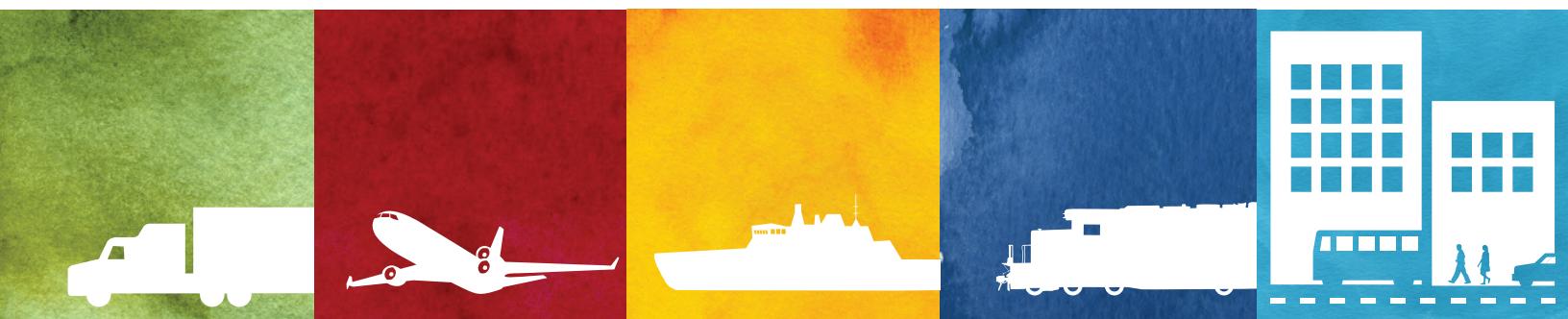


Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation

Pour le secteur canadien des transports 2016



Cette publication est aussi disponible à l'adresse suivante :
adaptation.rncan.gc.ca

Also available in English under the title: Climate Risks and Adaptation Practices for the Canadian Transportation Sector 2016.

La page couverture du rapport et des chapitres ainsi que les graphiques sont l'œuvre de : Soaring Tortoise www.soaringtortoise.ca
Tous droits réservés.

Pour obtenir plus de renseignements sur les droits de reproduction, communiquez avec Transports Canada à : TCcopyright-droitdauteurTC@tc.gc.ca

No TP. : 15353F
No de cat. : T42-12/2017F-PDF
No ISBN : 978-0-660-07681-2
TC-1005849



Gouvernement
du Canada

Government
of Canada

RISQUES CLIMATIQUES ET PRATIQUES EN MATIÈRE D'ADAPTATION POUR LE SECTEUR CANADIEN DES TRANSPORTS 2016

RÉVISÉ PAR :

KATHY G. PALKO

DIRECTION GÉNÉRALE DES POLITIQUES ENVIRONNEMENTALES
TRANSPORTS CANADA

DONALD S. LEMMEN

DIVISION DES IMPACTS ET DE L'ADAPTATION LIÉS AUX
CHANGEMENTS CLIMATIQUES RESSOURCES
NATURELLES CANADA

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Palko, K. et Lemmen, D.S. (Éds.). (2017). *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016*, Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

Canada

Cette évaluation a été réalisée par la Plateforme d'adaptation de Ressources naturelles Canada, qui réunit des représentants du gouvernement, de l'industrie et d'organisations professionnelles afin qu'ils collaborent aux priorités en matière d'adaptation. Pour obtenir de plus amples renseignements sur la plateforme d'adaptation ou pour télécharger de nouveaux produits comme des études de cas, des outils d'adaptation, des documents d'orientation et des rapports, visitez le site : adaptation.rncan.gc.ca

REMERCIEMENTS

Nous remercions du fond du cœur les membres suivants du comité consultatif pour leurs conseils, leur appui et leur rétroaction tout au long du processus :

Les Aalders	Anja Jeffrey	Diane Leroux	Bob Pett
Dan Casselman	David Lapp	Bill Parish	Jayleen Robertson
Caroline Gravel	Caroline Larrivée	David Pearson	Terry Zdan
Michael Gullo			

Nous souhaitons aussi reconnaître le travail de l'auteur principal, des coauteurs et des réviseurs de chaque chapitre :

