous les domaines d'études.
- Les articles scientifiques qui traitent de l'adaptation aux changements climatiques sont de plus en plus diversifiés, comme semble l'indiquer le nombre de revues publiant des articles à ce sujet pour la première fois. En 2007, 13 revues ont publié pour la première fois des articles sur l'adaptation aux changements climatiques rédigés par des chercheurs associés à des établissements canadiens. On en comptait 32 en 2012.
- La couverture sectorielle des recherches sur l'adaptation accuse également une augmentation . La figure 1 illustre la répartition des articles de recherche par secteur pour deux périodes données. Entre 2000 et 2007, la gestion de l'eau, l'agriculture et le secteur forestier constituaient les trois premiers secteurs les plus étudiés. Après 2007, on a constaté une augmentation significative du nombre d'articles portant sur l'adaptation en matière de santé et ce secteur fait maintenant partie des trois premiers secteurs les plus étudiés. La couverture de tous les secteurs, sauf dans le cas de la gestion de l'eau et des transports, a augmenté d'une période à l'autre.
- L'Arctique a fait l'objet d'un grand nombre de recherches sur l'adaptation. De plus, le nombre de recherches associées à cette région a augmenté de façon notable après 2005, probablement en raison de l'effet combiné de la production et de la diffusion des conclusions de l'*Évaluation de l'impact du changement climatique dans l'Arctique* (ÉICCA, 2005) et des investissements subséquents dans la recherche par l'entremise de fonds consacrés à l'Année polaire internationale (p. ex., Kulkarni *et al.*, 2012) et d'ArcticNet[1].

Les tendances sur le plan des méthodes de recherche sont difficiles à cerner, puisqu'elles sont propres à une discipline et à un secteur. Trois points généraux doivent être dégagés de cette analyse.

1. La recherche sur l'adaptation dans l'Arctique se démarque par son caractère hautement pluridisciplinaire, intégratif et participatif. L'agriculture de subsistance et l'exploitation des ressources naturelles prédominent comme thème de recherche (40 % des articles sur l'Arctique avec un thème sectoriel), suivi par les recherches sur la santé (23 %) et la conservation des écosystèmes (10 %). La recherche sur l'Arctique a souvent recours aux enquêtes et aux méthodologies participatives, et intègre l'aspect social et culturel de l'adaptation aux changements climatiques à la modélisation de leurs répercussions.
2. Même si bon nombre d'articles accordent une place importante au financement et aux ressources financières dans la planification de l'adaptation, on recense moins de dix articles qui analysent plus particulièrement la question des coûts et des avantages associés à l'adaptation (p. ex., Crowe et Parker, 2008; Samarawickrema et Kulshreshtha, 2008; Lantz et al., 2012; Ochuodho et al., 2012). Aucun article ne porte directement sur l'évaluation et le choix des options d'adaptation en fonction des outils économiques.
3. On constate une hausse du nombre d'études qui ont recours à des méthodes quantitatives telle l'analyse des citations et du contenu pour intégrer et analyser la recherche. Sept pour cent de tous les articles que nous avons analysés pourraient être considérés comme des études méthodiques et certaines d'entre elles se rapportent directement à des questions d'ordre stratégique précises (p. ex., Hewitt et al., 2011).

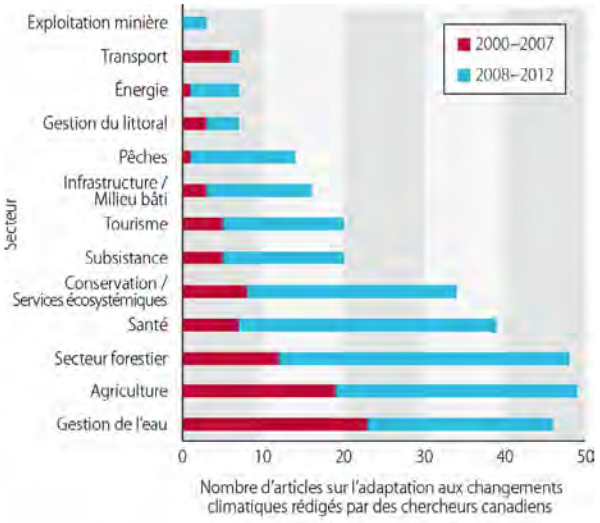


FIGURE 1 : Nombre d'articles sur l'adaptation aux changements climatiques rédigés par des chercheurs canadiens classés par secteur (2000-2012).

Cette analyse est limitée par le fait qu'elle met l'accent sur la quantité d'ouvrages de recherche. Malgré tout, il en découle un aperçu des capacités de recherche qui évoluent et dont l'objet consiste à appuyer les efforts d'adaptation au Canada. On croit que ce serait utile d'étendre l'analyse des tendances à la littérature grise et à l'examen des capacités de recherche par les décideurs.

fondant aussi bien sur des tendances générales observées dans les cadres existants que sur des activités d'adaptation exécutées par les organisations canadiennes (*voir* l'encadré 2). Les gouvernements ont souvent établi des partenariats pour mettre en œuvre une gamme d'initiatives, afin de comprendre comment l'adaptation s'est produite au sein de divers groupes et d'encourager la prise de mesures. Cela s'est traduit par des projets pilotes (p. ex., systèmes de surveillance des maladies liées à la chaleur; chapitre 7 – *Santé humaine*; Rodgers et Behan, 2012; programme des *Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale*, Ressources naturelles Canada, 2013a), des études de cas et des pratiques exemplaires (p. ex., Fraser et Strand, 2011; CVIIP, 2012; Rodgers et Behan, 2012; TRNEE, 2012a) et plusieurs initiatives visant à promouvoir le partage des connaissances.

ENCADRÉ 2

LE PROCESSUS D'ADAPTATION

Comme tout processus susceptible d'entraîner des changements de mentalité et de pratique, l'adaptation aux changements climatiques exige un renforcement des niveaux d'engagement (phases) et des mesures qui peuvent être mises en place, en vue d'appuyer la prise de décisions (étapes). La figure 2 résume les phases et les étapes, qui intègrent les observations sur les initiatives d'adaptation entreprises au Canada, et les éléments communs à plusieurs cadres de planification de l'adaptation. Bien que les phases et les étapes soient présentées comme un processus linéaire, les organisations peuvent utiliser des moyens variés, à mesure qu'elles passent d'une phase et d'une étape à l'autre.

Les étapes du processus d'adaptation comprennent la prise de conscience, la préparation, la mise en œuvre et l'apprentissage itératif.

Les sept étapes sont les suivantes :

1. **Sensibilisation aux changements climatiques :** le processus d'adaptation débute une fois que la personne ou l'organisation considère que les changements climatiques représentent une menace ou une occasion.
2. **Prise de conscience sur la nécessité d'adapter :** le fait de reconnaître l'ampleur du problème permet d'envisager l'adoption de mesures d'adaptation comme solution.
3. **Mobilisation des ressources :** la prise de conscience peut conduire les personnes et les organisations à consacrer au problème des ressources humaines ou financières, afin d'aider à préciser la nature des menaces ou des occasions.
4. **Renforcement de la capacité d'adaptation :** l'application de données scientifiques, de ressources financières et de compétences à des activités ciblées telles que l'examen des enjeux, l'évaluation des risques et l'analyse approfondie, permet d'acquérir les connaissances aptes à favoriser la prise de décisions éclairées.
5. **Mise en œuvre de mesures d'adaptation ciblées :** des mesures concrètes sont mises, en œuvre en vue de réduire la vulnérabilité (risque ou exposition) aux changements climatiques ou de tirer profit des occasions qui se présentent.
6. **Mesure et évaluation des progrès :** le fait de mesurer et d'évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation, de même que les hypothèses et incertitudes connexes, fournit les observations nécessaires à la mise en place de pratiques de gestion améliorées.
7. **Apprentissage, partage des connaissances et modification :** la dernière étape mène aux améliorations apportées aux mesures d'adaptation mises en œuvre et au transfert des leçons apprises aux initiatives d'adaptation à venir.

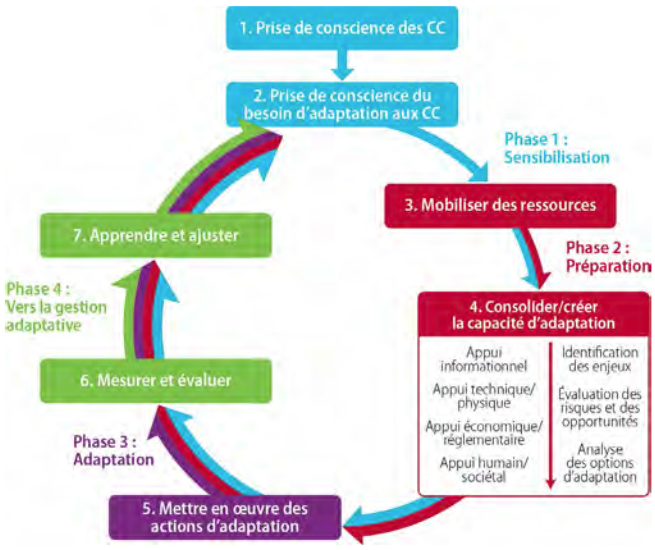


FIGURE 2 : Phases et étapes du processus d'adaptation.

Cette évaluation met en lumière de multiples exemples d'activités d'adaptation au Canada et montre que les groupes qui ont participé à ces activités ont dépassé les étapes 1 et 2. On a également relevé des preuves que certains ont atteint les étapes 3 et 4, sous forme de stratégies ou de plans d'adaptation, mis en œuvre à l'échelle provinciale ou territoriale ou au sein de certains pouvoirs publics locaux, ainsi que de programmes et des initiatives d'adaptation pris en charge par les gouvernements, mais mis en place dans le cadre de partenariats. La création d'organisations mandatées spécifiquement en vue d'acquérir des connaissances concernant l'adaptation (p. ex., Plateforme d'adaptation de Ressources naturelles Canada, Ouranos, Pacific Climate Impacts Consortium, Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources et Collectif des Prairies pour la recherche en adaptation) témoigne des efforts intenses déployés en vue de renforcer les capacités d'adaptation. On constate une progression moins évidente dans les trois dernières étapes, bien qu'il existe quelques exemples de mises en œuvre de mesures ciblées (*voir* le tableau 1).

Les milieux de la politique et de la recherche manifestent un nouvel intérêt envers le suivi et l'évaluation des progrès en matière d'adaptation (p. ex., Leclerc, 2012; Ford *et al.* 2013). Les études ont exploré les mécanismes de sensibilisation aux effets des changements climatiques et le niveau de mobilisation chez certains groupes, y compris les entreprises (p. ex., Environics Research Group, 2010; TRNEE, 2012b), les municipalités (Robinson et Gore, 2011; Carmin *et al.*, 2012) et les individus, y compris les fonctionnaires (p. ex., BC Stats, 2012), les membres d'associations professionnelles (Davidson et Bowron, 2012) et les ménages (p. ex., Berry *et al.*, 2009). Les résultats de ces études servent, entre autres, à établir les paramètres de référence et à étayer les politiques et les programmes futurs. Le manque de caractérisation uniforme des mesures d'adaptation, en particulier des mesures d'adaptation efficaces, compte parmi les difficultés liées à la surveillance et à l'évaluation des progrès en matière d'adaptation (p. ex., Ford *et al.*, 2013), et à la comparaison des résultats d'une étude à l'autre (Dupuis et Biesbrock, sous presse).

Dans la pratique, l'approche du Canada en matière d'adaptation au cours des dernières années cherche surtout à faciliter l'adoption de mesures à l'échelle locale et régionale (p. ex., à l'échelle des bassins versants; Mullan *et al.*, 2013), bien que l'on constate une hausse de mobilisation des groupes dans l'ensemble des secteurs et à tous les niveaux de décision (CCNUCC, 2011). Les chapitres 3 à 8 de la présente évaluation fournissent plusieurs exemples d'activités d'adaptation entreprises par les gouvernements, l'industrie et les organismes non gouvernementaux (*voir* le tableau 1). Il s'agit d'activités qui renforcent les capacités en vue de l'adaptation, ainsi que de la mise en œuvre d'activités ciblées, dans le but de réduire la vulnérabilité aux risques que posent les changements climatiques ou d'exploiter les possibilités que présentent ces derniers (Smit et Wandel, 2006; UKCIP, 2010).

		Type d'activité d'adaptation	
Exemples	**Chapitre**	**Renforcer les capacités d'adaptation**	**Mettre en œuvre les mesures**
Gouvernement			
Les collectivités de Cambridge et Milton (Ontario) évaluent les conséquences économiques des changements climatiques sur la conception des infrastructures de drainage dans les zones inondables	8	X	
La région de Durham (Ontario) intègre des considérations liées aux changements climatiques dans les documents d'aménagement locaux	8	X	
Les villes de Toronto et de Windsor (Ontario) et de Winnipeg (Manitoba) se sont fondées sur les résultats des évaluations des vulnérabilités de la santé liées à la chaleur afin d'élaborer ou d'actualiser leurs systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur	7	X	X
La ville de Québec revoit la conception de ses ponceaux pour tenir compte de la fréquence et de l'intensité croissante des épisodes pluvieux	8		X
La ville de Calgary (Alberta) a intensifié ses efforts de conservation de l'eau afin de maintenir le niveau de prélèvement enregistré en 2003	8		X
La Colombie-Britannique, le Québec, le Yukon et les Territoires du Nord-Ouest ont effectué des évaluations sectorielles spécifiques de la vulnérabilité, des risques et des avantages (agriculture, réseaux routiers dans le Nord)	4, 8	X	
La Colombie-Britannique met sur pied un projet d'adaptation pilote sur la migration assistée pour 15 essences d'arbres commerciales établies entre le centre du Yukon et le sud de l'Oregon	3	X	
La Colombie-Britannique, l'Alberta et le Québec modifient les directives en matière de transfert de semences applicables aux activités de reboisement, afin de tenir compte des conditions changeantes propices à la croissance des arbres	3	X	
Dans le cadre du plan de protection du lac Simcoe, l'Ontario exige l'élaboration d'une stratégie d'adaptation aux changements climatiques pour le bassin versant	6	X	
En faisant appel au savoir scientifique, local et traditionnel, le plan d'aménagement du territoire du Yukon pour le bassin de la rivière Peel contiendra des considérations liées aux changements climatiques	6	X	
La Colombie-Britannique élabore une gamme de conseils portant sur l'élaboration des politiques, afin d'intégrer l'adaptation aux plans de gestion des zones côtières et d'aménagement du territoire	8	X	
Le Manitoba protège l'aire d'hivernage de la harde de caribous de la toundra de Qamanirjuaq dans la zone de transition entre l'écosystème de la forêt boréale et la toundra	6		X
Le gouvernement fédéral a entrepris plusieurs activités en vue de sensibiliser les praticiens du secteur de la santé et le public en général aux risques sanitaires liés aux changements climatiques	7	X	
Le gouvernement fédéral envisage de modifier les politiques en matière de biosécurité, afin de les adapter aux effets des changements climatiques sur les espèces exotiques envahissantes	4	X	

Tableau 1 suite à la page suivante

Exemples	Chapitre	Type d'activité d'adaptation	
		Renforcer les capacités d'adaptation	Mettre en œuvre les mesures
Le gouvernement fédéral met au point des outils, afin d'aider les responsables de la santé publique à appliquer les méthodes de surveillance et de contrôle des maladies à transmission vectorielle	7	X	
Le gouvernement fédéral tient compte de la fonte continue des glaciers dans les parcs nationaux de Banff et de Jasper dans l'aménagement de nouveaux lieux d'observation et de centres d'interprétation	5		X
Le gouvernement fédéral désigne des régions écologiques pour lutter contre la fièvre catarrhale du mouton, une maladie virale qui touche surtout les ruminants, en prévision de l'évolution des taux de prévalence de la maladie	4		X
Une gamme d'initiatives intergouvernementales accordent une place plus importante à l'adaptation dans le programme stratégique et facilitent le partage de connaissances	3, 4	X	
Industrie			
Les associations industrielles en Colombie-Britannique élaborent un plan d'action du tourisme en réaction aux dommages causés par le dendroctone du pin ponderosa	3, 5	X	
Une entreprise pétrolière et gazière élabore et met en œuvre une stratégie de l'eau, qui comprend aussi bien un engagement sur le plan des orientations stratégiques qu'une collaboration avec les intervenants locaux au niveau des questions liées à l'eau de certains sites	3	X	
La société hydroélectrique du Québec intègre des considérations liées aux changements climatiques dans les prévisions de la demande, afin de déterminer les ajustements à apporter aux taux facturés et d'étayer les plans d'approvisionnement	3	X	
Les acteurs du secteur agro-industriel adoptent la surveillance en temps réel et d'autres technologies susceptibles de contribuer à accroître le rendement de l'agriculture irriguée	4	X	X
Les acériculteurs modifient la date à laquelle ils entaillent les érables et installent des systèmes de cueillette plus efficaces	4		X
Certaines compagnies d'assurance de biens modifient leurs garanties (p. ex., elles n'offrent plus d'assurance contre le refoulement d'égout dans les collectivités soumettant périodiquement des réclamations) afin de mieux tenir compte de l'exposition aux risques climatiques	5		X
Les entreprises minières actives dans le Nord appliquent des techniques visant à protéger les infrastructures contre la fonte du pergélisol (p. ex., fondations sur pieux plus profondes, fondations ajustables)	3		X
Les exploitants d'entreprises touristiques améliorent la gestion des effets des fluctuations actuelles du climat (p. ex., fabrication de neige, irrigation, aménagement forestier de type « intelli-feu », diversification des activités saisonnières et produits d'assurance et financiers telles des garanties relatives à l'enneigement ou à l'ensoleillement)	5		X
Organisations non gouvernementales			
L'Association médicale canadienne a publié un énoncé de principe qui doit servir d'appel à l'action des autorités sanitaires en matière d'adaptation aux changements climatiques	7	X	
L'Association canadienne de normalisation a publié un guide technique pour la construction en région de pergélisol, dans lequel sont présentés les effets possibles du climat futur sur le pergélisol	3	X	
Ingénieurs Canada a mis en place une gamme d'initiatives visant à fournir aux ingénieurs des outils et des renseignements, afin qu'ils soient en mesure de s'adapter (p. ex., protocole d'évaluation de la vulnérabilité, études de cas, ateliers de formation)	8	X	

TABLEAU 1 : Exemples choisis d'activités d'adaptation tirés des chapitres consacrés aux secteurs.

Certaines observations peuvent être tirées des exemples des activités d'adaptation présentées dans la présente évaluation. En premier lieu, il appert que les événements climatiques et la reconnaissance de la sensibilité aux conditions climatiques et météorologiques constituent des éléments déclencheurs importants de l'adaptation dans les secteurs publics et privés. Par exemple, l'inondation de 2011 au Manitoba a permis de constater l'importance de tenir compte des effets sur la santé dans les activités de planification et de reprise en cas d'urgence ou de catastrophe (chapitre 7 – *Santé humaine*; *voir* l'étude de cas 3); tandis qu'une tendance croissante des dommages causés aux résidences et aux entreprises par des phénomènes météorologiques extrêmes tels que des pluies torrentielles, des épisodes de vent violent et des feux de friches au Canada et à l'étranger a conduit les compagnies d'assurance canadiennes à envisager l'adaptation (chapitre 5 – *Industrie*). Les autres moteurs de l'adaptation comprennent la conformité aux règlements, les préoccupations au chapitre de la réputation et le désir de conserver un accès aux marchés internationaux (chapitre 3 – *Ressources naturelles*, chapitre 4 – *Production alimentaire* et chapitre 8 – *Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport*). Les rôles que joue le gouvernement en matière de protection des gens les plus vulnérables de la société et de la protection de la santé et de la sécurité fournissent l'élan nécessaire pour entreprendre des activités menant à une meilleure compréhension des risques et des vulnérabilités et à la mise en œuvre de mesures ciblées (chapitre 7 – *Santé humaine* et chapitre 8 – *Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport*).

En deuxième lieu, on ne dispose que de peu d'exemples de mesures d'adaptation mises en œuvre pour gérer de manière proactive les risques relatifs aux futurs changements climatiques. Plus de la moitié (60 %) des 63 exemples de mesures d'adaptation recensés dans l'ensemble des études analysées font état des activités suivantes : recherche, surveillance des effets des changements climatiques, évaluation des vulnérabilités, risques et possibilités, élaboration de stratégies d'adaptation indépendantes et intégration de l'adaptation aux politiques et aux programmes de planification existants. Les autres exemples comprennent des activités mises en œuvre en vue de prévenir ou de neutraliser les dommages découlant des risques actuels liés aux changements climatiques, y compris les changements opérationnels destinés à gérer les effets de la variabilité climatique actuelle, de même que les changements graduels observés telle la dégradation du pergélisol. Outre les essais pour l'initiative concernant la migration assistée des essences d'arbre (*voir* l'étude de cas 2 présentée dans le chapitre 3 – *Ressources naturelles*), la documentation recensée présente peu d'exemples de nouvelles mesures prises pour gérer les risques associés aux changements climatiques potentiellement inconnus, de grande envergure ou progressifs.

