



6 · Ontario

CHAPITRE 6 : ONTARIO

AUTEURS PRINCIPAUX :

CLARENCE WOUDSMA¹
WILL TOWNS²

COLLABORATEURS :

JOCELYN BEATTY (UNIVERSITÉ DE WATERLOO),
QUENTIN CHIOTTI (METROLINX),
HANI FARGHALY (MINISTÈRE DES
TRANSPORTS DE L'ONTARIO),
SHARI GRADY (CORPORATION DE GESTION
DE LA VOIE MARITIME DU SAINTLAURENT),
DEREK GRAY (AUTORITÉ AÉROPORTUAIRE
DU GRAND TORONTO),
MEL WHITE (GO TRANSIT)

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Woudsma, C., et Towns, W. (2017). Ontario. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 153-197). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ École de la planification, Université de Waterloo, Waterloo (ON)

² École de la planification, Université de Waterloo, Waterloo (ON) et Transports Canada

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions.....	155
1.0 Introduction et aperçu de la région.....	155
1.1 Géographie.....	157
1.2 Caractéristiques sociales et démographiques.....	157
1.3 Caractéristiques économiques.....	158
2.0 Aperçu du système de transport de l'Ontario.....	159
2.1 Transport routier.....	159
2.2 Transport ferroviaire.....	161
2.3 Transport maritime.....	162
2.4 Transport aérien.....	162
3.0 Tendances et projections climatiques.....	163
3.1 Tendances climatiques observées.....	163
3.2 Projections climatiques.....	164
4.0 Transport routier en Ontario.....	170
4.1 Répercussions climatiques antérieures.....	170
4.2 Risques climatiques futurs.....	171
4.3 Pratiques d'adaptation.....	172
5.0 Transport ferroviaire en Ontario.....	177
5.1 Répercussions climatiques antérieures.....	177
5.2 Risques climatiques futurs.....	178
5.3 Pratiques d'adaptation.....	178
6.0 Transport aérien.....	181
6.1 Répercussions climatiques antérieures.....	181
6.2 Risques climatiques futurs.....	181
6.3 Pratiques d'adaptation.....	182
7.0 Transport maritime en Ontario.....	186
7.1 Répercussions climatiques antérieures.....	186
7.2 Risques climatiques futurs.....	186
7.3 Pratiques d'adaptation.....	187
8.0 Une approche multimodale aux transports et à l'adaptation.....	192
9.0 Les lacunes dans les connaissances et les contraintes liées à la prise de décisions adaptatives en Ontario.....	192
10.0 Conclusions.....	193
Références.....	194

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- **Les récents événements météorologiques extrêmes (en été et en hiver) démontrent la vulnérabilité des réseaux de transport de l'Ontario aux effets des conditions climatiques.** Les inondations des routes et des voies ferrées en juillet 2013 ainsi que la tempête de verglas de décembre 2013 dans le sud de l'Ontario ont non seulement provoqué d'importants dommages et d'importantes perturbations des déplacements, mais ont aussi favorisé une prise de conscience organisationnelle accrue de la vulnérabilité aux conditions météorologiques extrêmes de plus en plus fréquentes dans la région. À la suite de ces événements, les organismes publics ont mené de multiples initiatives visant à augmenter la résilience, en particulier pour les routes et les voies ferrées.
- **La hausse des températures et les changements dans la configuration des précipitations devraient contribuer à changer (à la hausse ou à la baisse) les niveaux d'eau dans le bassin des Grands Lacs, ce qui a des implications sur la capacité de navigation sur le réseau GrandsLacsVoie maritime du SaintLaurent.** En raison des fluctuations observées au cours des 20 à 30 dernières années, il est difficile de prédire la direction des changements à long terme; toutefois, le transport de marchandises pourrait adopter d'autres modes de transport advenant que survienne à nouveau une tendance à la baisse des niveaux d'eau dans les Grands Lacs.
- **La durée de période d'accès pour les routes d'hiver dans le Nord de l'Ontario pourrait réduire en raison de la hausse des températures.** Ces changements entraînent des répercussions économiques pour les collectivités éloignées du Nord; le remplacement du mode de transport par camion par le transport aérien pourrait s'avérer nécessaire si des investissements importants ne sont pas faits dans une infrastructure routière plus résiliente dans le Nord de l'Ontario.
- **Les praticiens en Ontario ont commencé à évaluer la vulnérabilité de leurs actifs, et dans certains cas, à adapter leur infrastructure et leurs opérations en vue des changements climatiques.** Les efforts déployés par le ministère des Transports de l'Ontario (routes et ponts), Metrolinx (voies ferrées), l'Autorité aéroportuaire du Grand Toronto (aviation), et la Corporation de gestion du réseau Grands LacsVoie maritime du SaintLaurent (navigation maritime) témoignent de la diversité des pratiques d'adaptation employées en Ontario.

1.0 INTRODUCTION ET APERÇU DE LA RÉGION

L'Ontario est la deuxième province en importance au Canada en matière de superficie, et la plus importante en matière de population. Bien que la densité de sa population (14,1 personnes par km²) soit nettement plus élevée que la moyenne nationale (3,7 personnes par km²) (Statistique Canada, 2012), de nombreuses régions de la province sont éloignées, isolées des centres d'emploi, des marchés urbains et des centres de transport internationaux. Le maintien de systèmes de transport routier, maritime et aérien efficaces et économiques pour les passagers et les marchandises dans ce contexte est complexe. Les changements climatiques rendent ces défis encore plus complexes. Les configurations des températures et des précipitations devraient changer considérablement d'ici au milieu du siècle, et l'augmentation prévue de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes présente des risques importants pour le système de transport de l'Ontario (par exemple des routes inondées, des baisses des niveaux d'eau) et de possibles répercussions socioéconomiques (par exemple les coûts, les perturbations) en l'absence de pratiques d'adaptation efficaces.

Les effets des changements climatiques ne seront pas tous négatifs. Comme la plupart des recherches se sont attardées sur les impacts négatifs potentiels des changements climatiques, il est possible que les effets positifs soient mal compris (Chiotti et Lavender, 2008). Bien que le présent chapitre aborde les possibilités et les avantages potentiels qui pourraient découler des changements climatiques, l'accent a été placé sur les risques liés au transport.

La discussion sur le réseau de transport de l'Ontario traitera des trois sousrégions distinctes de la province (le Nord, le Centre et le Sud [figure 1]) afin de refléter sa diversité géographique, sociale et économique; ses différentes capacités d'adaptation aux changements climatiques; et les mesures d'adaptation uniques qui doivent être adoptées. Bien que la capacité d'adaptation de l'Ontario soit relativement élevée en raison de l'ensemble de sa richesse économique, de son niveau d'éducation, de ses infrastructures, de son capital social et de ses institutions, cette capacité n'est pas répartie uniformément dans toute la province (Chiotti et Lavender, 2008). Chaque sousrégion est brièvement décrite dans la section suivante en fonction de leurs caractéristiques environnementales, sociales et économiques. Il fait noter que même si ce chapitre reconnaît l'importance des réseaux de transport urbains de l'Ontario, les effets des changements climatiques sur les municipalités et les pratiques d'adaptation sont abordés dans le chapitre 9.

Pour la rédaction du présent chapitre, il a fallu procéder à un examen approfondi à la fois de la littérature scientifique et de la documentation parallèle (c.à.d. non évaluée par les pairs), ainsi que des entrevues avec des praticiens de transport à travers la province. Les conclusions et les discussions reflètent l'état actuel des connaissances sur l'adaptation aux changements climatiques en Ontario; cependant, elles ne devraient pas être considérées comme un recensement exhaustif des événements, des effets et des pratiques d'adaptation.

Figure 1 : Lignes de délimitation des trois sousrégions de l'Ontario. (Source : Ressources naturelles Canada)



1.1 GÉOGRAPHIE

Sousrégion du Sud

La sousrégion du Sud de l'Ontario s'étend de l'endroit à l'extrême sud du Canada (pointePelée) à l'est de la frontière du Québec. La topographie varie de plate dans le SudOuest et dans le SudEst, à accidentée et vallonnée dans la région de l'escarpement du Niagara (Chiotti et Lavender, 2008). La région comporte huit des 16 centres métropolitains les plus densément peuplés du Canada, y compris les régions urbaines de la région du Grand Golden Horseshoe (qui ceinture la région du Grand Toronto et de Hamilton), et la Ville d'Ottawa, à l'est. Cette sousrégion présente une importante modification du paysage pour les réseaux de transport, le développement urbain et l'agriculture. Le SudOuest de l'Ontario présente un climat tempéré humide, avec des étés chauds et des hivers froids. Pour les collectivités dans ce domaine, les Grands Lacs ont un effet modérateur sur la température, exercent une influence sur les configurations de convection atmosphérique (et donc sur la distribution et l'intensité des précipitations) au cours de l'été, et produisent un effet « ceinture de neige » en hiver (Baldwin et coll., 2011; Gula et Peltier, 2012). Le SudEst de l'Ontario se caractérise par des hivers relativement plus longs et des étés plus courts que dans le SudOuest, bien que les niveaux de précipitations annuelles soient comparables (Baldwin et coll., 2011).

Sousrégion du Centre

La sousrégion du Centre, qui comprend Sudbury, Thunder Bay et Timmins, est composée presque entièrement de terrain boisé et rocheux du bouclier précambrien. Ses étés sont doux et humides, et les précipitations sont uniformément réparties à travers les saisons (Baldwin et coll., 2011). On y trouve de nombreuses collectivités à faible densité tributaires des ressources naturelles, notamment dans les secteurs forestier, des pâtes et papiers, de l'exploitation minière et du tourisme. La région renferme les deux tiers du réseau routier de l'Ontario, qui, avec le réseau ferroviaire, joue un rôle névralgique pour relier les producteurs de ressources de la région aux marchés d'autres régions dans la province, du pays et sur le continent (Chiotti et Lavender, 2008). Les collectivités éloignées et les industries d'extraction de la sousrégion dépendent également fortement de plus de 3 000 km de routes à accès saisonnier pour le bien-être économique, la stabilité sociale et le transport de surface des marchandises en hiver (ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario, 2013).

Sousrégion du Nord

La sousrégion du Nord s'étend de la ligne de délimitation supérieure du Centre de l'Ontario jusqu'aux côtes de la baie d'Hudson et de la baie James. La topographie et le relief sont généralement bas et mal drainés, comportant la majorité du pergélisol dans les sols cryosoliques (c.à.d. gelés) du nordouest de la province (Baldwin et coll., 2011). Le Nord de l'Ontario présente un climat subarctique, avec de longs hivers rigoureux et de courts étés frais. Il n'est pas rare que la température atteigne -40°C (bien que la température varie énormément durant l'année), et les précipitations annuelles sont plus faibles que dans les autres sousrégions (Baldwin et coll., 2011). Les collectivités du Nord sont également isolées, et bon nombre d'entre elles comptent uniquement sur l'aviation comme moyen de connectivité.

1.2 CARACTÉRISTIQUES SOCIALES ET DÉMOGRAPHIQUES

L'Ontario est la province présentant la plus forte croissance au Canada, avec une population estimée de 13,8 millions en 2015 (Statistique Canada, 2014, tableau 1). La croissance importante devrait se poursuivre pour une bonne partie du XXI^e siècle, ce qui a des implications sur les demandes futures sur les systèmes de transport de passagers et de marchandises à travers la province. On prévoit que 17,4 millions de personnes habiteront en Ontario en 2036 (ministère des Finances de l'Ontario, 2013).

Tableau 1 : Projections démographiques pour 2036 pour chaque sousrégion, selon les données de recensement de Statistique Canada et du ministère des Finances de l'Ontario. (Source : ministère des Finances de l'Ontario, 2013)³

Sousrégion	Population en 2014	Population en 2036	Taux de variation 2014 à 2036
Nord	35 435	46 203	+30,3 %
Centre	948 165	965 817	+1,8 %
Sud	12 522 320	16 359 820	+30,6 %
Total pour l'Ontario	13 505 920	17 371 840	+28,6 %

Quatre-vingt-neuf % de la population de la province vit dans les régions métropolitaines de recensement (RMR) ou dans les agglomérations de recensement (AR) (Statistique Canada, 2012). Comme la majorité de la croissance future de la province se poursuivra en étant concentrée dans les zones urbaines, les Ontariens vivront et travailleront de plus en plus dans des quartiers plus denses et plus accessibles par transport en commun. Le Grand Golden Horseshoe (GGH) dans le Sud de l'Ontario absorbera la majeure partie de cette croissance, principalement par le truchement de l'immigration (ministère des Finances de l'Ontario, 2013).

L'Ontario abrite également la plus importante population autochtone au pays, soit environ 242 495 des 1 172 785 membres des Premières Nations, des Inuits et des Métis du Canada (Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 2014). Les populations autochtones des sousrégions du Centre et du Nord ont des vulnérabilités uniques aux effets des changements climatiques. Par exemple, une communauté des Premières Nations de l'Ontario sur quatre n'est accessible que par voie aérienne à longueur d'année, ou par la route de glace ou la route d'hiver en saison.

1.3 CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES

Les économies du Centre et du Nord de l'Ontario sont semblables à bien des égards. Alors que les activités économiques traditionnelles comme l'exploitation minière demeurent importantes dans les deux sousrégions, des efforts sont déployés afin de diversifier l'économie (ministère de l'infrastructure et ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario, 2011).

Le Centre de l'Ontario contient la majorité des 40 mines opérationnelles de la province, ce qui représente des possibilités économiques considérables (ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario, 2013). Thunder Bay est un centre névralgique de transport aérien, ferroviaire et de navigation maritime, tandis que l'assise économique de Sudbury comprend l'exploitation minière, les ressources de traitement, le tourisme et l'éducation. Les principales industries du Nord de l'Ontario comprennent l'exploitation minière et le tourisme. Le Plan de croissance du Nord de l'Ontario (ministère de l'infrastructure et ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario, 2011) couvre la zone géographique des deux sousrégions, et propose des mesures pour une plus grande diversification (à savoir l'amélioration du secteur des services et l'augmentation de la production à valeur ajoutée des matières premières destinées à l'exportation).

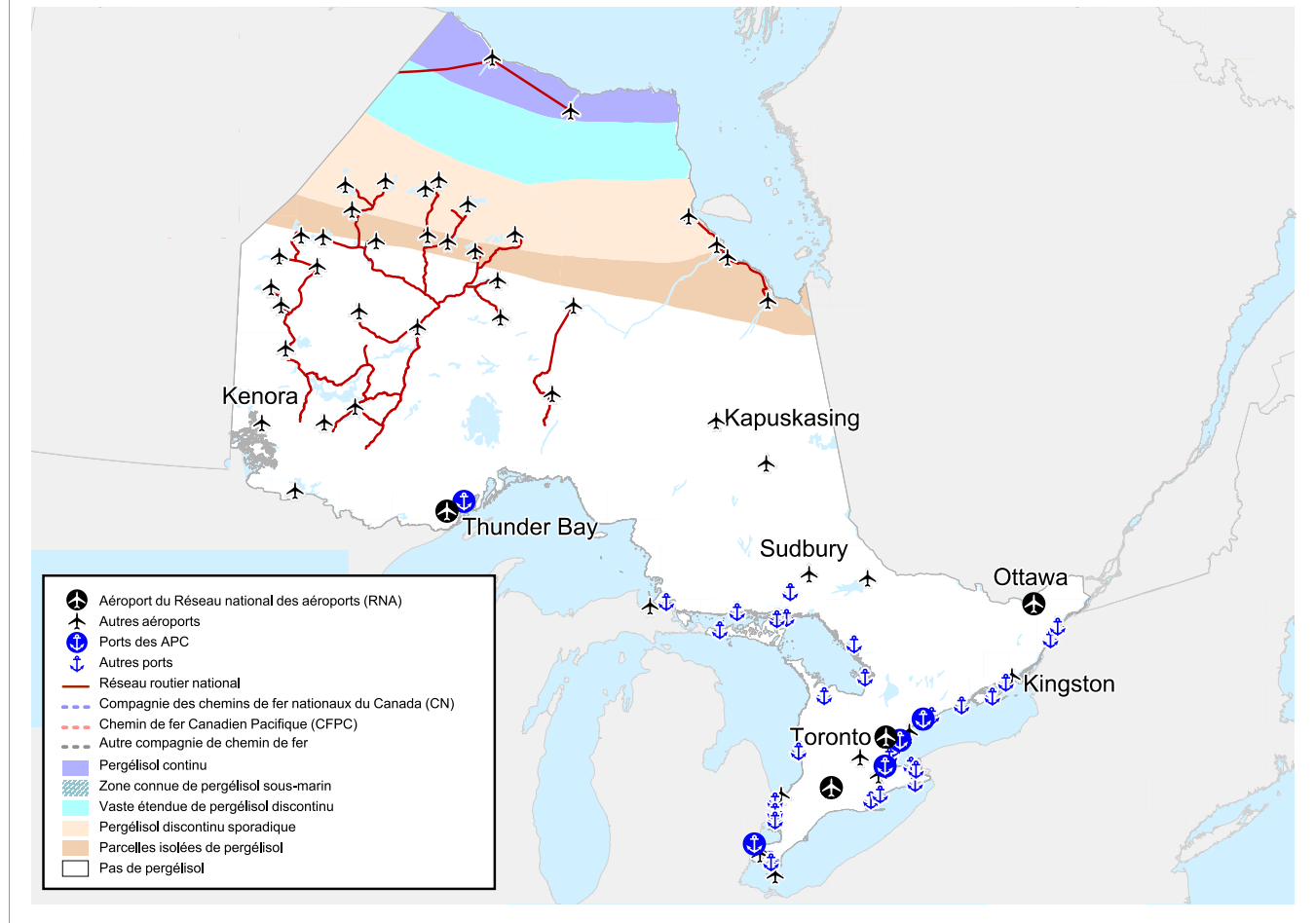
Contrairement aux deux autres sousrégions, l'économie du Sud de l'Ontario est entraînée principalement par les secteurs des services et manufacturier (Hutton, 2010). Essentiellement urbaine (mais comptant de nombreuses collectivités rurales et agricoles dans les banlieues urbaines), l'économie est influencée en partie par les lois provinciales soutenant la concentration des infrastructures, des emplois et des résidents, ainsi que sa proximité avec les partenaires commerciaux aux États-Unis.

³ Prendre note que ces projections démographiques propres à chaque région sont approximatives étant donné que les sous-régions climatiques ne correspondent pas parfaitement aux limites juridictionnelles utilisées lors de la collecte et de l'analyse des données de recensement.

2.0 APERÇU DU SYSTÈME DE TRANSPORT DE L'ONTARIO

Le système de transport de l'Ontario est vaste et appuyé par les quatre modes principaux qui jouent un rôle important dans le transport des personnes et des marchandises. La figure 2 présente un aperçu du système de transport de l'Ontario, y compris les principaux aéroports et ports, et les principales routes et voies ferrées. Les sections qui suivent présentent et explorent plus en détail chaque mode de transport.

Figure 2 : Les principales infrastructures de transport en Ontario, y compris dans les zones de pergélisol.