Jean Andrey	Sabine Dietz	Don Lemmen	Vesna Stevanovic-Briatico
Elaine Aucoin	Hugh Donovan	Doug Matthews	Art Stewart
Jim Barnes	Peter Dzikowski	Joel R. Nodelman	John Streicker
Jocelyn Beatty	Hani Farghaly	Dirk Nyland	Stephane Thibodeau
Marie-Pier Breton	Ken Forrest	Kathy Palko	Will Towns
Nazzareno Capano	Shari Grady	Kala Pendakur	E.O.D. Waygood
Jeff Casello	Katherine Grandmont	Bob Pett	Mel White
Norm Catto	Derek Gray	Al Phillips	Clarence Woudsma
Quentin Chiotti	Naomi Happychuk	Dr. Ian Picketts	Yuri Yevdokimov
Geneviève Cloutier	Jeff Hoyt	Eric Rapaport	
Jackie Dawson	Caroline Larrivée	Sidney Starkman	

Nous remercions également les personnes suivantes d'avoir pris le temps de fournir un examen critique spécialisé d'un ou plusieurs chapitres, ainsi que les personnes qui ont écrit les études de cas présentées dans le rapport ou qui ont été interviewées pour les réaliser :

Mona Abouhenid	Jonathan Andrews	David Barber	David Black
Zachary Alaoui	Tyler Andrews	Mark Barton	Line Blain
Neal Alexander	Bill Appleby	Fiona Beaudoin	Connie Blakeston
Amir Ali Khan	Meby Ayers	Kim Benjamin	Kate Borowec
Perrin Alison	David Babb	Jean-Stéfane Bergeron	Gilles Bourgeois
Kevin Anderson	Madhav Govind Badami	Dale Bergeron	Giselle Bramwell

Luc Brisebois	Michael Gullo	Graham Lowrey	Trish Rea
Louise Bussieres	Chris Hall	Paul Lyon	Sharon Riberio
Carolyn Campbell	Salim Hayder	David MacDonald	Stephanie Roller
Alex J. Cannon	Health Canada	Shawn MacDonald	Robin Rong
Anita Champagne	David Henderson	Manitoba Infrastructure and Transportation	Murray Ross
Gudmundson	Michael Hendry	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports	Dean Ruffilli
André Châteauvert	Trevor J. Heryet	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports	Matthew Sancton
Claude Comtois	Sean Hinds	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports	Darren M. Scott
Chad Shouquan Cheng	Allan Howatson	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports	Wm. A. Scott
Stewart Cohen	David Hubley	Shawn McDonald	Jas Sidhu
Mark Conrad	Craig Hutton	Heather McGonigal	Frederic Sirois
John Cooper	Pamela Ingeri	Martin McKay	Sharon Smith
Valerie Cote	Dr. Michael Ircha	Dominic McKenna	Steve St. Pierre
Ryan Coulter	Neal Alexander Irwin	Kevin McLeod	Teresa Stephens
Sarah Desrochers-Coulobre	Don Jardine	Brian Mills	Kit K. Szeto
Stephen Dolan	Jaideep Johar	Adrien Monpetit	Benita Tam
Hugh Donovan	Lucille Kamal	Kelly Montgomery	Patrick Tanguy
Julie Dupuis	Pamela Kertland	Gilles Morneau	Brian Thompson
Teresa Ehman	Ata Khan	Paul Murchison	Jeff Tindall
Environment and Climate Change Canada	Amir Ali Khan	Natural Resources Canada	Marion Town
Gail Faveri	Dale Kirkland	Elizabeth Newgard	Martin Tremblay
John Festarini	Joan Klaassen	Dale Nicholson	Denis Tully
Greg Flato	Stephanie Klak	Stephen Nourse	Isabelle Villeneuve
Manon D. Fleury	Karmen Klarenbach	Lesley Latham O'Brien	Lucie Vincent
Nicole Fleury	Ryan Klomp	Tyler O'Rourke	Mel White
Manon Fleury	Y.T. John Kwong	Lesley O'Brien Latham	Dave White
Matt Fournier	Sandra LaFortune	Melanie Orlowski	Sara Wiebe
Karen Garvey	Manon Lajoie	Vaughan Owens	Teresa Wilk
David Gillen	Jean-Sébastien Langelier	Kim Pawley	Jennifer Williams
Nathan Gillett	Darlene Langlois	Alison Perrin	Johanna Wolf
Martin Goebel	Anne-Marie LeBlanc	Robert James Pett	Louise Yako
Michel Goguen	Yoss Leclerc	Dr. Ian Picketts	Terry Zdan
Jennifer Graham	Vayzel Lee	Barry Prentice	Sany Zein
Caroline Gravel	Véronique Lefebvre-Beauparlant	Nick Previsich	Transport Canada, Pacific Region Office
Thomas Grégoire	Diane Leroux	Marco Prud'Homme	...et les nombreux autres qui ont contribué à ce rapport
Julie Guicheteau	Paul Lewis	Jason Rae	
	Andrew Liu	Robert Rattle	