En troisième lieu, on constate que les secteurs collaborent dans l'optique d'acquérir des connaissances relatives à l'adaptation et d'élargir la gamme d'options dans ce domaine. Par exemple, le gouvernement de l'Ontario a établi un partenariat de recherche avec l'Université de Guelph, dans le but d'améliorer le niveau de compréhension au sujet des maladies animales liées aux changements climatiques (chapitre 4 – *Production alimentaire*). On remarque également la mise sur pied de partenariats visant à établir le bien-fondé de l'adaptation. La Compagnie d'assurance générale Co-operators, de concert avec l'Institut de prévention des sinistres catastrophiques, a lancé une initiative visant à démontrer la faisabilité technique et économique de construire des maisons capables de résister aux aléas du climat (chapitre 5 – *Industrie*). La mise en œuvre de l'adaptation peut exiger un effort de collaboration. Par exemple, le partenariat établi entre le groupe de conservation Canards illimités Canada et la mine Chaplin, en Saskatchewan, a permis à cette dernière d'accéder à une source d'eau secondaire grâce à laquelle il sera possible de pallier les effets des années de sécheresse (chapitre 3 – *Ressources naturelles*).

La mobilisation et l'adoption de mesures d'adaptation diffèrent d'un groupe d'intervenants à l'autre. Par conséquent, les sections suivantes traitent des progrès accomplis dans ce domaine par les gouvernements (fédéral, provincial/territorial et local) et l'industrie, et abordent du même coup leurs rôles, leurs objectifs et leurs approches.

4.1.1 GOUVERNEMENT FÉDÉRAL

Le gouvernement fédéral joue un rôle important dans la diffusion de l'information scientifique concernant les répercussions des changements climatiques et l'adaptation, ainsi que dans l'intégration des mesures d'adaptation (BVG, 2010). Cela est conforme à ce que l'on comprend maintenant des rôles que joue le gouvernement en tant qu'agent et facilitateur de l'adaptation (p. ex., TRNEE, 2009; Cimato et Mullan, 2010; Hallegatte *et al.*, 2011). À titre de facilitateurs, les organismes gouvernementaux doivent éliminer les obstacles et créer des incitatifs qui feront en sorte que les gens et les organisations seront plus enclins à s'adapter de manière proactive. En tant qu'agents, les organismes gouvernementaux doivent adapter les politiques, les programmes et les décisions opérationnelles afin de tenir compte des changements climatiques.

Bien que critiqué pour le manque perçu de leadership soutenu au chapitre de l'adaptation et pour l'absence d'une stratégie d'adaptation nationale (TRNEE, 2009; BVG, 2010; Dickinson et Burton, 2011; Hanna *et al.*, 2013), le gouvernement fédéral a intensifié ses efforts au cours des cinq dernières années en vue de renforcer la capacité des Canadiens à s'adapter aux changements climatiques. On observe une hausse

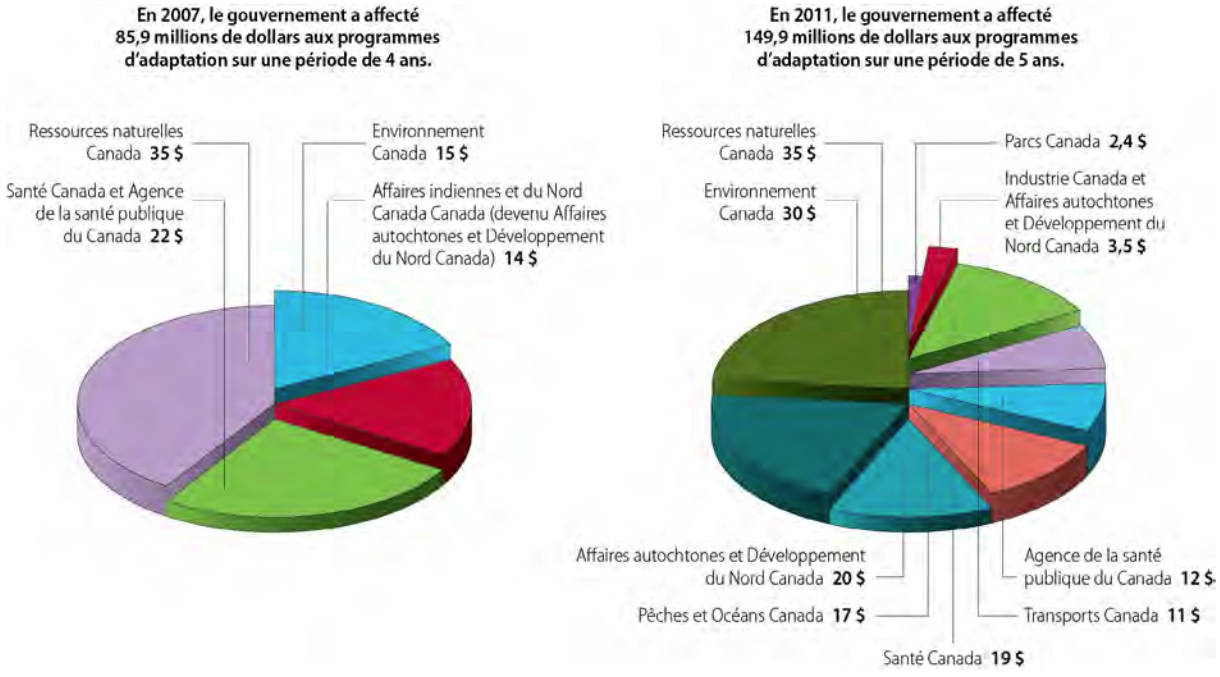


FIGURE 3 : Évolution des dépenses fédérales consacrées aux programmes d'adaptation *(données obtenues de : Environnement Canada, 2013; CNW, 2007).*

évidente du niveau d'engagement du gouvernement fédéral en ce qui concerne l'adaptation. En effet, entre 2007 et 2011, le nombre de ministères et d'organismes qui exécutaient des programmes d'adaptation est passé de cinq à neuf (*voir* la figure 3), alors qu'on adoptait le *Cadre stratégique fédéral sur l'adaptation*, en 2011, dont l'objet consiste à orienter les futures priorités relatives à l'adaptation (Gouvernement du Canada, 2011). Le financement a permis d'appuyer, entre autres, l'élaboration de scénarios sur les changements climatiques et de plans d'adaptation communautaires, la présentation de renseignements et d'outils d'aide à la prise de décisions axées sur l'adaptation en matière de santé et d'infrastructure (Environnement Canada, 2010, 2013), et les activités de collaboration entre les divers ordres de gouvernement, le secteur industriel et les praticiens de l'adaptation (*voir* l'étude de cas 1).

La documentation disponible recense plusieurs façons de renforcer les activités fédérales en matière d'adaptation, y compris le renforcement des activités se rapportant à la production et à la diffusion de

ÉTUDE DE CAS 1

APPROCHE FONDÉE SUR LA COLLABORATION VISANT À AMÉLIORER LE PROCESSUS DÉCISIONNEL EN MATIÈRE D'ADAPTATION

Le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux et territoriaux reconnaissent que les effets des changements climatiques et les décisions en matière d'adaptation transcendent les limites de compétences et des secteurs, et font intervenir un grand nombre d'acteurs; c'est pourquoi ils ont adopté une approche fondée sur la collaboration comme principe clé ayant pour objet de favoriser l'acquisition de connaissances et la prise de mesures dans le domaine de l'adaptation. Même si l'établissement d'une relation de collaboration exige du temps et peut poser de nombreux défis, elle présente également de nombreux avantages, en ce qui a trait à l'utilisation judicieuse des ressources, au partage des données, de l'expérience et des compétences, à l'incitation à l'action chez les pairs, et à un degré de coordination permettant d'éviter les objectifs divergents et les conflits (Spencer *et al.*, 2012).

En se fondant sur le travail de base accompli jusqu'à présent sur les répercussions des changements climatiques et l'adaptation (p. ex., Smit, 1993), on a créé le Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation (C-CIARN) dans le but d'accroître la sensibilisation à l'égard de cet enjeu et d'établir des relations. Ce réseau, exploité de 2001 à 2007, comptait 14 bureaux sectoriels et régionaux, dont le principal objectif consistait à jeter des ponts entre les communautés de recherche et les décideurs, y compris le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux et territoriaux.

D'après les résultats obtenus et les relations établies par le C-CIARN, six initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale ont été mises en œuvre au Canada en 2008 (Nord, Colombie-Britannique, Prairies, Ontario, Québec et Atlantique) et ont porté sur les activités destinées à faciliter l'adoption de mesures d'adaptation pratiques. Chaque initiative est axée sur les priorités définies en fonction de la compréhension scientifique (p. ex., Lemmen *et al.*, 2008) et des priorités stratégiques régionales. Les thèmes communs comprenaient la gestion des ressources hydriques, l'infrastructure et la planification municipale (Ressources naturelles Canada, 2013a). Chaque initiative a établi son propre réseau de décideurs et de praticiens, notamment les gouvernements, l'industrie et les organisations non gouvernementales, et a également mis à contribution la communauté de recherche. En tout, plus de 150 organisations ont pris part à ces initiatives et ont créé plus de 230 produits, notamment des lignes directrices, des normes, des outils, des plans d'adaptation, des études de cas et des rapports techniques (Ressources naturelles Canada, 2013b; figure 4). Les réseaux régionaux sont venus compléter les activités menées en collaboration avec des organisations de praticiens ciblées tels les ingénieurs et les planificateurs.

La Plateforme d'adaptation, lancée en 2012, constitue le mécanisme le plus récent visant à améliorer la collaboration en matière d'adaptation au Canada (Ressources naturelles Canada, 2013a). Elle réunit la plupart des acteurs qui ont déjà pris part aux activités de collaboration (gouvernement fédéral, gouvernements provinciaux et territoriaux et organisations professionnelles), ainsi que des représentants des associations industrielles et du secteur financier, afin de se pencher sur des priorités d'adaptation partagées, en mettant en commun les connaissances, les capacités et les ressources financières, dans le but de produire les outils et de partager les connaissances dont les régions et les secteurs ont besoin pour se renseigner au sujet des effets des changements climatiques et prendre les mesures qui s'imposent.

La plateforme fournit une structure permettant d'entreprendre des activités qui font progresser les priorités régionales et sectorielles communes en matière d'adaptation au Canada. Elle comprend une séance plénière et des réunions de divers groupes de travail. Les membres qui participent à la séance plénière sont des représentants de la haute direction, qui aident à définir les domaines de priorité sur lesquels se pencheront les groupes de travail, établissent des liens entre les intérêts et les ressources et déterminent les possibilités d'adaptation. Les groupes de travail, quant à eux, se concentrent sur les principaux secteurs économiques (p.ex., secteur forestier, exploitation minière), les besoins communs en matière d'information (scénarios de changements climatiques) et des thèmes plus généraux jugés importants dans le but de continuer à faire progresser l'adaptation (p. ex., mesurer les progrès, évaluation scientifique).

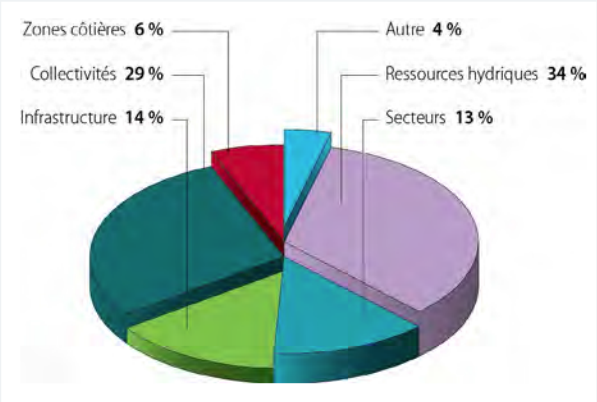


FIGURE 4: Répartition thématique des produits résultant des initiatives de collaboration en matière d'adaptation régionale *(Ressources naturelles Canada, 2013b).*

données sur l'adaptation, l'intensification des efforts visant à intégrer l'adaptation dans les domaines à orientation stratégique tels que la prévention des risques liés aux catastrophes, l'approbation des grands projets, le financement des infrastructures et la gestion des pêches, et l'amélioration de la coordination, afin d'éviter le dédoublement et les effets secondaires indésirables et de s'assurer que les leçons apprises sont transférées, aussi bien à l'ensemble des secteurs que d'un secteur à l'autre, ainsi qu'au-delà des frontières géopolitiques (Jessen et Patton, 2008; Dickinson et Burton, 2011; TRNEE, 2012b).

4.1.2 GOUVERNEMENTS PROVINCIAUX ET TERRITORIAUX

Les gouvernements provinciaux et territoriaux accordent de plus en plus d'importance à l'adaptation (*voir* le tableau 2). La Colombie-Britannique, l'Ontario et le Québec ont mis en œuvre des stratégies d'adaptation indépendantes et des plans d'action et ont aussi formé des conseils consultatifs scientifiques, afin d'orienter les efforts dans le domaine de l'adaptation. Les autres provinces et territoires ont intégré leurs efforts à ce chapitre dans leurs plans d'action globaux sur les changements climatiques, ou sont en voie d'élaborer des stratégies ou des plans d'adaptation (p. ex., Saskatchewan, Nouveau-Brunswick, Île-du-Prince-Édouard et Territoires du Nord-Ouest; Fondation David Suzuki, 2012). Au cours des dernières années, plusieurs gouvernements ont réalisé une forme quelconque d'évaluation des risques ou de la vulnérabilité (p. ex., BC Agriculture and Food Climate Action Initiative, 2012) et certains d'entre eux prévoient des mesures et des engagements sectoriels spécifiques (p. ex., mesures en vue d'améliorer la santé des personnes et des collectivités en situation de changements climatiques; Gouvernement du Québec, 2012). Aucune évaluation des efforts gouvernementaux relatifs aux besoins en matière d'adaptation n'a encore été élaborée. On observe toutefois des différences évidentes dans l'ensemble du pays en ce qui a trait à la capacité d'évaluer la vulnérabilité, et de prévoir et de mettre en œuvre les mesures d'adaptation (*voir* le chapitre 7 – *Santé humaine*).

Province / Territoire	Stratégie, plan, cadre	Exemples d'activités ou de ressources d'adaptation
Colombie-Britannique	*Preparing for climate change – British Columbia's adaptation strategy* (2010)[2]	Fonds de 94,5 millions de dollars pour créer le Pacific Institute for Climate Solutions (PICS) qui servira à évaluer, élaborer et promouvoir des options de réduction des émissions et d'adaptation à titre de contributions aux politiques[3] Directives en matière de politique forestière, outils d'aide à la décision et connaissances susceptibles d'aider les aménagistes forestiers de la Colombie-Britannique à s'adapter aux changements climatiques[4]
Alberta	*Climate change strategy: Responsibility. Leadership. Action* (2007) – comprend les efforts d'adaptation[5]	Cadre d'adaptation aux changements climatiques et guide connexe pouvant servir à aider les organisations à intégrer les risques liés aux changements climatiques aux mécanismes de gestion des risques de l'entreprise et aux approches de planification stratégique déjà en place[6] Participation aux recherches sur les changements climatiques et sur les approvisionnements en eau[7], notamment par l'intermédiaire du Collectif des Prairies pour la recherche en adaptation
Saskatchewan		Lancé en 2010, Saskadapt.ca est un portail d'information provincial sur les effets des changements climatiques et l'adaptation conçu en vue d'aider les résidents et les organisations à s'adapter[8] La *Management and Reduction of Greenhouse Gases and Adaptation to Climate Change Act*, y compris des dispositions applicables à la coordination des efforts de planification en matière d'adaptation[9]
Manitoba	Plan d'action pour les changements climatiques *Beyond Kyoto* (2008) – comprend les efforts d'adaptation[10]	Amélioration des ouvrages de protection contre les inondations, y compris la mise à niveau du canal de dérivation de la rivière Rouge, afin qu'il résiste à un épisode majeur de crue printanière qui survient tous les 700 ans au lieu d'un épisode tous les 90 ans[11] Le nouveau règlement provincial sur la planification contient des dispositions applicables à l'aménagement local afin de se préparer aux effets des changements climatiques[12]
Ontario	Faire face au changement climatique : stratégie d'adaptation et plan d'action de l'Ontario 2011 - 2014[13]	Un guide conçu en vue d'aider à intégrer les prévisions de changements climatiques à la modélisation hydrologique, afin de produire les bilans hydriques requis en vertu de la *Loi sur la salubrité de l'eau potable* Une boîte à outils virtuelle susceptible d'aider à prévoir les effets des changements climatiques sur les écosystèmes et les ressources naturelles[14]
Québec	Québec en action : vert 2020 – Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques[15]	Un montant de 200 millions de dollars affecté à la mise en œuvre de mesures d'adaptation dans la province L'adaptation a été intégrée à plusieurs lois et politiques : la *Loi sur le régime des eaux*, la *Loi sur la sécurité des barrages* et la Stratégie de protection et de conservation des sources destinées à l'alimentation en eau potable
Yukon	Climate change action plan (2009) – comprend les efforts d'adaptation[16]; *Pan-Territorial Adaptation Strategy* (2011)[17]	Évaluations des risques et de la vulnérabilité propres à chaque secteur (infrastructure, santé des forêts, essences forestières, ressources hydriques)[18] Inventaire des données sur le pergélisol[19]
Territoires du Nord-Ouest	*Pan-Territorial Adaptation Strategy* (2011)	Un cadre d'adaptation pour les Territoires du Nord-Ouest est en cours d'élaboration[20] Évaluation de la vulnérabilité des axes routiers terminée en 2011[21]

Tableau 2 suite à la page suivante

Province / Territoire	Stratégie, plan, cadre	Exemples d'activités ou de ressources d'adaptation
Nunavut	*Upagiaqtavut – Setting the course: climate change impacts and adaptation in Nunavut – framework for adaptation activities* (2011); *Pan-territorial adaptation strategy* (2011)	Le projet Atuliqtuq vise à renforcer la capacité d'adaptation de la collectivité par des activités de sensibilisation, de recherche, de mise au point d'outils et de planification Un réseau de surveillance du pergélisol a été mis sur pied en collaboration avec les villages et le gouvernement fédéral[22]
Nouveau-Brunswick	Plan d'action sur les changements climatiques – 2007-2012 (comprend les efforts d'adaptation)[23]; Solutions d'adaptation aux changements climatiques de l'Atlantique[24]	Lancement d'un site Web sur les indicateurs de changements climatiques qui a recours à des données locales, dans le but d'éduquer le public au sujet des changements climatiques[25] Évaluation, mise au point d'outils et soutien à la planification, en vue d'accroître la résilience des infrastructures et des collectivités aux changements climatiques[26]
Nouvelle-Écosse	*Toward a green future: Nova Scotia's climate change action plan* (2009) – comprend les efforts d'adaptation[27]	Un fonds d'action pour le changement climatique créé en 2009 lance annuellement des appels de propositions afin de soutenir les efforts déployés par la collectivité en vue de comprendre les effets des changements climatiques et d'adopter des mesures susceptibles de l'aider à se préparer à leur faire face[28] Obligations pour les municipalités d'élaborer et de présenter des plans d'action en matière de changements climatiques (y compris l'atténuation des émissions et l'adaptation), afin de recevoir une tranche des revenus fédéraux provenant de la taxe sur l'essence[29]
Île-du-Prince-Édouard	*Prince Edward Island and climate change: a strategy for reducing the impacts of global warming* (2008) – comprend les efforts d'adaptation[30]	Élaboration de scénarios sur les changements climatiques qui seront utilisés par neuf collectivités ciblées[31] Évaluation et mise au point d'outils visant à accroître la compréhension en matière de la vulnérabilité des collectivités à l'égard des changements climatiques[32]
Terre-Neuve-et-Labrador	*Charting our course: climate change action plan* (2011) – comprend les efforts d'adaptation[33]	Élaboration d'un guide en 7 étapes, comprenant des études de cas et un guide de ressources, conçu en vue d'aider les collectivités de la province à évaluer les vulnérabilités aux changements climatiques[34] Élaboration d'un carnet de travail susceptible d'aider les fonctionnaires et les employés municipaux à gérer les effets des changements climatiques sur les infrastructures[35]

TABLEAU 2 : Exemples d'activités d'adaptation provinciales et territoriales.

Les gouvernements mettent habituellement l'adaptation en contexte en attirant l'attention sur les vulnérabilités existantes, les expériences et les observations locales. Les infestations de dendroctone du pin ponderosa en Colombie-Britannique, la dégradation du pergélisol et le recul des glaciers au Yukon, ainsi que les ouragans qui frappent la Nouvelle-Écosse n'en sont que quelques exemples. Les secteurs qui font l'objet de la plus grande attention sont ceux qui contribuent le plus à l'économie ou à la composition régionale (p. ex., les forêts en Colombie-Britannique, l'agriculture en Alberta et en Saskatchewan, l'infrastructure et la santé en Ontario, les régions côtières des Maritimes). Bon nombre de documents territoriaux et provinciaux mettent en lumière les répercussions des changements climatiques sur la culture et le patrimoine des collectivités nordiques.

Les provinces et les territoires considèrent qu'il est prioritaire de renforcer la capacité d'adaptation de la collectivité et du gouvernement local. Pour ce faire, ils ont adopté certaines lignes d'action communes, à savoir le financement de la recherche sur l'adaptation aux changements climatiques, l'amélioration des initiatives actuelles de préparation aux situations d'urgence, le renforcement de la planification relative à l'aménagement urbain et rural et de l'investissement dans l'infrastructure en intégrant l'adaptation, la prestation de conseils, l'offre de coordination et le partage des données et des leçons retenues. Les provinces et les territoires ont compétence sur un certain nombre de questions locales ayant trait à l'adaptation aux changements climatiques, dont l'aménagement du territoire (Richardson et Otero, 2012). On s'attend donc à ce qu'ils accordent une attention particulière à la préparation et aux mesures envisagées à l'échelle locale.