2.1 TRANSPORT ROUTIER

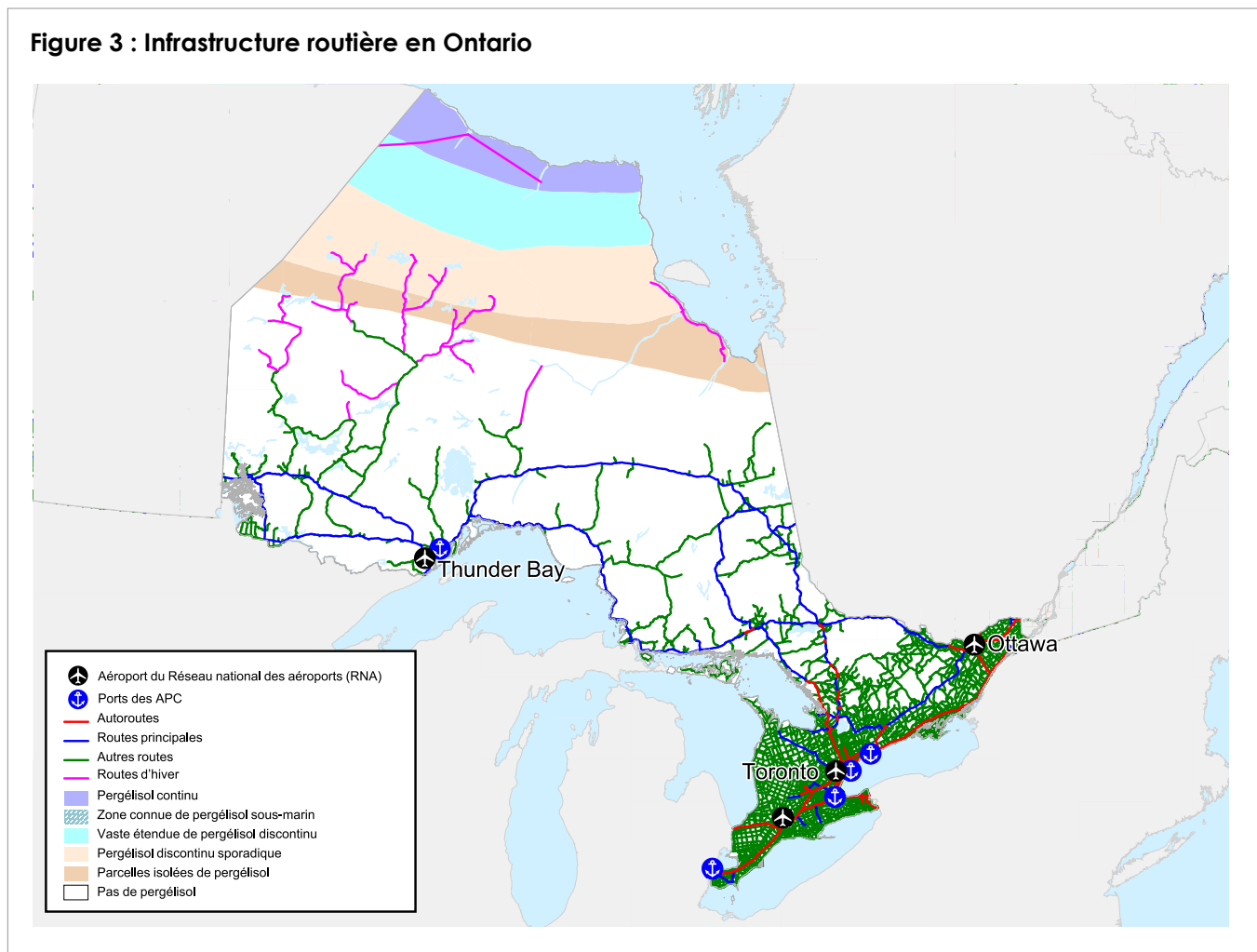
Le réseau routier de l'Ontario comprend plus de 16 600 km de routes gérées par la province, 2 756 ponts, plus de 1 800 km de route Transcanadienne, et un vaste réseau routier régional et municipal (Ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario, 2012). La base d'utilisateurs de ce réseau, qui est présentée à la Figure 3, est très large. En 2013, l'Ontario comptait plus de 11 millions de véhicules routiers immatriculés en vigueur, dont 7,6 millions de véhicules légers (par exemple, les voitures, camionnettes et fourgonnettes) et 237 000 véhicules lourds (par exemple, les autobus et les semiremorques); le reste de ce nombre comprend les remorques, les motocyclettes et les véhicules agricoles ou de construction (Statistique Canada 2015a).

Le réseau routier est une composante essentielle du réseau de commerce international et interprovincial du Canada. En 2015, le camionnage comptait pour 68,9 % de la valeur du commerce

de l'Ontario avec les États-Unis (Transports Canada, adapté de la base de données sur le commerce international de Statistique Canada). Le point d'entrée du pont Ambassador est particulièrement névralgique, comptant pour 23,3 % de la circulation transfrontalière de camions entre le Canada et les États-Unis en 2015 (Transports Canada, 2016).

Le Nord et le Centre de l'Ontario comptent plus de 3 000 km de routes d'hiver reliant les communautés isolées au réseau routier provincial (Sous-groupe de travail fédérale/provinciale/territoriale sur les transports du Nord, 2015). Les routes d'hiver de l'Ontario sont construites et entretenues par 29 collectivités des Premières Nations et la ville de Moosonee avec l'aide financière et technique des gouvernements provincial et fédéral. Bien que ces routes ne permettent qu'un accès saisonnier (généralement de décembre à mars), elles sont beaucoup moins coûteuses que la construction de routes praticables en toutes saisons dans la région arctique estimée à 85 000 \$ US (111 758 \$ CA) par kilomètre de route, et de 64 000 \$ US à 150 000 \$ US (84 147 \$ CA à 197 220 \$ CA)⁴ par pont (Prowse et coll., 2009; Dore et Burton, 2001).

Figure 3 : Infrastructure routière en Ontario



⁴ Toutes les valeurs liées aux coûts des effets et des pratiques d'adaptation dans le présent chapitre sont présentées en dollars canadiens de 2015. Ces valeurs ont été calculées à l'aide de la Feuille de calcul de l'inflation de la Banque du Canada (<http://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises-dix-dernieres-annees>).

2.2 TRANSPORT FERROVIAIRE

Un certain nombre d'opérateurs offrent des services ferroviaires en Ontario. Le Canadien National (CN) et le Canadien Pacifique (CP) fournissent des services de transport de marchandises dans la province, alors que le CN, le CP et CSX (une société américaine) ont des activités à l'échelle internationale. Les marchandises les plus importantes transportées par train en Ontario comprennent le carburant, les métaux, les produits chimiques et les produits manufacturés (Statistique Canada, 2015b).

VIA Rail Canada offre des services voyageurs dans le corridor QuébecWindsor, de Toronto à Vancouver, et sur la route du lac Supérieur (de White River à Sudbury), tandis qu'Amtrak traverse la frontière à Niagara Falls et offre un service vers Toronto. Alors que VIA fonctionne sur un réseau ferroviaire de 12 500 km, 98 % de cette voie est détenue et exploitée par le CN, le CP et d'autres partenaires (VIA Rail Canada, 2015). Ontario Northland offre également des services de transport de marchandises et de passagers entre Cochrane (dans la sousrégion du Centre) et Moosonee (dans la région Nord).

Le réseau ferroviaire comporte également ce qui suit :

- dix opérateurs locaux et régionaux de fret;
- onze lignes ferroviaires touristiques;
- trois systèmes légers sur rail et de métro (Toronto, Ottawa et KitchenerWaterloo d'ici 2017);
- le système GO Transit, qui offre des services voyageurs régionaux dans le Sud de l'Ontario (Association des chemins de fer du Canada, 2014).

Metrolinx, un organisme provincial responsable de la planification régionale des transports pour la région du Grand Toronto et de Hamilton (RGTH), a été mise à niveau dans tout le sud de l'Ontario au cours des dernières années (Transports Canada, 2014). Les projets notables incluent l'UnionPearson Express, le SLR Eglinton Crosstown, et l'initiative du service ferroviaire express régional (RER), un plan sur 10 ans visant à fournir un service de GO Transit plus rapide et plus fréquent et à électrifier les principaux segments du réseau ferroviaire.

Le secteur ferroviaire de l'Ontario est relativement stable, bien que le nombre de kilomètres de voie opérationnels soit en baisse (Statistique Canada, 2015b). Au total, en 2013, l'Ontario a exploité 16 000 km de voies pour les services de fret et les services voyageurs en 2013, soit une baisse de 15,5 % par rapport à 2009 (Statistique Canada, 2015b). Les autres tendances récentes dans le secteur ferroviaire de l'Ontario comprennent ce qui suit :

- Le fret en provenance de l'Ontario en destination d'autres provinces et de marchés internationaux a diminué de 20 % de 2001 à 2013 (Statistique Canada, 2015c).
- Le transport de marchandises par train vers l'Ontario en provenance d'autres provinces et territoires d'Amérique du Nord a diminué de 18 % de 2001 à 2013 (Statistique Canada, 2015c).
- Les déplacements de passagers dans les corridors de VIA en Ontario ont diminué de façon considérable au cours des dernières années, ce qui contribue à des changements dans les modèles de services (Transports Canada, 2015).
- En revanche, le nombre d'usagers du réseau GO Transit a augmenté d'environ 28 % de 2007 à 2013, un segment du marché des services de navettes qui en croissance en Ontario (Metrolinx, 2014).

2.3 TRANSPORT MARITIME

Le réseau Grands LacsVoie maritime du SaintLaurent (la Voie maritime) est la portion la plus importante d'eaux navigables au Canada, englobant les rives de quatre Grands Lacs et du fleuve SaintLaurent. Des centaines d'autres lacs et rivières en Ontario, en particulier dans les sousrégions du Sud et du Centre, offrent également des avantages en matière de navigation, de tourisme, de loisirs et de subsistance.

La Voie maritime est une voie navigable de 3 700 km gérée qui a été entièrement ouverte à la navigation en 1959. Son fonctionnement repose sur une série d'écluses et d'autres infrastructures utiles (y compris des ports et de l'équipement de navigation) qui permet le commerce international direct avec les ÉtatsUnis, l'Europe, et d'autres États. Environ 30 000 tonnes de marchandises en provenance ou en destination de l'Ontario sont acheminées par les voies de navigation nationales chaque année (Statistique Canada, 2010).

Historiquement, la Voie maritime est une route cruciale pour les exportateurs des Prairies qui expédient leurs céréales vers les marchés de l'Est et dont le point de transfert transcontinental et d'accès au réseau Grands Lacs le plus important est situé à Thunder Bay, sur la rive nord du lac Supérieur (Martin Associates, 2011). La plupart des itinéraires de navigation sont imposants. Un itinéraire typique pour le fret maritime en provenance de Thunder Bay à destination du port de Montréal est d'environ 1 967 km (102 heures de navigation, et 17 heures dans les écluses) (Corporation de gestion de la Voie maritime du SaintLaurent, 2014). Parmi les marchandises importantes transportées en empruntant le segment ontarien du réseau Grands LacsVoie maritime du SaintLaurent, on trouve :

- les cultures agricoles (40 %);
- les produits miniers (40 %);
- les produits de fer et d'acier (10 %);
- d'« autres » produits, y compris les produits forestiers et d'origine animale, de même que les produits pétroliers (10 %) (Martin Associates, 2011).

2.4 TRANSPORT AÉRIEN

Le transport aérien a gagné en importance et a augmenté sa part de marché pour le transport de passagers et de marchandises en Ontario. En 2013, 452 000 tonnes de marchandises ont été chargées et déchargées dans les aéroports de l'Ontario (soit une augmentation d'environ 5 000 tonnes par rapport à 2010), et environ 45 millions de passagers ont transité par les terminaux de l'Ontario (les principaux aéroports sont indiqués à la figure 2). Environ 35 millions de ces chargements et ces départs ont eu lieu à l'Aéroport international Pearson de Toronto, l'aéroport le plus achalandé au Canada (Transports Canada, 2015). Le volume des voyageurs dans la province a augmenté de près de un million de voyageurs par an depuis 2010 (Statistique Canada, 2016).

La déréglementation de l'industrie canadienne du transport aérien et le programme de cession des aéroports en 1987 ont eu une incidence considérable sur l'évolution de l'aéronautique en Ontario. En conséquence, les intérêts privés et les autorités quasi publics sont désormais responsables des exigences financières et opérationnelles liées à l'infrastructure aérienne dans de nombreuses collectivités (par exemple, les aéroports régionaux), bien que le gouvernement fédéral et les gouvernements provinciaux continuent de contribuer de manière importante à l'infrastructure aérienne et son entretien (Transports Canada, 2014). Cela signifie que les efforts d'adaptation aux changements climatiques de l'infrastructure aérienne exigeront la participation de nombreux paliers de gouvernement en plus d'une contribution majeure du secteur privé.

3.0 TENDANCES ET PROJECTIONS CLIMATIQUES

La présente section donne un aperçu de certains changements climatiques observés et projetés en Ontario afin de communiquer les tendances et l'ampleur des changements à venir. Des renseignements plus détaillés sont disponibles dans plusieurs sources, y compris le « Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources » et « l'Ontario Climate Consortium ».

3.1 TENDANCES CLIMATIQUES OBSERVÉES

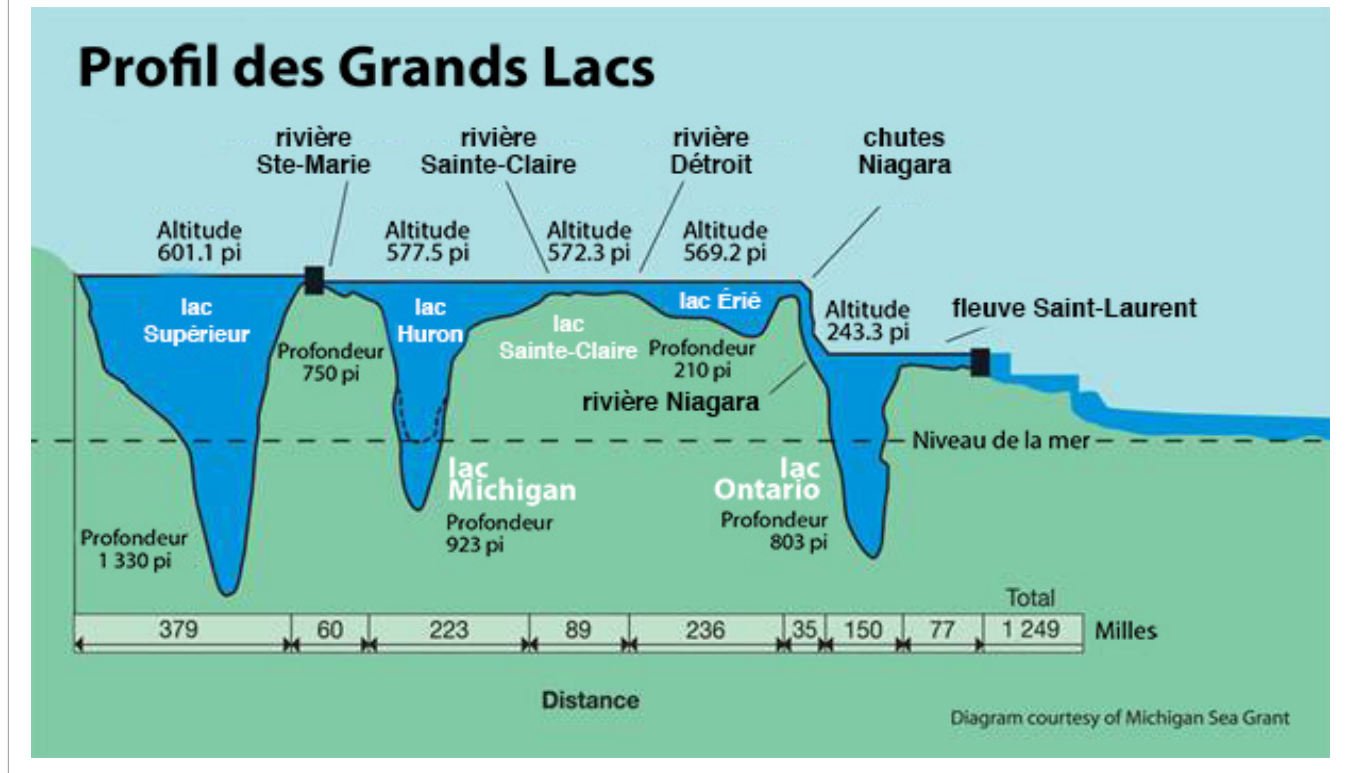
Dans l'ensemble de l'Ontario, les températures moyennes annuelles de l'air à la surface ont augmenté d'environ 1,0 °C à 1,5 °C de 1948 à 2012, alors que les régions du Centre et du Sud ont connu des hausses légèrement plus élevées (Vincent et coll., 2015). Le réchauffement le plus important a été observé dans les températures hivernales. En raison de ces hivers plus doux, la couverture de glace moyenne annuelle sur les Grands Lacs a diminué de 71 % entre 1973 et 2012 (Kahl et Stirrat, 2012).

Les précipitations totales annuelles ont également augmenté en Ontario de 1948 à 2012. Les augmentations les plus importantes ont été observées dans le Nord (Vincent et coll., 2015). Le manteau neigeux et les chutes de neige annuelles (comme proportion des précipitations) ont diminué dans toutes les régions, alors que les baisses les plus importantes ont été observées dans les sousrégions du Centre et du Nord (Vincent et coll., 2015).

Il est généralement plus difficile de relever les changements dans les conditions météorologiques extrêmes (par exemple, la fréquence des vents, des précipitations et des événements de chaleur intenses) que les changements dans les conditions moyennes, bien que la corrélation entre les températures de l'air plus élevées et l'intensité des tempêtes soit bien documentée (Zwiers et Kharin 1998; Westra et coll., 2015). L'analyse des tendances des précipitations extrêmes de courte durée pour le Canada (selon la recherche incluant une analyse régionale et provinciale de l'Ontario) montre que les tendances à la hausse sont plus fréquentes que les tendances à la baisse, et que de nombreuses augmentations sont significatives du point de vue statistique (Shepherd et coll., 2014).

Les Grands Lacs ne sont pas considérés comme étant sensibles à la hausse du niveau de la mer, compte tenu de leur élévation respective au-dessus du niveau de la mer (74 mètres dans le cas du lac Ontario, et 183 mètres pour le lac Supérieur) couplée à l'écoulement des lacs vers l'océan Atlantique (figure 4). Cependant, les niveaux d'eau dans les Grands Lacs sont sujets à fluctuer. Des niveaux inférieurs aux moyennes mensuelles à long terme ont été observés entre 1997 et 2012 (Shlozberg et coll., 2014); cependant, les hivers froids de 2013 et 2014 (caractérisés par une couverture de glace lacustre étendue et des températures plus froides) ont mis fin à cette tendance, alors que les niveaux d'eau ont augmenté dans tous les lacs (Dorling et Hanniman, 2016; Great Lakes Environmental Research Laboratory, 2015). Peu importe, les effets à long terme des changements climatiques sur les niveaux d'eau ne seront pas établis clairement pour un certain temps encore, car selon les résultats de l'Étude internationale des Grands Lacs d'amont, la « variabilité naturelle » dans les niveaux d'eau des Grands Lacs peut masquer les effets des changements climatiques au cours des 30 prochaines années (Brown et coll., 2012).

Figure 4 : Profil des élévations des Grands Lacs par rapport au niveau de la mer. (Source : Michigan Sea Grant)



3.2 PROJECTIONS CLIMATIQUES

Le climat en Ontario devrait changer dans les trois sousrégions, avec quelques variations. Les variations prévues dans les précipitations et les températures annuelles et saisonnières dans l'ensemble de la province sont présentées dans le tableau 2. Les figures 5a et b et 6a et b indiquent les variations par sousrégion, présentant un gradient des changements possibles pour les périodes de 2016 à 2035, de 2046 à 2065 et de 2081 à 2100, par rapport à la période de référence de 1986 à 2005.

Tableau 2 : Projection des températures et des précipitations saisonnières pour l'Ontario (valeurs moyennes provinciales), pour trois horizons temporels (les années 2020, 2050 et 2080). Les périodes saisonnières sont l'hiver (de décembre à février), le printemps (de mars à mai), l'été (de juin à août), et l'automne (de septembre à novembre). Les données sont tirées des résultats du modèle climatique mondial recueillis dans le contexte du CMIP 5 selon un ensemble de scénarios de profil représentatif 2.6, 4.5 et 8.5 (Données et scénarios climatiques canadiens, 2015). Les données reflètent l'incertitude associée à ces projections en présentant une plage de valeurs pour les 25^e et 75^e centiles des résultats du CMIP5. La valeur médiane (50^e centile) est présentée entre parenthèses à la suite de la plage de valeurs.