Nous voulons aussi reconnaître la contribution des employés de Transports Canada qui nous ont grandement aidés tout au long du processus :

Jenna Craig	Monica Harvey	Nicole Legault	Elizabeth Smalley
Lesley-Anne Dams	Deena Hookoom	Amaris Page	Will Towns
Carla Gomez Wichtendahl			

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	2
CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE	13
CHAPITRE 3 : LES TERRITOIRES DU NORD	32
Principales conclusions.....	34
1.0 Introduction.....	34
1.1 Aperçu régional	35
2.0 Une introduction au système de transport du Nord du Canada.....	36
2.1 Aperçu du système	37
2.2 Transport routier	39
2.3 Aviation.....	40
2.4 Transport maritime	41
2.5 Transport ferroviaire	41
3.0 Climat	42
3.1 Tendances et prévisions.....	42
3.1.1 Atmosphère.....	42
3.1.2 Cryosphère	43
3.1.3 Niveau de la mer	46
4.0 Transport de surface	47
4.1 Incidences climatiques sur le transport routier.....	47
4.1.1 Routes praticables en toutes saisons	47
4.1.2 Routes hivernales.....	48
4.2 Risques futurs	48
4.2.1 Routes praticables en toutes saisons	48
4.2.2 Routes hivernales.....	49
4.3 Pratiques d'adaptation	51
4.3.1 Pratiques d'entretien et de surveillance.....	51
4.3.2 Planification et emplacement de l'infrastructure	52
4.3.3 Techniques et technologies de construction des routes praticables en toutes saisons	53
5.0 Transport ferroviaire.....	57
6.0 Transport aérien.....	58
6.1 Incidences du climat sur le transport aérien.....	58
6.2 Risques futurs	58
6.3 Méthodes d'adaptation.....	59
7.0 Transport maritime.....	61
7.1 Incidences du climat sur le transport maritime (y compris les lacs et les rivières)	61
7.2 Risques et possibilités futurs.....	62
7.3 Pratiques d'adaptation	64
7.3.1 Adaptations pour les navires et la navigation	64
7.3.2 Adaptations pour les installations maritimes	65

8.0	Lacunes en matière de renseignements.....	66
9.0	Conclusions	67
	Références	68

CHAPITRE 4 : LA COLOMBIE-BRITANNIQUE **74**

	Principales conclusions.....	76
1.0	Introduction.....	77
1.1	Population.....	78
1.2	Économie	78
1.3	Géographie	79
2.0	Climat	80
2.1	Tendances observées	81
2.2	Projections sur les changements	83
3.0	Aperçu du système de transport de la Colombie-Britannique	85
3.1	Système routier.....	85
3.2	Transport ferroviaire	87
3.3	Transport aérien	87
3.4	Transport maritime	88
4.0	Réseaux routiers.....	89
4.1	Effets climatiques historiques.....	89
4.2	Risques climatiques futurs	92
4.3	Pratiques d'adaptation	95
5.0	Transport ferroviaire.....	96
5.1	Effets climatiques historiques.....	96
5.2	Risques climatiques futurs	100
5.3	Pratiques d'adaptation	100
6.0	Transport aérien.....	103
6.1	Effets climatiques historiques.....	103
6.2	Risques climatiques futurs	105
6.3	Pratiques d'adaptation	106
7.0	Transport maritime.....	106
7.1	Effets climatiques historiques.....	107
7.2	Risques climatiques futurs	107
7.3	Pratiques d'adaptation	108
8.0	Pratiques provinciales d'adaptation au climat.....	108
9.0	Lacunes dans les renseignements et les connaissances qui nuisent au processus décisionnel	110
10.0	Conclusion	111
	Références	112