4.1.3 COLLECTIVITÉS ET GOUVERNEMENTS LOCAUX

La planification de l'adaptation a pris de l'ampleur dans un grand nombre de collectivités et gouvernements locaux au Canada. Des études menées auprès des municipalités canadiennes et des études de cas révèlent une tendance à la hausse des activités d'adaptation (Robinson et Gore, 2011); une répartition à peu près égale des activités de préparation, d'évaluation, de planification et de mise en œuvre (Carmin *et al.*, 2012); des efforts consentis afin d'élaborer des plans, des politiques et des programmes d'adaptation en collaboration avec des intervenants internes et externes (Richardson et Lemmen, 2010); et quelques indications qui portent à croire qu'on affecte du personnel à la planification de l'adaptation (Merrill et Zwicker, 2010). Parmi les homologues internationaux qui ont répondu au questionnaire de l'ICLEI–Local Governments for Sustainability, les villes canadiennes se démarquent par leurs préoccupations sur le plan de la sécurité des logements, des effets provoqués par une évolution des vecteurs de maladies sur la santé, du degré d'intégration de l'adaptation à la planification communautaire, des partenariats établis avec d'autres villes et des organisations non gouvernementales, et de la création de commissions ou de groupes de travail axés sur l'adaptation (Carmin *et al.*, 2012). Le niveau de soutien varie d'un politicien et d'un organisme gouvernemental local à l'autre, certaines études faisant état d'un appui soutenu (p. ex., Carmin *et al.*, 2012), alors que d'autres estiment qu'un manque de volonté politique constitue un obstacle à l'adaptation (p. ex., Davidson et Bowron, 2012). Les petites collectivités sont moins susceptibles de participer à la planification de l'adaptation que les plus grandes (Hanna *et al.*, 2013).

De nombreux facteurs incitent les collectivités et les gouvernements locaux à tenir compte de l'adaptation (*voir* l'étude de cas 2). On a recours à la planification et aux projets d'adaptation en réaction aux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes (p. ex., Wellstead, 2011; Rodgers et Behan, 2012), ainsi qu'aux changements graduels tels que l'élévation du niveau de la mer et le dégel du pergélisol (Richardson et Lemmen, 2010). D'autres facteurs incluent l'enseignement par les pairs et le jumelage des mesures d'adaptation aux priorités immédiates telle la conservation de l'eau (Richardson et Lemmen, 2010; Picketts *et al.*, 2013).

ÉTUDE DE CAS 2

COMMENT LES COLLECTIVITÉS S'ADAPTENT-ELLES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES? UNE ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE HALIFAX, EN NOUVELLE-ÉCOSSE, ET BEAUBASSIN-EST, AU NOUVEAU-BRUNSWICK

Cette étude de cas compare l'approche en matière d'adaptation adoptée par deux collectivités de l'Atlantique : la municipalité régionale d'Halifax (Halifax Regional Municipality ou HRM), en Nouvelle-Écosse, et Beaubassin-est, au Nouveau-Brunswick. Même si elles sont exposées à des aléas climatiques analogues, les différences entre les deux collectivités sur le plan de la taille, de l'emplacement, de la culture et des ressources exigent des interventions différentes en matière de gestion (*voir* le tableau 3). Halifax, dont la population est de 390 000 habitants, est un important port maritime doté d'une grande infrastructure industrielle, militaire et municipale, tandis que Beaubassin-est est une collectivité côtière de 6000 habitants.

Planification de l'adaptation à Halifax

Au cours des dernières années, Halifax a connu à de fréquentes reprises des conditions météorologiques extrêmes. On note en particulier l'ouragan Juan, qui a inondé une partie du centre-ville en septembre 2003 et entraîné des pertes d'environ 200 millions de dollars en dommages causés aux propriétés et à l'infrastructure. Cet événement, et ceux qui ont suivi, ont accru la préoccupation du public concernant les répercussions éventuelles des changements climatiques et ont incité la collectivité à adopter des mesures d'adaptation (Richardson, 2010).

En août 2006, le conseil de la HRM a adopté une stratégie de planification municipale régionale, qui inclut des politiques visant à gérer les changements climatiques (Halifax Regional Municipality, 2006). Cette stratégie s'articule autour de la nécessité de recueillir des données scientifiques sur l'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête et la vulnérabilité afin d'avoir en main tous les éléments nécessaires à l'élaboration d'un plan d'utilisation des terres d'une zone particulière du port d'Halifax. En 2009, les urbanistes de la HRM ont collaboré avec des chercheurs des gouvernements fédéral et provincial, ainsi qu'avec des universités, afin de fournir les données nécessaires (Halifax Regional Municipality *et al.*, 2010). Trois scénarios sur les prévisions des niveaux de la mer et de l'eau de tempête dans le port d'Halifax ont été mis au point : un scénario minimum, fondé sur le prolongement du rythme de changement antérieur du niveau de la mer; un scénario moyen, reposant sur la limite supérieure prévue pour l'élévation moyenne du niveau de la mer, tel que décrit dans la quatrième évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publiée en 2007; et une prévision plus élevée, reposant sur une documentation scientifique plus récente (Forbes *et al.*, 2009).

Au début de 2010, le conseil de la HRM a décidé d'adopter le scénario moyen à titre provisoire et comme point de référence stratégique à partir duquel les urbanistes pouvaient commencer l'élaboration d'un plan d'adaptation. Les urbanistes travaillent sur un plan d'adaptation depuis 2010 (Richardson, 2010) et plusieurs mesures d'adaptation provisoires ont été mises en œuvre entre-temps. Par exemple, ils ont créé une base de données sur l'évaluation des risques qui contient des renseignements sur la vulnérabilité des propriétés le long du port et en 2010, le conseil a adopté une nouvelle version de la stratégie de planification municipale et un règlement sur l'utilisation des terres pour le secteur riverain du centre-ville d'Halifax, en vertu desquels tout nouvel aménagement (niveau du rez-de-chaussée) doit être situé à au moins 2,5 m au-dessus du niveau de la ligne des eaux hautes ordinaires. Tout récemment, la ville a utilisé des ententes d'aménagement pour fixer le niveau d'élévation minimum au-dessus du sol des rez-de-chaussées de nouveaux immeubles construits dans les zones à risque (Richardson et Otero, 2012). À titre d'exemple, les fonctionnaires locaux et le promoteur ont convenu de bâtir les infrastructures de la nouvelle marina et les autres structures riveraines du centre-ville de Dartmouth à un niveau supérieur à celui indiqué dans les plans.

Planification de l'adaptation à Beaubassin-est

Beaubassin-est a été sévèrement touchée par des ondes de tempête au cours des 15 dernières années. La tempête qui a balayé la région en janvier 2000 a été la pire à survenir à cet endroit depuis une centaine d'années, inondant une partie de la collectivité et endommageant les résidences, les chalets et les quais (Doiron, 2012).

En 2007, un nouvel urbaniste de la Commission d'aménagement de Beaubassin-est s'est rendu compte que les édifices nouvellement érigés dans la collectivité n'étaient pas construits de manière à résister aux éventuelles fluctuations du niveau de la mer. Il a donc entrepris de modifier la réglementation locale en vue d'accroître la résistance aux conséquences découlant de l'élévation du niveau de la mer. L'urbaniste a présenté une série d'exposés visant à renseigner les conseillers sur les effets des changements climatiques et sur la nécessité d'élaborer des mesures d'adaptation pour les gérer.

Une approche en deux temps a permis d'élaborer un nouveau règlement de zonage. Une analyse documentaire a d'abord permis de découvrir les outils et les pratiques utilisés par les autres collectivités en vue de s'adapter, et d'obtenir les meilleures prévisions concernant l'élévation du niveau de la mer. La commission d'aménagement a ensuite obtenu les données lidar et une subvention qui lui ont servi à produire une carte numérique haute résolution de la profondeur projetée d'un épisode d'inondation en 2100, en s'appuyant sur les données recueillies pendant la tempête de janvier 2000 comme point de départ. Cette carte s'est avérée être un outil important dont l'introduction a su susciter la mobilisation des conseillers et du public.

Étude de cas 2 suite à la page suivante

Le Conseil a adopté un nouveau règlement de zonage en mars 2011, dont l'objet consiste à améliorer la protection des nouvelles constructions dans la zone côtière de Beaubassin-est (Doiron, 2012). Le règlement délimite une zone de protection contre l'élévation du niveau de la mer et recommande que toute nouvelle construction soit érigée (au niveau du rez-de-chaussée) à au moins 1,43 m au-dessus du niveau de la cote de récurrence de 100 ans. Le règlement constitue une zone de chevauchement – qui englobe toutes les ententes de zonage existantes. Au lieu d'interdire tout projet d'aménagement d'office, le règlement de zonage impose des exigences plus strictes en matière de construction et comprend un système d'autorisation à deux volets. Le promoteur doit d'abord demander à un arpenteur-géomètre d'établir le niveau minimum d'élévation pour le projet proposé. Une fois le projet de construction terminé, un arpenteur doit mesurer le niveau d'élévation et attester la conformité à la nouvelle norme.

La promulgation et l'application du nouveau règlement ont fourni aux promoteurs et à la collectivité des possibilités en matière de sensibilisation aux effets des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer (Richardson et Otero, 2012). Par exemple, un urbaniste local a élaboré un recueil qui comprend des rapports et des articles portant sur les mesures d'adaptation et les techniques de conception mises en place dans d'autres sphères de compétence et accessibles aux éventuels promoteurs. Depuis l'adoption du règlement, plusieurs maisons et chalets ont été construits selon ces nouvelles normes. La ville de Shediac (population de 6000 habitants), un village côtier de la région, a ensuite adopté ce même règlement.

Tableau récapitulatif

	Halifax	Beaubassin- est
Population	390 000	6000
Problèmes liés aux changements climatiques	Élévation du niveau de la mer et inondations causées par les ondes de tempête	Élévation du niveau de la mer et inondations causées par les ondes de tempête
Outil d'aménagement du territoire	Ententes d'aménagement (c.-à-d. niveau minimum d'élévation établi dans le cadre de négociations)	Actualisation du règlement de zonage qui impose un niveau d'élévation minimum dans les zones à risque de la collectivité
Plan d'adaptation	Plan d'adaptation en cours d'élaboration à Halifax (depuis 2009)	Aucun plan indépendant. Le chapitre sur les nouvelles zones de protection contre l'élévation du niveau de la mer énoncées dans le nouveau règlement contient un préambule qui décrit l'enjeu et l'approche

TABLEAU 3 : Outils d'aménagement du territoire et plans d'adaptation dans les collectivités de Halifax et Beaubassin-est.

Conclusions

Halifax et Beaubassin-est sont parmi les premières collectivités côtières du Canada à prendre des mesures concrètes en vue de renforcer la résilience aux changements climatiques. Bien que leurs approches diffèrent, on note certains facteurs favorables dans les deux cas tels que l'exposition aux importants dommages causés par des tempêtes récentes, un ou plusieurs champions qui prônent l'adoption de mesures d'adaptation, une base scientifique solide pouvant servir à déterminer l'ampleur des menaces à l'échelle locale, la mobilisation du public et des conseillers en vue de favoriser la participation, et le recours à des moyens de visualisation pour mobiliser le public, le conseil et les intervenants. L'expérience de Beaubassin-est révèle que même une petite collectivité aux moyens limités peut adopter des règlements lui permettant d'accroître sa résilience aux changements climatiques. Halifax est un exemple de la nature itérative de la planification de l'adaptation, que caractérise l'adoption de mesures provisoires pouvant être mises en place jusqu'à l'adoption d'un plan plus complet.

La progression des activités d'adaptation déployées par les collectivités et les administrations locales varie et dépend largement du contexte. Certaines initiatives communautaires en matière d'adaptation découlent de processus de planification interne (p. ex., le plan d'action sur les changements climatiques de Toronto [Ville de Toronto, 2007] et le plan d'aménagement des installations portuaires d'Halifax [Ville d'Halifax, 2005]), tandis que d'autres collectivités ont reçu un appui et des encouragements externes significatifs en reconnaissance de leurs activités d'adaptation (p. ex., District d'Elkford, 2009). Dans bien des cas, la collaboration a joué un rôle important (Carlson, 2012). Parmi les exemples de collaboration entre les administrations locales et les échelons supérieurs du gouvernement, il convient de remarquer le travail de collaboration faisant intervenir Santé Canada, le gouvernement du Manitoba et les autorités sanitaires d'Assiniboine, lequel a permis de mettre au point un système d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur et de mettre son efficacité à l'épreuve (Santé Canada, 2012). Dans certains cas, l'intégration est un principe directeur. Par exemple, le plan d'action sur les changements climatiques de Toronto demande qu'on tienne compte de l'atténuation des changements climatiques et de l'adaptation à ces derniers dans l'ensemble des activités, des politiques et des programmes de la ville, ainsi que dans le système d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur (Ville de Toronto et Clean Air Partnership, 2008).

Dans Berrang-Ford *et al.* (2011), les auteurs ont constaté que la plupart des mesures d'adaptation des pays développés étaient mises en œuvre dans les municipalités. Bien qu'aucune preuve définitive ne vienne étayer cette conclusion dans le cas du Canada à l'heure actuelle, par rapport aux autres ordres du gouvernement, les collectivités canadiennes et les gouvernements locaux ont fait l'objet de nombreuses recherches (p. ex., Parkins et MacKendrick, 2007; Ford *et al.*, 2008; Burch, 2010; Richardson et Lemmen, 2010; Boyle et Dowlatabadi, 2011; Richardson et Otero, 2012; Rodgers et Behan, 2012; Picketts *et al.*, 2012, 2013). Le niveau relativement élevé d'activité au sein des collectivités et des administrations locales pourrait être le fruit d'une combinaison de la nature locale des effets des changements climatiques (Richardson, 2010), de la croyance qui émane de la communauté d'urbanistes et d'ingénieurs spécialisés en infrastructure voulant que les changements climatiques aient une incidence sur leur pratique (Davidson et Bowron, 2012; Groupe CSA, 2012) et du soutien accordé par les échelons supérieurs des gouvernements sous forme de politiques, d'outils d'aide à la prise de décisions et d'autres ressources contribuant à étayer les plans d'adaptation (Hanna *et al.*, 2013).

4.1.4 INDUSTRIE

Les entreprises canadiennes et les secteurs de l'industrie sont de plus en plus conscients des risques et des possibilités associés aux changements climatiques. On constate que les préoccupations relatives à une hausse du nombre et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes prédominent, que les répercussions aussi bien positives que négatives des changements climatiques sont reconnues, et que l'équilibre entre le risque et les occasions diffère en fonction du secteur (TRNEE, 2012b). De tous les secteurs de l'industrie analysés par la TRNEE (2012a), les sociétés de services financiers et le secteur de l'assurance étaient les plus susceptibles de signaler des possibilités liées aux répercussions des changements climatiques telle la création de nouveaux produits financiers. On souligne cependant que les recherches sur les débouchés commerciaux dans un climat en évolution sont peu nombreuses (chapitre 5 – *Industrie*). Au Canada et à l'étranger, les associations et les conseils industriels se mobilisent de plus en plus en vue de sensibiliser la population à la pertinence commerciale des changements climatiques. Par exemple, certains ont facilité le partage des connaissances (l'Association canadienne de l'électricité), financé la recherche appliquée et l'élaboration d'outils conçus dans le but d'étayer les stratégies de l'industrie (le Bureau d'assurance du Canada), publié des énoncés de principe afin d'orienter la pratique de l'industrie (la Fédération internationale des ingénieurs-conseils) et présenté des cadres d'adaptation de portée générale à ses membres (TRNEE, 2012b; ICMM, 2013).

Même si les entreprises canadiennes adaptent leur pratique à chaque événement lié au climat, peu de mesures sont prises dans la perspective des changements climatiques à venir (Johnston *et al.*, 2011; TRNEE, 2012b). Les entreprises qui prennent des mesures tentent principalement de comprendre les effets des changements climatiques sur leurs activités, de définir des cadres pour orienter les décisions stratégiques et opérationnelles, et d'évaluer le mérite des autres options d'adaptation (chapitre 3 – *Ressources naturelles*; chapitre 5 – *Industrie*; Horton et Richardson, 2011; TRNEE, 2012a). Outre la planification proactive observée dans certaines exploitations minières dans le nord du Canada (chapitre 3 – *Ressources naturelles*), les révisions apportées aux normes de conception de l'entreprise, ainsi qu'au code de pratique, à la lumière des changements climatiques comptent parmi les exemples d'adaptation documentés les plus concrets (Horton et Richardson, 2011; TRNEE, 2012a). On constate que l'intégration des mesures d'adaptation aux approches de planification et de gestion est déjà en place dans les entreprises, mais on en ignore l'étendue et le résultat. Ces approches comprennent les plans d'urgence et d'intervention en cas de catastrophe, ainsi que la gestion adaptative.

Cette évaluation souligne le fait que les secteurs de la foresterie, de l'hydroélectricité, de l'assurance et du tourisme sont les secteurs qui participent le plus aux activités d'adaptation. D'autres recherches portent surtout sur les mesures d'adaptation mises en place par les secteurs qui dépendent des ressources naturelles, comme la foresterie, l'agriculture et le tourisme, ainsi que par ceux qui utilisent d'importantes immobilisations, comme les services publics et les transports (Deloitte, 2011; Ford *et al.*, 2011; Ceres et Climate Change Lawyers Network, 2012). Les facteurs pouvant contribuer à la différence entre les niveaux de préparation actuels et signalés comprennent l'absence de points de repère communs et de mesures de rendement, ainsi que des préoccupations au chapitre de la confidentialité et de la réputation (Agrawala *et al.*, 2011; TRNEE, 2012b).

4.2 OBSTACLES ET DIFFICULTÉS

Depuis 2008, on comprend mieux les obstacles et les difficultés auxquels doivent faire face les mesures d'adaptation prévues (p. ex., Richardson, 2010; Johnston *et al.*, 2011; Picketts *et al.*, 2012; TRNEE, 2012a) et cela a permis d'accorder de nouvelles bourses qui serviront à étudier les facteurs susceptibles de constituer des contraintes à l'état de préparation des organisations (Moser et Ekstrom, 2010; Clar *et al.*, 2013; Ford *et al.*, 2013), facteurs autres que ceux associés strictement aux capacités d'adaptation (Smit et Pilofosova, 2001; Yohe et Tol, 2002).

La présente section approfondit la question des obstacles et des difficultés liés à l'adaptation tels que présentés aux chapitres 3 et 8 de l'évaluation. On examine le rôle de l'information et de la communication, des ressources, de la gouvernance et des normes, de la psychologie et des valeurs, ainsi que du leadership, et la mesure dans laquelle ces facteurs nuisent aux mesures d'adaptation mises en place par divers intervenants (*voir* le tableau 4).

Type d'obstacle / de difficulté	Exemple	Chapitre
Information et communication	Difficulté à comprendre les influences sur le choix des visites (p. ex., prix de l'essence, coût de transport, restrictions transfrontalières, réputation, situation démographique et tendances du marché) découlant des effets des changements climatiques	5
	Discordance entre la résolution spatiale et temporelle des prévisions climatiques et des besoins en matière de gestion; difficulté à obtenir des prévisions fiables à une échelle qui répond aux besoins en matière de gestion	3, 5, 6
	Disponibilité des documents d'orientation pouvant aider à interpréter les scénarios climatiques et pour tenir compte des données de modélisation des facteurs dans la conception des infrastructures et la fermeture des mines	3
	Insuffisance de données et de renseignements sur les phénomènes météorologiques extrêmes (p. ex., prévisions d'épisodes de pluie extrêmes)	5, 8
	Données et renseignements limités sur les effets passés et futurs des changements climatiques sur un secteur particulier (p. ex., effets des changements climatiques sur les forêts, sur la production d'énergie éolienne, solaire et de biomasse; effets des changements climatiques sur l'eau et incidence sur l'exploitation des sables bitumineux et des gaz de schistes, ainsi que sur la récupération améliorée des hydrocarbures; effets des changements climatiques sur les infrastructures de ressources hydriques; effets sur la santé)	3, 7, 8
Ressources (financement, compétences, technologie)	Peu d'incitatifs à adopter des mesures qui vont au-delà de la pratique habituelle (p.ex., coût additionnel pour mettre en œuvre les solutions d'ingénierie ou techniques existantes dans le but d'adapter les activités minières aux effets des changements climatiques, ou pour protéger les biens et services écologiques sur les terres agricoles)	3, 5, 6
	Manque d'expertise et de compréhension portant sur les effets locaux des changements climatiques sur les activités de l'entreprise et de solutions d'adaptation efficaces	5
	Options d'adaptation limitées en ce qui a trait aux déplacements en motoneige (p.ex., impossibilité de produire de la neige à grande échelle)	5
	Manque de ressources financières pour surveiller, prévenir et contrôler les maladies à transmission vectorielle; manque d'expertise et de capacités susceptibles d'aider à diagnostiquer les maladies à transmission vectorielle, manque de produits homologués et efficaces pour lutter contre les maladies à transmission vectorielle	7
Gouvernance et normes	Des questions très complexes liées au nombre d'acteurs et de compromis à prendre en considération redéfinissent le concept d'aménagement forestier durable	3
	Influences des facteurs de contrainte non climatiques tels les changements démographiques régionaux et l'exode rural	4
	Risque pesant sur l'accès fiable aux ressources alimentaires non commerciales lorsque l'intégrité de l'infrastructure est sensible aux effets des changements climatiques	4
	Les concepts fondés sur les futures projections climatiques évoluent en fonction du code du bâtiment et des approches actuelles en matière de conception	5
	Les plans d'adaptation des régions côtières, qui ont été mis en œuvre par des organismes gouvernementaux autres que l'agence de la santé publique, peuvent faire en sorte que les effets sur la santé ne soient pas pris en considération	7
Psychologie et valeurs	Faible importance accordée aux changements climatiques comparativement aux défis économiques, aux pertes d'emploi et aux fermetures d'usines auxquels le secteur doit faire face	3
	L'incertitude inhérente aux prévisions de changements climatiques entrave les décisions d'investissement en matière d'adaptation	3
	Optimisme quant à l'aptitude à surmonter les défis relatifs à l'adaptation aux effets des changements climatiques	5
	Attention continue accordée à la mise à niveau des infrastructures vieillissantes, au renforcement des capacités dans le but de gérer la croissance de la population et à la modification des exigences réglementaires en vue de gérer les risques qui pèsent sur les infrastructures d'approvisionnement en eau – tout en accordant un intérêt moindre aux changements apportés aux codes, aux normes et aux instruments connexes	8
Leadership	Les plans d'adaptation proactifs sont rares dans le secteur minier malgré le recours aux scénarios climatiques afin d'évaluer les effets et de définir des stratégies de surveillance et d'adaptation	3
	Adoption d'une approche prudente, étant donné qu'il est difficile de trouver un équilibre entre l'attente de données dans le but de prévoir d'éventuelles mesures et la mise en œuvre de mesures à court terme en fonction des données disponibles	3

TABLEAU 4 : Obstacles et difficultés liés à l'adaptation présentés dans les chapitres précédents.