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changements prévus par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e 75 ^e centiles; 50 ^e centile entre parenthèses)		
			2020	2050	2080
			(2016-2035)	(2046-2065)	(2081-2100)
PREC 2.5 (Scénario de faible croissance des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	+0.2–10.8 (+5.3)	+3.2–14.9 (+8.9)	+2.7–13.4 (+7.9)
		Printemps	-1.6–+8.4 (+3.7)	+0.7–12.8 (+6.5)	+0.1–11.2 (+5.5)
		Été	-3.8–+10.8 (+0.5)	-2.6–+14.9 (+2.6)	-3.4–+13.4 (+1.2)
		Automne	-1.4–+8.2 (+3.6)	+0.8–9.7 (+5.0)	+0.2–11.1 (+6.0)
	Température (°C)	Hiver	+0.8–1.9 (+1.4)	+1.5–2.8 (+2.2)	+1.4–3.0 (+2.4)
		Printemps	+0.7–.4 (+1.1)	+1.0–2.1 (+1.6)	+0.8–1.9 (+1.4)
		Été	+0.8–1.5 (+1.1)	+1.0–2.2 (+1.4)	+0.9–2.0 (+1.3)
		Automne	+0.9–1.5 (+1.2)	+1.2–2.5 (+1.7)	+1.0–2.3 (+1.6)
PREC 4.5 (Scénario de croissance moyenne des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	+1.8–11.2 (+5.7)	+7.6–18.2 (+12.9)	+10.0–23.5 (+16.4)
		Printemps	-0.9–+10.1 (+3.7)	+3.8–14.2 (8.5)	+4.0–18.8 (+10.7)
		Été	-4.5–+11.2 (+0.4)	-3.0–18.2 (+2.7)	-2.0–+23.5 (+3.3)
		Automne	-1.6–+9.0 (+3.3)	+3.3–13.2 (+7.8)	+3.1–13.5 (+7.7)
	Température (°C)	Hiver	+0.9–2.0 (+1.6)	+2.4–4.1 (+3.2)	+3.1–5.3 (+4.4)
		Printemps	+0.6–1.6 (+1.1)	+1.4–2.6 (+2.0)	+1.8–3.7 (+2.5)
		Été	+0.8–1.4 (+1.1)	+1.6–2.8 (+2.1)	+1.8–3.6 (+2.9)
		Automne	+0.9–1.6 (+1.3)	+1.8–2.9 (+2.2)	+2.4–3.8 (+2.8)
PREC 8.5 (Scénario de croissance élevée des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	+1.6–12.1 (+6.6)	+10.9–23.9 (+17.5)	+21.6–41.7 (+31.8)
		Printemps	-0.8–+9.7 (+4.0)	+5.3–21.5 (13.1)	+14.1–36.9 (+24.2)
		Été	-3.5–+12.1 (+0.7)	-3.8–+23.9 (+1.3)	-8.2–41.7 (-0.5)
		Automne	-1.1–+7.9 (+3.1)	+1.7–13.6 (+7.7)	+6.3–19.9 (+13.6)
	Température (°C)	Hiver	+1.2–2.2 (+1.9)	+3.45.4 (+4.6)	+6.9–9.7 (+8.2)
		Printemps	+0.8–1.7 (+1.2)	+2.3–3.4 (+3.0)	+4.5–6.3 (+5.2)
		Été	+1.0–1.6 (+1.3)	+2.6–3.9 (+3.1)	+4.7–6.9 (+6.0)
		Automne	+1.1–1.8 (+1.4)	+2.8–4.0 (+3.3)	+4.9–7.0 (+5.8)

Figure 5a : Variations de température pour la période d'été en Ontario (juin, juillet et août) selon le scénario RCP 2.5 (scénario de faible croissance des émissions), RCP 4.5 (scénario de croissance moyenne des émissions) et RCP 8.5 (scénario de croissance élevée des émissions) pour la période de 2046 à 2065 par rapport à la période de référence de 1986 à 2005. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)

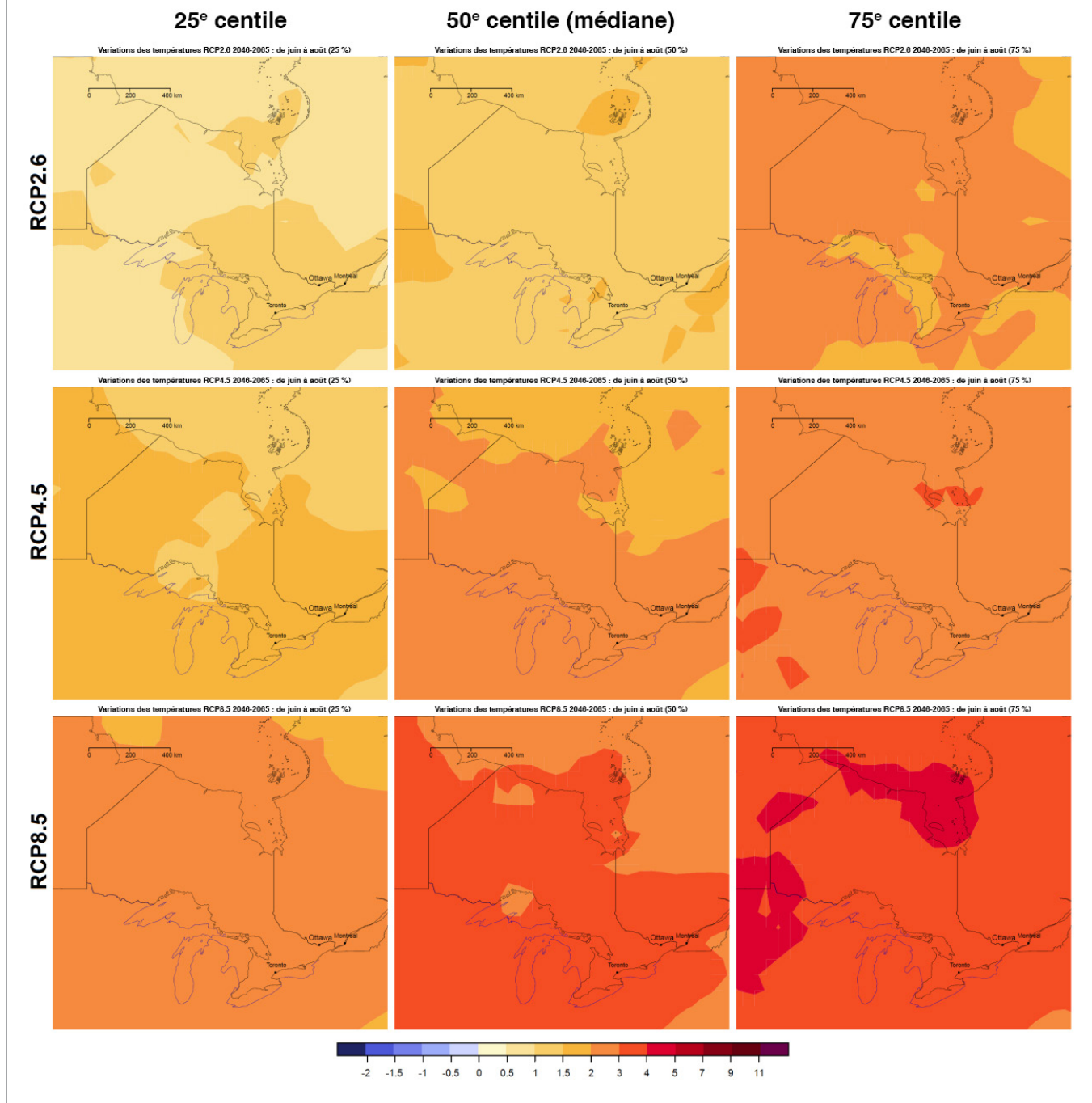
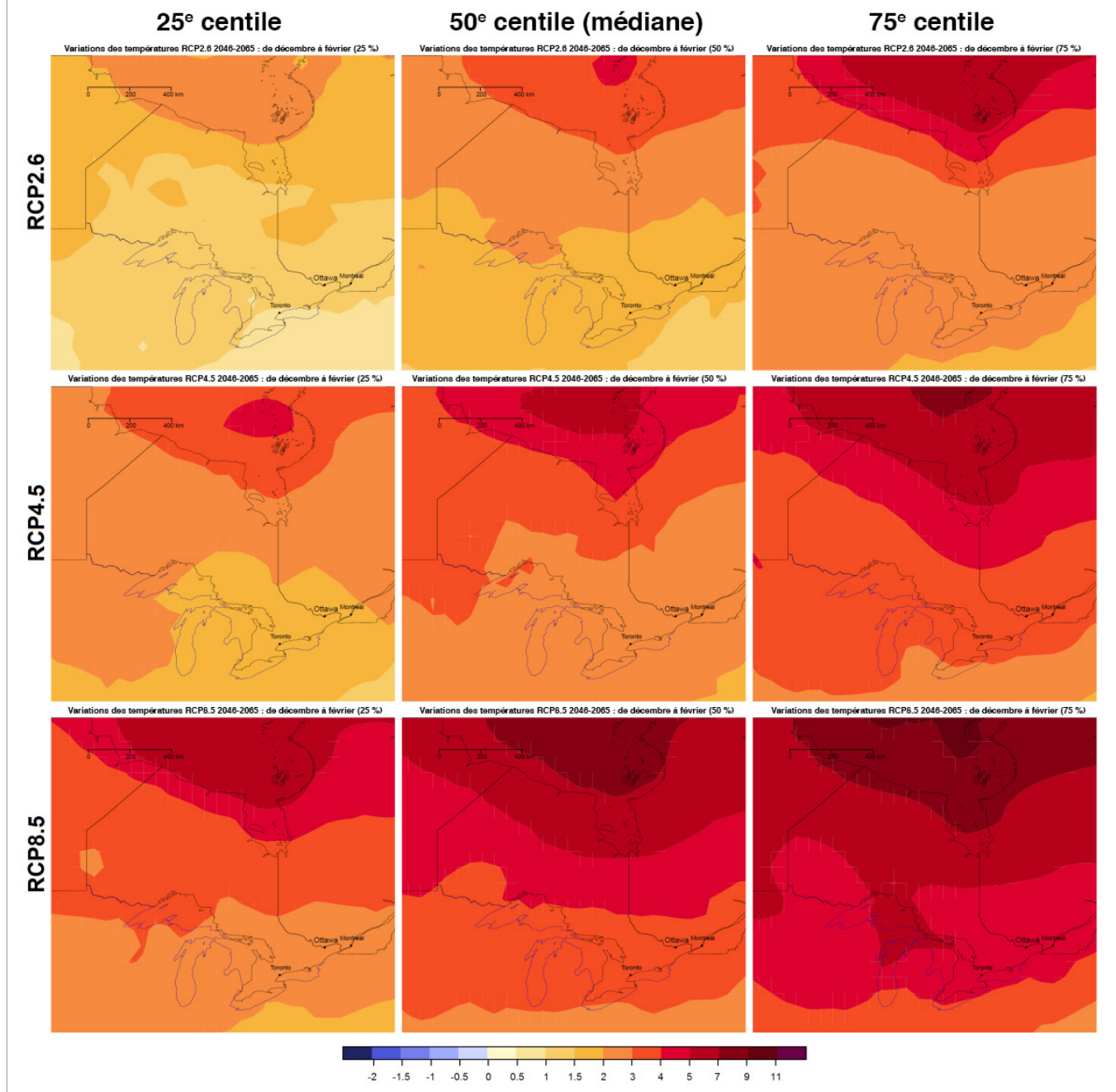


Figure 5b : Variations de température pour la période d'hiver en Ontario (décembre, janvier et février) selon le scénario RCP 2.5 (scénario de faible croissance des émissions), RCP 4.5 (scénario de croissance moyenne des émissions) et RCP 8.5 (scénario de croissance élevée des émissions) pour la période de 2046 à 2065 par rapport à la période de référence de 1986 à 2005. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



Les figures 5a et 5b suggèrent que le réchauffement devrait se poursuivre dans les trois sousrégions selon les trois scénarios prévisionnels, alors que les hausses les plus importantes devraient avoir lieu dans le Nord de l'Ontario pendant l'hiver. Les projections des variations des précipitations montrent une plus grande variabilité, avec des augmentations annuelles dans les trois sousrégions, mais des diminutions saisonnières (durant l'été) dans les sousrégions du Sud et du Centre de l'Ontario selon certains scénarios. Bien qu'elle n'ait pas été reflétée dans les tableaux et les figures qui précèdent, la vitesse moyenne quotidienne du vent devrait augmenter dans toute la province (Cheng et coll., 2012b).

Dans le Nord de l'Ontario, la proportion des précipitations hivernales tombant sous forme de neige est susceptible de diminuer, et la fréquence des épisodes de pluie verglaçante devrait augmenter de 60 à 85 % (Cheng et coll., 2007). Ces conditions pourraient occasionner des problèmes de sécurité et des perturbations au niveau des routes, des voies ferrées et des pistes dans le Nord de l'Ontario. Les effets du cycle de réchauffement et de dégel du pergélisol seront plus importants sur l'hydrologie des tourbières et sur la stabilité de surface dans les zones où le pergélisol existe actuellement (Prowse et coll., 2009). Dans les zones le long des côtes de la baie James et de la baie d'Hudson, la débâcle et l'englacement de la glace de mer se produiront plus tôt et la baisse du niveau relatif de la mer se poursuivra cours du siècle et ultérieurement en raison d'un phénomène appelé « relèvement isostatique » qui cause le soulèvement progressif des terres auparavant déprimées par les glaciers. (Atkinson et coll., 2016)

Figure 6a : Variations des précipitations pour la période d'été en Ontario (de juin à août) selon le scénario RCP 2.5 (scénario de faible croissance des émissions), RCP 4.5 (scénario de croissance moyenne des émissions) et RCP 8.5 (scénario de croissance élevée des émissions) pour la période de 2046 à 2065 par rapport à la période de référence de 1986 à 2005. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)

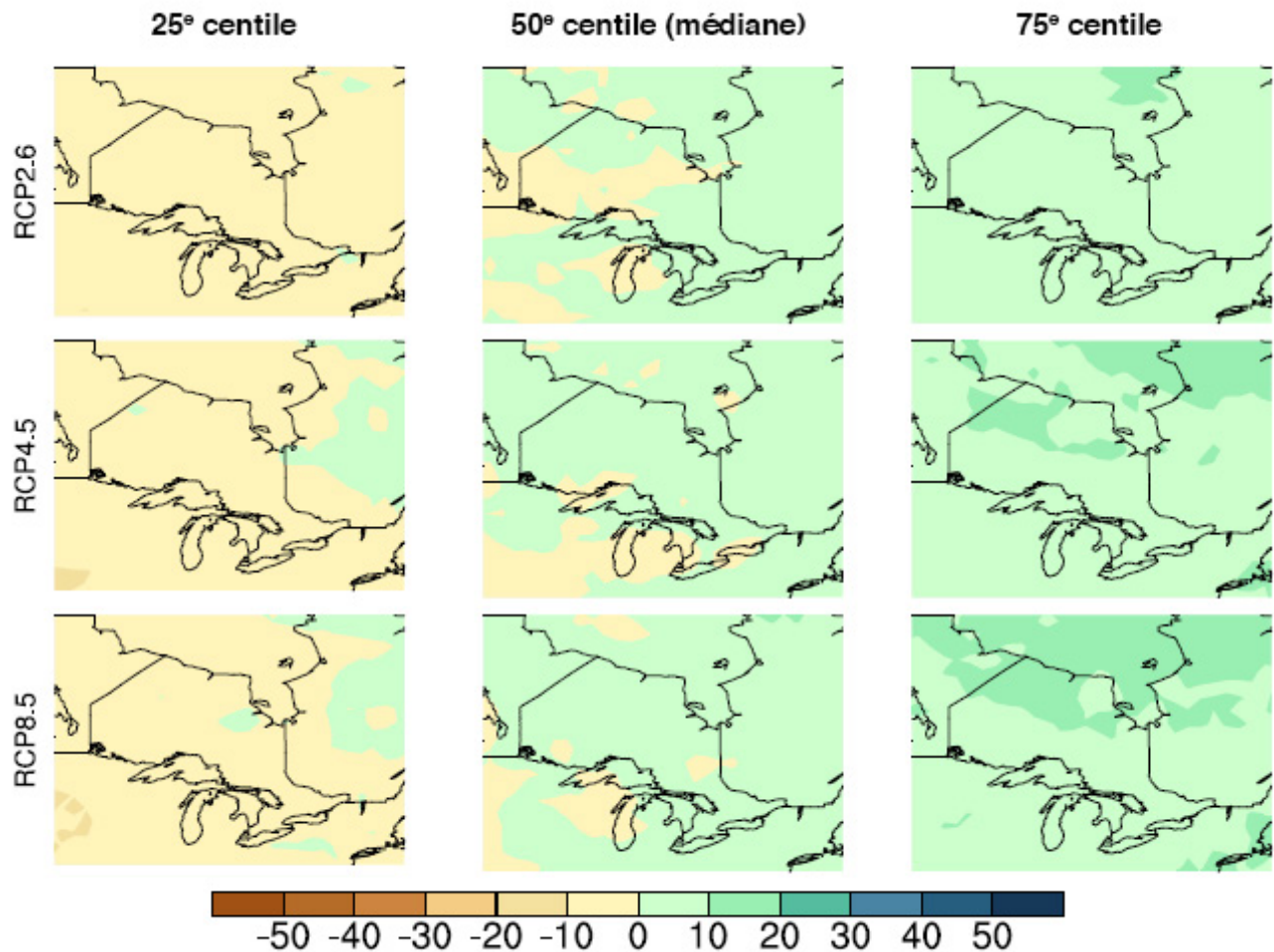
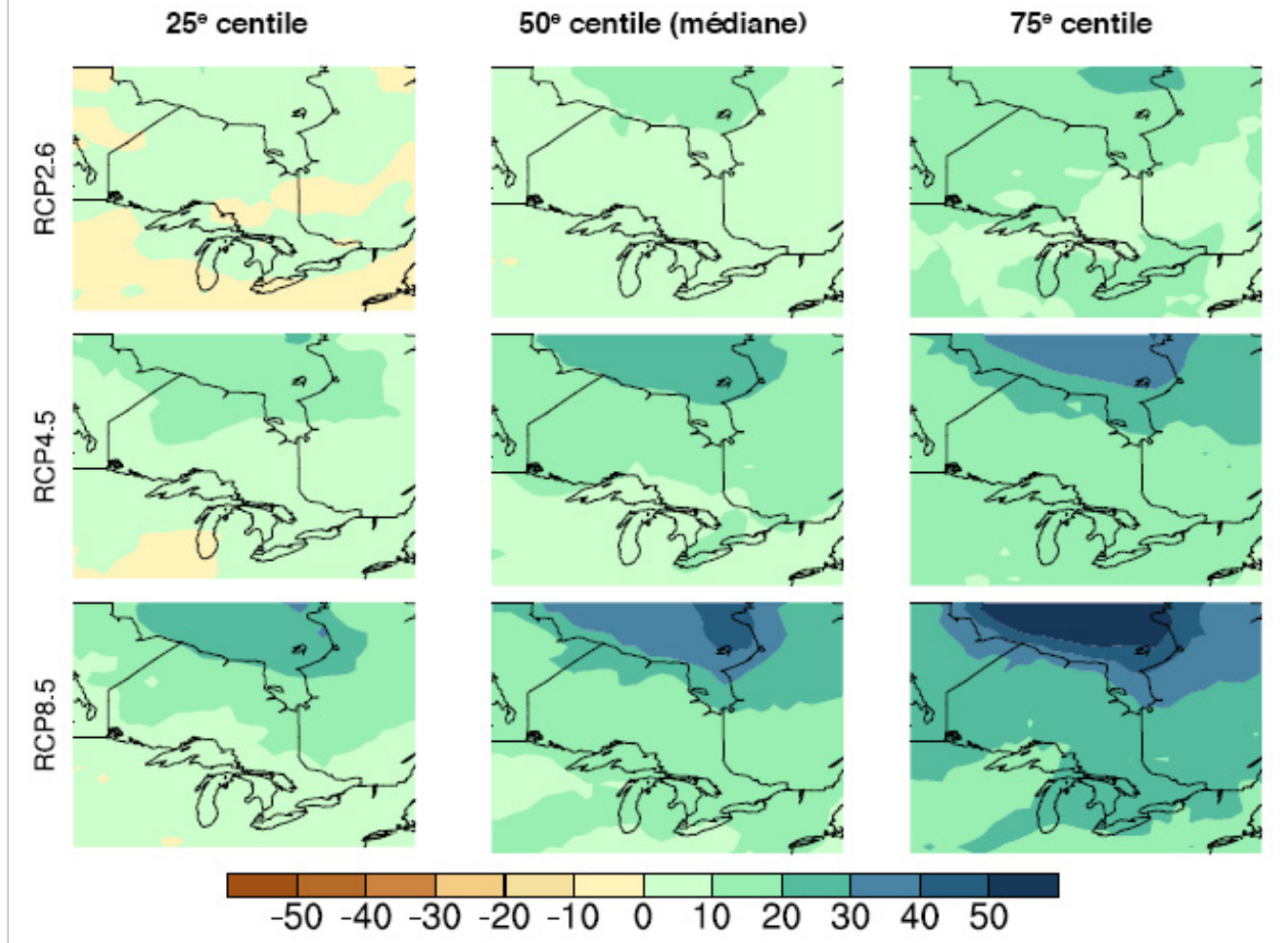


Figure 6b : Variations des précipitations pour la période d'hiver en Ontario (de décembre à février) selon le scénario RCP 2.5 (scénario de faible croissance des émissions), RCP 4.5 (scénario de croissance moyenne des émissions) et RCP 8.5 (scénario de croissance élevée des émissions) pour la période de 2046 à 2065 par rapport à la période de référence de 1986 à 2005 (Données et scénarios climatiques canadiens, 2015). (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



Les figures 6a et 6b montrent que dans la plupart des scénarios, les volumes de précipitations augmenteront dans l'ensemble la province durant hiver et davantage de zones connaîtront une baisse de précipitations durant l'été. Dans les sousrégions du Centre et du Sud, l'intensité, la durée et la fréquence de certains événements météorologiques extrêmes devraient augmenter durant l'été et l'hiver (ministère des Transports de l'Ontario, 2013a; Chiotti et Lavender, 2008; Colombo et coll., 2007; Deng et coll., 2015). Ces événements comprennent les tempêtes de verglas, les vagues de chaleur, la pluie verglaçante (augmentation de 40 %), et des pluies intenses (Reid et coll., 2007; Cheng et coll., 2007). Bien que les volumes de chutes de neige annuelles devraient diminuer en raison des conditions hivernales plus chaudes au cours des prochaines décennies, l'intensité des tempêtes hivernales pourrait augmenter (mais leur fréquence devrait diminuer), ce qui donnerait lieu à de fortes accumulations lors d'événements individuels de tempêtes de neige (Auld et coll., 2006). Les recherches axées précisément sur Toronto suggèrent également que même si la période des événements de gel et de dégel (lorsque les températures fluctuent au-dessus et au-dessous de zéro dans un court laps de temps) pourrait être de moins en moins longue, les « cycles de gel et de dégel » seront probablement beaucoup plus nombreux durant les mois d'hiver (Ho et Gough, 2006; Federal Highway Administration, 2015).