CHAPITRE 5 : LES PRAIRIES	116
Principales conclusions.....	118
1.0 Introduction.....	118
1.1 Géographie et environnement physique.....	119
1.2 Économie	120
2.0 Survol du transport dans les Prairies	121
2.1 Transport routier	122
2.1.1 Routes d'hiver	122
2.2 Transport ferroviaire	123
2.3 Transport aérien	123
2.4 Transport maritime	124
3.0 Profil climatique	124
3.1 Tendances passées	124
3.2 Projections	127
3.3 Climat, conditions météorologiques et transport dans les Prairies.....	128
4.0 Transport routier	128
4.1 Impacts sur les infrastructures routières.....	128
4.2 Impacts sur les activités de camionnage.....	129
4.3 Mesures d'adaptation pour l'infrastructure routière	129
4.4 Mesures d'adaptation pour les exploitants du camionnage	133
4.5 Routes d'hiver	134
5.0 Transport ferroviaire.....	137
5.1 Impacts constatés dans le passé et risques futurs.....	137
5.2 Mesures d'adaptation pour les rails	142
6.0 Transport aérien.....	144
6.1 Impacts constatés dans le passé et risques futurs.....	144
6.2 Pratiques d'adaptation	145
7.0 Transport maritime.....	145
7.1 Impacts climatiques et possibilités futures.....	145
7.2 Mesures d'adaptation de l'infrastructure et des activités maritimes.....	146
8.0 Lacunes dans les renseignements et conclusions.....	147
Références	149

CHAPITRE 6 : ONTARIO.....	153
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

CHAPITRE 7 : Québec **199**

	Principales conclusions	201
1.0	Introduction	202
1.1	Portrait du Québec	202
2.0	Organisation du transport au Québec	203
2.1	Transport routier	206
2.2	Transport maritime	208
2.3	Transport ferroviaire	209
2.4	Transport aérien	209
3.0	Un climat en évolution	210
3.1	Des températures qui se réchauffent	210
3.2	Des précipitations plus intenses	213
3.3	Des incertitudes concernant les vents	215
3.4	Des variations des débits moyens des rivières	215
3.5	Le niveau relatif de la mer	216
3.6	Une perte progressive du couvert de glace	216
3.7	Le pergélisol affecté	217

4.0	Vulnérabilités des transports face aux changements climatiques au Québec	218
4.1	Transport terrestre	218
4.1.1	Les vulnérabilités du transport routier dans le sud du Québec et le long du Saint-Laurent	218
4.1.2	Les vulnérabilités du transport terrestre au Nunavik	220
4.1.3	Les événements météorologiques extrêmes et le transport routier	221
4.2	Transport maritime	223
4.2.1	Le transport maritime dans le corridor du Saint-Laurent	223
4.2.2	Le transport maritime au Nunavik	224
4.3	Transport ferroviaire	224
4.3.1	Le transport ferroviaire dans le corridor du Saint-Laurent	225
4.4	Transport aérien	225
4.5	Réseaux de distribution et de télécommunications	226
5.0	Mesures d'adaptation	226
5.1	Mesures d'adaptation planifiées et mises en œuvre par le gouvernement du Québec	227
5.2	Mesures d'adaptation à l'échelle régionale et locale	228
6.0	Conclusions et besoins futurs de recherche	231
	Références	232