Même si les différents types d'obstacles et de difficultés sont abordés séparément ci-dessous, on constate qu'ils sont souvent interdépendants et qu'ils peuvent se renforcer mutuellement (p. ex., Burch, 2010). Par exemple, les effets combinés des taux élevés de pauvreté et du faible niveau d'éducation, les capacités limitées des praticiens du secteur de la santé d'assurer le suivi, de diagnostiquer et de traiter les maladies liées au climat, les enjeux intergouvernementaux et l'accès inégal aux ressources gênent l'adaptation des systèmes de santé autochtones (chapitre 7 – *Santé humaine*).

4.2.1 INFORMATION ET COMMUNICATIONS

On note que les obstacles et les difficultés liés à l'accès à l'information sur l'adaptation sont encore fréquemment cités comme facteurs nuisant à l'adoption de mesures au Canada. Les chapitres précédents mettent en lumière les questions liées à la disponibilité et à l'accessibilité des données et des renseignements sur les conditions climatiques moyennes et extrêmes, les prévisions climatiques et l'interprétation de celles-ci, la recherche sur les répercussions des changements climatiques et les méthodes et les outils qui aident à intégrer les données sur les changements climatiques au processus décisionnel.

L'une des principales préoccupations relevées dans l'analyse documentaire à ce sujet porte sur la discordance entre les données climatiques et les renseignements disponibles et sur ce qui est perçu comme étant nécessaire aux fins de l'adaptation. Des appels visant à obtenir des prévisions climatiques à court terme, détaillées et particulières à un site en vue d'étayer l'évaluation des risques et le processus de planification des gouvernements provinciaux et territoriaux (CdPACC, 2011), de l'industrie (Kovacs, 2011) et de la collectivité (McLeman *et al.*, 2011) ont été documentés, de même que des demandes visant à obtenir les prévisions locales de variables climatiques autres que les moyennes de température et de précipitations. Une autre source d'inquiétude concerne la densité et l'efficacité des réseaux de surveillance des conditions météorologiques et du climat (Steenhof et Sparling, 2011; Pennesi *et al.*, 2012) qui servent de sources de données dans les prévisions climatiques à échelle réduite. La difficulté de répondre à de telles demandes d'information n'est pas un problème propre au Canada. Par exemple, dans Reisinger *et al.* (2011), les auteurs ont révélé des lacunes concernant les données climatiques de base et la disponibilité des prévisions probabilistes susceptibles d'entraver l'adoption de mesures d'adaptation par les gouvernements locaux en Nouvelle-Zélande.

Les lacunes au niveau des données et de l'information permettant de mieux définir la vulnérabilité aux changements climatiques posent également problème lorsqu'il s'agit d'évaluer les risques et planifier l'adaptation (TRNEE, 2009). On peut se fonder sur des archives historiques qui relatent les réactions des systèmes aux phénomènes climatiques pour étayer les estimations des effets des changements climatiques. Par exemple, des documents fiables faisant état des effets directs et indirects des phénomènes météorologiques extrêmes sur la santé, des dégâts liés au climat touchant les propriétés et de la réaction des touristes aux changements climatiques permettraient de procéder à une analyse des tendances (chapitre 5 – *Industrie* et chapitre 7 – *Santé humaine*) sont un exercice utile à l'établissement d'un plan d'action. Les évaluations ciblées des risques liés aux changements climatiques – des infrastructures municipales par exemple – pourraient aussi tirer avantage de la documentation portant sur les dégâts liés au climat qui ont eu une incidence sur les activités ou qui ont endommagé les actifs (Peck *et al.*, 2013).

Or, les décisions varient quant à leur degré de susceptibilité aux risques liés aux changements climatiques, et des discussions sont en cours concernant le degré de résolution auquel il faudrait acquérir les données sur les effets des changements climatiques afin qu'elles se prêtent à l'élaboration de mesures d'adaptation. Des facteurs tels que le degré de sensibilité au climat et le type d'options de gestion envisagé, ont une incidence sur le niveau de détail et de précision des données sur les changements climatiques requises pour prendre de bonnes décisions (Willows et Connell, 2003). Les besoins en information sur les répercussions des changements climatiques et l'adaptation – de même que les mécanismes et les approches permettant de consolider et d'intégrer ces données dans le processus décisionnel – varieront d'un secteur, d'un endroit et d'un utilisateur à l'autre. En termes régionaux, les centres climatiques (p. ex., Pacific Climate Impacts Consortium, Ouranos) travaillent de concert avec les utilisateurs en vue de cerner les besoins et de déterminer le type de données pouvant être fournies (Murdock et Burger, 2010).

Malgré les progrès réalisés au chapitre de l'élaboration de la base de connaissances servant à appuyer l'adaptation aux changements climatiques, de nombreux défis subsistent lorsque vient le temps de communiquer des renseignements scientifiques et techniques complexes à divers groupes (CdPACC, 2011). Les facteurs suivants nuisent à l'intérêt et à la compréhension : la décision de considérer les changements climatiques comme un problème d'ordre environnemental, plutôt que d'ordre économique et social; l'incapacité d'établir un lien entre les effets des changements climatiques, les préoccupations actuelles et les mesures locales; les difficultés de communiquer des concepts scientifiques complexes et les incertitudes sous-jacentes à un public non spécialisé; et des campagnes de sensibilisation qui se limitent à une transmission unilatérale de l'information (Shaw *et al.*, 2009; Sheppard *et al.*, 2011; TRNEE, 2012b; Picketts *et al.*, 2013). Les chercheurs et les praticiens de l'adaptation sont de plus en plus conscients des approches favorisant l'intégration des données sur les changements climatiques dans le processus de planification local (p. ex., Shaw *et al.*, 2009; Sheppard *et al.*, 2011) et déploient des stratégies de communication adaptées aux responsables de la santé publique et aux autres professionnels (Clarke et Berry, 2012).

4.2.2 RESSOURCES

Les limites – réelles ou perçues – en ce qui concerne les ressources économiques, les compétences, l'expertise et les technologies d'adaptation sont fréquemment comptées au nombre des principaux obstacles à l'adoption de mesures d'adaptation.

RESSOURCES ÉCONOMIQUES

Malgré le manque de données quantitatives sur les coûts associés à l'adaptation (p. ex., TRNEE, 2010; Ochuodho *et al.*, 2012), les intervenants des secteurs privés et publics perçoivent ces coûts comme un des principaux obstacles. Les relevés de recherche indiquent que plus de la moitié des entreprises et des gouvernements provinciaux et municipaux considèrent les coûts d'adaptation comme « l'obstacle le plus important à la prise en considération des changements climatiques dans le processus [traduction] » (Environics Research Group, 2010). Même si certaines mesures d'adaptation – comme la mise à niveau des infrastructures – s'avèrent coûteuses, les coûts de l'inadaptation sont souvent sous-estimés (p. ex., TRNEE, 2012a, b). Au cours des cinq dernières années, on a noté un intérêt accru envers l'examen du bien-fondé de la mise en œuvre des mesures d'adaptation sur le plan économique (Mills, 2008; Desjarlais et Larrivée, 2011; TRNEE, 2011; Olar et Lessard, 2013), même si peu de guides et d'outils canadiens pouvant servir à évaluer le coût et les avantages de l'adaptation sont disponibles (p. ex., Webster *et al.*, 2008).

La capacité d'allouer des ressources limitées à l'adaptation fait également partie des préoccupations soulevées par plusieurs groupes. Au sein d'une organisation, les priorités concurrentes (CdPACC, 2011), le manque de visibilité de l'unité vouée à la promotion de l'adaptation et les processus budgétaires qui font une distinction entre les dépenses en capital et de fonctionnement (Burch, 2010) peuvent contribuer à diminuer la possibilité d'obtenir du financement pour les activités d'adaptation. Dans les cas extrêmes, la gestion de crise et les besoins urgents nuisent aux projets d'investissement dans les mesures d'adaptation planifiées (p. ex., Boyle et Dowlatabadi, 2011; Ford et Berrang-Ford, 2011; Pearce *et al.*, 2011). Les signaux provenant du marché peuvent également décourager l'investissement dans les mesures d'adaptation. Par exemple, les entreprises ont actuellement peu d'intérêt à payer les coûts supplémentaires requis en vue d'appliquer les solutions d'ingénierie et technologiques susceptibles de leur permettre d'adapter les activités aux changements climatiques (chapitre 3 – *Ressources naturelles*; TRNEE, 2012b). La taille de l'entreprise

semble aussi jouer un rôle (Environics Research Group, 2010; TRNEE, 2012b) et cela peut être dû en partie à leurs ressources financières et leur nombre d'employés limités, ainsi qu'à un horizon de planification à court terme (TRNEE, 2012b; CCES, 2013).

Outre la question du financement, on constate que le contexte et le choix du moment ont également une incidence sur la vulnérabilité aux changements climatiques et sur les options d'adaptation rentables. Par exemple, la dépendance économique envers une seule industrie et la capacité de mettre en œuvre des stratégies de diversification économique comptaient parmi les éléments clés de l'évaluation des options d'adaptation envisagées par les collectivités touchées par le dendroctone du pin ponderosa en Colombie-Britannique (Parkins et MacKendrick, 2007). D'autres recherches mettent l'accent sur l'importance stratégique des cycles de réapprovisionnement et de renouvellement en tant que conjoncture favorable à l'adaptation (Williamson *et al.*, 2012).

COMPÉTENCES ET EXPERTISE

L'accès aux connaissances, aux compétences et aux ressources humaines nécessaires en vue d'évaluer les risques climatiques, d'élaborer des stratégies d'adaptation et d'intégrer l'adaptation à la planification et aux activités courantes dans le secteur public a ses limites. Les provinces et les territoires ont indiqué que le nombre insuffisant d'employés affectés à ce type d'activité, ainsi que le manque d'employés possédant les compétences requises, étaient des facteurs qui nuisaient au progrès en matière d'adaptation (CdPACC, 2011). L'analyse d'une enquête menée auprès des fonctionnaires de la Colombie-Britannique a permis de conclure qu'ils sauraient profiter des renseignements sur les effets des changements climatiques et des efforts d'adaptation actuels propres aux domaines couverts par leur mandat (BC Stats, 2012).

Ces restrictions au niveau des capacités humaines ont eu des conséquences sur le degré de considération donné à l'adaptation. Par exemple, en Ontario, la première version des plans de protection des sources d'eau ne comprend pas les résultats de la modélisation des changements climatiques dans les bilans hydriques, étant donné la capacité qu'a chacun des 34 organismes responsables de la conservation de l'eau de manipuler les résultats, d'appliquer des méthodes de réduction d'échelle et de respecter les exigences liées à la production de rapports (de Loë *et al.*, 2011). Des données climatiques, des directives sur l'intégration des résultats des modèles climatiques aux modèles hydrologiques et de la formation leur ont ensuite été offerts (http://waterbudget.ca/climatechangetraining). Dans le secteur de la santé publique, les responsables admettent qu'ils ne disposent pas des connaissances nécessaires pour prendre une décision éclairée en matière d'adaptation, malgré la disponibilité des ressources d'information telles que les alertes météorologiques et les rapports sur la qualité de l'air (Clarke et Berry, 2012). Dans leurs réponses, les gestionnaires forestiers travaillant au sein d'entreprises et d'organismes de réglementation ont également mentionné le nombre insuffisant de ressources scientifiques et le manque de compréhension au sujet des répercussions des changements climatiques et de l'adaptation (Johnston *et al.*, 2011).

Il semble que les contraintes liées aux ressources humaines soient plus prononcées au sein de petits ministères et organismes responsables de la planification (OCDE, 2012; Hanna *et al.*, 2013). La capacité des municipalités nordiques du Canada d'intervenir en cas d'urgence varie d'un endroit à l'autre et les petites collectivités éloignées sont confrontées à des défis particuliers (TRNEE, 2009). Les organisations disposant de ressources scientifiques et techniques limitées peuvent faire appel aux services d'experts externes qui effectueront des analyses et fourniront des données personnalisées sur les répercussions des changements climatiques et l'adaptation (p. ex., Johnston et Hesseln, 2012).

TECHNOLOGIES POUVANT SERVIR À L'ADAPTATION

Les enjeux liés aux options technologiques sont propres à chaque secteur, mais dans tous les cas, il faut mettre en place les mécanismes d'incitation adéquats, si l'on veut mettre au point et déployer de nouvelles technologies. Les solutions technologiques actuelles mises à la disposition des gestionnaires forestiers peuvent atténuer les risques actuels liés au climat. Cependant, les coûts et le niveau d'acceptation du public pourraient limiter le déploiement généralisé de nouvelles technologies telles l'installation de pneus à grande portance sur les débusqueuses afin de faciliter le déroulement des activités sur un sol non gelé ou la modification génétique d'essences d'arbre en vue d'accroître leur résistance aux conditions climatiques du futur (Johnston et Hesseln, 2012). Les limites relatives aux options technologiques dans certains secteurs, comme la santé publique (chapitre 7 – *Santé humaine*), l'électricité (chapitre 3 – *Ressources naturelles*) et le tourisme (chapitre 5 – *Industrie*) présentent de nouvelles possibilités d'innovation.

4.2.3 GOUVERNANCE ET NORMES

La recherche sur la gouvernance de l'adaptation a progressé au cours des dernières années (Adger *et al.*, 2009, 2010), au point où l'on aborde maintenant certaines questions épineuses telles celles ayant trait à la manière de promouvoir des mesures cohérentes et concertées aussi bien au sein, que dans l'ensemble, des secteurs publics et privés. L'élaboration d'une politique sur l'adaptation est confrontée au défi que pose la nécessité d'assurer l'intégration à l'ensemble des secteurs d'activité et des paliers du gouvernement, la participation des organisations non gouvernementales et la mobilisation du savoir scientifique (Bauer *et al.*, 2012). Dans le cas de domaines stratégiques complexes telle la gestion des pêches et des océans, les changements climatiques ajoutent à l'incertitude en matière de gouvernance. Certains changements d'envergure, comme l'acidification des océans, sont sans précédent et les initiatives de gestion efficaces manquent de précision. Les communications et les négociations avec les intervenants du secteur des pêches doivent maintenant tenir compte de l'interprétations et des perceptions diverses quant aux changements climatiques (McIlgorn *et al.*, 2010). Cette problématique peut inciter les organismes à se concentrer sur les conséquences à court terme et sur leurs propres cloisonnements politiques (Lemieux *et al.*, 2013). De plus, la coordination au sein des paliers du gouvernement, et entre ceux-ci, ainsi que tout travail accompli en partenariat, exige du temps et des ressources (McLeman *et al.*, 2011; CdPACC, 2011) et le recours à des compétences particulières (p. ex., communication, négociation, élaboration d'une vision commune).

Les réseaux, tant formels qu'informels, peuvent contribuer à renforcer la capacité d'adaptation (*voir* l'étude de cas 1). Cependant, les occasions de se renseigner au sujet des changements climatiques et d'établir des relations entre les domaines stratégiques ne sont pas toujours mises à profit. Par exemple, on constate que la capacité d'analyse est élevée dans le secteur financier au Canada, mais que les employés de ce secteur ne semblent pas prêts à aborder les questions relatives à l'adaptation aux changements climatiques

(Williams et McNutt, 2013). À mesure que la notion d'adaptation se développe en tant que question stratégique, il est probable que la structure de gouvernance fondée sur des réseaux à participation volontaire se transforme en une combinaison de réseaux et d'approches hiérarchiques (Bauer *et al.*, 2012).

L'intégration, en tant qu'approche à la question de l'adaptation, est à la fois porteuse d'aspirations et de défis. De nombreuses études permettent de conclure qu'il n'est pas nécessaire de créer de nouveaux processus ni de cadres pour aborder le sujet de l'adaptation. Parmi les raisons citées, on note la charge de travail déjà élevée, par exemple, des responsables de la santé publique (Clarke et Berry, 2012) et une prédisposition à vouloir travailler dans le respect des règles en vigueur et avec des méthodes de planification d'usage (Jantarasami *et al.*, 2010; Davidson et Bowron, 2012). L'intégration des considérations d'adaptation aux politiques actuelles et aux méthodes de gestion n'est pas nécessairement une tâche aisée. Une orientation logique et convenue sur la façon d'intégrer l'adaptation constitue une lacune reconnue dans le domaine de l'infrastructure construite et les codes, les normes et les instruments connexes (Steenhof et Sparling, 2011), et dans la planification de l'aménagement forestier (Johnston *et al.*, 2011; Johnston et Hesseln, 2012). Adapter les processus et les cadres actuels, afin de tenir compte des changements climatiques, peut avoir pour conséquence la remise en question des hypothèses de base (Steenhof et Sparling, 2011).

Les politiques conçues afin de traiter des questions qui ne sont pas liées aux changements climatiques peuvent également nuire à l'adaptation. Par exemple, pour les gestionnaires des ressources naturelles et de la conservation, les politiques axées uniquement sur la gestion des espèces uniques (p. ex., biodiversité, espèces exotiques envahissantes), plutôt que sur les objectifs plus généraux de gestion, peuvent poser problème en raison des variations au niveau des aires de répartition et de l'abondance des espèces provoquées par les changements climatiques (Jantarasami *et al.*, 2010; Johnston *et al.*, 2011). En précisant les conditions, notamment les niveaux de récolte et les essences à replanter, certains éléments des politiques forestières provinciales tels les accords de tenures forestières, font que les entreprises forestières sont moins portées à adopter des approches novatrices en matière d'adaptation (Johnston *et al.*, 2011; Johnston et Hesseln, 2012). Pour conclure, on constate que les plans de développement communautaire et les cadres de planification provinciaux désuets, de même que l'absence de plan de durabilité à long terme, imposent un frein à l'adoption de mesures d'adaptation à l'échelle municipale tel que c'est le cas pour trois municipalités des basses-terres continentales de la Colombie-Britannique (Burch, 2010).

4.2.4 PSYCHOLOGIE ET VALEURS

Les personnes et les groupes perçoivent et interprètent différemment les nouvelles situations et prennent diverses mesures à ce sujet. On reconnaît de plus en plus les répercussions de ces actions sur l'adaptation. Les recherches en psychologie servent à mieux comprendre pourquoi la capacité d'adaptation ne se traduit pas forcément par des actions. On comprend de mieux en mieux les rôles que jouent les valeurs, la culture et les interactions sociales dans l'analyse d'un problème et la recherche de solutions acceptables (Burch et Robinson, 2007; Lynam, 2011). L'interaction entre les attitudes individuelles et collectives et le comportement a d'ailleurs aussi fait l'objet d'études (Wellstead et Stedman, 2011; Cunsolo Willox *et al.*, 2012; Wolfe *et al.*, 2013).