Les Grands Lacs exercent une influence significative sur les configurations régionales des températures et des précipitations (Gula et Peltier, 2012). Les températures plus élevées au cours du XXI^e siècle seront probablement associées à une diminution progressive du manteau de glace hivernal sur les Grands Lacs, conformément aux tendances observées (Kahl et Stirrat, 2012), et à une augmentation de la neige d'effet de lac à certains endroits. L'augmentation des températures (et de l'évaluation) jumelée à une plus longue période sans glace pourraient donner lieu à des réductions des niveaux d'eau de 0,5 m à 1 m dans les Grands Lacs et le fleuve du Saint-Laurent d'ici 2055 (Shlozberg et coll., 2014; Brown et coll., 2012). Toutefois, les tendances futures à long terme vers des baisses des niveaux d'eau peuvent être surestimées en raison des limitations des modélisations traditionnelles (MacKay et Seglenieks, 2013). En février 2015, les niveaux d'eau dans le lac Ontario et la Voie maritime du Saint-Laurent étaient de 20 cm au-dessous des moyennes mensuelles historiques (Conseil international de contrôle du fleuve Saint-Laurent, 2015).

4.0 TRANSPORT ROUTIER EN ONTARIO

4.1 RÉPERCUSSIONS CLIMATIQUES ANTÉRIEURES

Les exemples historiques des effets climatiques sur les réseaux de transport, en particulier les événements météorologiques extrêmes, peuvent influencer sur les perceptions publiques et politiques du risque et de la probabilité de pratiques d'adaptation. Les événements majeurs qui ont touché le transport en Ontario comprennent l'ouragan Hazel en 1954 (Environnement Canada, 2013b; voir le chapitre 9) et la tempête de verglas en Amérique du Nord de 1998. Lors de ce dernier événement, l'accumulation de glace sur l'infrastructure électrique, les routes et les lignes de chemin de fer a causé des dommages importants et des perturbations ainsi que la fermeture des réseaux de transport et de signalisation, et des voyageurs bloqués (Environnement Canada, 2013b).

En décembre 2013, une autre tempête hivernale violente a causé l'obstruction de routes dans l'ensemble du Sud et du Centre de l'Ontario en raison des branches et des lignes de transmission tombées, et de la glace lourde. La Ville de Toronto (Ville de Toronto, 2014) estime que ses organismes municipaux ont subi des coûts et des pertes de revenus d'environ 106 millions de dollars à la suite de la tempête. Certaines pratiques d'adaptation importantes ont été relevées à la suite de cet événement, dont les suivantes :

- Améliorer l'échange d'information entre les gouvernements provinciaux et municipaux.
- Améliorer la coordination entre le personnel d'urgence et le secteur de l'infrastructure.
- Mettre en place une alimentation de secours pour les feux de circulation.
- Mettre à jour le plan d'intervention d'urgence de l'Ontario (Bureau du commissaire des incendies et de la gestion des situations d'urgence, 2014).

Des événements récents de violentes tempêtes durant l'été ont également provoqué des perturbations et des dommages généralisés. En 2002, le Nord-Ouest de l'Ontario a été frappé par de la pluie intense, causant des dommages évalués à 31 millions de dollars aux routes ainsi que de longues fermetures d'autoroutes de portions de la route Transcanadienne (Chiotti et Lavender, 2008). Les dommages auraient probablement été plus graves si la tempête avait eu lieu dans une zone plus urbanisée.

Les effets de ces événements sur la connectivité sont plus importants pour les régions dépendantes des routes et des autoroutes ayant peu de routes alternatives pour les déplacements (comme dans le Centre et le Nord de l'Ontario). Des affouillements causés par des événements météorologiques extrêmes ont bloqué les voyageurs durant de très longues périodes dans certains cas, perturbant les flux économiques et causant des retards dans les interventions du personnel d'urgence.

4.2 RISQUES CLIMATIQUES FUTURS

Précipitations extrêmes et changeantes

Selon les recherches, le sud de l'Ontario devrait connaître des événements météorologiques extrêmes plus sévères et plus fréquents d'ici la fin du siècle (Cheng et coll., 2012a). Les effets passés causés par les précipitations intenses ou prolongées, y compris les inondations et les affouillements de pont en été, et les routes glacées et l'affaissement de lignes électriques en hiver, ont causé des perturbations au niveau des routes, des ponts et de l'infrastructure en Ontario, et des événements semblables présentent des risques futurs.

Les changements dans les configurations de précipitations auront également probablement une incidence sur les routes de l'Ontario. La province peut s'attendre à plus de cas d'inondation et d'affouillements en raison de l'augmentation de la fréquence des tempêtes de pluie, ce qui pose des risques en matière de sécurité (Boyle et coll., 2013). Les probabilités d'accident de véhicule augmentent jusqu'à 45 % lors d'événements de fortes précipitations (Andrey et coll., 2003). En outre, la pluie verglaçante (comme proportion des précipitations hivernales) est susceptible d'augmenter dans l'ensemble de la province (Bruce, 2011; Cheng et coll., 2011), créant des défis en matière d'entretien et de sécurité des routes en hiver (par exemple, les besoins accrus en sel et en sable).

Augmentation des températures et chaleur extrême

Dans le passé, la hausse des températures annuelles et la fréquence accrue des événements de chaleur extrême ont causé une augmentation du nombre de cas de ramollissement, d'orniérage et de ressuage de la chaussée dans le Sud de l'Ontario (Mills et coll., 2009; Woudsma et coll., 2007). Ces effets sont susceptibles d'être exacerbés à l'avenir, compte tenu des tendances prévues relatives à la température (voir la section 3). Les températures élevées provoquant la dilatation thermique des joints de ponts ont également entraîné la fermeture de ponts et des détours dans certaines administrations (Transportation Research Board, 2008), bien que les risques associés à cet effet restent faibles en Ontario.

La hausse des températures hivernales et la variabilité accrue de la température à court terme (à savoir quotidienne) sont susceptibles de produire plus de cycles de gel et de dégel dans l'ensemble de la province, causant la déformation et le cisaillement de la chaussée (Boyle et coll., 2013; Ho et Gough, 2006). La dégradation des routes qui en découle pourrait interrompre les activités de transport économiquement importantes comme le transport lourd ou le mouvement de fret projet spécial, l'exploitation forestière et minière, affectant les communautés rurales dans le Nord et le Centre de l'Ontario.

Les recherches suggèrent que, bien que les effets des changements climatiques sur la chaussée puissent être globalement modestes dans le Sud de l'Ontario, les conditions changeantes devraient être prises en compte lors du choix des matériaux de revêtement des autoroutes (Tighe et coll., 2008). Dans le cas des routes à faible achalandage, les recherches indiquent que la fissuration et l'orniérage longitudinaux de la chaussée empireront en raison des cycles de gel et de dégel et de la chaleur extrême dans le Sud, alors que la fissuration transversale deviendra moins problématique (Mills et coll., 2009). De manière générale, les routes nécessiteront un entretien plus tôt au courant de leur cycle de vie.

Les températures plus élevées sont susceptibles de raccourcir les saisons d'exploitation pour les routes d'hiver dans le Nord et le Centre de l'Ontario. Par exemple, Deloitte (2014) prévoit que les fenêtres d'exploitation pour les routes d'hiver qui desservent les collectivités des Premières Nations du Centre et du Nord de l'Ontario diminueront de 12 % à 20 % d'ici 2050 par rapport aux conditions actuelles, et de 20 % à 40 % d'ici 2100. Parmi les conséquences socioéconomiques potentielles, on retrouve :

- une fenêtre saisonnière plus courte pour le transport de marchandises et de personnes (Deloitte, 2014);

- des coûts d'entretien plus élevés (Boyle et coll., 2013; Association des transports du Canada, 2010);
- une capacité de charge réduite (en raison de l'épaisseur réduite de la glace) (Prowse et coll., 2009);
- des défaillances des remblais routiers (Association des transports du Canada, 2010; Association des transports du Canada, 2011).

Les températures plus chaudes offrent également des opportunités pour le transport routier en Ontario, y compris :

- un meilleur rendement de carburant pour de nombreux véhicules lors des hivers plus doux (Maoh et coll., 2008);
- des saisons de construction prolongées (Andrey et Mills, 2003);
- des exigences réduites pour l'entretien hivernal (Fu et coll., 2009).

Changements dans les niveaux d'eau et dans la configuration des glaces

La fluctuation des niveaux d'eau et les changements dans la configuration des glaces dans les rivières et dans les lacs peuvent également causer l'inondation des routes. En Ontario, ce risque est plus élevé lors de la débâcle du printemps dans les rivières (Andrey et Mills, 2003). Les événements de seiche (c.à.d. des changements temporaires dans les niveaux des lacs causés par les fluctuations de la pression atmosphérique) présentent également des risques d'inondation des routes adjacentes aux plans d'eau dans l'ensemble du bassin des Grands Lacs. L'augmentation de la fréquence des inondations causées par la seiche pourrait avoir une incidence sur les exigences relatives aux marges de recul des routes et d'autres infrastructures essentielles dans les zones vulnérables à long terme (Commission mixte internationale, 2014a).

Vent

Les vitesses des vents dans l'ensemble de la province devraient augmenter au cours des prochaines années (Cheng et coll., 2012b; Environnement Canada, 2014), ce qui présente des risques pour le transport routier. Les vents forts dispersent les produits chimiques pour le traitement des routes; produisent de la poudrierie qui réduit la visibilité, la stabilité et la maniabilité et causent des dommages aux appareils de signalisation et à d'autres structures de grande taille (OFCM, 2002).

4.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

Précipitations inondations

Plusieurs pratiques décrites dans la littérature peuvent permettre d'atténuer les effets des précipitations extrêmes sur les routes de l'Ontario. Parmi elles, on trouve l'utilisation de routes alternatives; l'évaluation des risques pour les nouvelles infrastructures routières; l'élargissement des ponceaux et d'autres améliorations de drainage et l'augmentation de la fréquence des entretiens (Savonis et coll., 2008). Certaines de ces pratiques ont été adoptées en Ontario : par exemple, Toronto a augmenté l'inspection régulière et le déblocage des ponceaux de drainage pour prendre en charge l'augmentation du flux de débris (Ville de Toronto, 2015). Le ministère des Transports de l'Ontario (MTO) a également entrepris des recherches pour mettre à jour les courbes intensité-durée-fréquence (IDF) dans le but de caractériser avec plus de précision les précipitations dans la province, et a évalué la vulnérabilité de l'infrastructure de drainage des routes ontariennes à des événements de fortes précipitations (voir l'étude de cas n° 1).

La gestion et l'utilisation efficaces de produits de déglçage (y compris le sel, le sable et la saumure) réduisent l'incidence de la pluie verglaçante (et les coûts associés). Par exemple, la région de York

traite le sel granulé avec du jus de betterave pour augmenter ses capacités de fusion, ce qui génère des économies budgétaires d'environ 8 % par an (Clean Air Partnership, 2012).

Les systèmes de transport intelligents (STI) peuvent également soutenir l'adaptation au niveau des opérations. Des panneaux de signalisation à message variable peuvent avertir les automobilistes au sujet des problèmes de sécurité routière en temps réel pour éviter les accidents pendant les événements de précipitations (Andrey et Mills, 2003). De même, le réseau de stations météoroute (SIMR) avancées de l'Ontario (déployé dans les années 1990) fournit au MTO et à ses soustraitants des renseignements environnementaux en temps réel pour orienter les pratiques d'entretien des routes en hiver (Buchanan et Gwartz, 2005).

Changements dans les niveaux de l'eau et dans la configuration des glaces (risques d'inondations)

Dans les zones particulièrement vulnérables aux inondations, l'infrastructure routière peut être déplacée ou élevée afin de réduire les risques (Savonis et coll., 2008). Cependant, l'élévation de routes est coûteuse et la relocalisation soulève des préoccupations liées à l'expropriation. Par conséquent, il est souvent plus prudent d'augmenter la capacité de gestion des eaux pluviales et d'autres infrastructures de prévention des inondations, comme les digues ou les murs de protection (Andrey et Mills, 2003).

Vent

Afin de réduire les effets du vent, les structures peuvent être conçues pour résister à des conditions plus turbulentes (OFCM, 2002). Dans certaines collectivités rurales ontariennes, des « barrières à neige » vivantes (des rangées d'arbres bordant les étendues ouvertes des terres agricoles) ont été utilisées pour réduire les pertes de sol dues au vent intense. De plus, elles offrent des avantages additionnels pour le transport en réduisant les effets de la poudrière sur la visibilité de la route en hiver (Huron County, 2014).

Chaleur extrême et hausse des températures

Certaines parties de la province, y compris la ville de Toronto, utilisent des mélanges de revêtement de chaussée qui résistent mieux à la chaleur pour renforcer la résistance à la chaleur de la chaussée (Andrey et Mills, 2003; Ville de Toronto, 2011). Le ministère des Transports de l'Ontario (MTO) et certaines municipalités ontariennes utilisent également un système de caractérisation des matériaux bitumineux appelé « SuperPave » depuis 1997. Ce système a été conçu pour améliorer le rendement à long terme de la chaussée (en réduisant l'orniérage et la fissuration) dans diverses conditions environnementales (ministère des Transports de l'Ontario, 2013b). Le système SuperPave tient compte du rendement dans des conditions de haute et de basse température durant les cycles de vie de la chaussée à l'aide de données détaillées des stations météorologiques pour déterminer les mélanges bitumineux les plus appropriés pour des emplacements précis. Bien que le système ne comprend pas les prévisions relatives aux paramètres climatiques, le MTO met en œuvre une méthode améliorée « mécaniste empirique » de conception des chaussées pour certains projets en tenant compte des prédictions relatives au rendement de la chaussée, des données détaillées des stations météorologiques et des niveaux de trafic. Le MTO estime que cela facilitera l'utilisation de concepts et de matériaux routiers mieux adaptés aux conditions de changement climatique (ministère des Transports de l'Ontario, 2013b).

Enfin, les saisons d'exploitation réduites des routes d'hiver en Ontario, causées par des températures plus chaudes, pourraient nécessiter un changement à d'autres modes de transport (aérien par exemple) pour certaines marchandises étant donné le coût prohibitif pour le remplacement des routes d'hiver de l'Ontario par des infrastructures utilisables toute l'année (estimé à environ 1,5 milliard de dollars) (Deloitte, 2014). Des modifications aux activités d'expédition des marchandises et d'exploration des ressources ont également été proposées comme pratiques d'adaptation de pair avec des pratiques particulières d'exploitation et d'entretien (voir le chapitre 3 pour plus de détails sur ces pratiques) (Prowse et coll., 2009; Association des transports du Canada, 2011).

Le tableau 3 donne un aperçu des effets et des pratiques d'adaptation abordés dans la présente section.

Tableau 3 : Les risques climatiques, les effets et les pratiques d'adaptation pour le transport routier.

Facteurs de risques climatiques ou environnementaux	Effets et occasions	Mesures d'adaptation
<p>Augmentation des températures de l'air (été et hiver; variabilité accrue)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des cycles de gel et de dégel • Expansion thermique des ponts, causant des détours et des entraves à la circulation • Orniérage ramollissement et ressuage de la chaussée par temps chaud • Saison d'exploitation des routes et capacités de charge réduites pour les routes d'hiver • Saison de construction prolongée (possibilité) • Exigences réduites relatives à l'entretien des routes d'hiver (possibilité) 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation accrue de produits de déglacage (comme le sel, le sable et la saumure) • Entretien régulier accru • Utilisation de matériaux de revêtement plus résistants à la chaleur (p. ex. « la technologie SuperPave »); surveillance et entretien plus fréquents • Ajustement des calendriers saisonniers et changement de mode de transport pour le Nord
<p>Précipitations (changements dans les configurations saisonnières causant l'augmentation de la fréquence et des événements extrêmes)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilités accrues d'affouillement et d'inondation des routes • Précipitations et inondations plus extrêmes • Détérioration plus rapide de la chaussée et du béton • Risque accru (> 45 %) d'accident de véhicules durant les événements de fortes précipitations, particulièrement en cas de pluie verglaçante 	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration à l'infrastructure de gestion des eaux pluviales • Surveillance et nettoyage réguliers des ponceaux • Changement dans les critères de conception d'ingénierie pour tenir compte des volumes accrues de précipitation • Applications de STI, avertissements aux automobilistes des conditions dangereuses; SIMR, pour signaler les activités d'entretien • Sélection de matériaux de revêtement plus résistants • Utilisation accrue de produits de déglacage (comme le sel, le sable et la saumure)

Facteurs de risques climatiques ou environnementaux	Effets et occasions	Mesures d'adaptation
Changements dans les configurations des glaces lacustres	<ul style="list-style-type: none"> • Risque accru d'inondation, particulièrement en ce qui concerne les inondations causées par les débâcles plus précoces et importantes dans les rivières • Durée réduite de la saison d'exploitation des routes d'hiver 	<ul style="list-style-type: none"> • Investissement dans l'infrastructure de prévention des inondations • Changement de mode de transport pour le transport aérien
Vent (changements dans les vitesses moyennes et extrêmes de vent)	<ul style="list-style-type: none"> • Écoulement de surface accrue n raison de la dispersion de produits chimiques pour l'entretien des routes • Visibilité, stabilité et contrôle réduits en cas de poudrerie; défaillances des appareils de signalisation et des structures de grande taille 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune mesure d'adaptation recensée dans la littérature • Conception des structures en fonction de conditions plus turbulentes; « barrières à neige » vivantes dans les zones rurales
Changements dans les niveaux d'eau (lacs et rivières)	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d'inondation de la chaussée dépassant la capacité de gestion des eaux pluviales de l'infrastructure de ponceaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement ou élévation des routes à distance des plaines inondables

ÉTUDE DE CAS N° 1 : ÉVALUATION DE LA RÉSILIENCE DES INFRASTRUCTURES DE DRAINAGE DES ROUTES AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS DE L'ONTARIO

On craint que l'augmentation dans l'intensité des événements de précipitation puisse menacer la capacité conceptuelle future de l'infrastructure de drainage des routes ontariennes. Le ministère des Transports de l'Ontario (MTO) a entrepris deux initiatives de recherche interdépendantes pour évaluer cette vulnérabilité et établir les stratégies d'adaptation appropriées.