CHAPITRE 8 : Canada atlantique **240**

	Principales conclusions	242
1.0	Introduction	243
1.1	Caractéristiques environnementales	243
1.2	Caractéristiques démographiques	243
1.3	Caractéristiques économiques	244
2.0	Profil du climat régional	245
2.1	Tendances climatiques observées	245
2.2	Projections climatiques	246
3.0	Système de transport au Canada atlantique	248
3.1	Transports routier et ferroviaire	249
3.2	Transport maritime	251
3.3	Transport aérien	252
4.0	Transport routier : Impacts et adaptations	253
4.1	Impacts constatés dans le passé et risques futurs	253
4.2	Pratiques d'adaptation	256
5.0	Transport ferroviaire : Impacts et adaptations	260
5.1	Impacts constatés dans le passé et risques futurs	260
5.2	Pratiques d'adaptation	263
6.0	Transport maritime	265
6.1	Impacts constatés dans le passé et risques futurs	265
6.2	Pratiques d'adaptation	267

7.0	Transport aérien	270
7.1	Impacts constatés dans le passé et risques futurs	270
7.2	Pratiques d'adaptation	271
8.0	Évaluations des risques et analyses coûts-avantages pour le transport multimodal	272
8.1	Évaluations des risques	272
8.2	Analyse coûts-avantages	272
9.0	Lacunes et conclusions	276
10.0	Annexe	277
	Références	283

CHAPITRE 9 : URBAIN **289**

	Principales conclusions	291
1.0	Introduction	292
1.1	Tendances dans les milieux urbains du Canada	293
1.2	Adaptation aux changements climatiques	295
2.0	Le climat et les transports urbains	296
2.1	Sensibilité du transport urbain au climat	296
2.2	Tendances et projections climatiques	303
2.3	Risques climatiques pour le transport urbain	307
3.0	Infrastructure routière urbaine	308
4.0	Transport ferroviaire urbain	310
5.0	Transport actif	312
6.0	Pratiques d'adaptation aux changements climatiques pour le transport urbain	317
7.0	Interdépendances avec d'autres secteurs urbains	332
8.0	Lacunes et obstacles	335
9.0	Conclusion	335
	Références	336



1 • Introduction

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

AUTEURS PRINCIPAUX :

JEAN ANDREY¹
KATHY PALKO²

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Andrey, J., et Palko, K. (2017). Introduction. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 02-11). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ Géographie et gestion de l'environnement, Université de Waterloo, Waterloo (ON)

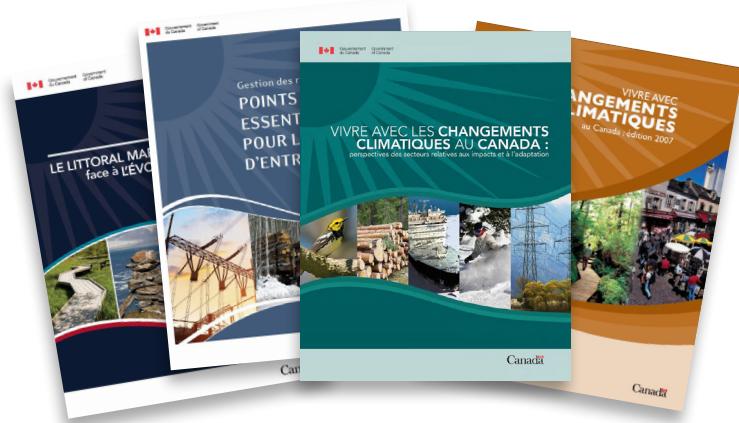
² Transports Canada, Ottawa (ON)

Le climat de la terre change et le Canada se réchauffe plus rapidement que la plupart des régions du monde. De 1950 à 2010, la température annuelle moyenne au Canada a augmenté d'environ 1,5 °C, ce qui est approximativement le double de la moyenne mondiale (Bush et al., 2014). Cette tendance de réchauffement a été associée à des changements d'autres importantes variables climatiques, y compris les précipitations, le niveau de la mer, le niveau des eaux intérieures, la glace marine, le pergélisol et les événements météorologiques extrêmes (tableau 1).

Dans les prochaines décennies, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre entraîneront d'autres changements aux climats mondiaux et régionaux. Ces changements entraînent des répercussions sur le secteur des transports, ainsi que sur l'économie canadienne et la société en général.

Le gouvernement du Canada a produit une série d'évaluations des changements climatiques à l'échelle nationale, lesquelles relèvent les impacts observés et prévus sur l'économie, la société et l'environnement du Canada; ainsi que les pratiques pour s'adapter à ces impacts. Ces évaluations comprennent les suivantes :

- Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat (2016);
- Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation (2014);
- Vivre avec les changements climatiques au Canada (2007);
- Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne (2004);
- Étude pancanadienne : sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique (1997-1998).