Les restrictions quant à la manière dont nous pensons, voyons le monde et percevons les risques occupent une place prépondérante dans les articles sur les obstacles psychologiques à l'adaptation (Gifford, 2011). La pensée à court terme, l'incertitude invoquée comme prétexte pour reporter les mesures à plus tard, le fait de se montrer sélectif au moment de prêter attention à un enjeu et l'inclination à l'optimisme comptent parmi les obstacles qui se présentent le plus souvent dans les recherches portant sur les gouvernements (CdPACC, 2011), les entreprises et l'industrie (Johnston *et al.*, 2011; Kovacs, 2011; Johnston et Hesseln, 2012; Linnenluecke *et al.*, 2012; TRNEE, 2012a, b), les responsables de la santé publique et des mesures d'urgence (Hutton, 2011; Clarke et Berry, 2012) et les populations vulnérables (Berry, 2011; Wolfe, 2011). La vision du monde contribue à façonner les options d'adaptation qui sont acceptables aux yeux des gens. Par exemple, dans une étude, les experts ont rejeté les nouvelles approches en matière de biodiversité et de politiques de conservation qui prenaient en considération les échanges entre les espèces (Hagerman *et al.*, 2010). Dans certains cas, les gens perçoivent les changements de comportement comme un risque, à la fois sur le plan financier, social et fonctionnel (Gifford, 2011). À l'heure actuelle, les risques financiers semblent être la principale source de risque nuisant à l'adoption de mesures d'adaptation (p. ex., Johnston et Hesseln, 2012).

Les valeurs caractérisent les croyances, les attitudes et les comportements des individus et des groupes. Jusqu'à récemment, la documentation portait principalement sur les valeurs en fonction du rôle qu'elles jouent lorsqu'il s'agit de mettre en relief les effets des changements climatiques sur les activités et les endroits importants sur le plan culturel, et l'importance que l'on doit accorder aux connaissances et points de vue des populations autochtones (Burch et Robinson, 2007; Pearce *et al.*, 2011; Wolfe *et al.*, 2013). On cherche maintenant à comprendre l'influence exercée par les valeurs sur les réactions face aux changements climatiques lorsqu'on effectue de nouvelles recherches (Hutton, 2011; Cunsolo Willox *et al.*, 2012; Wolfe *et al.*, 2013). Celles-ci ont permis de démontrer, entre autres, que les résidents de collectivités au contexte géographique et socioéconomique semblable peuvent percevoir les phénomènes climatiques – et par conséquent la pertinence des mesures d'adaptation – différemment. Au Labrador, on a observé qu'une collectivité a associé un hiver anormalement doux à un sentiment de perte et d'isolement, alors qu'une autre a qualifié cet événement de neutre à positif (Wolfe *et al.*, 2013). D'autres études examinent l'influence des attitudes individuelles et de la culture organisationnelle sur l'engagement envers l'adaptation. Par exemple, les fonctionnaires de la Colombie-Britannique sont plus susceptibles d'intégrer l'adaptation à leurs schèmes de pensée s'ils travaillent dans des ministères responsables de la gestion des ressources naturelles (BC Stats, 2012). Il est également essentiel de tenir compte des différences culturelles entre les professions – urbanistes municipaux, ingénieurs et employés responsables de la prestation directe des services – dans la planification de l'adaptation (Burch, 2010).

4.2.5 LEADERSHIP

Les dirigeants – qu'il s'agisse de particuliers ou d'organisations – qui sont disposés à mettre de l'avant de nouvelles idées et à apporter un changement peuvent jouer un rôle très influent en ce qui a trait à l'adaptation (*voir* l'étude de cas 2). Les conditions qui prévalent au sein et à l'extérieur de l'organisation ont une incidence sur les compétences en leadership. Les demandes limitées des citoyens et des autres intervenants externes sont considérées comme un facteur qui contribue à ralentir l'action des gouvernements en matière d'adaptation (CdPACC, 2011). Les structures organisationnelles internes peuvent également faire obstacle aux actions. Les hiérarchies rigides, de même que l'absence d'un mandat clairement défini et de délégation de pouvoirs, peuvent dissuader les gestionnaires d'assigner des ressources et du temps de travail à la planification de l'adaptation (Jantarasami *et al.*, 2010). Même les employés qui sont prêts à intégrer l'adaptation aux changements climatiques à leurs tâches, et qui ont les compétences pour le faire, peuvent ne pas être en mesure d'agir en raison de priorités concurrentes (Davidson et Bowron, 2012).

5. SURMONTER LES OBSTACLES ET FACILITER L'ADAPTATION

Les recherches sur l'élimination des obstacles et des difficultés propres à l'adaptation ont tendance à miser sur la sensibilisation et le renforcement des capacités d'adaptation. Cela dit, on reconnaît de plus en plus que la volonté de s'adapter est un élément essentiel à la mise en œuvre réussie de l'adaptation. Jusqu'à présent, cette exigence a fait l'objet de relativement peu d'études portant sur les changements climatiques et l'adaptation. La présente section traite des approches et des mécanismes utilisés pour surmonter les obstacles actuels et faciliter une adaptation soutenue.

5.1 ACCROÎTRE LA SENSIBILISATION

La sensibilisation aux changements climatiques, les répercussions possibles et la nécessité de s'adapter constituent la première étape vers la mise en œuvre de l'adaptation (*voir* l'encadré 2). La sensibilisation accrue aux changements climatiques peut survenir de manière spontanée (p. ex., en étant touché par un phénomène météorologique extrême) ou par l'entremise d'activités planifiées (p. ex., ateliers, campagnes de sensibilisation, modules d'apprentissage ou publications).

Les phénomènes extrêmes peuvent servir d'avertissement et sensibiliser la population aux vulnérabilités existantes, et ainsi déclencher des réactions d'adaptation (Berrang-Ford *et al.*, 2011; Ford *et al.*, 2011). On fait souvent le lien entre l'épisode et les changements climatiques pendant la couverture médiatique d'un phénomène météorologique extrême (p. ex., Kolbert, 2012; CBC, 2013; Thompson, 2013), ce qui crée une occasion d'amorcer un échange sur l'adaptation. Dans le présent rapport et ailleurs, on relève plusieurs exemples de mesures d'adaptation qui ont été prises après un épisode extrême tel qu'une inondation, un feu de forêt ou une tempête de vent (p. ex., Lemmen *et al.*, 2008; Richardson, 2010). Pour ce qui est des entreprises, les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent aussi accroître leur degré de sensibilisation à l'égard des changements climatiques (TRNEE, 2012a; IEMA, 2013). Les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent inciter les organisations à repenser leurs activités et à reconsidérer leurs hypothèses, les menant à s'adapter en conséquence (Burch, 2010). Toutefois, d'autres font valoir que les mesures d'adaptation prises en fonction d'une crise ou d'un désastre accroissent le risque de redondance si personne ne prend le temps d'intégrer et de planifier adéquatement les mesures d'adaptation dans le contexte des politiques, des procédures et des pratiques en vigueur (Plummer *et al.*, 2010).

Plusieurs organisations canadiennes ont mis au point des outils susceptibles de conscientiser davantage les groupes de praticiens et les décideurs à l'adaptation. Par exemple, l'Institut canadien des urbanistes a mis en place un programme de planification adaptée aux changements climatiques qui contient des modules de formation professionnelle continue s'adressant à ses membres (Institut canadien des urbanistes, 2013). De même, la Fédération canadienne des municipalités (FCM) s'est jointe à l'Association canadienne de normalisation (CSA) en vue de mettre au point un cours en ligne qui porte surtout sur l'adaptation des infrastructures essentielles aux changements climatiques et aux phénomènes météorologiques extrêmes, afin d'aider les municipalités (FCM, 2013). La Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE) a élaboré un « tableau de bord conçu en vue d'assurer le succès des entreprises dans un cadre climatique en constante évolution [traduction] » dans le but de conscientiser les organisations à l'adaptation et d'aider les entreprises à évaluer et à gérer les risques et les possibilités associés aux changements climatiques (TRNEE, 2012b). Les cours universitaires constituent un important mécanisme de conscientisation à l'adaptation aux changements climatiques au moyen de séances de formation. Ce genre d'activités ciblées tient compte de la culture et des valeurs des groupes que l'on désire influencer, ce qui est particulièrement important lorsqu'il s'agit d'éliminer les obstacles d'ordre psychologique ou liés à la communication qui touchent l'adaptation (*voir* la section 4.2).

Les ateliers servent souvent de mécanisme de sensibilisation et stimulent l'adaptation à l'échelle locale. Ils permettent aux intervenants qui ont des connaissances concernant le volet scientifique des changements climatiques et de l'adaptation de se réunir avec des dirigeants de la collectivité, des employés municipaux et même des membres du grand public. Bien que les objectifs précis varient d'un atelier à l'autre et peuvent comprendre, entre autres, l'établissement de priorités (p. ex., Picketts *et al.*, 2012; Stocker *et al.*, 2012), la création de conditions menant à la collaboration et au dialogue (p. ex., Stocker *et al.*, 2012), et le renforcement des capacités adaptatives (*voir* l'étude de cas 3), ces ateliers présentent tous l'avantage sous-jacent de conscientiser davantage à la valeur de l'adaptation les acteurs ayant le pouvoir de mettre en œuvre ou de demander le changement.

La visualisation des données est devenue l'un des principaux outils auxquels on a recours en vue d'améliorer la communication lors des ateliers, grâce à sa capacité de présenter les données scientifiques sur les effets attendus des changements climatiques d'une manière adaptée aux utilisateurs locaux (p. ex., Sheppard *et al.*, 2011; Cohen *et*

ÉTUDE DE CAS 3

RENFORCER LES CAPACITÉS ADAPTATIVES DANS LE BASSIN DU FLEUVE COLUMBIA

Le bassin du fleuve Columbia, au sud-est de la Colombie-Britannique, couvre 671 000 kilomètres carrés. On y observe divers écosystèmes, y compris des pâturages, la forêt ombrophile de l'intérieur, des terres humides et des zones alpines (figure 5). La production d'énergie d'origine hydraulique, l'exploitation forestière, les activités minières, le tourisme et l'agriculture comptent parmi les principales activités économiques du bassin et toutes dépendent des ressources naturelles. L'adaptation aux changements climatiques est l'une des initiatives mises sur pied par le Columbia Basin Trust (CBT), qui appuie l'adoption de mesures visant à créer et à maintenir le bien-être social, économique et environnemental de la population habitant la portion canadienne du bassin du fleuve Columbia. Parmi les risques connus associés aux changements climatiques, on compte les changements découlant du ruissellement glaciaire, la température de l'eau, les cycles de gel et de dégel, les maladies et les pathogènes, les inondations, la fréquence des épisodes de sécheresse, l'intensité des feux de friches, les glissements de terrain, le risque d'avalanches et la biodiversité (Columbia Basin Trust, 2008).

En s'appuyant sur leurs travaux antérieurs, le CBT a créé un modèle d'atelier d'un jour qui vise à intégrer les efforts d'adaptation à l'échelle de la région à l'aide de prévisions climatiques et de documents d'orientation (p. ex., Columbia Basin Trust, 2012). Un processus de planification de l'adaptation, qui pourrait s'échelonner sur un an ou plus, est condensé et présenté dans le cadre d'un atelier d'une seule journée, qui contient des échanges entre employés des administrations locales portant sur trois priorités liées à la capacité de résistance aux changements climatiques de la collectivité. Les modèles d'atelier condensé ont été bien reçus par les membres de la collectivité et les praticiens tels que les gestionnaires de bassins hydrographiques et les responsables d'interventions d'urgence. Les travaux de suivi collaboratifs ont porté sur la mise au point des stratégies de communication et des plans existants, notamment les cartes de risques d'inondation, en tenant compte des données climatiques.

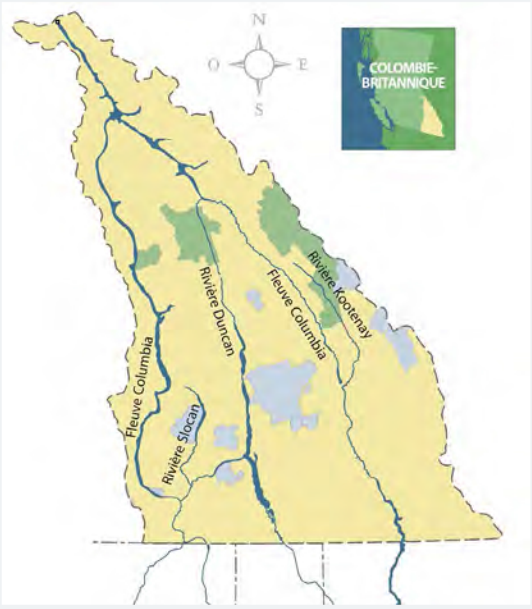


FIGURE 5 : Carte de la région du bassin du fleuve Columbia *(source : Columbia Basin Trust, 2008).*

al., 2012; Colombo et Byer, 2012). Les exemples permettent d'illustrer comment la fréquence des inondations augmenterait dans une région donnée sujette à l'élévation du niveau de la mer (figure 6) ou comment les conditions d'enneigement en montagne changeraient en réaction aux changements climatiques (Cohen *et al.*, 2012). Les variables peuvent être modifiées afin de montrer l'influence des mesures d'adaptation, contribuant ainsi à sensibiliser davantage les intervenants et à faciliter les échanges (Cohen *et al.*, 2012). On compte parmi les autres éléments visuels interactifs utilisés pendant les ateliers, le recours à Google Earth, où les chercheurs présentent une carte de la région puis y superposent des données économiques, sociales, écologiques et culturelles. Cela permet aux participants de se concerter, afin de définir des « points sensibles relatifs à la durabilité » et les incite en outre à discuter de l'adaptation aux changements climatiques (Stocker *et al.*, 2012).



FIGURE 6 : Exemple de données illustrées lors d'un exercice de visualisation – représentant un scénario qui se rapporte à l'infrastructure d'une digue *(source : www.fraserbasin.bc.ca/_Library/CCAQ_BCRAC/bcrac_delta_visioning-policy_4d.pdf).*

5.2 RENFORCER LES CAPACITÉS

La présente section met en évidence les efforts constants et les modes d'action évolutifs destinés à poursuivre le renforcement des capacités, afin de s'adapter efficacement aux éventuels changements climatiques.

5.2.1 RÉPONDRE AUX BESOINS EN MATIÈRE D'INFORMATION

Le manque de données susceptibles d'étayer le processus décisionnel est l'un des obstacles à l'adaptation les plus souvent cités (*voir* la section 4.2). Les décideurs recherchent un type de renseignements particuliers, à une échelle appropriée et avec suffisamment de détails, qui sont accessibles et compréhensibles.

Au cours des cinq dernières années, on a constaté une augmentation de la disponibilité et de la qualité des scénarios climatiques. Au Canada, plusieurs groupes se sont efforcés d'offrir des données prévisionnelles et de les rendre accessibles au public (p. ex., le Réseau canadien des scénarios de changements climatiques, le Pacific Climate Impacts Consortium et Ouranos). Ces groupes aident les décideurs à s'adapter aux changements climatiques en fournissant un accès à des données, des cartes et des graphiques pertinents et utiles sur les conditions climatiques futures.

On reconnaît la nécessité de présenter les données climatiques dans un format compréhensible et utile; pour ce faire, bon nombre de projets ont mis l'accent sur la communication et l'interprétation de données utiles aux décideurs par l'intermédiaire d'ateliers, de réunions communautaires et autres démarches participatives (p. ex., Ogden et Innes, 2009; Shaw *et al.*, 2009; Hennessey, 2010; Picketts *et al.*, 2012; Stocker *et al.*, 2012). Pour que la science soit plus utile aux décideurs, on recommande d'encourager la participation des intervenants au choix des questions de recherche et des extrants (Halliday, 2008; Ford *et al.*, 2013). Les enseignements tirés de ces projets peuvent servir à instruire d'autres collectivités, surtout en ce qui a trait aux méthodes et aux démarches, et les compétences qui ont fait le plus de progrès dans le domaine de la planification de l'adaptation auraient l'occasion de partager leurs connaissances. La Communauté de pratique de l'adaptation au changement climatique (CdPACC) est un exemple de mécanisme qui permet de communiquer des connaissances et des renseignements relatifs à l'adaptation (*voir* l'étude de cas 4).

ÉTUDE DE CAS 4

PROMOUVOIR L'ADAPTATION EN PARTAGEANT L'INFORMATION ET LES CONNAISSANCES PAR L'INTERMÉDIAIRE D'UNE COMMUNAUTÉ DE PRATIQUE VIRTUELLE

La Communauté de pratique de l'adaptation au changement climatique (CdPACC) appuie les efforts des provinces et territoires canadiens qui tentent d'intégrer l'adaptation aux changements climatiques dans la planification et les politiques, grâce au transfert des connaissances entre les compétences. Il s'agit d'un portail interactif qui permet aux chercheurs, aux experts, aux décideurs et aux praticiens de l'ensemble du Canada de se réunir pour poser des questions, générer des idées, partager des connaissances et communiquer avec les autres acteurs qui effectuent des travaux sur l'adaptation aux changements climatiques. Lancée en 2010, la CdPACC découle d'une idée lancée par le Conseil de la fédération, un forum provincial et territorial, qui a appuyé la création d'une telle communauté virtuelle en 2008. Elle regroupe maintenant plus de 500 membres.

L'échange de connaissances et la communication qui découlent des webinaires et par l'intermédiaire du forum *Solliciter des informations* aide à créer de nouvelles relations et à mettre en rapport les praticiens de l'ensemble du Canada. Une affiliation de plus en plus nombreuse et diversifiée (*voir* la figure 7) et l'intensification de l'activité du site Web ont contribué à favoriser la prise de conscience et à promouvoir l'adaptation. La communauté a évolué et inclut maintenant des sous-comités qui se penchent sur des questions précises telle la *Communauté de pratique en adaptation forestière* (CdPAF), formée en 2012 au nom du Conseil canadien des ministres des forêts. On compte parmi les principaux éléments qui contribuent au succès du portail : 1) une plateforme Web stable; 2) les observations des conseillers et les commentaires des membres; 3) un animateur communautaire spécialisé; 4) une affiliation pluridisciplinaire; et 5) une communication permanente entre les membres.

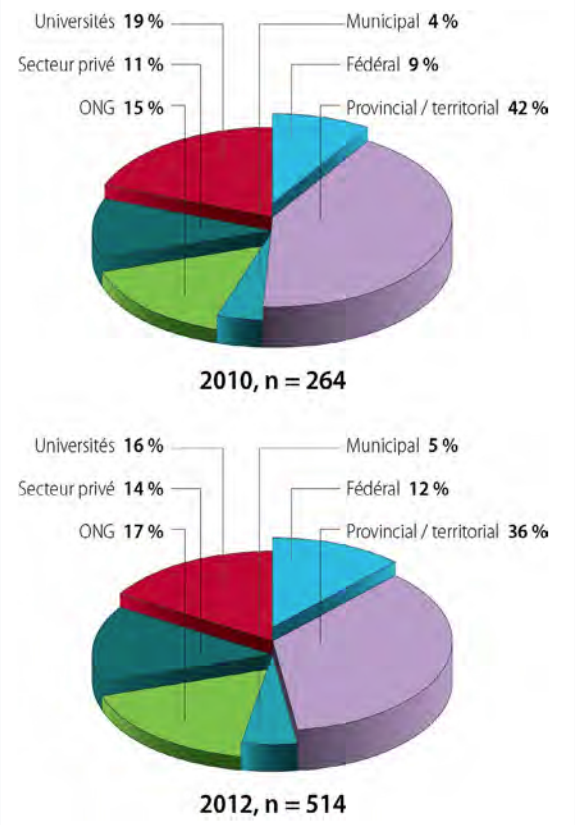


FIGURE 7 : Membres de la Communauté de pratique de l'adaptation au changement climatique.

5.2.2 METTRE AU POINT ET DIFFUSER LES OUTILS D'ADAPTATION

Au cours des cinq dernières années, on a noté une hausse substantielle du nombre d'outils d'aide à la prise de décisions mis à la disposition des municipalités. Cela comprend des cartes, des moyens de visualisation, des directives pour l'interprétation et l'utilisation de scénarios, ainsi que des manuels et des trousses sur l'adaptation (*voir* Carlson, 2012; Richardson et Otero, 2012; Santé Canada, 2013).

Les organisations professionnelles mettent aussi des outils au point en vue d'aider leurs membres à s'adapter aux changements climatiques. Par exemple, en 2008, l'Institut canadien des urbanistes a élaboré une politique qui exigeait des membres de tenir compte des changements climatiques dans les mesures et recommandations présentées; il a en outre mis au point un modèle de référence en plus d'évaluer les mécanismes actuels de planification qui pourraient être utilisés dans les plans d'adaptation. Des modules de formation utilisés pendant les cours d'urbanisme donnés à l'université et de la formation en cours d'emploi d'urbanistes sont venus appuyer ces travaux (Institut canadien des urbanistes, 2013).

Ingénieurs Canada et ses partenaires ont élaboré le protocole du CVIIP dans le but d'évaluer la vulnérabilité des infrastructures publiques du point de vue technique et de tenir compte des mesures d'adaptation en s'appuyant sur une perspective « de triple résultat ». On a eu recours à cet outil dans 26 études de cas, afin de l'évaluer et de construire une bibliothèque de référence (CVIIP, 2012). Les renseignements tirés des études de cas ont servi de base à la révision des codes, normes et instruments connexes dans trois catégories d'infrastructures (ressources hydriques, transports et immeubles; *voir* le chapitre 8 – *Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport*). Des ateliers de formation ont été offerts dans l'ensemble du pays en vue de sensibiliser la communauté au besoin de s'adapter, et de faire connaître cet outil et en promouvoir l'utilisation. Il importe de faire un tel suivi, puisque la mise au point de l'outil ne représente que la première étape – la diffusion et la mise en œuvre doivent suivre, afin de s'assurer que l'outil est utilisé de manière efficace.