PROJET 1 : MISE À JOUR DES COURBES INTENSITÉ-DURÉE-FRÉQUENCE (IDF) POUR L'ONTARIO

Ce projet visait à mettre à jour les courbes intensité-durée-fréquence (IDF) pour l'Ontario dans le but de caractériser avec plus de précision les précipitations dans la province.

En partenariat avec l'université de Waterloo, des chercheurs ont élaboré des courbes IDF pour les différentes régions de la province. Ces courbes utilisent les plus récentes données climatiques historiques d'Environnement et Changement climatique Canada, et sont disponibles par le truchement d'une plateforme en ligne conviviale⁵. Le MTO continue de collaborer avec l'université de Waterloo dans le but de recenser les tendances dans les données historiques de précipitations, qui pourraient offrir une méthode alternative pour l'élaboration des scénarios prévisionnels.

PROJET 2 : ÉVALUATION DE L'INFRASTRUCTURE DE GESTION DES EAUX PLUVIALES ET DE DRAINAGE DES ROUTES

Le projet a évalué la résilience des infrastructures de drainage des routes existantes aux futurs volumes de précipitation, et a élaboré des stratégies d'adaptation pour une variété de composants d'infrastructure au cours de leur durée de vie conceptuelle.

Les chercheurs ont étudié deux sections de routes provinciales représentant différents niveaux d'utilisation (l'autoroute 37 près de Belleville, et l'autoroute 417 près d'Ottawa). Ils ont analysé la capacité de 25 canalisations dans chaque section, ainsi que 46 ponceaux. Le projet était divisé en trois étapes clés.

Première étape : Relever des projections de précipitations fiables (c.à.d. probables) dans des conditions climatiques futures. À la lumière d'un examen des études climatiques menées en Ontario et de l'analyse des données, les chercheurs ont déterminé que l'intensité des précipitations projetées variait dans l'ensemble de la province. En conséquence, les chercheurs ont pris en compte trois scénarios de changements climatiques possibles pour analyser la résilience des infrastructures : des augmentations de 10 %, 20 % et 30 % de l'intensité des précipitations. (Notez qu'aucun horizon prévisionnel du changement n'a été défini dans la présente étude.)

Deuxième étape : Évaluer les capacités conceptionnelles des égouts et des ponceaux. Cette étape déterminait la proportion de l'infrastructure existante qui répondra aux exigences futures en matière de capacité basées sur les trois scénarios de précipitations, à savoir la proportion de l'infrastructure qui est dotée d'une « résistance hydraulique ». Bien que les chercheurs aient identifié des effets mineurs sur les égouts dans deux échantillons de réseau routier, les chercheurs ont déterminé que la plupart des infrastructures avaient une capacité suffisante pour les conditions futures.

Troisième étape : Établir des mesures d'adaptation pour atténuer les problèmes potentiels liés au drainage. Cette étape demandait aux chercheurs d'agencer les adaptations aux risques relevés. Ils ont établi que, lorsque l'augmentation de l'intensité de l'écoulement présentait des risques d'érosion des ponceaux, des matériaux plus résistants à l'érosion pouvaient être utilisés pour protéger les structures de drainage. Si l'élévation du cours supérieur s'avère préoccupante, l'adaptation choisie dépendra de la gravité. En général, le MTO n'autorise pas les conceptions de drainage qui permettent les débordements (c.à.d. des inondations) sur les autoroutes ontariennes; cependant, si le débordement est inévitable, le jumelage des égouts et des ponceaux existants pour accroître la capacité est utile.

⁵ L'outil se trouve à l'adresse suivante : http://www.mto.gov.on.ca/IDF_Curves/terms.shtml



Les ponts sont généralement conçus avec une capacité de drainage excédentaire limitée en raison du coût plus élevé de ces structures. Cependant, l'étude a déterminé que les augmentations de précipitations allant jusqu'à 30 % ne constituaient pas une menace pour les ponts. Si l'affouillement ou l'érosion du pont est probable, une protection physique peut être ajoutée.

SYNTHÈSE

Dans l'ensemble, les résultats de l'étude représentent de bonnes nouvelles pour les routes ontariennes. Selon les constatations de l'étude, les normes de conception actuelles du MTO font en sorte que les routes sont résilientes au débordement selon la fourchette des projections de précipitations établies, et les augmentations ne posent pas de risques graves pour la sécurité routière. Plus précisément, 40 % des canalisations dotées d'une capacité excédentaire étaient dimensionnées pour répondre aux seuils réglementaires plutôt que pour gérer les niveaux de précipitations attendus. Par conséquent, aucune infrastructure n'a à être remplacée avant la fin de son cycle de vie pour tenir compte de l'augmentation des précipitations.

L'analyse ne portait que sur les effets des changements climatiques possibles sur les intensités des précipitations utilisées dans la conception. Les secteurs qui pourraient être examinés dans le cadre d'une prochaine étude comprennent les effets de l'intensité et de la durée croissantes des précipitations sur les matériaux fonctionnels, et les modifications à la classification de « tempêtes réglementaires » en Ontario (telles qu'elles sont définies par le ministère des Richesses naturelles et des Forêts).

En dépit de ces résultats, de nombreuses routes dans l'ensemble de la province demeurent vulnérables aux inondations, y compris aux événements rares qui dépassent la capacité conceptuelle. Les effets de ces perturbations sur les routes peuvent être réduits par l'intermédiaire de dédoublements dans le réseau routier (à savoir, des itinéraires de déviation utilisant les routes municipales à proximité). (Voir le chapitre 9.)

Rédigé avec la collaboration de Hani Farghaly (ministère des Transports de l'Ontario).

5.0 TRANSPORT FERROVIAIRE EN ONTARIO

5.1 RÉPERCUSSIONS CLIMATIQUES ANTÉRIEURES

Exemples d'événements climatiques passés qui ont eu des effets sur le transport ferroviaire :

- La vague de chaleur dépassant 44 °C qui a sévi du 5 au 17 juillet 1936 dans certaines régions du Manitoba et de l'Ontario a donné lieu au gauchissement de certains rails en acier et à la torsion des poutres de pont (Environnement Canada, 2013a).
- La tempête de pluie verglaçante qui a frappé l'Est de l'Ontario en décembre 1942 a recouvert les fils téléphoniques, les arbres et les voies ferrées d'une épaisse couche de glace, forçant environ 50 000 travailleurs à Ottawa de se rendre à pied au travail pendant cinq jours (Environnement Canada, 2013a).
- L'ouragan Hazel (1954) a causé des dommages et des perturbations considérables dans le transport ferroviaire dans tout le Sud de l'Ontario (Environnement Canada, 2013b).
- La tempête de verglas en Amérique du Nord de 1998 a perturbé les services ferroviaires dans et entre les villes importantes (Environnement Canada, 2013a).

- Les événements de pluie intenses en 2013 à Toronto ont inondé les voies ferrées dans la Vallée de la rivière Don et, dans un cas, bloqué les passagers de GO Transit (CBC News, 2013).

5.2 RISQUES CLIMATIQUES FUTURS

Le transport ferroviaire est confronté à une variété de risques particuliers dus aux conditions climatiques changeantes et aux événements météorologiques extrêmes. Les changements dans les variations de température présentent des défis pour l'intégrité des rails – un risque qui est particulièrement prononcé dans le Sud de l'Ontario où les températures extrêmes seront plus élevées. Par exemple, le gauchissement peut se produire dans des conditions de chaleur extrême, augmentant la durée des déplacements (en raison de la vitesse réduite des trains) et augmentant les possibilités de déraillement, d'un dysfonctionnement des systèmes de détection pour les rails, et des déversements de matières dangereuses (OFCM, 2002). Les températures élevées entraînent également la surchauffe des marchandises (Andrey et Mills, 2003). Dans le Nord, le dégel du pergélisol affaiblit les remblais de chemin de fer (Caldwell et coll., 2002); conjointement avec les fortes précipitations, les affouillements et les défaillances du remblai pourraient augmenter dans le Nord de l'Ontario (Association des transports du Canada, 2010). Par contre, des hivers plus doux pourraient réduire les besoins d'entretien des rails par temps froid pour les lignes de chemin de fer de l'Ontario (Andrey et coll., 2003).

Le vent pose également des risques pour le transport ferroviaire, dont une augmentation des retards et des perturbations de l'horaire; des déversements de matières dangereuses; des renversements de wagons (mais seulement lors d'événements extrêmement rares); et des défaillances et des dommages dans l'équipement de signalisation (OFCM, 2002). Compte tenu de l'augmentation des vitesses moyennes journalières du vent dans l'ensemble de la province (voir la section 3), ces risques peuvent augmenter au XXI^e siècle.

Des événements de précipitations plus fréquents et intenses peuvent inonder les voies ferrées, créer des interruptions de service et des retards et diminuer le rendement en matière de ponctualité (Woudsma et coll., 2007; OFCM 2002; Koatse et Rietveld, 2012). Les lignes ferroviaires à proximité des plans d'eau sont vulnérables aux inondations dues au changement des niveaux d'eau et dans la configuration des glaces lacustres (Kcoatse et Rietveld, 2012).

5.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

Un certain nombre de mesures visant à atténuer les vulnérabilités du réseau ferroviaire existent dans la littérature. En ce qui a trait aux événements de chaleur extrême et de gauchissement des rails, les mesures comprennent l'imposition de limites de vitesse, ce qui réduit la fréquence du service, ainsi que la réalisation d'inspections plus fréquentes des voies (Savonis et coll., 2008). Le refroidissement et la réfrigération du fret peuvent réduire les pertes et les dommages aux produits pour les transporteurs de marchandises (Andrey et Mills, 2003). Les chercheurs ont également rapporté une réduction de la température de pointe des rails due à l'utilisation de revêtements à faible absorption d'énergie solaire lors de journées ensoleillées (Wang et coll., 2015). GO Transit a changé ses pratiques d'ingénierie afin de réduire la vulnérabilité de ses voies ferrées à la chaleur extrême (étude de cas n° 2).

Dans le but de réduire les inondations d'infrastructures situées à proximité des plans d'eau, les approches recensées dans la littérature comprennent l'amélioration des processus de gestion de l'écoulement, la construction de digues de même que d'autres solutions d'ingénierie pour la prévention des inondations (Savonis et coll., 2008), et l'élévation de certains segments de la voie ferrée (Kcoatse et Rietveld, 2012). Lors d'événements de précipitations extrêmes, les entreprises ferroviaires peuvent réduire la fréquence de service et augmenter la rapidité des avis aux voyageurs et de réparation (Savonis et coll., 2008). Les opérations peuvent également être modifiées en fonction des prévisions météorologiques (OFCM, 2002). Par exemple, à la suite de divers événements extrêmes dans la région du Grand Toronto, Metrolinx et GO Transit ont adopté un certain nombre de mesures d'adaptation pour renforcer la résilience du corridor ferroviaire, y compris les suivantes :

- Des efforts de prévention des inondations dans la Vallée de la rivière Don, l'installation de détecteurs de défaillances du remblai ferroviaire et de niveaux d'eau élevés;
- La planification des services pour les conditions hivernales extrêmes (qui consiste à utiliser moins de trains, mais réduit la probabilité de retards ou d'annulations pour assurer la continuité des activités par temps neigeux);
- L'installation de systèmes d'alimentation d'urgence dans l'installation d'entretien des locomotives.

Le tableau 4 donne un aperçu des effets et des pratiques d'adaptation abordés dans la présente section.

Tableau 4 : Facteurs de risques climatiques abordés en lien avec leurs effets sur le transport ferroviaire. Les citations relatives aux effets et aux pratiques d'adaptation se trouvent à la section 5.

Facteurs de risques climatiques ou environnementaux	Effets et occasions	Mesures d'adaptation
Augmentation des températures de l'air (été et hiver; variabilité accrue)	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de cas de gauchissement des rails donnant lieu à des possibilités accrues de déraillement et de dysfonctionnement des systèmes de détection pour les rails; augmentation du temps de déplacement et vitesse réduite; risque accru de déversements de matières dangereuses • Surchauffe du fret et de l'équipement de signalisation • Réduction globale des besoins d'entretien des rails dans des conditions plus froides (possibilité) 	<ul style="list-style-type: none"> • Limites de vitesse, réduction de la fréquence des services; climatisation pour les appareils de signalisation; augmentation de la fréquence des inspections des rails; augmentation de la rapidité des avis et des mises à jour relatifs aux réparations • Refroidissement et réfrigération du fret
Précipitations (changements dans les configurations saisonnières causant l'augmentation de la fréquence et des événements extrêmes)	<ul style="list-style-type: none"> • Inondations; perturbations et retards de service; diminution du rendement en matière de ponctualité lors d'événements extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> • Solutions d'ingénierie pour la prévention des inondations; augmentation des avis aux voyageurs; modification des activités en fonction des prévisions météorologiques • Installation de détecteurs de défaillances du remblai et de niveaux d'eau élevés • Élévation de la voie
Vent (changements dans les vitesses moyennes et extrêmes de vent)	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des retards et des perturbations de l'horaire • Risque accru de déversements de matières dangereuses • Renversement des wagons • Défaillances des appareils de signalisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune mesure d'adaptation recensée dans la littérature pour cette catégorie
Changements dans les niveaux d'eau (lacs, rivières et océans)	<ul style="list-style-type: none"> • Inondation des voies ferrées près des plans d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Construction de digues; améliorations des systèmes de gestion de l'écoulement

ÉTUDE DE CAS N° 2 : PRÉPARATION EN VUE DE TEMPÉRATURES PLUS ÉLEVÉES ET DU GAUCHISSEMENT DES RAILS À GO TRANSIT

Metrolinx est un organisme provincial responsable des transports en commun dans la région du Grand Toronto et de Hamilton (RGTH). Son autorité s'étend aux investissements en capital, à la prise de décision stratégique et à la planification stratégique pour GO Transit (le service de banlieue par train et par autobus le plus achalandé au Canada), ainsi qu'à l'amélioration, à la coordination et à l'intégration de ces services avec les services de transport en commun municipaux et d'autres modes. Metrolinx et GO Transit ont commencé à recenser de manière globale les risques posés à l'organisation par les changements climatiques et les événements météorologiques extrêmes, et pour évaluer les vulnérabilités et les risques pour les installations, les pratiques et les protocoles. Une politique organisationnelle d'adaptation aux changements climatiques est également en cours d'élaboration et devrait être achevée en 2018 (Metrolinx, 2015).

À court terme, l'organisation répond aux préoccupations liées au climat les plus immédiates au moyen des ressources et de l'expertise disponibles. Ces préoccupations immédiates tombent principalement sous l'égide opérationnelle étant donné que les perturbations des services de première ligne et des infrastructures routières et ferroviaires présentent des risques pour la quantité et la qualité du service de banlieue que Metrolinx est en mesure de fournir.

Par exemple, la Division des corridors ferroviaires de GO Transit se prépare en vue des températures estivales extrêmes prévues pour le Sud de l'Ontario d'ici le milieu du XXI^e siècle. Les voies ferrées ont tendance à prendre de l'expansion et à « gondoler » (gauchissement) par temps chaud où la température dépasse 27 °C, ce qui pose des risques relativement à la vitesse, à la sécurité et à la capacité des lignes. Au cours des dix dernières années, un faible gauchissement a été observé sur certains segments du réseau par journées de temps chaud durant l'été. Les ingénieurs de GO ont choisi de réduire de manière proactive les risques de gauchissement des rails et les besoins de réparation en augmentant les températures idéales de pose et de libération des contraintes dans le Sud de l'Ontario de 32,2°C à 37,8°C (90 à 100 degrés Fahrenheit). Cette simple mesure d'adaptation n'a engagé aucun coût supplémentaire, seulement des ajustements mineurs à l'équipement, mais elle a apporté des avantages relativement à l'entretien. Le gauchissement des rails a diminué de manière importante dans les zones touchées depuis que cette modification a été apportée. Bien qu'aucun changement n'ait été apporté aux normes organisationnelles (en grande partie en raison du temps et des ressources nécessaires), la pratique a été adoptée par des organismes autres que Corridors ferroviaires. Par exemple, GO Transit utilise les températures plus élevées de pose et de libération des contraintes pour la construction de l'Union Pearson Express. Il s'agit d'un exemple d'une stratégie d'adaptation « sans regret », à savoir une stratégie dont les mesures entraînent peu de coûts supplémentaires, produisent des avantages conjoints ou préviennent des dommages et des dépenses futurs (voir le chapitre 9).

Les praticiens suggèrent également que la mise à jour des températures de pose et de libération des contraintes n'avait pas affecté de manière importante la tolérance de l'infrastructure ferroviaire GO à des températures plus froides. Alors que le froid extrême a provoqué la contraction des rails dans les régions situées plus au nord, les lignes ferroviaires de GO Transit n'ont pas été touchées de façon importante. Les praticiens ne prévoient pas que la contraction des rails durant l'hiver constitue autant d'un problème au cours des prochaines décennies étant donné qu'en moyenne, le Sud de l'Ontario devrait connaître des hivers plus doux durant le XXI^e siècle.

Rédigé avec la collaboration de Mel White (GO Transit), et de Quentin Chiotti (Metrolinx).

6.0 TRANSPORT AÉRIEN

6.1 RÉPERCUSSIONS CLIMATIQUES ANTÉRIEURES

Les phénomènes météorologiques violents, y compris les températures extrêmes et les tempêtes, ont souvent provoqué des retards et des annulations de vols dans les aéroports de l'Ontario.

Par exemple, du 5 au 9 janvier 2014, une combinaison inhabituelle de pluie, de neige, de bourrasques de neige et de refroidissement éolien et de froid extrême dans l'Est de l'Ontario et dans d'autres régions du Canada a gravement perturbé les déplacements des voyageurs dans de nombreux aéroports, y compris à l'Aéroport international Pearson de Toronto. Le froid extrême (atteignant -39°C avec le refroidissement éolien) et l'accumulation de glace ont ralenti les équipes au sol et ont causé la défaillance ou le fonctionnement intermittent de certains équipements (de ravitaillement par exemple). La chute soudaine de la température a également entraîné le gel de la neige et de la neige fondante, causée par la pluie, dans les aires de circulation, de trafic et de stationnement des aéronefs. Les températures étaient trop froides pour que les traitements chimiques puissent faire fondre efficacement la glace et la neige. Ces effets sur les opérations conjugués à d'autres facteurs (tels que le nombre élevé de vols qui ont été déroutés vers l'aéroport en provenance d'autres aéroports), ont entraîné des retards et des perturbations dans les déplacements des voyageurs à travers le Canada. En réponse à cet événement, l'Autorité aéroportuaire du Grand Toronto (GTAA) a examiné et élaboré des recommandations relatives aux opérations, au service à la clientèle et aux communications de l'aéroport (GTAA, 2014a).

6.2 RISQUES CLIMATIQUES FUTURS

Selon la littérature, le transport aérien est affecté par les changements climatiques et les conditions météorologiques extrêmes de plusieurs façons. Les risques climatiques suivants sont pertinents pour les aéroports et l'aviation en Ontario.

