

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 relatifs 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 ponts 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 partie¹. 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.

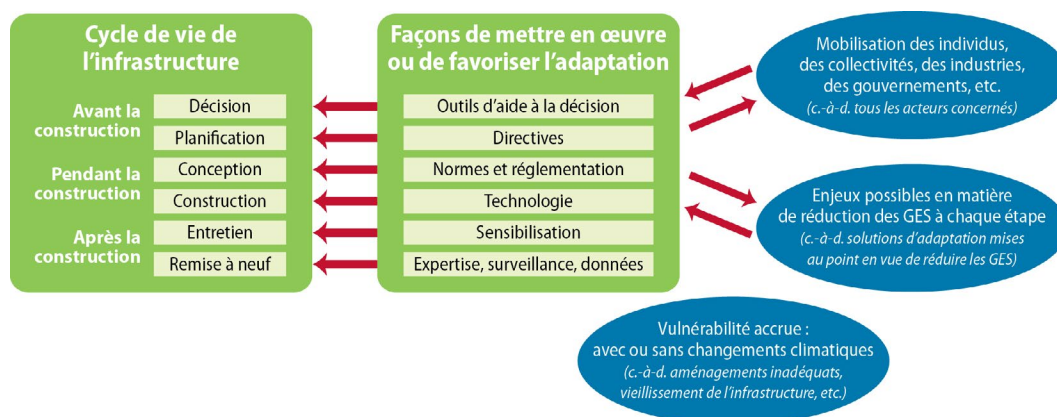


FIGURE 1 : L'adaptation dans le cycle de vie de l'infrastructure (source : Larrivée et Simonet, 2007).

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.

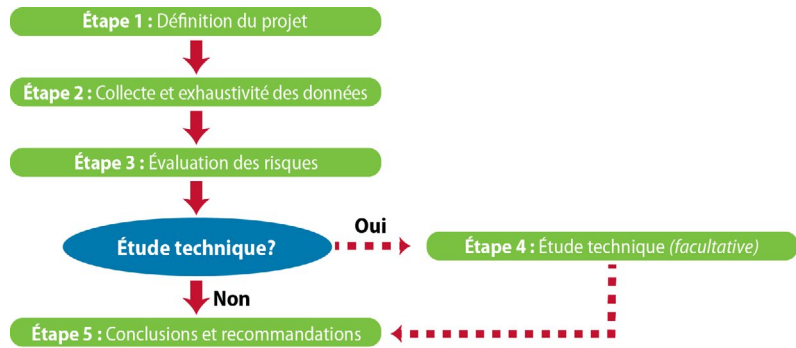


FIGURE 2 : Aperçu du processus en cinq étapes du CVIIP permettant d'analyser la vulnérabilité technique d'une infrastructure particulière face à des paramètres climatiques actuels et futurs (source : CVIIP, 2007).

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).

Type de système	Évaluation				
	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 reconstruisant 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 influencer 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			
<ul style="list-style-type: none"> Bassins versants Barrage et réservoir de Glenmore Barrages et réservoirs de Ghost et de Bearspaw 		<ul style="list-style-type: none"> Hausse de la température minimale Inondation Sécheresse 	<ul style="list-style-type: none"> Changements du débit fluvial Diminution de la couverture neigeuse Phénomènes cumulés – feux de forêt
Stations de pompage et de captage d'eau brute			
<ul style="list-style-type: none"> Station de captage et de pompage d'eau brute de Glenmore Stations de captage et d'élévation d'eau brute de Bearspaw 		<ul style="list-style-type: none"> Inondation Augmentation des cycles de gel et de dégel 	
Processus de traitement			
<ul style="list-style-type: none"> Installations de prétraitement Filtration Désinfection 	<ul style="list-style-type: none"> Stockage Systèmes de dosage des produits chimiques Traitement des résidus 	<ul style="list-style-type: none"> Phénomènes cumulés – feux de forêt Hausse de la température minimale Inondation Sécheresse 	
Stockage et distribution			
<ul style="list-style-type: none"> Infrastructure linéaire Vannes/canalisation 		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des cycles de gel et de dégel 	
Infrastructure de soutien			
<ul style="list-style-type: none"> Soutien de l'infrastructure lourde Administration/exploitation Électricité et transmission Transport 		<ul style="list-style-type: none"> 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 connue 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.

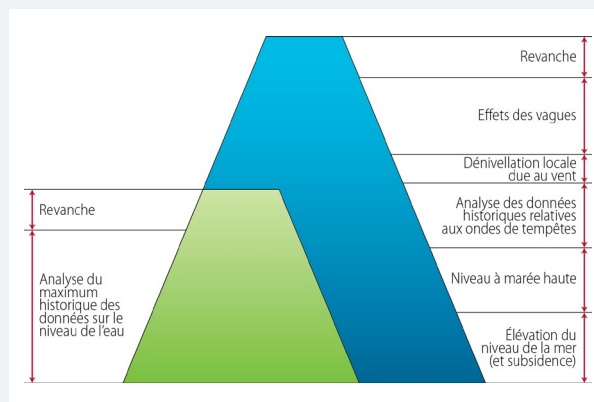


FIGURE 3 : Différences de conception entre les anciens et les nouveaux modèles de digues marines (source : BC Ministry of Forest, Lands and Natural Resource Operations, 2012).

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 poudrière 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 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. Une 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 minimale 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 CVIP. 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 infrastructure assessment report*; AMEC Environment & Infrastructure, AMEC Environment and Infrastructure, n° 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, n° 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-clarenceville-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 changements 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, n° 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_ft.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.uepei.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, n° 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, n° 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/ef/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 of 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/ef/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/ef/casedocs/fraser/Metro%20Vancouver%20-%20Fraser%20Sewerage_Final%20Report.pdf>.
- Kleindorfer, M., M. Möderi, R. Sittenfrei, C. Ulrich 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.
- Larivée, C. et G. Simonet. « Testing the assumptions: assessing infrastructures vulnerability to climate change », *Municipal World*, vol. 117, n° 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)*, 63^e Conférence annuelle de la Société canadienne de géotechnique et 6^e 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 Brunswick: 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.uepei.ca.acasa/files/Yarmouth%20Part%202020-%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. Briene, 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, n° 3, 2010.
- Marsalek, J. et H. Schreier. « Innovation in stormwater management in Canada: the way forward », *Water Quality Research Journal of Canada*, vol. 44, n° 1, v-x, 2009.
- McBean, E. et H. Motie. « 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, n° 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.
- Miller, 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.
- Miller, 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, n° 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, n° 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, n° 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. Schroerer 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, n° 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 au 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.mrfce.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#ixzz2UeLlRjzn>.
- 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.