5.2.3 SURMONTER LES CONTRAINTES RELATIVES AUX RESSOURCES ÉCONOMIQUES

Les mesures visant à surmonter les contraintes financières et économiques associées à l'adaptation varieront en fonction de l'intervenant et du contexte. Pour ce qui est de l'industrie et des entreprises, la mise en œuvre des mesures d'adaptation reposera souvent sur l'adoption d'un modèle d'affaires qui établira clairement les avantages liés à l'adaptation. Ces modèles peuvent comprendre des analyses coûts-avantages, mais de telles analyses sont peu nombreuses (IEMA, 2013), peut-être en raison des difficultés intrinsèques associées à l'estimation des éventuels avantages. Cependant, les entreprises peuvent être en mesure de relever les occasions où le fait d'agir maintenant (en termes de valeur actuelle) coûterait moins cher que d'attendre (c.-à-d. qu'il serait plus rentable d'intégrer des mesures d'adaptation à la conception de bâtiments plutôt que d'avoir à les remettre en état plus tard; Fankhauser et Soare, 2013).

L'évaluation des coûts d'adaptation devrait tenir compte des avantages mutuels (TRNEE, 2011; IEMA, 2013). Parmi les autres façons d'atténuer les coûts potentiels de l'adaptation, il y a l'élaboration de politiques et de stratégies pouvant être réévaluées et mises à jour au fil du temps, réduisant ainsi les coûts initiaux et les risques associés à la suradaptation (Colombo et Byer, 2012). Parmi les stratégies étudiées, on recommande de porter une attention aux mesures de type « gagnant-gagnant », qui offriraient des avantages immédiats et augmenteraient la résistance à long terme aux changements climatiques. On peut, par exemple, améliorer l'utilisation efficace de l'eau, accroître la protection contre les inondations, mettre en œuvre des mesures permettant de gérer le stress thermique et améliorer la gestion de l'environnement dans le but de protéger les écosystèmes (Fankhauser et Soare, 2013).

Dans bien des cas, les questions liées aux contraintes économiques au Canada visent davantage à faciliter l'utilisation des ressources existantes, plutôt que de créer une plus grande base de ressources financières (Burch, 2010). Lorsqu'il est nécessaire de procéder à de gros investissements dans l'infrastructure, les coûts sont parfois répartis entre plusieurs paliers de gouvernement (p. ex., Andrachuk et Smit, 2012).

5.2.4 CRÉER LA VOLONTÉ DE S'ADAPTER

Il faut également tenir compte des attitudes sous-jacentes si l'on veut favoriser l'adaptation, particulièrement au sein des milieux de travail du secteur privé et public. Par exemple, les normes culturelles d'une organisation qui valorisent le maintien du statu quo peuvent parfois s'avérer un défi de taille (Jantarasami *et al.*, 2010). Élaborer des processus de gestion dynamiques et souples, établir des mandats clairs qui accordent une priorité à l'adaptation, offrir de la formation sur les enjeux liés aux changements climatiques, établir clairement les responsabilités et assurer un financement adéquat, comptent parmi les moyens qui ont été suggérés pour créer un environnement favorable à l'adaptation et encourager les employés à revoir comment ils envisagent l'adaptation aux changements climatiques (Jantarasami *et al.*, 2010; Davidson et Bowron, 2012).

Bien qu'il existe de nombreux points communs entre le secteur public et le secteur privé en ce qui concerne la volonté de s'adapter, on observe aussi de grandes différences. Les entreprises ont peut-être plus de facilité à agir de manière novatrice, car elles sont moins réglementées par des politiques et des procédures que le secteur public; par contre, elles agissent en fonction de leurs résultats et doivent rendre des comptes aux actionnaires, lorsqu'il s'agit d'une entreprise publique. Elles sont peut-être moins susceptibles de communiquer des renseignements ou de publier des comptes rendus sur l'adaptation pour des raisons d'exclusivité (*voir* le chapitre 5 – *Industrie*). Pour améliorer la volonté de s'adapter au sein des entreprises, la mise en évidence des initiatives d'adaptation qui renforceraient les avantages comparatifs par rapport aux concurrents (en fortifiant, par exemple, la capacité de résister aux ruptures de la chaîne d'approvisionnement) s'avérerait être une influence motivante, tout comme le fait de présenter les avantages mutuels possibles (IEMA, 2013) ou de mettre l'accent sur la réputation de l'entreprise. Il est également important de tenir compte des différences observées au niveau de la nature de l'entreprise, puisque certaines industries attachent beaucoup d'importance à l'innovation et au leadership, alors que d'autres ont tendance à adopter une culture d'entreprise plus conservatrice. Les approches et les attitudes ne seront pas non plus les mêmes à l'échelle des gros conglomérats internationaux ou des petites et moyennes entreprises (TRNEE, 2012b).

Les mécanismes qui promeuvent la responsabilité sociale et la durabilité écologique des entreprises (p. ex., programme de certification forestière, systèmes de gestion environnementale) pourraient sensibiliser davantage les intervenants du secteur privé et susciter leur intérêt pour l'adaptation (Johnston et Hesseln, 2012), tout comme les demandes croissantes de production de rapports sur les changements climatiques et les risques matériels (*voir* le chapitre 5 – *Industrie*; TRNEE, 2012a, b). Cependant, il est nettement insuffisant de s'appuyer sur les mécanismes de marché pour stimuler l'adaptation. Par exemple, les recherches démontrent que le secteur de l'assurance ne joue qu'un petit rôle pour ce qui est d'encourager l'adaptation planifiée de l'infrastructure construite aux changements climatiques (TRNEE, 2009; Cook et Dowlatabadi, 2011; OCDE, 2012).

Jusqu'à présent, l'adaptation au Canada s'est surtout traduite par des solutions de type « sans regret », des changements marginaux

ÉTUDE DE CAS 5

MISE AU POINT DE PLANS DE GESTION ADAPTATIVE : EXEMPLE DES GRANDS LACS

L'Étude internationale des Grands Lacs d'amont qui porte sur les fluctuations des niveaux d'eau dans le bassin des Grands Lacs a permis de conclure que les coûts et les contraintes liées à l'environnement et aux établissements ont empêché l'investissement dans les mesures d'adaptation structurelles à ce moment. La gestion adaptative s'est avérée être le meilleur mécanisme pouvant servir à examiner les éventuelles incertitudes et les risques associés aux niveaux d'eau extrêmes provoqués par la variabilité naturelle et les changements climatiques (Leger et Read, 2012; *voir aussi* l'étude de cas 4 dans le chapitre 8).

Pour réaliser l'étude, on a eu recours à un processus de détermination de la portée de la gestion adaptative pour examiner un certain nombre de questions clés (figure 8). Le processus a recours au principe de la « graduation des décisions » pour faire correspondre les seuils *ascendants* du niveau de l'eau définis par les intervenants avec l'élaboration *descendante* des scénarios de changements climatiques (Brown *et al.*, 2011, 2012; Moody et Brown, 2012). La première étape consistait à mobiliser les intervenants et les spécialistes en ressources, grâce à divers moyens (enquêtes en ligne, entrevues, collecte, analyse et modélisation des données, avis d'experts, et séances d'information publiques), en vue d'évaluer la vulnérabilité du système et délimiter les zones de tolérance associées aux principaux enjeux.

Trois zones de tolérance, de même que des options de gestion correspondantes, ont été définies (figure 9). Les niveaux de la zone A sont acceptables (situés dans la plage des données historiques, mais cela exclut les deux extrêmes) et conformes aux limites de tolérance et aux attentes des intervenants. Dans la zone B, les niveaux se situent en dehors des attentes d'une des parties intéressées, mais les régimes actuels de gestion peuvent être utilisés pour les contrôler. Même s'il peut y avoir des changements significatifs sur le plan des activités, des avantages et des coûts dans cette zone, les parties intéressées ne s'exposent pas à de graves conséquences financières ni à des effets irréversibles. Les niveaux de la zone C engendrent des conséquences négatives permanentes. On observe, par exemple, que les politiques qui régissent les zones de danger et les grandes infrastructures seraient compromises. Dans cette situation, les parties intéressées sont contraintes d'apporter des changements significatifs à leurs activités, de renoncer aux avantages à long terme ou de s'exposer à des incidences négatives permanentes ou de longue durée (Leger et Read, 2012). Ensuite, on a employé diverses méthodes – données historiques, modèle de circulation générale et modèle climatique régional, analyse stochastique et de données paléo-environnementales – pour produire des données climatiques sur la variation et le cycle des conditions du niveau de l'eau, y compris les extrêmes (ÉIGLA, 2012; *voir aussi* le chapitre 2). On a ensuite utilisé ces données pour produire des matrices des risques qui examinent la probabilité et les conséquences d'événements particuliers.

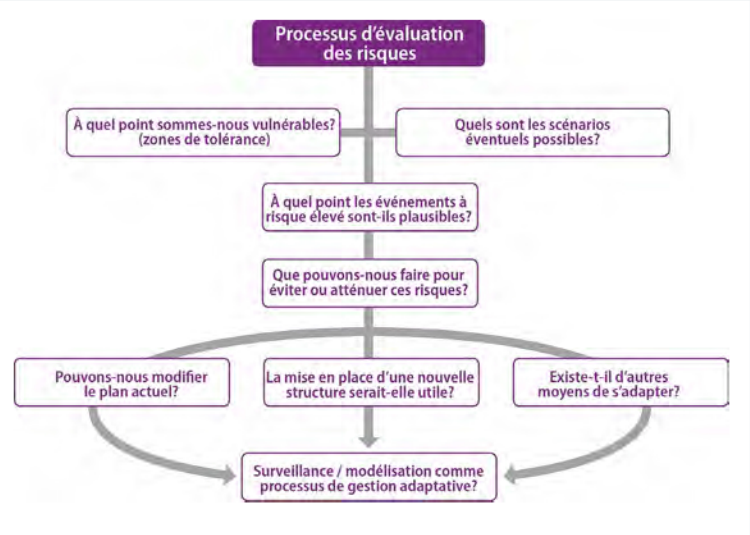


FIGURE 8 : Processus d'évaluation de la gestion adaptative *(extrait modifié tiré de Leger et Read, 2012, figure 2-1, p. 8).*

Conjuguées à l'acquisition de connaissances au sujet des principaux risques et des seuils, la surveillance à long terme, la modélisation du système et l'évaluation du rendement servent à éclairer l'examen continu des activités de gestion. Les politiques, pratiques et plans actuels doivent être revus et modifiés selon les circonstances, à mesure que de nouveaux renseignements sont acquis, que l'état des connaissances s'améliore ou que le régime de niveau d'eau change. À cette fin, selon Leger et Read (2012) « […] la stratégie de gestion adaptative […] se concentre sur ce qui est nécessaire […] afin d'en arriver à mieux connaître les mesures d'adaptation appropriées, ainsi que le moment et la manière de les mettre en œuvre ou de les modifier en vue d'atténuer d'éventuels risques [traduction] ». Des projets pilotes en matière de gestion adaptative visant à résoudre des questions locales ou régionales urgentes relatives aux niveaux de l'eau ont été proposés comme moyen d'engager le processus, et d'analyser et de perfectionner les mécanismes de collaboration.

apportés aux systèmes en place, et des approches souples et adaptatives (*voir* l'étude de cas 5). Ces approches tendent à minimiser les risques actuels et perçus associés à l'adaptation tels que la suradaptation, la mauvaise adaptation et le gaspillage des ressources. Or, certains chercheurs laissent entendre que celles-ci ne répondront pas toujours aux besoins, puisque le climat continuera d'évoluer et qu'il faudra procéder à des changements transformationnels à plus grande échelle (Kates *et al.*, 2012; O'Brien, 2012; Rickards et Howden, 2012, *voir* l'encadré 3). Dans de tels cas, il sera encore plus difficile d'accroître la volonté de s'adapter et de faire accepter ce genre de changements que dans le cas des approches évolutives.

5.2.5 CRÉER UN ENVIRONNEMENT PROPICE

Créer un environnement favorable à l'adaptation signifie qu'il faut éliminer et réduire les obstacles (notamment les politiques et les règlements qui entravent le processus d'adaptation), faciliter l'adaptation et donner aux gens le pouvoir d'accepter le changement.

Les politiques et programmes gouvernementaux exercent une influence sur la capacité d'adaptation (Ford et Pearce, 2012) et le rôle que joue le gouvernement varie en fonction de l'échelon (p. ex., municipal, provincial/territorial, fédéral) et du mandat de chacun (*voir* la section 4.1). Pour créer un environnement favorable, les échelons doivent établir de solides voies de communication, fournir un accès aux données et à l'information (p. ex., recherche, résultats de projet, outils et données sur les changements climatiques), accroître la participation des citoyens et des intervenants et mettre en œuvre des politiques souples et adaptatives (Corkal *et al.*, 2011). Les politiques adaptatives sont conçues en vue de répondre de manière continue aux conditions changeantes, incertaines et complexes (Swanson *et al.*, 2010). On considère aussi que les gouvernements doivent aider les populations vulnérables et surmonter les obstacles existants (Fankhauser et Soare, 2013). On peut également contribuer à créer un environnement favorable en établissant clairement l'adaptation aux changements climatiques comme une priorité et en donnant l'occasion d'intégrer les changements climatiques à l'ensemble de la structure organisationnelle (Burch, 2010; Lemieux *et al.*, 2013). Fournir des possibilités de collaboration accrue et efficace entre divers échelons du gouvernement, ministères et intervenants externes, y compris l'industrie, et encourager la participation à cet échange font également partie des fonctions du gouvernement. En effet, dans le contexte canadien, la collaboration est essentielle à l'avancement de l'adaptation (Gouvernement du Canada, 2011; *voir aussi* l'étude de cas 1).

L'importance accordée aux « champions » qui influenceront l'adaptation au sein des organisations – des gens qui font preuve d'initiative, qui manifestent de l'enthousiasme et qui possèdent le pouvoir de mettre en œuvre le changement – a également été constatée dans les articles consultés (Richardson et Lemmen, 2010; Tompkins *et al.*, 2010; *voir aussi* l'étude de cas 2). Même si le rôle des individus peut s'avérer être important, Van Damme (2008), ainsi que Johnston et Hesseln (2012), ont souligné l'importance d'intégrer des attitudes progressives et une réflexion sur l'adaptation dans la culture d'entreprise, plutôt que de compter exclusivement sur un certain nombre de personnes clés.

ENCADRÉ 3

CHANGEMENT TRANSFORMATIONNEL

Le changement transformationnel en réaction aux changements climatiques constitue un nouveau domaine de recherche (O'Brien, 2012). À ce titre, les définitions et les interprétations continuent d'évoluer (Rickards et Howden, 2012). Certains sont d'avis que la « transformation » constitue une réaction distincte aux changements climatiques (en plus des mesures d'atténuation et d'adaptation; O'Brien, 2012). D'autres voient la transformation comme un type d'adaptation qui englobe des mesures à plus grande échelle et plus détaillées, et des mesures proposées dans une nouvelle région ou un nouveau système de ressources (Kates *et al.*, 2012); ils font plutôt une distinction entre l'adaptation *progressive* et *transformationnelle* (Park *et al.*, 2012; figure 10). Dans les deux cas, les changements transformationnels provoqueraient des modifications importantes répandues, qui procureraient non seulement des avantages, mais qui pourraient aussi remettre en question les normes environnementales, sociales et économiques, le statu quo ou le système de valeur actuel.

Ces changements comprennent, entre autres, des changements significatifs en rapport avec l'aménagement du territoire (p. ex., le fait de passer d'une exploitation agricole à une exploitation forestière), le déménagement d'une collectivité entière pour la protéger des risques posés par l'érosion côtière (Kates *et al.*, 2012) et le changement de paradigme au niveau du mode de pensée (ACT, 2013). En comparaison avec les approches progressives, l'adaptation transformationnelle offre un potentiel de gains plus élevé, mais présente aussi un plus grand nombre de risques (Rickards et Howden, 2012). On note cependant que ces changements ne seraient pas forcément irréversibles même s'ils étaient radicaux (Park *et al.*, 2012; Rickards et Howden, 2012). Appliqué aux changements climatiques, le concept du changement transformationnel a, jusqu'à présent, surtout fait l'objet de discussions soit dans le contexte des écosystèmes naturels et de l'agriculture, soit dans une optique théorique.

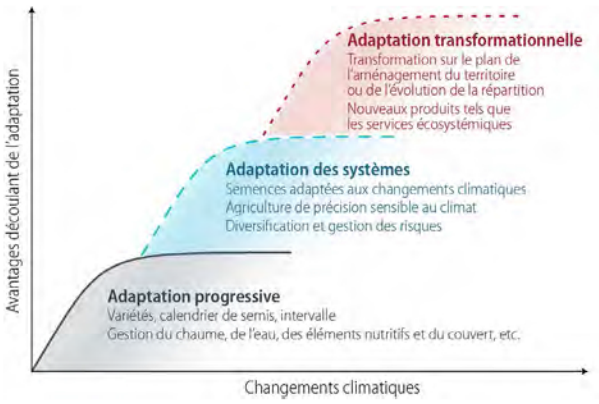


FIGURE 9 : Différents niveaux d'adaptation à partir d'exemples tirés du secteur agricole *(tiré de Howden et al., 2010; Rickards et Howden, 2012).*

6. SYNTHÈSE

Les tendances liées à la recherche et aux mesures d'adaptation au Canada au cours des cinq à dix dernières années sont liées à une question complexe étayée par de nombreuses recherches, un niveau de participation élargi et un nombre croissant d'exemples de mise en œuvre. Les discussions ne visent plus uniquement à justifier et à préciser la légitimité de l'adaptation en réaction aux changements climatiques, mais à comprendre le processus d'adaptation – qui s'adapte, pourquoi et comment les gens le font-ils, et qu'est-ce qui facilite ou limite le processus.

Au Canada, on observe des exemples d'adaptation à tous les paliers du gouvernement et au sein des groupes industriels, des associations non gouvernementales et des entreprises. On constate que l'activité semble encore dominer à l'échelle municipale, comme c'était le cas en 2008. Les municipalités élaborent des plans d'adaptation et participent à des ateliers de sensibilisation. Certaines d'entre elles ont également modifié leurs politiques et leurs procédures, afin de tenir compte des changements climatiques. Les niveaux supérieurs du gouvernement ont aussi élaboré des stratégies d'adaptation et des cadres stratégiques et s'emploient à faciliter l'adoption de mesures d'adaptation aux changements climatiques par l'établissement de mécanismes de collaboration visant à encourager la recherche appliquée, la mise au point d'outils d'aide à la prise de décisions et le partage d'expériences d'adaptation. L'industrie s'investit de plus en plus dans ce domaine, particulièrement au sein des secteurs les plus vulnérables et les plus exposés aux variations climatiques et aux fluctuations de température (p. ex., secteur forestier, hydroélectricité et tourisme), et les activités d'adaptation sont de plus en plus nombreuses au sein du secteur des services publics. En effet, on constate de nombreux exemples de la planification proactive de l'adaptation dans le secteur de la santé.

Dans l'ensemble, on constate des progrès importants en ce qui concerne les activités d'adaptation au Canada. Au cours des cinq dernières années, on a observé une augmentation sur le plan de la mobilisation, de la recherche, de la prise de conscience, de la planification (y compris les stratégies et les politiques) et de la collaboration dans ce domaine. Les progrès sont moins palpables au chapitre de la mise en œuvre des mesures d'adaptation aux éventuelles conditions climatiques (c.-à-d. des modifications précises apportées aux structures ou aux stratégies dans le but de réduire la vulnérabilité ou de profiter des occasions qui pourraient se présenter). Bien que certains exemples soient disponibles, telles les nouvelles lignes directrices en matière de digue en Colombie-Britannique (*voir* le chapitre 8 – *Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport*) et la diversification des activités dans les stations de sports d'hiver, afin d'inclure des activités pour la saison chaude (*voir* le chapitre 5 – *Industrie*), le nombre ne semble pas correspondre à notre capacité d'adaptation élevée et à notre base de connaissances qui s'enrichit constamment. Cela ressemble à la situation qui prévaut dans d'autres pays développés, où la mise en œuvre n'en est encore qu'à ses débuts (p. ex., *voir* Bauer *et al.*, 2012; Biesbroek *et al.*, 2010; Bierbaum *et al.*, 2013).

À chaque étape du processus (figure 2), les obstacles et les difficultés peuvent entraver ou limiter l'adaptation. Certains obstacles tels que les ressources limitées, les lacunes concernant les données ou le manque de technologie sont de plus en plus reconnus; d'autres tels que les valeurs et les biais psychologiques sont moins concrets, mais tout aussi importants, puisqu'ils exercent une influence sur la volonté de s'adapter, soit un facteur essentiel qui permet de garantir que la prise de conscience et la capacité d'adaptation sont mises en pratique. On a acquis de nouvelles connaissances au sujet des obstacles, tant grâce à la hausse du nombre d'activités d'adaptation qu'à l'intégration accrue des perspectives des autres disciplines.

Pour aller de l'avant, il faudra accorder davantage d'attention aux approches visant à surmonter les obstacles et à faciliter l'adaptation. Apprendre de son entourage et utiliser la recherche seront utile à cet égard, tout comme les contributions continues des organisations qui élaborent des modules d'apprentissage et des documents d'orientation sur l'adaptation. À mesure que les secteurs publics et privés continueront de s'engager davantage dans le débat, il deviendra de plus en plus pressant de comprendre les avantages et les compromis associés à la mise en œuvre de mesures d'adaptation. Tous les paliers de gouvernement devront jouer un rôle soutenu dans la création d'un environnement favorable à l'adaptation.