- L'augmentation des variations de température accroît le risque d'accumulation de glace sur les ailes (GTAA, 2014b).
- Des conditions plus chaudes entraînent une densité de l'air réduite, réduisant ainsi la portance pour les avions. Ces conditions peuvent donner lieu à des exigences accrues en matière de carburant et longueur de piste (Andrey et Mills, 2003).
- Une augmentation des cycles de gel et de dégel peut entraîner le gauchissement des pistes (Transportation Research Board, 2008).
- Le froid et la chaleur extrêmes peuvent affecter les moteurs d'avion et les activités aéroportuaires, entraînant des retards et un rendement diminué en matière de ponctualité (OFCM, 2002; Woudsma et coll., 2007).
- La fonte du pergélisol pose un risque pour la stabilité des pistes dans les collectivités nordiques qui dépendent de l'aviation (Association des transports du Canada, 2010).
- Les zones sujettes aux inondations sont confrontées à un risque accru d'inondations des pistes associées aux événements de précipitations extrêmes et aux changements saisonniers des niveaux d'eau (Andrey et Mills, 2003; Secrétariat de l'OACI, 2010).
- Une intensité accrue des vents (à la fois quotidienne et pendant les événements extrêmes) augmentent les occurrences d'objets étrangers sur les pistes, les voies de circulation et les installations d'entretien, empêchant l'entretien des avions (particulièrement des endroits élevés du fuselage, y compris les procédures de déneigement et de dégivrage) (OFCM, 2002).

- Les températures plus douces donneront également lieu à d'autres événements « mixtes » de précipitation (par exemple, de la pluie verglaçante combinée à de la neige et de la pluie) durant les opérations en hiver (GTAA, 2014b).

Les aéroports sont également touchés par des événements météorologiques dans d'autres secteurs en raison de l'annulation ou du réacheminement des vols, taxant davantage l'infrastructure et les opérations.

6.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

Bien que les exploitants aériens de l'Ontario appliquent déjà certaines pratiques d'adaptation, d'autres pratiques pourraient devoir être appliquées en fonction des conditions futures. Par exemple, les aéroports éloignés du Nord de l'Ontario ont longtemps utilisé les réchauffeurs portatifs à air forcé pour lutter contre l'accumulation de glace sur les aéronefs (Transports Canada, 2004). Pour faire face à l'augmentation prévue des conditions hivernales extrêmes et de pluie verglaçante, les opérateurs pourraient également adopter des changements aux procédures de dégivrage des moteurs et des ailes à l'avenir. Cela pourrait inclure une utilisation accrue d'agents de dégivrage et d'antigivrage à base de glycol (Transportation Research Board, 2011).

L'augmentation des températures moyennes à long terme peut également présenter des avantages pour les exploitants de l'Ontario, comme la réduction des besoins en matière de dégivrage dans les régions du sud (Andrey et Mills, 2003). En raison de l'augmentation des températures cependant, les aéroports pourraient devoir utiliser plus de matériaux de revêtement résistant à la chaleur dans la construction de pistes (comme dans le cas des routes en asphalte) (Andrey et Mills, 2003). À long terme, les températures futures devront être prises en considération pour établir les critères en matière de longueur de la piste.

Afin d'accroître la capacité de freinage et de maniabilité d'un aéronef sur des surfaces détrempées en périodes de précipitations intenses, l'aéroport international d'Ottawa a rainuré ses pistes d'atterrissage durant l'été 2013 au coût de 360 000 \$. L'ajout de rainures minimise les possibilités d'aquaplanage à l'atterrissage et est relativement non perturbateur. (La piste est demeurée ouverte durant le jour pendant que les travaux ont été effectués durant dix nuits). Après une année d'opération sur cette nouvelle surface, les pilotes ont signalé que le contrôle était amélioré. L'aéroport est ensuite allé de l'avant avec les plans d'ajouter de rainures à sa plus longue piste au cours de l'été 2015 (Schwanz, 2014).

Dans le Nord canadien, la fonte du pergélisol cause des problèmes fréquents au niveau des pistes (Association des transports du Canada, 2010) (voir le chapitre Nord). Ces questions ne sont toutefois pas abordées dans la littérature touchant l'Ontario en particulier. Si des problématiques liées au pergélisol survenaient dans le futur, la relocalisation des infrastructures endommagées ou inutilisables ou la reconstruction à l'aide de barrières géosynthétiques offrant une stabilité accrue pourraient être des mesures d'adaptations pertinentes (Savonis et coll., 2008; Association des transports du Canada, 2010). Les thermosiphons (systèmes mécaniques conçus pour éloigner la chaleur du sol de l'infrastructure) peuvent aussi contribuer à réduire les effets de la fonte du pergélisol sur les pistes, bien que les coûts d'installation puissent être prohibitifs pour les petits aéroports (Association des transports du Canada, 2010).

Le tableau 5 donne un aperçu des effets et des pratiques d'adaptation abordés dans la présente section.

Tableau 5 : Facteurs de risques climatiques abordés en lien avec leurs effets sur le transport aérien.

Facteurs de risques climatiques ou environnementaux	Effets et occasions	Mesures d'adaptation
Augmentation des températures de l'air (été et hiver; variabilité accrue)	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la longueur des pistes et utilisation accrue de carburant en raison de la densité réduite de l'air Retards dus au froid extrême et à la chaleur (incidence sur les moteurs) Gauchissement des pistes 	<ul style="list-style-type: none"> Prise en compte des températures futures lors de la détermination des besoins en matière de longueur de piste Modification des procédures de dégivrage du moteur et des ailes (réduction des besoins en matière de dégivrage) Sélection de matériaux de revêtement résistants à la chaleur
Précipitations (changements dans les configurations saisonnières causant l'augmentation de la fréquence et des événements extrêmes)	<ul style="list-style-type: none"> Perturbations et retards de service; diminution du rendement en matière de ponctualité 	<ul style="list-style-type: none"> L'ajout de rainures sur les pistes afin d'améliorer la capacité de freinage et de maniabilité de l'aéronef; réduit le risque d'aquaplanage
Changements dans les configurations des glaces de lac et de mer	<ul style="list-style-type: none"> Risque accru d'inondation des pistes dans les secteurs vulnérables 	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration des infrastructures de gestion des eaux pluviales
Vent (changements dans les vitesses moyennes et extrêmes de vent)	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de l'incidence des objets étrangers présents sur les pistes, les voies de circulation et les installations d'entretien Entravé à l'entretien des aéronefs (particulièrement des endroits élevés du fuselage) Entrave aux procédures de déneigement et de dégivrage 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune mesure d'adaptation recensée dans la littérature
Changements dans les niveaux d'eau (lacs, rivières, océan) et dans les configurations des glaces de lac et de mer	<ul style="list-style-type: none"> Inondations des installations aéroportuaires 	<ul style="list-style-type: none"> Relocation et protection contre les inondations des installations
Dégradation du pergélisol	<ul style="list-style-type: none"> Problèmes de stabilité des pistes 	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation des géotextiles pour le renforcement et de thermosiphons pour le refroidissement du sol

ÉTUDE DE CAS N° 3 : ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES INFRASTRUCTURES DE GESTION DES EAUX PLUVIALES À L'AÉROPORT INTERNATIONAL PEARSON DE TORONTO

En 2012, l'Autorité aéroportuaire du Grand Toronto (GTAA) a évalué la vulnérabilité aux changements climatiques de certaines infrastructures de gestion des eaux pluviales à l'Aéroport international Pearson de Toronto à l'aide de processus d'évaluation de la vulnérabilité climatique du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) d'Ingénieurs Canada. L'évaluation a été menée principalement en raison des menaces potentielles aux infrastructures que présentent les conditions futures. Ces menaces comprennent les suivantes :

- inondation des pistes, des voies de circulation et des aires de manœuvre;
- dégâts aux terminaux et à l'équipement de navigation causés par le vent;
- écoulement des eaux pluviales dépassant la capacité de drainage;
- perturbations des opérations et de l'accès au sol;
- changements dans les besoins en matière de dégivrage et de déneigement des aéronefs.

Le protocole du CVIIP donne aux exploitants d'infrastructure une méthode pour évaluer la vulnérabilité de leurs actifs en fonction des paramètres climatiques historiques, récents et projetés. Le protocole se déroule en cinq étapes.

La première étape consistait à définir le projet. La GTAA a choisi de se concentrer sur certaines infrastructures de gestion des eaux pluviales et sur le dalot triple du ruisseau Spring (voir la figure 7). La GTAA a sélectionné un total de 27 variables climatiques pour évaluer les effets, y compris les variations de température, l'intensité, la durée et la fréquence des précipitations, les cycles de gel et dégel, le brouillard, le vent et les événements de tempêtes importants, entre autres (GTAA, 2014b). **La deuxième étape** consistait à recueillir les données climatiques historiques relatives à ces variables.

La troisième étape consistait à l'évaluation du risque. Le personnel de la GTAA a calculé les cotes de risque en multipliant la probabilité d'un effet par sa gravité. Selon cette évaluation, la valeur des probabilités de risque de 90 % des interactions entre les infrastructures et le climat n'a pas augmenté en fonction des conditions climatiques prévues par rapport aux conditions actuelles. Le personnel de la GTAA a également analysé 11 640 interactions entre l'infrastructure et le climat, et 27 % d'entre elles ont obtenu une cote suffisamment élevée pour faire l'objet d'une enquête technique plus approfondie.

Lors de la **quatrième étape**, analyse technique, le personnel a calculé le rapport entre les niveaux de stress climatiques actuels et futurs et la capacité de l'infrastructure de gestion des eaux pluviales. Sept interactions vulnérables ont été relevées, principalement liées à des événements de précipitations intenses, extrêmement abondantes et prolongées (voir GTAA, 2014b pour les définitions de ces événements).

Figure 7 : Dalot triple du ruisseau Spring À l'aéroport de Pearson . (Source: Toronto Pearson - Dalot du ruisseau printemps, 2010 - Photo prise par Morrison Hershfield Limited et gracieusement fournie par la L'Autorité aéroportuaire du Grand Toronto)





La cinquième étape consistait à établir les recommandations de mesures d'adaptation. Parmi ces mesures, on trouve l'examen des plans d'urgence actuels de la GTAA relatifs à la pluie, à la neige, à la glace et aux vents violents; la planification d'urgence relative aux événements à fort impact de faible probabilité (par exemple, les ouragans et les tornades); assurer l'inspection et l'entretien réguliers des systèmes de gestion des eaux pluviales (malgré un pronostic généralement positif); et la réévaluation fréquente des données climatiques (à savoir, les nouveaux scénarios du GIEC).

Comme la plupart des installations évaluées étaient des étangs ouverts ou de très grandes structures, l'analyse a conclu que les légères augmentations des températures et des précipitations d'ici au milieu du siècle (augmentations saisonnières et annuelles, de même que dans la fréquence et dans l'intensité des extrêmes) ne devraient pas produire d'effets graves sur les infrastructures et propres à ces dernières.

L'application du CVIIP suggère que dans des conditions futures de température plus élevée, la probabilité des événements de froid extrême est plus faible. Cependant, la probabilité des événements de précipitations de forte intensité sera plus grande. Au cours du processus, les membres du personnel ont pu observer les deux extrêmes. Des événements de pluie extrêmes sont survenus au cours de mois de juillet 2013, alors que de fortes chutes de neige, d'importantes accumulations de glace et des températures froides ont frappé la région au cours des mois de décembre 2013 et de janvier 2014.

Le personnel de la GTAA a mentionné que le processus du CVIIP était utile pour recenser à la fois les menaces et les occasions pour les exploitants aéroportuaires. En tant qu'entité émettrice d'obligations d'émission, la GTAA a la responsabilité de rendre les investisseurs conscients des problèmes qui pourraient avoir une incidence sur leurs décisions en matière d'investissement, y compris les risques climatiques. Les défis rencontrés par la GTAA lors de l'application du protocole du CVIIP sont les suivants :

- le maintien de l'uniformité et de la continuité au sein du personnel responsable d'effectuer l'évaluation;
- les dépassements de temps et de coûts d'environ 30 % en raison de la restructuration;
- assurer l'engagement total dans l'ensemble de l'organisation.

Il existe un consensus au sein du personnel selon lequel, bien que les données climatiques de référence étaient quelque peu désuètes (seules les données historiques pour la période de 1971 à 2000 étaient disponibles; les normes climatiques pour la période de 1981 à 2010 n'avaient pas encore été diffusées), l'utilisation de données plus récentes aurait uniquement déplacé les tendances incluses dans l'évaluation de la vulnérabilité progressivement à la hausse.

Dans l'ensemble, l'évaluation du CVIIP effectuée par la GTAA a contribué à hausser la sensibilisation et la compréhension des risques climatiques parmi les opérateurs et les actionnaires. Étant donné que le projet a évalué que 90 millions de dollars des actifs de 6 à 7 milliards de dollars de l'Aéroport, l'organisation élabore actuellement un processus simplifié basé sur le modèle du CVIIP qui serait appliqué à d'autres infrastructures plus rapidement, à un coût moindre et à un niveau de détail approprié.

Rédigé avec la collaboration de Derek Gray (Autorité aéroportuaire du Grand Toronto).

7.0 TRANSPORT MARITIME EN ONTARIO

7.1 RÉPERCUSSIONS CLIMATIQUES ANTÉRIEURES

Plusieurs événements météorologiques extrêmes climatiques ont eu une incidence sur les activités maritimes en Ontario. Par exemple, pendant la tempête qui a frappé les Grands Lacs de 1913 (du 7 au 13 novembre), deux fronts de tempête convergents ont créé des bourrasques de neige et des vents d'environ 145 km/h, coulant 34 navires et tuant 270 personnes (Environnement Canada, 2013a). Les dégâts, qui ont affecté les lacs Huron, Érié et Ontario en particulier, ont été estimés à 5 millions de dollars (119,3 millions en dollars de 2015) (Brown, 2002). La nature de la navigation sur les Grands Lacs au cours de cette période a contribué à augmenter le risque de chavirement, les bateaux étant construits en fonction de la largeur étroite de la Voie maritime du Saint-Laurent et de la faible profondeur de nombreux affluents des Grands Lacs (Catton, 1984). Suite à cette tempête, la trappe d'évacuation et d'autres exigences en matière de sécurité ont été mises en place, et la technologie de communication navire-terre s'est nettement améliorée depuis, contribuant à sauver des vies lors d'événements de haute intensité (Catton, 1984).

Les faibles niveaux d'eau dans les Grands Lacs ont également affecté négativement les transporteurs dans le passé. En 1964, les niveaux d'eau inférieurs à la moyenne ont causé des dommages à l'infrastructure portuaire, nécessitant 843 millions de dollars en réparations (en dollars de 1988, ou 1,49 milliard en dollars de 2015) (Shlozberg et coll., 2014).

7.2 RISQUES CLIMATIQUES FUTURS

Au cours du XXI^e siècle, les Grands Lacs connaîtront probablement un réchauffement annuel important, une évaporation accrue, une période sans glace prolongée et des changements dans les configurations de précipitations. Ces changements auront probablement une incidence sur les niveaux d'eau (voir la section 3). Pour les transporteurs, les variations des niveaux d'eau au cours des dernières années ont affecté les tirants d'eau des navires et les volumes annuels de transport maritime dans l'ensemble du réseau Grands Lacs. Le maintien de cette tendance pourrait occasionner une réduction de la capacité de charge des navires (ou des variations accrues de capacité de transport saisonnier), une augmentation des coûts, des perturbations d'horaires de transport plus fréquentes et réduire l'accès au littoral (Boyle et coll., 2013; Shlozberg et coll., 2014). Au cours du XXI^e siècle, les Grands Lacs connaîtront probablement un réchauffement annuel important, une évaporation accrue, une période sans glace prolongée et des changements dans les configurations de précipitations. Ces changements auront probablement une incidence sur les niveaux d'eau (voir la section 3). Pour les transporteurs, les variations des niveaux d'eau au cours des dernières années ont eu une incidence sur les capacités de chargement des navires et les volumes annuels de transport maritime dans l'ensemble du réseau Grands Lacs. Le maintien de cette tendance donnerait lieu à des capacités réduites de chargement des navires (ou produirait une plus grande variation de la capacité saisonnière de transport maritime), à une augmentation des coûts, à des perturbations plus fréquentes des calendriers de navigation, et à un accès réduit au littoral (Boyle et coll., 2013; Shlozberg et coll., 2014). Les pertes économiques seraient importantes. Une analyse récente suggère l'économie régionale subirait des impacts d'environ 1,18 milliard de dollars d'ici 2030, et de 1,92 milliard de dollars d'ici 2050 en raison de la productivité réduite du transport maritime dans des conditions de bas niveaux d'eau (Shlozberg et coll., 2014). Bien que les faibles niveaux d'eau ne sont pas sans précédent, dans les années 60, les niveaux d'eau dans de nombreux lacs étaient aussi inférieurs à la moyenne (Dorling et Hanniman, 2016), la possibilité de répercussions économiques de grande envergure rend cette situation très préoccupante pour l'économie de l'Ontario.

Les fluctuations des niveaux d'eau affectent aussi la stabilité de l'infrastructure, nécessitant un dragage supplémentaire des chenaux de navigation portuaires et des rampes intérieures. Ces mesures ont une incidence notable sur l'environnement. Les faibles niveaux d'eau peuvent

également causer l'érosion de l'infrastructure, en raison de l'exposition à l'oxygène de plus en plus importante des éléments de structure en bois (Clark, 2012). L'Ontario a connu ces problèmes : Les faibles niveaux d'eau en 2013 ont causé des problèmes aux quais à Tobermory et à South Baymouth dans la baie Georgienne, où les transbordeurs étaient trop bas pour permettre le fonctionnement adéquat des défenses d'accostage (conçues pour empêcher les navires d'endommager les quais). Les services de transbordeurs ne pouvaient pas être offerts comme prévu avant que ces défenses soient modifiées (The Manitoulin Expositor, 2013).

Parmi les autres risques pour le transport maritime recensés dans la littérature, on trouve les inondations soudaines des voies navigables intérieures en raison de précipitations extrêmes, et l'écoulement de surface causé par les embâcles (Andrey et Mills, 2003). Les vents forts durant les tempêtes rendent également les manœuvres plus difficiles, et l'accumulation de glace sur les structures en raison de l'augmentation de la pluie verglaçante et des phénomènes météorologiques extrêmes peuvent augmenter les dégâts causés par l'érosion par la glace sur les structures portuaires et les aides visuelles à la navigation durant l'hiver (OFCM, 2002).

De plus, selon les praticiens, le « décalage saisonnier » de la période navigable est une autre problématique importante pour les transporteurs sur les Grands Lacs et la Voie maritime du Saint-Laurent, désynchronisant les calendriers de construction et d'entretien traditionnels avec les exigences opérationnelles. Par exemple, une période de trafic maritime prolongée ou à longueur d'année dans les Grands Lacs réduirait ou éliminerait la période de remisage pour les transporteurs dans les Grands Lacs où se fait généralement l'entretien et la préparation de la flotte.

Les effets des conditions de seiche qui sont produites par des changements temporaires du niveau des lacs causés par la pression atmosphérique fluctuante posent également des risques importants pour l'infrastructure et les activités maritimes dans les Grands Lacs. Par exemple, un récent événement de seiche sur le lac Michigan a occasionné une baisse des niveaux d'eau de plus de 3 m en moins d'une heure, desséchant complètement les marinas avant de les inonder soudainement et détruisant les navires et les infrastructures (Commission mixte internationale, 2014a).

Les changements climatiques créent également des occasions pour le secteur du transport maritime. Celles-ci comprennent les suivantes :

- un prolongement de la saison d'hydravion dans certaines régions de la province (Andrey et Mills, 2003) (plus particulièrement dans les sous-régions du Centre et du Nord de l'Ontario);
- une saison de transport saisonnier prolongée durant l'été et le printemps;
- accumulations de glace réduites sur les navires et le gréement (Transportation Research Board, 2008);
- possibilités de nouvelles voies maritimes (y compris l'ouverture potentielle de voies maritimes à travers l'Arctique, même si ces dernières étaient limitées – voir la section 2.4) (Prowse et coll., 2009).