Nous concluons le chapitre en ajoutant que notre compréhension du processus d'adaptation au Canada ne cesse de s'améliorer et qu'un nombre croissant d'exemples d'adaptation a été observé au cours des cinq dernières années. Nous disposons des connaissances et de la capacité requises pour nous adapter à la plupart des situations. Les efforts soutenus consentis par tous les groupes visés, en vue de surmonter les obstacles et d'accroître la volonté de s'adapter, contribueront à faire en sorte que l'adaptation continuera de progresser et atteindra le niveau requis pour maintenir la durabilité sociale, économique et environnementale à long terme.

RÉFÉRENCES

ACT (Adaptation to Climate Change Team). *Summary for decision-makers – climate change adaptation and Canada's crops and food supply*, Adaptation to Climate Change Team, 2013, <http://act-adapt.org/wp-content/uploads/2013/07/07-13-CFS-Summary-WEB.pdf>.

Adger, W.N., K. Brown et D. Conway. « Progress in global environmental change », *Global Environmental Change*, vol. 20, nº 4, 2010, pp. 547-549.

Adger, W.N., I. Lorenzoni et K. O'Brien (éd.) *Adapting to Climate Change: Thresholds, Values, Governance*, Cambridge University Press, 2009.

Agrawala, S., M. Carraro, N. Kingsmill, E. Lanzi, M. Mullan et G. Prudent-Richard. « Participation du secteur privé à l'adaptation au changement climatique : approches de la gestion des risques climatiques », dans *Documents de travail sur l'environnement de l'OCDE*, Éditions OCDE, 2011.

Andrachuk, M. et B. Smit. « Community-based vulnerability assessment of Tuktoyaktuk, NWT, Canada to environmental and socio-economic changes », *Regional Environmental Change*, vol. 12, nº 4, 2012, pp. 867-885.

Bauer, A., J. Feichtinger et R. Steurer. *The governance of climate change adaptation in 10 OECD countries: challenges and approaches*, document de travail, Institute of Forest, Environmental, and Natural Resource Policy, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienne, 2011, <www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/_/H73/H732/_TEMP_/InFER_DP_11_1__The_Governance_01.pdf>.

Bauer, A., J. Feichtinger et R. Steurer. « The governance of climate change adaptation in 10 OECD countries: challenges and approaches », *Journal of Environmental Policy and Planning*, vol. 14, nº 3, 2012, pp. 279-304.

BC Agriculture and Food Climate Action Initiative. *BC agriculture climate change adaptation risk and opportunity assessment: provincial report*, British Columbia Agriculture and Food Climate Action Initiative, mars 2012, 2012.

BC Stats. *Preparing for a changing climate: perceptions of BC public service employees*, Colombie-Britannique, 2012, <www.bcstats.gov.bc.ca/Files/1f1b77b7-0866-4841-8b75-9c22af000864/Preparing for a Changing Climate Survey Report - June 2012.pdf>.

Berrang-Ford, L., J.D. Ford et J. Paterson. « Are we adapting to climate change? », *Global Environmental Change*, vol. 21, nº 1, 2011, pp. 25-33.

Berry, P. « Risk perception, health communication and adaptation to the health impacts of climate change in Canada », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice*, J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

Berry, P., M. Pajot, D. Hutton, K.-L. Clarke et M. Verret. *The role of risk perception and health communication in adapting to the health impacts of climate change in Canada*, rapport rédigé pour Ressources naturelles Canada, Ottawa, 2009.

Bierbaum, R., J.B. Smith, A. Lee, M. Blair, L. Carter, F.S. Chapin III et L. Verduzco. « A comprehensive review of climate adaptation in the United States: more than before, but less than needed », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 18, nº 3, 2013, pp. 361-406.

Biesbroek, G.R., R.J. Swart, T.R. Carter, C. Cowan, T. Henrichs, H. Mela et D. Rey. « Europe adapts to climate change: comparing national adaptation strategies », *Global Environmental Change*, vol. 20, nº 3, 2010, pp. 440-450.

Bourque, A. et G. Simonet. « Québec », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 171-226.

Boyd, E., R. Street, M. Gawith, K. Lonsdale, L. Newton, K. Johnstone et G. Metcalf. « Leading the UK adaptation agenda: a landscape of stakeholders and networked organizations for adaptation to climate change », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice*, J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

Boyle, M. et H. Dowlatabadi. « Anticipatory adaptation in marginalized communities within developed countries », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice*, J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

Brisley, R., J. Welstead, R. Hindle et J. Paavola. *Socially just adaptation to climate change*, Joseph Rowntree Foundation, juillet 2012, 2012.

Brown, C., W. Werick, W. Leger et D. Fay. « A decision-analytic approach to managing climate risks: application to the Upper Great Lakes », *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 47, nº 3, 2011, pp. 524-534.

Brown, C., Y. Ghile, M. Laverty et K. Li. « Decision scaling: linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector », *Water Resources Research*, vol. 48, W09537, 2012.

Bruce, J.P., M. Egener et D. Noble. *Adapting to climate change: a risk-based guide for Ontario municipalities*, Ressources naturelles Canada, Programme sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques, 2006, 42 p., <https://adapt.nd.edu/resources/508/download/Adapting-to-Climate-Change-a-Risk-Based-Guide-for-Ontario-Municipalities.pdf>.

Burch, S. « In pursuit of resilient, low carbon communities: an examination of barriers to action in three Canadian cities », *Energy Policy*, vol. 38, 2010, pp. 7575-7585.

Burch, S. et J.A. Robinson. « A framework for explaining the links between capacity and action in response to global climate change », *Climate Policy,* vol. 7, 2007, pp. 304-316.

Burton, I. « Progrès sur la voie de l'adaptation », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 425-440.

BVG (Bureau du vérificateur général du Canada). « L'adaptation aux impacts climatiques », chapitre 3 dans *Rapport du commissaire à l'environnement et au développement durable à la Chambre des communes*, Bureau du vérificateur général du Canada, 2010.

Carlson, D. *Preparing for climate change: an implementation guide for local governments in British Columbia*, West Coast Environmental Law, 2012, <www.retooling.ca/_Library/docs/WCEL_climate_change_FINAL.pdf>.

Carmin, J., N. Nadkarmi et C. Rhie. *Progress and challenges in urban climate adaptation planning: results of a global survey*, DUSP/MIT, Cambridge, Massachusetts, 2012.

CBC. *Calgary floods spotlight cities' costly failure to plan for climate change*, 2013, <www.huffingtonpost.ca/2013/06/28/alberta-floods-climate-change_n_3514976.html>.

CCES (Center for Climate and Energy Solutions). *Weathering the storm: building business resilience to climate change*, Center for Climate and Energy Solutions, juillet 2013, 2013.

CCNUCC (Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques). *Report of the in-depth review of the fifth national communication of Canada*, Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 2011.

CdPACC (Communauté de pratique de l'adaptation au changement climatique). *Provincial and territorial adaptation projects and initiatives – survey results*, Adaptation au changement climatique, Communauté de pratique, mars 2011, 2011.

Ceres and Climate Change Lawyers Network. Business resilience in a changing climate: Canadian corporate disclosure on risks and opportunities from the physical impacts of climate change, rapport commandé par la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 2012.

Chiotti, Q. et B. Lavender. « Ontario », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 227-274.

Cimato, F. et M. Mullan. « Adapting to climate change: analysing the role of government », *Defra Evidence and Analysis Series*, Paper 1, janvier 2010, 2010.

Clar, C., A. Prutsch et R. Steurer. « Barriers and guidelines for public policies on climate change adaptation: a missed opportunity of scientific knowledge-brokerage », *Natural Resources Forum*, vol. 37, 2013, pp. 1-18.

Clarke, K.L. et P. Berry. « From theory to practice: a Canadian case study of the utility of climate change adaptation frameworks to address health impacts », *International Journal of Public Health*, vol. 57, 2012, pp. 167-174.

CNW (Canadian NewsWire). *Canada leading by example – Baird announces new funding for adaptation on climate change*, Canadian News Wire, 2007, <www.newswire.ca/fr/story/36479/canada-leading-by-example-baird-announces-new-funding-for-adaptation-on-climate-change>.

Cohen, S.J., S. Sheppard, A. Shaw, D. Flanders, S. Burch, B. Taylor, D. Hutchinson, A. Cannon, S. Hamilton, B. Burton et J. Carmichael. « Downscaling and visioning of mountain snow packs and other climate change implications in North Vancouver, British Columbia », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 17, 2012, pp. 25-49.

Colombo, A.F. et P.H. Byer. « Adaptation, flexibility and project decision-making with climate change uncertainties », *Impact Assessment and Project Appraisal*, vol. 30, nº 4, 2012, pp. 229-241.

Columbia Basin Trust. *The Basin*, Columbia Basin Trust, 2008, <www.cbt.org/The_Basin/>.

Columbia Basin Trust. *From dialogue to action*, Columbia Basin Trust, 2012, <www.cbt.org/uploads/pdf/DialoguetoAction_Final_lo-res.pdf>.

Commission européenne. *Questions and answers: EU strategy on adaptation to climate change*, Commission européenne, 2013, <europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-334_en.htm>.

Committee on Climate Change. *UK adaptation policy,* Committee on Climate Change, sans date, <www.theccc.org.uk/tackling-climate-change/preparing-for-climate-change/uk-adaptation-policy/>.

Communauté rurale Beaubassin-est. *Arrêté 09-1B, Grand-Barachois (Nouveau-Brunswick)*, Communauté rurale Beaubassin-est, 2011, <www.beaubassinest.ca/userfiles/file/09-1E%20Modifiant%20l%27arr%C3%AAt%C3%A9%20adoptant%20le%20plan%20rural.pdf>.

Cook, C. et H. Dowlatabadi. « Learning adaptation: climate-related risk management in the insurance industry », dans *Climate change adaptation in developed nations: from theory to practice*, J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011, pp. 255-265.

Corkal, D.R., H. Diaz et D. Sauchyn. « Changing roles in Canadian water management: a case study of agriculture and water in Canada's south Saskatchewan river basin », *International Journal of Water Resources Development*, vol. 27, nº 4, 2011, pp. 647-664.

Crawford, E. et E. MacNair. *BC agriculture climate change adaptation risk and opportunity assessment: provincial report*, British Columbia Agriculture and Food Climate Action Initiative, mars 2012, 2012.

CREXE (Centre de recherche et d'expertise en évaluation). *Éléments pour un référentiel d'évaluation en adaptation aux changements climatiques : le cas de l'ICAR-Québec*, rapport présenté au Consortium Ouranos, mars, 2012, <http://www.ouranos.ca/media/publication/243_RapportLamari2012.pdf>.

Crowe, K.A. et W.H. Parker. « Using portfolio theory to guide reforestation and restoration under climate change scenarios », *Climatic Change*, vol. 89, nº 3-4, 2008, pp. 355-370.

CSA Group. *National survey of Canada's infrastructure engineers about climate change*, rapport rédigé pour Ingénieurs Canada, mai 2012, 2012.

CTV.ca News Staff. *Extreme heat wave example of climate change: expert*, CTV.ca News Staff, 2010, </www.ctvnews.ca/extreme-heat-wave-example-of-climate-change-expert-1.530132>.

Cunsolo Willox, A., S.L. Harper, J.D. Ford, K. Landman, K. Houle, V.L. Edge et gouvernement de la communauté inuite de Rigolet. « From this place and of this place: climate change, sense of place, and health in Nunatsiavut, Canada », *Social Science & Medicine*, vol. 75, 2012, pp. 538-547.

CVIIP (Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques). *PIEVC case studies: codes, standards and related instruments (CSRI) review for water infrastructure and climate change*, Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques, 2012, <www.pievc.ca/e/2012_PIEVC_CSRI_Water_report_Final.pdf>.

Davidson, G. et B. Bowron. Perspectives on climate change: benchmarking CIP members, Institut canadien des urbanistes, mars 2012, 2012.

de Loë, R. « Mainstreaming climate change adaptation in drinking water source protection in Ontario: challenges and opportunities », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice*, J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

Deloitte. *Canadian business perspectives on the role of government in private sector climate adaptation*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 2011.

Delta Programme Commissioner. *Delta Act*, Delta Programme Commissioner, sans date, <www.deltacommissaris.nl/english/topics/delta_act/>.

Desjarlais, C. et A. Blondlot. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, Ouranos, Montréal, 2010, <http://www.ouranos.ca/fr/publications/documents/sscc_francais_br-V22Dec2011_000.pdf>.

Desjarlais, C. et C. Larrivée. *Analyse économique de l'adaptation aux changements climatiques en matiere de drainage urbain au Québec : comparaison de diverses stratégies d'adaptation pour un secteur de Montréal*, Ouranos, 2011.

Dickinson, T. et I. Burton. « Adaptation to climate change in Canada: a multi-level mosaic », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice*, J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

District d'Elkford. *Official community plan and climate change adaptation strategy,* District d'Elkford, 2009, <www.elkford.ca/include/get.php? nodeid=78>.

Doiron, S. « From climate change plans to by-laws, it's time to act, The sea level rise zone adaptation by-law – new coastal development regulation », *Plan Canada*, vol. 52, no 4, 2012.

Dupuis, J. et R. Biesbroek. « Comparing apples and oranges: the dependent variable problem in comparing and evaluating climate change adaptation policies », *Global Environmental Change*, août 2013, sous presse.

ÉICCA (Évaluation de l'impact du changement climatique dans l'Arctique). *Arctic Climate Impact Assessment,* Évaluation de l'impact du changement climatique dans l'Arctique, Cambridge University Press, 2005, 1042p., <http://www.acia.uaf.edu>.

ÉIGLA (Étude internationale des Grands Lacs d'amont). *Lake Superior regulation: addressing uncertainty in Upper Great Lakes water levels*, rapport final rédigé pour la Commission mixte internationale, mars 2012, 2012, 215 p.

Environics Research Group. *National climate change adaptation benchmark survey*, Environics Research Group, Ressources naturelles Canada, 2010.

Environnement Canada. *Évaluation du thème adaptation du Programme sur la qualité de l'air : revue des constatations des évaluations et des mesures de rendement des programmes,* Environnement Canada, Direction générale de la vérification et de l'évaluation, décembre 2010, 2010.

Environnement Canada. *Engagement continu du Canada en matière d'adaptation aux changements climatiques,* Environnement Canada, 2013, <http://ec.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=2D1D6FA7-1&news=B67A7995-A1CA-4DE3-89D2-E4E3C0E24BFB>.

Fankhauser, S. et R. Soare. « An economic approach to adaptation: illustrations from Europe », *Climatic Change*, vol. 118, nº 2, 2013, pp. 367-379.

FCM (Fédération canadienne des municipalités). *S'adapter aux changements climatiques et aux phénomènes météorologiques extrêmes,* 2013, <http://www.fcm.ca/accueil/dossiers/environnement/adaptation-aux-changements-climatiques/ressources-en-matière-dadaptation/s'adapter-aux-changements-climatiques-et-aux-phénomènes-météorologiques-extrêmes.htm>.

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

Fondation David Suzuki. *Un bilan disparate 2012 : la lutte contre les changements climatiques, province par province,* Fondation David Suzuki, mars 2012, 2012.

Forbes, D.L., G.K. Manson, J. Charles, K.R. Thompson et R.B. Taylor. *Halifax Harbour extreme water levels in the context of climate change: scenarios for a 100-year planning horizon,* Commission géologique du Canada, Ottawa (Ontario), Dossier public 6346, 2009, 21 p.

Ford, J. et T. Pearce. « Climate change vulnerability and adaptation research focusing on the Inuit subsistence sector in Canada: directions for future research », *Le Géographe canadien*, vol. 56, nº 2, 2012, pp. 275-287.

Ford, J., B. Smit, J. Wandel, M. Allurut, K. Shappa, H. Ittusujurat et K. Qrunnut. « Climate change in the Arctic: current and future vulnerability in two Inuit communities in Canada », *The Geographical Journal,* vol. 174, nº 1, 2008, pp. 45-62.

Ford, J.D. et L. Berrang-Ford. « Introduction », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice,* J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

Ford, J.D., L. Berrang-Ford et J. Paterson. « A systematic review of observed climate change adaptation in developed nations », *Climatic Change,* vol. 106, 2011, pp. 327-336.

Ford, J.D., L. Berrang-Ford, A. Lesnikowski, M. Barrera et S.J. Heymann. « How to track adaptation to climate change: a typology of approaches for national-level application », *Ecology and Society,* vol. 18, nº 3, art. 40, 2013.

Fraser, J. et M. Strand. *Climate change adaptation for local government: a resource guide,* Pacific Institute for Climate Solutions, juin 2011, 2011.

Gagnon-Lebrun, F. et S. Agrawala. « Implementing adaptation in developed countries: an analysis of progress and trends », *Climate Policy,* vol. 7, nº 5, 2007, pp. 392-408.

Gifford, R. « The dragons of inaction: psychological barriers that limit climate change mitigation and adaptation », *American Psychologist*, vol. 66, nº 4, 2011, pp. 290-302.

Gleeson, J., P. Gray, A. Douglas, C.J. Lemieux et G. Nielsen. *A practitioner's guide to climate change adaptation in Ontario's ecosystems,* Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources, Sudbury (Ontario), 2011, 74 p.

Gouvernement du Canada. *Cadre stratégique fédéral sur l'adaptation,* Environnement Canada, Gatineau (Québec), 2011.

Gouvernement du Québec. *Québec en action – vert 2020: plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques,* Gouvernement du Québec, 2012.

Hagerman, S., H. Dowlatabadi, T. Satterfield et T. McDaniels. « Expert views on biodiversity conservation in an era of climate change », *Global Environmental Change,* vol. 20, 2010, pp. 192-207.

Halifax Regional Municipality. *Regional municipal planning strategy (Policy 2.2.5 and E-16),* Halifax Regional Municipality, Halifax, 2006, <www.halifax.ca/regionalplanning/documents/Regional_MPS.pdf>.

Halifax Regional Municipality. *HRM climate change: developer's risk management guide*, Halifax Regional Municipality, Halifax (Nouvelle-Écosse), 2007, <www.halifax.ca/climate/documents/DevelopersGuidetoRiskManagment.pdf>.

Halifax Regional Municipality, *Commission géologique du Canada et Ressources naturelles Canada. Sea level rise adaptation planning for Halifax Harbour,* Halifax (Nouvelle-Écosse), présentation à l'assemblée plénière, conseil régional de Halifax, 2010, <www.halifax.ca/council/agendasc/documents/100209cow4.pdf>.

Hallegatte, S., F. Lecocq et C. de Perthuis. *Designing climate change adaptation policies: an economic framework,* Banque mondiale, 2011.

Halliday, R. *Evaluation of multidisciplinary research projects and teams – climate change impacts and adaptation program,* rédigé pour Ressources naturelles Canada, 2008.

Hanna, K., A. Dale, P. Filion, Z. Khan, C. Ling, K. Rahaman et M. Seasons. *Planning for adaptation in an uncertainty setting: local government action in Canada,* compte-rendu de conférence rédigé pour le AESOP-ACSP Joint Congress, du 15 au 19 juillet 2013, Dublin, 2013.

Hennessey, R. « Scenario planning as a tool to ensure robust adaptation », *Plan Canada*, vol. 50, nº 4, 2010, pp. 32-35.

Hewitt, N., N. Klenk, A.L. Smith, D.R. Bazely, N. Yan, S. Wood, J.I. MacLellan, C. Lipsig-Mumme et I. Henriques. « Taking stock of the assisted migration debate », *Biological Conservation,* vol. 144, nº 11, 2011, pp. 2560-2572.

Horton, B. et G.R.A. Richardson. *Adaptation aux changements climatiques et décideurs canadiens municipaux et d'entreprises : un aperçu pour 2009,* Série de documents de travail de la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 2011.

Howden, S.M., S. Crimp et R.N. Nelson. « Australian agriculture in a climate of change », dans *Managing Climate Change: Papers from Greenhouse 2009 Conference,* I. Jubb, P. Holper et W. Cai (éd.), CSIRO Publishing, Melbourne, 2010, pp. 101-112.

Hutton, D. « Behavioral health and risk perception: factors in strengthening community resiliency and emergency preparedness », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice,* J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, vol. 42, 2011, pp. 133-142.

ICMM (Conseil international des mines et métaux). *Adapting to a changing climate: implications for the mining and metals industry,* Conseil international des mines et métaux, mars 2013, 2013.

IEMA (Independent Environmental Monitoring Agency). *Climate change adaptation: building the business case,* Independent Environmental Monitoring Agency, 2013, <https://www.iema.net/system/files/iema_guidance_report_v5.pdf>.

Institut canadien des urbanistes. *Questions nationale - Initiatives de l'ICU,* Institut canadien des urbanistes, 2013, <http://www.cipicu.ca/web/la/fr/pa/0e47adaf838c4becbb11dab1691d696b/template.asp>.

Institut canadien des urbanistes. *Planifier en fonction des changements climatiques,* Institut canadien des urbanistes, 2013, <http://www.planningforclimatechange.ca/wwwroot/dsp_HomePage_FR.cfm>.

Jackson, E., L. Barry et N. Marzok. *Changing climate, changing communities: guide and workbook for municipal climate adaptation,* ICLEI Canada, Toronto (Ontario), Canada, 2011, <www.icleicanada.org/images/icleicanada/pdfs/GuideWorkbookInfoAnnexes_WebsiteCombo.pdf>.

Jantarasami, L., J.J. Lawler et C.W. Thomas. « Institutional barriers to climate change adaptation in U.S. national parks and forests », *Ecology and Society*, vol. 15, nº 4, art. 33, 2010.

Jessen, S. et S. Patton. « Protecting marine biodiversity in Canada: adaptation options in the face of climate change », *Biodiversity,* vol. 9, nº 3-4, 2008, pp. 47-58.

Johnston, M. et H. Hesseln. « Climate change adaptive capacity of the Canadian forest sector », *Forest Policy and Economics,* vol. 24, 2012, pp. 29-34.

Johnston, M., T. Williamson, T. Nelson, L. Van Damme, A. Ogden et H. Hesseln. « Adaptive capacity of forest management systems on publicly owned forest landscapes in Canada », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice,* J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, vol. 42, 2011, pp. 267-278.

Kates, R.W., W.R. Travis et T.J. Wilbanks. « Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 109, nº 19, 2012, pp. 7156-7161.

Klein, R.J.T., S. Huq, F. Denton, T.E. Downing, R.G. Richels, J.B. Robinson et F.L. Toth. « Inter-relationships between adaptation and mitigation », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability,* Contribution du Groupe de travail II au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 745-777.

Kolbert, E. *Watching Sandy, ignoring climate change,* 2012, <www.newyorker.com/online/blogs/newsdesk/2012/10/watching-hurricane-sandy-ignoring-climate-change.html>.

Kovacs, P. « Overview: climate change adaptation in industry », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice,* J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

Kulkarni, T., J.M. Watkins, S. Nickels et D.S. Lemmen. « Canadian International Polar Year (2007-2008): an introduction », *Climatic Change,* vol. 115, 2012, pp. 1-11.

Lantz, V., R. Trenholm, J. Wilson et W. Richards. « Assessing market and non-market costs of freshwater flooding due to climate change in the community of Fredericton, Eastern Canada », *Climatic Change,* vol. 110, nº 1-2, 2012, pp. 347-372.

Leclerc, L. *Background document and workshop report: measuring progress on adaptation in Canada,* rapport final rédigé pour Ouranos Inc., 2012, 32 p.

Leger, W. et J. Read. « Adaptive management: strategy and legacy », dans *Lake Superior Regulation: Addressing Uncertainty in Upper Great Lakes Water Levels,* rapport final rédigé pour le Groupe d'étude international des Grands Lacs d'amont, Adaptive Management Technical Work Group, 2012, 167 p.

Lemieux, C.J., J.L. Thompson, J. Dawson et R.M. Schuster. « Natural resource manager perceptions of agency performance on climate change », *Journal of Environmental Management,* vol. 114, 2013, pp. 178-189.

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

Lesnikowski, A.C., J.D. Ford, L. Berrang-Ford, J.A. Paterson, M. Barrera et S.J. Heymann. « Adapting to health impacts of climate change: a study of UNFCCC Annex I parties », *Environmental Research Letters,* vol. 6, 044009, 2011.

Lim, B. et E. Spanger-Siegfried (éd.) *Adaptation policy frameworks for climate change: developing strategies, policies and measures*, Programme des Nations Unies pour le développement, New York et Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

Linnenluecke, M.K., A. Griffiths et M. Winn. « Extreme weather events and the critical importance of anticipatory adaptation and organizational resilience in responding to impacts », *Business Strategy and the Environment,* vol. 21, 2012, pp. 17-32.

Lynam, T. *Making sense of what enables and what constrains adaptation to climate change,* 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australie, 2011, pp. 12-16.

MacLellan, J.I. « Climate change adaptation for neophytes », dans *Linking Climate Models to Policy and Decision-making,* A. Fenech et J.I. MacLellan (éd.), Environnement Canada, Toronto, Canada, 2008, pp. 37-80.

McIlgorn, A., S. Hanna, G. Knapp, P. Le Floc'h, F. Millerd et P. Minling. « How will climate change alter fishery governance? Insights from seven international case studies ». *Marine Policy,* vol. 34, 2010, pp. 170-177.

McLeman, R., M. Brklacich, M. Woodrow, K. Vodden, P. Gallaugher et R. Sander-Regier. « Opportunities and Barriers for Adaptation and Local Adaptation Planning in Canadian Rural and Resource-based Communities », *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice,* J. Ford et L. Berrang-Ford, Springer, New York, New York, 2011.

Merrill, S. et G. Zwicker. *Capacity for climate change adaptation in New Brunswick municipalities,* Environmental Trust Fund Project No. 090179, mars, 2010.

Mills, B. (éd.) *SERA North: economics of weather, climate and climate change, synthèse d'une réunion tenue du 21 au 22 février,* Waterloo (Ontario), Canada, Environnement Canada, Adaptation and Impacts Research Section (AIRS), Waterloo, Canada, 2008, 64 p.

Ministère de la Sécurité publique du Québec. *Concepts de base en sécurité civile,* Gouvernement du Québec, 2008.

Moody, P. et C. Brown. « Modeling stakeholder-defined climate risk on the Upper Great Lakes », *Water Resources Research,* vol. 48, W10524, 2012.

Moser, S. et J. Ekstrom. « A framework to diagnose barriers to climate change adaptation », *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 107, nº 51, 2010.

Mullan, M., N. Kingsmill, A.M. Kramer et S. Agrawala. « Planification nationale de l'adaptation : L'expérience des pays de l'OCDE », *Documents de travail sur l'environnement de l'OCDE,* nº 54, Éditions OCDE, 2013.

Murdock, T.Q. et G. Burger. *Research plan for regional climate impacts,* Pacific climate impacts consortium, 2010, 39 p.

Nelitz, M., S. Boardley et R. Smith. *Tools for climate change vulnerability assessments for watersheds,* rapport préparé par ESSA Technologies Ltd. pour le Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2013.

O'Brien, K. « Global environmental change II: from adaptation to deliberate transformation », *Progress in Human Geography,* vol. 36, nº 5, 2012, pp. 667-676.

OCCIAR (Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources). *Welcome to OCCIAR,* Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources, 2013, <www.climateontario.ca/index.php>.

Ochuodho, T.O., V.A. Lantz, P. Lloyd-Smith et P. Benitez. « Regional economic impacts of climate change and adaptation in Canadian forests: a CGE modeling analysis », *Forest Policy and Economics,* vol. 25, 2012, pp. 100-112.

OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques). Policy forum on adaptation to climate change in OECD countries: summary note, du 10 au 11 mai 2012, Organisation de coopération et de développement économiques, Paris, 2012.

Ogden, A.E. et J.L. Innes. « Application of structured decision making to an assessment of climate change vulnerabilities and adaptation options for sustainable forest management », *Ecology and Society*, vol. 14, nº 1, art. 11, 2009.

Olar, M. et C. Lessard. *Analyse économique des impacts des changements climatiques sur les étiages et leurs conséquences sur divers usages de l'eau dans le basin versant de la rivière Yamaska,* Ouranos, 2013.

Park, S.E., N.A. Marshall, E. Jakku, A.M. Dowd, S.M. Howden, E. Mendham et A. Fleming. « Informing adaptation responses to climate change through theories of transformation », *Global Environmental Change,* vol. 22, nº 1, 2012, pp. 115-126.

Parkins, J.R. et N.A. MacKendrick. « Assessing community vulnerability: a study of the mountain pine beetle outbreak in British Columbia, Canada », *Global Environmental Change*, vol. 17, 2007, pp. 460-471.

Pearce, T., J.D. Ford, F. Duerden, B. Smit, M. Andrachuk, L. Berrang-Ford et T. Smith. « Advancing adaptation planning for climate change in the Inuvialuit Settlement Region (ISR): a review and critique », *Regional Environmental Change,* vol. 11, 2011, pp. 1-17.

Peck, A.M., E.A. Bowering et S.P. Simonovic. « A flood risk assessment to municipal infrastructure due to changing climate part II: case study », *Urban Water Journal,* 2013.

Pennesi, K., J. Arokium et G. McBean. « Integrating local and scientific weather knowledge as a strategy for adaptation to climate change in the Arctic », *Mitigation and Adaptation Strategies to Global Change,* vol. 17, 2012, pp. 897-922.

Picketts, I.M., A.T. Werner, T.Q. Murdock, J. Curry, S.J. Déry et D. Dyer. « Planning for climate change adaptation: lessons learned from a community-based workshop », *Environmental Science and Policy*, vol. 17, 2012, pp. 82-93.

Picketts, I., S.J. Déry et J.A. Curry. « Incorporating climate change adaptation into local plans », *Journal of Environmental Planning and Management*, 2013.

Plummer, R., J. Velaniškis, D. de Grosbois, R.D. Kreutzwiser et R. de Loë. « The development of new environmental policies and processes in response to a crisis: the case of the multiple barrier approach for safe drinking water », *Environmental Science and Policy*, vol. 13, nº 6, 2010, pp. 535-548.

Preston, B., R. Westaway et E. Yuen. « Climate adaptation planning in practice: an evaluation of adaptation plans from three developed nations », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2010, pp. 1-32.

Reisinger, A., D. Wratt, S. Allan et H. Larsen. « The role of local government in adapting to climate change: lessons from New Zealand », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice,* J.D Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, New York, 2011.

Ressources naturelles Canada. *Vulnérabilité de la zone côtière dans la municipalité régionale de Halifax,* Ressources naturelles Canada, Programme de géoscience des changements climatiques, Ottawa (Ontario), 2009.

Ressources naturelles Canada. *Plateforme d'adaptation,* Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ontario),2012, <http://www.rncan.gc.ca/environnement/impacts-adaptation/plateforme-adaptation10028>.

Ressources naturelles Canada. *Impacts et adaptation : fournir aux Canadiens les outils nécessaires pour s'adapter aux changements climatiques,* Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ontario), 2013a, <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Kd3lQMCuE64J:www.rncan.gc.ca/sciences-terre/changements-climatiques/adaptation-collectivites/108+&cd=1&hl=en&ct=clnk&gl=ca>.

Ressources naturelles Canada. *RAC and tools synthesis state of play summary,* Ressources naturelles Canada, Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ottawa (Ontario), 2013b, 3 p.

Richardson, G. et D.S. Lemmen. « Lessons learned from Canadian municipal climate change adaptation case studies », *Plan Canada,* 2010, pp. 26-28.

Richardson, G. et J. Otero. *Outils d'aménagement locaux pour l'adaptation aux changements climatiques,* Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ontario), 2012.

Richardson, G.R.A. *S'adapter aux changements climatiques : une introduction à l'intention des municipalités canadiennes,* Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ontario), 2010, 40 p.

Rickards, L. et S.M. Howden. « Transformational adaptation: agriculture and climate change », *Crop and Pasture Science,* vol. 63, 2012, pp. 240-250, <http://www.publish.csiro.au/nid/40/paper/CP11172.htm>.

Robinson, P. et C. Gore. *The spaces in between: a comparative analysis of municipal climate governance and action,* présenté à la conférence annuelle de l'American Political Science Association, du 1er au 4 septembre 2011, Seattle, Washington, 2011.

Rodgers, C. et K. Behan. *Accelerating adaptation in Canadian communities: case studies,* Clean Air Partnership, juillet 2012, 2012.

Samarawickrema, A. et S. Kulshreshtha. « Value of irrigation water for drought proofing in the South Saskatchewan River Basin (Alberta) », *Canadian Water Resources Journal,* vol. 33, nº 3, 2008, pp. 273-282.

Santé Canada. *Élaboration de systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur afin de protéger la santé : guide des pratiques exemplaires*, Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2012, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/climat/response-intervention/response-intervention-fra.pdf>.

Santé Canada. *Changements climatiques et santé,* Santé Canada, Ottawa (Ontario). 2013, <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/climat/index-fra.php>.

Sauchyn. D. et S. Kulshrethra. « Prairies », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007,* D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 275-328.

Séguin, J. *Santé et changements climatiques : évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada,* Santé Canada, Ottawa (Ontario), 2008.

Shaw, A., S. Sheppard, S. Burch, D. Flanders, A. Weick, J. Carmichael, J. Robinson et S. Cohen. « Making local futures tangible – synthesizing downscaling and visualizing climate change scenarios for participatory capacity building », *Global Environmental Change,* vol. 19, 2009, pp. 447-463.

Sheppard, S.R.J., A. Shaw, D. Flanders, S. Burch, A. Wiek, J. Carmichael, J. Robinson et S. Cohen. « Future visioning of local climate change: a framework for community engagement and planning with scenarios and visualisation », *Futures,* vol. 43, 2011, pp. 400-412.

Smit, B. (éd.) *Adaptation to climatic variability and change, report of the task force on climate adaptation: the Canadian climate program,* Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Guelph (Ontario), 1993.

Smit, B. et O. Pilifosova. « Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity », dans *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability,* Contribution du Groupe de travail II au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, J.J. McCarthy, O.F. Canzianni, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2001, pp. 877-912.

Smit, B. et J. Wandel. « Adaptation, adaptive capacity and vulnerability », *Global Environmental Change,* vol. 16, nº 3, 2006, pp. 282-292.

Spencer, C., G. Richardson, C. Arsenault, P. Kertland, N. O'Dea et M.A. Wilson. *The role of collaboration in effective adaptation decision-making,* Second Nordic International Conference on Climate Change Adaptation, résumés, 2012, pp. 22-23.

Steenhof, P. et E. Sparling. « The role of codes, standards, and related instruments in facilitating adaptation to climate change », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice,* J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

Stocker, L., G. Burke, D. Kennedy et D. Wood. « Sustainability and climate adaptation: using Google Earth to engage stakeholders », *Ecological Economics,* vol. 80, 2012, pp. 15-24.

Swanson, D., S. Barg, S. Tyler, H. Venema, S. Tomar, S. Bhadwal, S. Nair, D. Roy et J. Drexhage. « Seven tools for creating adaptive policies », *Technological Forecasting and Social Change,* vol. 77, nº 6, 2010, pp. 924-939.

Thomson, G. « Thomson: Alberta must adapt and upgrade in disasters' wake », *Edmonton Journal,* 6 juillet, 2013.

Tompkins, E.L., W.N. Adger, E. Boyd, S. Nicholson-Cole, K. Weatherhead et N. Arnell. « Observed adaptation to climate change: UK evidence of transition to a well-adapting society », *Global Environmental Change,* vol. 20, nº 4, 2010, pp. 627-635.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Franc Nord : Adaptation de l'infrastructure du Nord canadien au changement climatique,* Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2009.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Degrés de réchauffement : les enjeux de la hausse du climat pour le Canada,* Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2010.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Le prix à payer : répercussions économiques du changement climatique pour le Canada,* Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2011.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique (études de cas),* Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2012a.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique (rapport-conseil),* Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2012b.

UKCIP (UK Climate Impacts Program). *The UKCIP adaptation wizard v. 3.0,* UK Climate Impacts Program, Oxford, Royaume-Uni, 2010.

Van Damme, L. « Can the forest sector adapt to climate change? », *The Forestry Chronicle,* vol. 84, 2008, pp. 633-634.

Vasseur, L. et N. Catto. « Canada atlantique », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007,* D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 119-170.

Ville de Halifax. *Halifax Harbour Plan,* 2005, <www.halifax.ca/harboursol/documents/HalifaxHarbourPlan_000.pdf>.

Ville de Toronto. *Change is in the air: climate change, clean air and sustainable energy action plan,* 2007, <www.toronto.ca/changeisintheair/pdf/clean_air_action_plan.pdf>.

Ville de Toronto et Clean Air Partnership. *Ahead of the storm – preparing Toronto for climate change,* 2008, <www.toronto.ca/teo/pdf/ahead_of_the_storm.pdf>.

Webb, R. et J. Beh. *Leading adaptation practices and support strategies for Australia: an international and Australian review of products and tools,* National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast, 2013, 120 p.

Webster, A., F. Gagnon-Lebrun, C. Desjarlais, J. Nolet, C. Sauvé et S. Uhne. *L'évaluation des avantages et des coûts de l'adaptation aux changements climatiques,* Ouranos, 2008.

Wellstead, J. *Climate adaptation in Canadian communities – scoping report,* rapport préliminaire final, commandé par la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 2011.

Wellstead, A.M. et R.C. Stedman. « Climate change policy capacity at the sub-national government level », *Journal of Comparative Policy Analysis: Research and Practice,* vol. 13, nº 5, 2011, pp. 461-478.

Williams, R.A. et K. McNutt. « Climate change adaptation and policy capacity in the Canadian finance sector: a meso analysis », *Review of Policy Research,* vol. 30, nº 1, 2013, pp. 91-113.

Williamson, T.B., S.J. Colombo, P.N. Duinker, P.A. Gray, R.J. Hennessey, D. Houle, M. JOhnston, A. Ogden et D.L. Spittlehouse. *Les changements climatiques et les forêts du Canada : des impacts à l'adaptation,* Réseau de gestion durable des forêts et Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, 2009, 114 p.

Williamson, T., H. Hesseln et M. Johnston. « Adaptive capacity deficits and adaptive capacity of economic systems in climate change vulnerability assessment », *Forest Policy and Economics,* vol. 15, 2012, pp. 160-166.

Willows, R.I. et R.K. Connell (éd.) *Climate adaptation: risk uncertainty and decision-making,* UKCIP Technical Report, United Kingdom Climate Impacts Programme, Oxford, 2003.

Wolfe, J. « Climate Change Adaptation as a Social Process », dans *Climate Change Adaptation in Developed Nations: from Theory to Practice,* J. Ford et L. Berrang-Ford (éd.), Springer, New York, 2011.

Wolfe, J., I. Allice et T. Bell. « Values, climate change and implications for adaptation: Evidence from two communities in Labrador, Canada », *Global Environmental Change,* vol. 23, 2013, pp. 548-562.

Yohe, G. et R.S.J. Tol. « Indicators for social and economic coping capacity – moving toward a working definition of adaptive capacity », *Global Environmental Change,* vol. 12, 2002, pp. 25-40.

NOTES EN FIN DE CHAPITRE

[1] www.arcticnet.ulaval.ca/research/theme1.php
[2] www.env.gov.bc.ca/cas/adaptation/pdf/Adaptation_Strategy.pdf
[3] www.pics.uvic.ca/about
[4] www.for.gov.bc.ca/het/climate/actionplan/index.htm
[5] www.environment.alberta.ca/02248.html
[6] www.srd.alberta.ca/MapsPhotosPublications/Publications/ClimateChangeAdaptationFramework.aspx
[7] www.environment.alberta.ca/03136.html
[8] www.parc.ca/saskadapt/
[9] www.energy.ca/users/getdownload.asp?DownloadID=621
[10] www.gov.mb.ca/beyond_kyoto/
[11] www.gov.mb.ca/asset_library/en/beyond_kyoto/adapting_to_climate_change.pdf
[12] www.gov.mb.ca/ia/plups/pdf/cca.pdf
[13] www.ene.gov.on.ca/stdprodconsume/groups/lr/@ene/@resources/documents/resource/stdprod_085426.pdf
[14] www.mnr.gov.on.ca/fr/Business/ClimateChange/2ColumnSubPage/STDPROD_094024.html
[15] www.mddefp.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf
[16] www.env.gov.yk.ca/publications-maps/documents/YG_Climate_Change_Action_Plan.pdf
[17] www.anorthernvision.ca/strategy/
[18] www.env.gov.yk.ca/publications-maps/documents/ccap_progressreport_eng_2012.pdf
[19] www.env.gov.yk.ca/publications-maps/documents/ccap_progressreport_eng_2012.pdf
[20] www.nwtclimatechange.ca/content/actions
[21] www.ikadapt.ca/wp-content/uploads/2013/01/NWT_CC_newsletter2_PRINT.pdf
[22] env.gov.nu.ca/sites/default/files/3154-315_climate_english_sm.pdf
[23] www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Climate-Climatiques/2007-2012PlanActionSommaire.pdf
[24] www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Climate-Climatiques/ActivitesScienceAdaptationAtlantique.pdf
[25] www.atlanticadaptation.ca/acasa/sites/discoveryspace.upei.ca.acasa/files/New%20Brunswick%20Climate%20Change%20Adaptation%20Project%20Profiles%20-%20February%202013.pdf
[26] www.atlanticadaptation.ca/new-brunswick-communities
[27] www.climatechange.gov.ns.ca/files/03/32/CCAP_final3_FOR_WEB.pdf
[28] www.gov.ns.ca/nse/climate-change/docs/NSCCAF_About.pdf
[29] www.nsinfrastructure.ca/uploads/Gas_Tax_PAER_website_2011.pdf
[30] www.gov.pe.ca/photos/original/env_globalstr.pdf
[31] www.atlanticadaptation.ca/regional-climatescenarios
[32] www.atlanticadaptation.ca/prince-edward-island-communities
[33] www.exec.gov.nl.ca/exec/cceeet/publications/climate_change.pdf
[34] www.env.gov.nl.ca/env/climate_change/vultool/vultool_toc.html
[35] www.municipalnl.ca/userfiles/files/DEC-00306-Infrastructure%20Workbook%20(Web-Email%20Quality).pdf