7.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

Un certain nombre de pratiques d'adaptations pour le transport maritime ont été abordées dans la littérature. Dans les cas où les baisses des niveaux d'eau ont une incidence sur la navigabilité, les transporteurs pourraient déplacer le fret vers les réseaux de transport routier ou ferroviaire (Savonis et coll., 2008). Parmi les autres réponses à la baisse des niveaux d'eau, on trouve la modification des procédures de navigation; l'investissement dans les technologies de régulation du débit et l'augmentation du dragage des chenaux (Andrey et Mills, 2003). La Corporation de gestion de la Voie maritime du Saint-Laurent (CGVMSL) adopte une approche de gestion adaptative à l'égard des changements climatiques qui comprend la surveillance des niveaux d'eau et la modélisation des configurations de glace (voir étude de cas n° 4). Les transporteurs commerciaux qui ont des activités

sur les Grands Lacs possèdent également une certaine capacité d'adaptation et de flexibilité; les exploitants prennent les niveaux d'eau en compte lors du chargement des navires, généralement de trois à quatre semaines avant d'arriver dans les eaux canadiennes (pour les transits internationaux).

Selon une analyse des coûts/avantages des solutions de régulation du débit pour certaines parties de la Voie maritime du Saint-Laurent, la solution la plus rentable consiste à construire une série de seuils, ou des structures en forme de casse-vitesse, dans le cours supérieur de la rivière Sainte-Claire qui réduirait la vitesse d'écoulement de la rivière. Cette mesure générerait des retombées économiques nettes de près de 250 millions de dollars (Dorling et Hanniman, 2016). *Plan 2014*, un plan de gestion du débit pour le lac Ontario et la Voie maritime élaboré par la Commission mixte internationale (2014b), vise à réduire les dommages pour les propriétaires fonciers, y compris les ports en contrôlant la gamme possible des niveaux d'eau. En grande partie, ces initiatives de planification visent à réduire les risques associés aux futurs niveaux d'eau incertains (Commission mixte internationale, 2014b; Dorling et Hanniman, 2016).

La navigation électronique renvoie à l'utilisation de technologies et de services de navigation modernes qui peuvent aider les exploitants à s'adapter aux périodes de baisse des niveaux d'eau en Ontario. Les améliorations potentielles à ces systèmes comprennent l'établissement de connexions Internet pour fournir des canaux de communication de base navire-terre sur les voies navigables. Des « systèmes d'optimisation sous quille » modernes ont également été installés dans certains endroits entre Québec et Montréal le long de la Voie maritime du Saint-Laurent (Garde côtière canadienne, 2015), permettant aux exploitants d'ajuster la vitesse (et le tirant) afin de passer à travers des chenaux contraints et de mieux gérer les risques liés aux fluctuations des niveaux d'eau (Galor, 2007). Ce système a également été proposé pour certaines parties de la Voie maritime passant par l'Ontario, y compris les rivières Sainte-Claire et Détroit, et la rivière St. Mary's.

La gestion de la possibilité d'inondations résultant d'embâcles au cours des premiers dégelés du printemps peut exiger une utilisation plus fréquente des navires-brise-glace. Les praticiens en Ontario indiquent que les deux derniers hivers ont démontré la nécessité de tenir compte des heures de fonctionnement additionnelles pour ces navires. Pour les ports à risque d'inondation (comme ceux sur les Grands Lacs vulnérables aux événements de seiche), des investissements dans certaines infrastructures de prévention des inondations (à savoir, les briselames et les digues) peuvent s'avérer de sages décisions (Savonis et coll., 2008).

Dans certaines parties de la province, le soufflage de la glace dans les écluses retarde l'ouverture de la saison de navigation. Cet effet peut être réduit en utilisant des rideaux (qui empêchent l'accumulation de glace) et des émulseurs (y compris des compresseurs et des combustibles). Toutefois, en raison de la réduction du manteau de glace au cours du XXI^e siècle, les problèmes posés par les débâcles devraient devenir moins importants pour les exploitants.

Le tableau 6 donne un aperçu des effets et des pratiques d'adaptation abordés dans la présente section.

Tableau 6 : Facteurs de risques climatiques abordés en lien avec leurs effets sur le transport maritime.

Facteurs de risques climatiques ou environnementaux	Effets et occasions	Mesures d'adaptation
Augmentation des températures de l'air (été et hiver; variabilité accrue)	<ul style="list-style-type: none"> Des baisses des niveaux d'eau sur les cours d'eau douce navigables (c.à.d. les Grands Lacs), occasionnant une augmentation des coûts et des voyages Accumulations de glace réduites sur les navires et le gréement (possibilité) Une saison de transport saisonnier prolongée durant l'été et le printemps (possibilité) 	<ul style="list-style-type: none"> Changements aux procédures de navigation; le dragage des chenaux; augmentation du débit
Précipitations (changements dans les configurations saisonnières causant l'augmentation de la fréquence et des événements extrêmes)	<ul style="list-style-type: none"> Perturbation des horaires de transport Inondations soudaines des voies navigables intérieures 	<ul style="list-style-type: none"> Décalage saisonnier des pratiques de transport Améliorations de la gestion du débit
Changements dans les configurations des glaces de lac et de mer	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des risques liés à la navigation en raison de la plus longue période de faiblesse de la banquise (p. ex. augmentation de l'action des vagues, des ondes de tempête, etc.) Une saison de transport saisonnier prolongée durant l'été et le printemps, émergence de nouvelles voies de transport (possibilité) Prolongement de la saison pour l'utilisation d'hydravions (possibilité) 	<ul style="list-style-type: none"> Investissements accrus dans l'équipement et les ressources de gestion de la glace
Vent (changements dans les vitesses moyennes et extrêmes de vent)	<ul style="list-style-type: none"> Variations à court terme des niveaux d'eau en raison de vents soutenus (Shlozberg et coll., 2014) Manœuvres de navires plus difficiles 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune mesure d'adaptation recensée dans la littérature Aucune mesure d'adaptation recensée dans la littérature
Changements dans les niveaux d'eau (lacs, rivières, océan)	<ul style="list-style-type: none"> Événements d'inondation causés par la seiche Navigabilité réduite dans la VMSLGL; restriction accrue des chenaux Accès plus difficile à l'infrastructure marine sur les rives Inondation des ports et dommages aux infrastructures causés par les ondes de tempêtes 	<ul style="list-style-type: none"> Relocalisation de l'infrastructure et installation d'infrastructures de prévention des inondations Changement de mode en faveur du transport routier, ferroviaire ou aérien Navigation électronique et technologies d'optimisation sous quille Dragage accru de chenaux Investissements dans technologies de prévention des inondations (c.à.d. navires-brise-glace et digues)

ÉTUDE DE CAS N° 4 : NIVEAUX D'EAU, DÉGAGEMENT DE LA GLACE ET GESTION ADAPTATIVE À LA CORPORATION DE GESTION DE LA VOIE MARITIME DU SAINT LAURENT

Les changements climatiques sont susceptibles de produire des effets importants pour les exploitants de transport sur le réseau Grands Lacs Voie maritime du Saint Laurent. La Voie maritime est une importante voie de transport maritime internationale s'étendant sur plus de 3 700 km à travers de nombreux territoires. Les tronçons névralgiques comprennent le canal Welland (reliant les lacs Ontario et Érié) et le segment du lac Ontario jusqu'à Montréal. La Corporation de gestion de la Voie maritime du Saint Laurent (CGVMSL), un organisme canadien, voit à ce que le trafic maritime se déplace en toute sécurité et efficacement en empruntant 13 des 15 écluses de la voie navigable.

Il existe beaucoup d'incertitude en ce qui concerne les niveaux d'eau le long de la Voie maritime, car ils ont tendance à varier d'une année à l'autre. Selon certaines études, les baisses des niveaux d'eau seront la norme durant le XXI^e siècle (Shlozberg et coll., 2014). D'autres études suggèrent que l'augmentation des précipitations pourrait provoquer des variations périodiques des niveaux (MacKay et Seglenieks, 2013). Quoi qu'il en soit, des stratégies pour faire face à l'incertitude sont recommandées. Pour les transporteurs, les baisses des niveaux d'eau présentent des risques pour la capacité et l'efficacité de la navigation, réduisant le volume de fret qui peut être transporté. Selon Andrey et coll. (2014), pour chaque centimètre d'eau perdue, la capacité d'un navire moyen diminue de six conteneurs (60 tonnes).

À court terme, l'accumulation importante de glace a été problématique pour les transporteurs et les exploitants d'infrastructures sur la Voie maritime, y compris la CGVMSL. L'accumulation de glace retarde l'ouverture saisonnière et augmente les besoins en matière de dégagement, de morcellement et d'évacuation. Comme les améliorations des infrastructures de gestion de débit sont considérées comme trop coûteuses et difficiles à mettre en œuvre (Andrey et coll., 2014), la CGVMSL a adopté un certain nombre de procédures d'adaptation en réponse aux impacts observés et projetés.

Par exemple, la CGVMSL recueille de nombreuses données climatiques dans le but de déterminer qu'elles seront les incidences des conditions environnementales sur le rendement de l'infrastructure à court et à long terme. Elle surveille également les niveaux d'eau, les conditions de température et de vent, et les configurations des glaces. L'organisation utilise ces données pour prédire les dates d'ouverture et de clôture des saisons de la Voie maritime, retenir les actifs et les services de brise glace, et louer la quantité appropriée d'équipement de gestion de la glace pour les chenaux et les écluses.

Cependant, les praticiens ont observé une variabilité accrue des conditions météorologiques le long de la Voie maritime au cours des dernières années, ce qui rend difficile pour la CGVMSL de prédire avec précision les conditions d'ouverture et de fermeture et les processus connexes. Au cours de la saison de navigation, la CGVMSL a des procédures pour faire face aux événements extrêmes (à court terme), y compris le vent causant la baisse des niveaux d'eau. Ces procédures comprennent les suivantes :

- suspension de la navigation et redirection temporaire des navires vulnérables vers des zones d'ancrage sûres jusqu'à ce que les conditions redeviennent acceptables;
- activation « d'interdictions de rencontre » au besoin (qui interdit le trafic dans les deux sens de la Voie);
- limite de vitesse et du tirant d'eau afin de réduire les risques liés à la navigation (échouage par exemple).

La réduction de la limite maximale du tirant d'eau ⁶ est un effet particulièrement problématique de la baisse des niveaux d'eau, puisque les coûts liés à la réduction de l'efficacité sont transférés aux transporteurs et aux entreprises en aval de la chaîne d'approvisionnement. Pour accroître la sécurité des navires à fort tirant d'eau, de nombreux navires ont installé à bord des Systèmes d'information sur le tirant d'eau. Cette application logicielle fournit des représentations graphiques des conditions sous quille

⁶ Le tirant d'eau correspond à la distance verticale entre la ligne de flottaison et le fond de la carène d'un navire, ce qui affecte la profondeur d'un navire dans l'eau.



prévues pour un navire en fonction de sa position, de sa vitesse et de sa direction par rapport aux niveaux d'eau environnants et à la bathymétrie. Le système permet aux navires de prendre des mesures proactives de modification du tirant d'eau pour assurer le transport en toute sécurité en ajustant la vitesse. En 2014, 39 navires commerciaux d'eaux intérieures ont utilisé cette application sur la Voie maritime, mais il existe un potentiel pour une plus grande adoption.

La glace est une autre considération importante pour la CGVMSL. Elle a retardé l'ouverture de la section Montréal lac Ontario de la Voie maritime en 2014, augmentant les besoins en matière de dégagement, de morcellement et d'évacuation des glaces. La gestion de la glace dépend fortement de la coordination avec les gardes côtières du Canada et des États Unis pour le soutien offert par leurs navires-brise-glace. La CGVMSL retient également les services de remorqueurs équipés de grattoirs et d'excavateurs pour la gestion de la glace au besoin.

La glace ne retarde généralement pas l'ouverture du canal Welland. Cependant, au début de la saison 2014, les navires qui empruntaient le passage de St. Catharines à Port Colborne ne pouvaient pas circuler à cause de la glace sur les lacs Érié, Supérieur et Huron. La glace était également soufflée dans les écluses, provoquant des retards temporaires.

La glace est une préoccupation plus importante sur le segment du lac Ontario à Montréal en raison d'une plus grande diversité géographique et des conditions générales plus sévères. Les rideaux et les émulseurs sont utilisés pour protéger les écluses des glaces lorsqu'il est possible de le faire. L'augmentation de la capacité de gestion de la glace s'est avérée utile pour l'adaptation aux configurations changeantes des conditions hivernales extrêmes, mais pourrait devenir moins coûteuse avec l'adoucissement progressif des hivers le long de la Voie maritime.

Rédigé avec la collaboration de Shari Grady (Corporation de gestion de la Voie maritime du Saint Laurent).

8.0 UNE APPROCHE MULTIMODALE AUX TRANSPORTS ET À L'ADAPTATION

Les changements climatiques auront une incidence différente sur le Nord et le Centre de l'Ontario par rapport au Sud, et la capacité d'adaptation varie considérablement entre les municipalités au sein de ces sousrégions. Par rapport au Sud, ces deux sousrégions couvrent une superficie plus importante et ont moins de données et de ressources disponibles pour appuyer les prises de décisions adaptatives en matière de transport (Chiotti et Lavender, 2008). Le gouvernement provincial a pris des mesures pour déterminer les stratégies d'adaptation appropriées au climat pour le transport dans ces régions, et a lancé une étude multimodale portant sur le « nord proche » et l'« extrême nord » de l'Ontario (ce qui correspond environ aux sousrégions du Centre et du Nord) (Caroline de Groot, Ministère des Transports de l'Ontario, communication personnelle, 2015).

Cette étude permettra de recenser les améliorations à court, moyen et long terme pour tous les modes de transport. L'étude permettra également de fournir aux utilisateurs et aux fournisseurs de services de transport des solutions d'adaptation tangibles de même que les bases nécessaires aux décideurs pour prendre des mesures en faisant ce qui suit :

- en relevant les éléments de preuve concrets (c.à.d. données climatiques scientifiques rigoureuses) pour soutenir les preuves anecdotiques des changements climatiques (c.à.d. les saisons d'accès aux routes d'hiver plus courtes);
- en recensant les effets possibles des changements climatiques sur les normes d'exploitation, d'entretien et de construction des infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires et maritimes du Nord de l'Ontario;
- en déterminant les meilleures pratiques et orientations stratégiques pour relever les défis mentionnés cidessus.

9.0 LES LACUNES DANS LES CONNAISSANCES ET LES CONTRAINTES LIÉES À LA PRISE DE DÉCISIONS ADAPTATIVES EN ONTARIO

En dépit des progrès accomplis dans un certain nombre d'initiatives dans la province, les obstacles à l'adaptation dans le secteur des transports persistent. Les contraintes en matière de ressources et d'expertise peuvent être des obstacles à l'élaboration et à la mise en œuvre de stratégies d'adaptation significatives, en particulier dans le Nord et le Centre de l'Ontario.

Les effets cumulatifs des changements climatiques sur les infrastructures de transport, à savoir deux ou plusieurs impacts simultanés, ne sont pas étudiés suffisamment et sont difficiles à prévoir. Par exemple, l'augmentation du nombre de cycles de gel et de dégel en Ontario peut se combiner à des événements inhabituels d'inondation à la mi-hiver qui dépassent les capacités de gestion des eaux pluviales, produisant des forces de levage et de cisaillement destructrices sur les autoroutes, les ponts, les écluses et les ports. Bien que des exemples concrets de ces effets fassent défaut en Ontario, les récentes tempêtes hivernales aux États-Unis et au Royaume-Uni portent à croire que les dommages aux infrastructures résultant de l'inondation sur le sol gelé peuvent être sévères (Oh et coll., 2010; Met Office, 2014).

Traiter l'adaptation comme une question distincte des autres aspects du transport est une contrainte supplémentaire. Les communautés et les praticiens canadiens n'ont intégré les objectifs d'adaptation que dans une faible proportion de la planification et des prises de décision en matière de transport (Newman et coll., 2013; Henstra, 2015). Certaines initiatives en Ontario, telles que celles soulignées dans les études de cas, représentent des exceptions notables.

Des contraintes existent également au sein de la communauté scientifique et de l'adaptation climatique, du secteur des transports (pris dans son ensemble) et dans l'intégration des efforts dans ces deux domaines. La variété et la complexité des données de modèles climatiques disponibles font en sorte qu'il est difficile pour les décideurs d'évaluer la vulnérabilité et de déterminer les options d'adaptation appropriées. Ingénieurs Canada (2012) fait également valoir que l'absence de projections climatiques localisées fait en sorte qu'il est difficile pour les décideurs de justifier des investissements dans une infrastructure adaptative plus coûteuse par rapport à une infrastructure moins coûteuse qui est généralement conçue en fonction de pressions climatiques historiques (souvent avec l'utilisation de données qui ne sont plus à jour). Les solutions à cette situation comprennent le maintien et le développement de données historiques et de processus de modélisation climatique plus robustes, et la formation des ingénieurs pour leur permettre de gérer efficacement l'incertitude climatique.

Un autre défi est la complexité traditionnelle du système de fret et des différentes responsabilités juridictionnelles. Compte tenu du large éventail d'intervenants et d'organismes qui participent aux activités de transport routier des marchandises à l'échelle internationale, il est souvent difficile de déterminer de quelle façon aborder les mesures d'adaptation climatique et qui en est responsable.

10.0 CONCLUSIONS

L'Ontario est confronté à des risques divers et potentiellement coûteux associés aux changements climatiques et à l'évolution des besoins en matière de transport. Alors que la capacité d'adaptation de l'Ontario est généralement élevée, la vulnérabilité aux événements météorologiques extrêmes et aux changements progressifs présente des défis pour les décideurs et les exploitants d'infrastructures dans le domaine du transport.

Les pratiques d'adaptation décrites dans le présent chapitre témoignent de la volonté des décideurs pour faire face aux risques pour l'efficacité et la sécurité posés par les changements climatiques à la fois à l'infrastructure et aux activités. Le défi à tous les niveaux est de fournir des réponses coordonnées, efficaces et opportunes à l'égard de ces risques.

RÉFÉRENCES

- Affaires autochtones et Développement du Nord Canada. (2014). *Région de l'Ontario*. Repéré à <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/fra/1100100020284/1100100020288>
- Andrey, J. et Mills, B. (2003). Climate change and the Canadian transportation system : Vulnerabilities and adaptations. Dans J. Andrey and C. Knapper (Éds.), *Weather and transportation in Canada* (pp. 235-279.) Publication series number 55, Department of Geography, University of Waterloo.
- Andrey, J., Mills, B., Leahy, M., et Suggett, J. (2003). Weather as a chronic hazard for road transportation in Canadian cities. *Natural Hazards*, 28(2), 319-343.
- Andrey, J., Kertland, P., et Warren, F.J. (2014). Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport. Dans F.J. Warren et D.S. Lemmen (Éds.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation* (pp. 233-252). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Association des chemins de fer du Canada. (2014). *Tendances ferroviaires 2014*. Repéré à <http://www.railcan.ca/fr/publications/trends>
- Association des transports du Canada. (2010). *Lignes directrices de développement et de gestion des infrastructures de transport dans les régions de pergélisol*. Ottawa, ON. .
- Association des transports du Canada. (2011). *Lignes directrices relatives à la construction et à l'exploitation des routes d'hiver*. Ottawa, ON.
- Atkinson, D.E., Forbes, D.L., et James, T.S. (2016). Un littoral dynamique dans un contexte de climat en mutation. Dans D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James et C.S.L. Mercer Clarke (Éds.), *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat* (pp. 27-68). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Auld, H., Gray, P., Haley, D., Klaassen, J., Konnefat, H., MacIver, D., McNicol, D., Nimmrichter, P., Schiefer, K., et Taylor, M. (2006). *Coastal zone and climate change on the Great Lakes : Final report*. Ottawa, ON: Ressources naturelles Canada.
- Autorité aéroportuaire du Grand Toronto (GTAA). (2014a). *Perturbations de l'exploitation de l'aéroport Toronto Pearson en janvier 2014 : examen et recommandations*. Repéré à <http://www.torontopearson.com/fr/YourAirportYourSay/#>
- Autorité aéroportuaire du Grand Toronto (GTAA). (2014b). *Climate change vulnerability assessment for selected stormwater infrastructure at Toronto Pearson International Airport*. Repéré à https://pievc.ca/assessments?tid=9&field_province_tid=All&field_status_value=All
- Baldwin, D.J., Desloges, J.R., et Band, L.E. (2011). Physical geography of Ontario. Dans A.H. Perera, D.L. Euler, et D. Thompson (Eds.), *Ecology of a managed terrestrial landscape: patterns and processes of forest landscapes in Ontario*. Vancouver, BC : UBC Press.
- Boyle, J., Cunningham, M., et Dekens, J. (2013). *Climate change adaptation and Canadian Infrastructure : A review of the literature*. Winnipeg, MB : International Institute for Sustainable Development. Repéré à http://www.iisd.org/pdf/2013/adaptation_can_infrastructure.pdf
- Brown, D. (2002). *White hurricane : A Great Lakes November gale and America's deadliest maritime disaster*. International Marine/Ragged Mountain Press.
- Brown, C., Moody, P., Lefever, D., et Morales, J. (2012). *Decision-making under climate change uncertainty in the International Upper Great Lakes Study : Synthesis report*. International Upper Great Lakes Study, Commission mixte internationale. Repéré à <http://www.iugls.org/project/Risk%20Assessment%20and%20Decision%20Making%20under%20Climate%20Change%20Uncertainty>
- Bruce, J. (2011). *Climate change information for adaptation: Climate trends and projected values for Canada from 2010 to 2050*. Institute for Catastrophic Loss Reduction. Repéré à http://www.fcm.ca/Documents/reports/PCP/Climate_change_information_for_adaptation_Climate_trends_and_projected_values_for_Canada_from_2010_to_2050%20_EN.pdf
- Buchanan, F., et Gwartz, S.E. (2005). *Road weather information systems at the Ministry of Transportation, Ontario*. Document présenté à la session Road Weather Information as a Decision-Making Tool in Winter Maintenance Operations à la conférence annuelle 2005 de l'Association des transports du Canada. Calgary, AB. Repéré à <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2005/docs/s3/buchanan.pdf>
- Bureau du commissaire des incendies et de la gestion des situations d'urgence. (2014). *Tempête de verglas du sud de l'Ontario en 2013. Compte rendu après action de l'Ontario*. Repéré à http://www.mcscs.jus.gov.on.ca/french/publications/MCSCS_pubs_EM_ice_storm_statement_fr.html
- Caldwell, H., Quinn, K., Meunier, J., Grenzeback, L. (2002). Potential impacts of climate change on freight transport. Dans *The Potential impacts of climate change on transportation : Summary and discussion papers. Federal Research Partnership Workshop*, 1-2 octobre, 2002. Washington, DC : Center for Climate Change and Environmental Forecasting, US Department of Transportation.
- Catton, B. (1984). The ultimate storm : The Great Lakes hurricane of 1913. *American Heritage*, 35, pp. 102-107.
- CBC News. (2013). *Rain pounds Toronto, strands commuters on train*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/toronto/rain-pounds-toronto-strands-commuters-on-train-1.1355217>
- Cheng, C., Auld, H., Li, G., Klaassen, J., et Li, Q. (2007). Possible impacts of climate change on freezing rain in south-central Canada using downscaled climate scenarios. *Natural Hazards and Earth Systems Science*, 7, 71-87.
- Cheng, C., Li, G., et Auld, H. (2011). Possible impacts of climate change on freezing rain using downscaled future climate scenarios : Updated for Eastern Canada. *Atmosphere-Ocean*, 49(1), 8-21.

- Cheng, C., Auld, H., Li, Q., et Li, G. (2012a). Possible impacts of climate change on extreme weather events at local scale in south-central Canada. *Climate Change*, 112, 963-979.
- Cheng, C., Li, G., Li, Q., Auld, H., et Fu, C. (2012b). Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions over Ontario, Canada. *Journal of Climate*, 25, 3390-3408.
- Chiotti, Q., et Lavender, B. (2008). Ontario. Dans F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (Éds.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (pp. 227-274). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Clark, G. (2012). *Climate change implications and adaptation strategies*. University of Wisconsin Sea Grant Institute. Repéré à <http://www.seagrant.wisc.edu/Home/Topics/PortsHarborsandMarinas/Details.aspx?PostID=1562>
- Clean Air Partnership. (2012). *Accelerating adaptation in Canadian communities : York Region de-icing strategy* (Étude cas 2 de 9). Repéré à http://www.adaptationlibrary.com/media/ractool/attachments/133_ON_YorkRegionDe-icingStrategies_1.pdf
- Colombo, S.J., McKenney, D.W., Lawrence, K.M., et Gray, P.A. (2007). *Climate change projections for Ontario: Practical information for policymakers and planners*. Sault Ste. Marie, ON : Ministère des Ressources naturelles de l'Ontario. Repéré à http://www.climateontario.ca/MNR_Publications/276923.pdf
- Commission mixte internationale. (2014a). *Ils viennent par vagues : seiches et météotsunamis dans les Grands Lacs*. Repéré à http://www.ijc.org/fr_/blog/2014/10/23/they_come_in_waves_seiches_tsunami/
- Commission mixte internationale. (2014b). *Plan 2014 : Régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. Protection contre les niveaux extrêmes, restauration des milieux humides et préparation aux changements climatiques*. Repéré à http://www.ijc.org/fr_/Plan2014/Report
- Conseil international de contrôle du fleuve Saint-Laurent. (2015). *Le rapport d'étape semestriel couvrant la période du 24 septembre 2014 au 28 février 2015*. Repéré à http://ijc.org/fr_/islrbc/publications
- Corporation de gestion de la Voie maritime du Saint-Laurent. (2014). *Faits sur le réseau Grands Lacs-Voie maritime du Saint-Laurent (Autoroute H2O)*. Repéré à <http://www.greatlakes-seaway.com/fr/voie-maritime/faits/index.html>
- Deloitte. (2014, 31 mars). *Preparing for climate 2100 : Winter road damages and adaptation options under temperature increase (Northern Ontario winter road network). Task authorization #6 – Rapport final*.
- Deng, Z., Qiu, X., Liu, J., Madras, N., Wang, X., et Zhu, H. (2015). Trend in frequency of extreme precipitation events over Ontario from ensembles of multiple GCMs. *Climate Dynamics*, 1-13.
- Données et scénarios climatiques canadiens. (2015). *Parcelles de projections climatiques au Canada à partir de données CMIP5*. Repéré à <http://ccds-dscc.ec.gc.ca/index.php?page=download-cmip5&lang=fr>
- Dore, M., et Burton, I. (2001). *The costs of adaptation to climate change in Canada: A stratified estimate by sectors and regions – Social infrastructure*. Rapport final soumis au programme sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques. Ottawa, ON : Ressources naturelles Canada. Repéré à http://www.researchgate.net/publication/228805202_The_Costs_of_Adaptation_to_Climate_Change_in_Canada_A_stratified_estimate_by_sectors_and_regions
- Dorling, R., et Hanniman, K. (2016). *Restoring water levels on Lake Michigan-Huron. A cost-benefit analysis*. Mowat Centre. Repéré à <https://mowatcentre.ca/restoring-water-levels-on-lake-michigan-huron/>
- Environnement Canada. (2013a). *Les phénomènes météorologiques les plus importants du 20e siècle*. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=6a4a3ac5-1>
- Environnement Canada. (2013b). *Les effets de l'ouragan Hazel - Perturbations dans les transports*. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=FE4D3A3F-1>
- Environnement Canada. (2014). *Les dix événements marquants au Canada en 2013 : Pluies torrentielles à Toronto*. Repéré à <http://ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=5BA5EAFc-1&offset=3&toc=show>
- Federal Highway Administration. (2015). *TechBrief : Climate change adaptation for pavements*. FHWA-HIF-15-015. Repéré à <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/sustainability/hif15015.pdf>
- Fu, L., Trudel, M., et Valeri, K. (2009). Optimizing winter road maintenance operations under real-time information. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 332-341.
- Galor, W. (2007). *Optimization of under-keel clearance during ship's maneuvering in port water areas*. Risk, Reliability and Societal Safety : Proceedings of the European Safety and Reliability Conference 2007, Stavanger, Norway, 25-27 juin, 2681-2688.
- Garde côtière canadienne. (2015). *Dégagement sous quille autres navires (autres que porte-conteneurs), fleuve Saint-Laurent, Québec à Montréal*. Repéré à http://www.marinfo.gc.ca/fr/Publications/Table_Autres.asp
- Great Lakes Environmental Research Laboratory. (2015, February). *Water levels of the Great Lakes*. Repéré à <http://www.glerl.noaa.gov/pubs/brochures/lakelevels/>
- Gula, J., et Peltier, W. (2012). Dynamical downscaling over the Great Lakes Basin of North America using the WRF regional climate model: The impact of the Great Lakes system on regional greenhouse warming. *Journal of Climate*, 25, 7723-7742.
- Henstra, D. (2015). *The multilevel governance of climate change: Analyzing Canada's adaptation policy regime*. Document préparé pour la réunion annuelle de l'Association canadienne de science politique [Canadian Political Science Association], Session K6 – New Forms of Governance in Public Policy Development, University of Ottawa, Ottawa, ON, 3 juin, 2015.

- Ho, E., et Gough, W. (2006). Freeze thaw cycles in Toronto, Canada in a changing climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 83(1), 203-210.
- Huron County. (2014). *Forests for our future : Management plan for the county forests. Recommendations for tree cover enhancement*. Repéré à http://www.huroncounty.ca/plandev/downloads/Forest_For_Our_Future_2014-2033.pdf
- Hutton, T. (2010). Economic change in Canadian cities : Location dynamics of employment. Dans T. Bunting, P. Filion, et R. Walker (Eds.), *Canadian Cities in Transition : New Directions in the Twenty-first Century* (pp. 110-130). Don Mills, ON : Oxford University Press.
- Ingénieurs Canada. (2012). *Roads and associated structures expert working group review : Climate considerations in Canadian codes, standards and related instruments affecting roads infrastructure systems*.
- Kahl, K., et Stirrat, H. (2012). *What could changing water levels mean for our coastal communities?* The Nature Conservancy. Repéré à <http://www.nature.org/ourinitiatives/regions/northamerica/areas/greatlakes/explore/great-lakes-lake-levels-case-study.pdf>
- Koatse, M., et Rietveld, P. (2012). Adaptation to climate change in the transport sector. *Transport Reviews*, 32(3), 267-286.
- MacKay, M., et Seglenieks, F. (2013). On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change. *Climatic Change*, 117, 55-67.
- Maoh, H., Kanaragolou, P., et Woudsma, C. (2008). Simulation model for assessing the impact of climate change on transportation and the economy in Canada. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, No. 2067. Washington, DC : Transportation Research Board of the National Academies, 84-92 p.
- The Manitoulin Expositor. (2013). *Chi-Cheemaun sailings wait for dock improvements*. Repéré à <http://www.manitoulin.ca/2013/04/30/chi-cheemaun-sailings-wait-for-dock-improvements/>
- Martin Associates. (2011). *The economic impacts of the Great Lakes-St. Lawrence Seaway system*. Repéré à http://www.greatlakes-seaway.com/en/pdf/eco_impact_sum.pdf
- Met Office. (2014). *The recent storms and floods in the UK*. Natural Environment Research Centre. Repéré à http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/n/i/Recent_Storms_Briefing_Final_07023.pdf
- Metrolinx. (2014, août). *Faits en bref : GO Transit en chiffres*. Repéré à <http://www.gotransit.com/public/fr/aboutus/publications.aspx>
- Metrolinx. (2015). *Stratégie quinquennale de 2015 à 2020 de Metrolinx*. Repéré à http://www.metrolinx.com/fr/aboutus/publications/annual_reports.aspx
- Mills, B., Tighe, S., Andrey, J., Smith, J., et Huen, K. (2009). Climate change implications for flexible pavement design and performance in Southern Canada. *Journal of Transportation Engineering*, 135(10), 773-782.
- Ministère de l'infrastructure et Ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario. (2011). *Plan de croissance du Nord de l'Ontario, 2011*. Repéré à https://www.placestogrow.ca/index.php?option=com_content&task=view&id=53&Itemid=65&lang=fr
- Ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario. (2012). *Programme des routes du Nord: 2012-2016*. Repéré à <http://www.mto.gov.on.ca/french/highway-bridges/southern-and-northern-highways-programs.shtml>
- Ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario. (2013). *Rapport annuel, 2012-2013*. Repéré à <http://www.mndm.gov.on.ca/fr/le-ministere/rapport-annuel/rapport-annuel-2012-2013>
- Ministère des Finances de l'Ontario. (2013). *Mise à jour des projections démographiques pour l'Ontario, 2012-2036 : L'Ontario et ses 49 divisions de recensement*.
- Ministère des Transports de l'Ontario. (2013a). *Web Recherche de courbes IDF*. Repéré à http://www.mto.gov.on.ca/IDF_Curves/terms.shtml?coords=43.866218,-79.40918
- Ministère des Transports de l'Ontario. (2013b). *Pavement design and rehabilitation manual (deuxième édition)*. MTO/Manual/pdrm/2013.
- Newman, J., Perl, A., Wellstead, A., et McNutt, K. (2013). Policy capacity for climate change in Canada's transportation sector. *Review of Policy Research*, 30(1), 19-41.
- Office of the Federal Coordinator for Meteorology (OFCM). (2002). *Weather information for surface transportation: National needs assessment*. Repéré à http://www.ofcm.gov/wist_report/wist-report.htm
- Oh, E., Deshmukh, A., et Hastak, M. (2010). Disaster impact analysis of inter-relationship of critical infrastructure and associated industries : A winter flood disaster event. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 1(1), 25-49.
- Prowse, T., Furgal, C., Chouinard, R., Melling, H., Milburn, D., et Smith, S. (2009). Implications of climate change for economic development in Northern Canada : Energy, resource, and transportation sectors. *Ambio*, 38(5), 272-281.
- Reid, S., Smit, B., Caldwell, W., et Belliveau, S. (2007). Vulnerability and adaptation to climate risks in Ontario agriculture. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(4), 609-637.
- Savonis, M., Burkett, V., et Potter, J. (2008). Impacts of climate variability and change on transportation systems and infrastructure : Gulf coast study. *United States Climate Change Science Program, Synthesis and Assessment Product 4.7*. Washington, DC: United States Department of Transportation.
- Schwanz, M. (2014). *Ottawa Int'l sets precedent with grooved runway. Airport Improvement*. Repéré à <http://www.airportimprovement.com/article/ottawa-intl-sets-precedent-grooved-runway>
- Secrétariat de l'OACI. (2010). *ICAO environmental report : Aviation and climate change*. Repéré à <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/EnvReport10.aspx>

- Shephard, M., Mekis, E., Morris, R., Feng, Y., Zhang, X., Kilcup, K., et Fleetwood, R. (2014). Trends in short-duration extreme rainfall : Including an intensity-duration-frequency perspective. *Atmosphere-Ocean*, 52(5), 398-417.
- Shlozberg, R., Dorling, R., et Spiro, P. (2014). *Low water blues : An economic impact assessment of future low water levels in the Great Lakes and St. Lawrence River*. Mowat Centre and Council of the Great Lakes Region. Repéré à <http://mowatcentre.ca/low-water-blues/>
- Sous-groupe de travail fédérale/provinciale/territoriale sur les transports du Nord. (2015, mars). *Report on winter roads*. Transports Canada.
- Statistique Canada. (2010). *Fret intérieur et international, tonnage du fret chargé et déchargé du transport par eau, par province et territoire (Transport maritime intérieur)*. Produit n° 54-205-X au catalogue. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/101/cst01/trad51a-eng.htm>
- Statistique Canada. (2012). *Série perspective géographique, Recensement de 2011*. Produit n° 98-310-XWF2011004 au catalogue. Repéré à <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/as-sa/fogs-spg/Facts-pr-fra.cfm?LANG=Fra&GK=PR&GC=35>
- Statistique Canada. (2014). *Population par année, par province et territoire (Nombre)*. CANSIM tableau 051-0001. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/102/cst01/demo02a-fra.htm>
- Statistique Canada. (2015a). *Transport ferroviaire, longueur des voies exploitées pour le transport des marchandises et des voyageurs, par province et territoire*. CANSIM tableau 404-0011 et produit n° 52-216-XIF au catalogue. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/102/cst01/trad47a-fra.htm>
- Statistique Canada. (2015b). *Transport ferroviaire, origine et destination des marchandises*. CANSIM tableau 404-0011 et produit n° 52-216-XIF au catalogue. Repéré à <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?id=4040021&pattern=&p2=-1&stByVal=1&p1=1&tabMode=dataTable&csid=&retrLang=eng&lang=eng>
- Statistique Canada. (2015c). *Transport ferroviaire, origine et destination des marchandises annuel (tonnes)*. CANSIM tableau 404-0021. Repéré à <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?lang=eng&retrLang=eng&id=4040021&&pattern=&stByVal=1&p1=1&p2=-1&tabMode=dataTable&csid=>
- Statistique Canada. (2016). *Traffic aérien de passagers et vols, annuel (nombre)*. CANSIM tableau 401-0044. Repéré à <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26>
- Tighe, S., Smith, J., Mills, B., et Andrey, J. (2008). Evaluating climate change impact on low-volume roads in southern Canada. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2053, 9-16.
- Transportation Research Board. (2008). *Climate change impacts on US transportation infrastructure*.
- Transportation Research Board Special Report 290. Washington, DC : National Research Council of the National Academies.
- Transportation Research Board. (2011). *Optimizing the use of aircraft deicing and anti-icing fluids*. Airport Cooperative Research Program, Rapport 45. Repéré à http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp_rpt_045.pdf
- Transports Canada. (2004). *TP 10643 - Dans le doute... Programme de formation pour petits et gros aéronefs - Formation sur la contamination des surfaces critiques des aéronefs à l'intention des équipages de conduite et du personnel de piste*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/aviationcivile/publications/tp10643-menu-1118.htm>
- Transports Canada. (2014). *Les transports au Canada 2013 : un survol et addenda*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/anre-menu.htm>
- Transports Canada. (2015). *Les transports au Canada 2014 : un survol et addenda*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/anre-menu.htm>
- Transports Canada. (2016). *Les transports au Canada 2015 : Addenda statistique. Tableau RO12 : Les vingt principaux postes frontalières franchis par les camions, 2011 – 2015*.
- VIA Rail Canada. (2015). *Notre société en chiffres*. Repéré à <http://www.viarail.ca/fr/a-propos-de-via/notre-entreprise/notre-societe-en-chiffres>
- Ville de Toronto. (2011, April). *Toronto's adaptation actions*. Repéré à <http://www1.toronto.ca/wps/portal/contentonly?vgnextoid=78cfa84c9f6e1410VgnVCM10000071d60f89RCRD>
- Ville de Toronto. (2014). *Impacts from the December 2013 extreme winter storm event on the City of Toronto*. Repéré à <http://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2014/cc/bgrd/back-groundfile-65676.pdf>
- Ville de Toronto. (2015). *Climate change adaptation : Towards a resilient city*. Repéré à <http://www1.toronto.ca/wps/portal/contentonly?vgnextoid=78cfa84c9f6e1410VgnVCM10000071d60f89RCRD>
- Vincent, L., Zhang, X., Brown, R., Feng, Y., Mekis, E., Milewska, E., Wan, H., et Wang, X. (2015). Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes. *Journal of Climate*, 28, 4545-4560.
- Wang, H., Chen, J., Balaguru, P., et Al-Nazer, L. (2015). Thermal benefits of low solar absorption coating for preventing rail buckling. *Proceedings of the 2015 Joint Rail Conference*, San Jose, CA, 23-26 mars.
- Westra, S., Fowler, H., Evans, J., Alexander, L., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E., Landerink, G., et Roberts, N. (2015). Future changes in the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52, 522-555.
- Woudsma, C., Kanaragolou, P., Maoh, H., et Marshall, S. (2007). *Climate change and Canadian road transport : Assessing impacts and adaptation*. Ottawa, ON : Ressources naturelles Canada.
- Zwiers, F., et Kharin, V. (1998). Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂ doubling. *Journal of Climate*, 11, 2200-2222.