Alors que ces rapports indiquent que certains aspects des transports sont très vulnérables aux conditions climatiques changeantes, adapter l'infrastructure et les activités à des conditions climatiques changeantes et environnementales émergentes demeure un secteur d'intervention relativement nouveau pour le secteur des transports.

OBJET ET FORMAT DU RAPPORT

Ce rapport permet de dresser un portrait ponctuel des connaissances au chapitre des risques climatiques liés au secteur des transports au Canada et de déterminer les pratiques d'adaptation courantes et potentielles pouvant être appliquées afin de les réduire. Ce rapport vise à servir de source d'information accessible permettant d'étayer la prise de décisions et l'élaboration de politiques sans formuler de recommandations ou prescrire des mesures particulières, lesquelles peuvent varier en fonction des situations. Les décideurs et les professionnels des transports auront ainsi de meilleurs renseignements pour soutenir une résilience accrue du secteur face aux risques climatiques, tout en s'appuyant sur des connaissances qui servira aux futures activités de recherche.

Le rapport contient six chapitres sur les régions et un chapitre sur les centres urbains afin de refléter les différentes vulnérabilités climatiques, priorités, pratiques et opportunités dans l'ensemble du réseau de transport national du Canada. Chaque chapitre inclut un profil de la population, de l'économie, du climat et du réseau de transport de la région concernée, en plus d'examiner les répercussions

climatiques observées, les risques futurs, les opportunités et les méthodes d'adaptation pour les modes de transport routier, ferroviaire, aérien et maritime.

Les risques climatiques pris en compte dans le cadre de ce rapport comprennent les changements climatiques (les changements se produisant de façon progressive, notamment le dégel du pergélisol et les changements du niveau de la mer) et les événements météorologiques extrêmes. Même s'il est difficile d'expliquer les changements climatiques en invoquant un seul événement météorologique extrême, nous sommes de plus en plus persuadés que certains phénomènes météorologiques extrêmes deviendront soit plus fréquents, soit plus marqués, ou les deux, à mesure que le climat continuera de se réchauffer, et ces événements représentent des risques importants pour l'infrastructure et les activités de transport.

La conception de ce rapport est le fruit de nombreux efforts de collaboration ayant permis de rassembler les connaissances, l'expertise et les perspectives d'auteurs et de réviseurs. Chaque chapitre inclut une évaluation de la littérature évaluée par des pairs et de la littérature grise portant sur l'interaction entre les transports et le climat dans une région donnée. En outre, plusieurs chapitres intègrent également les points de vue de professionnels des transports, qui sont cités comme des communications personnelles, afin d'englober la base de connaissances quand la littérature actuelle est limitée.

Collectivement, ces caractéristiques ont permis de façonner le contenu des chapitres. Par exemple, le chapitre sur les centres urbains met l'accent sur les méthodes de planification des transports; les chapitres sur la Colombie-Britannique et le Nord offrent de plus amples détails sur les pratiques techniques et les risques de précipitation extrêmes. Le chapitre sur les Prairies intègre le contenu sur les expériences et les adaptations des professionnels de l'industrie du camionnage. Le chapitre sur la synthèse essaie de regrouper les perspectives des régions et des centres urbains afin de donner un aperçu des connaissances à l'échelle nationale sur les risques climatiques et des pratiques d'adaptation pour le réseau de transport du Canada.

Les sujets suivants ne sont pas visés par le rapport :

- les répercussions sur les pipelines et l'infrastructure de transport d'énergie;
- les répercussions indirectes sur les transports liées aux conséquences des changements climatiques sur les autres secteurs (p. ex. l'agriculture, le tourisme et les loisirs, les pêches, etc.) et sur les autres pays; les interdépendances entre les secteurs municipaux sont abordées au chapitre 9;
- les pratiques de gestion des catastrophes et des urgences;
- les incidences des transports sur le climat (p. ex. les émissions de gaz à effet de serre) et les activités d'atténuation des changements climatiques.

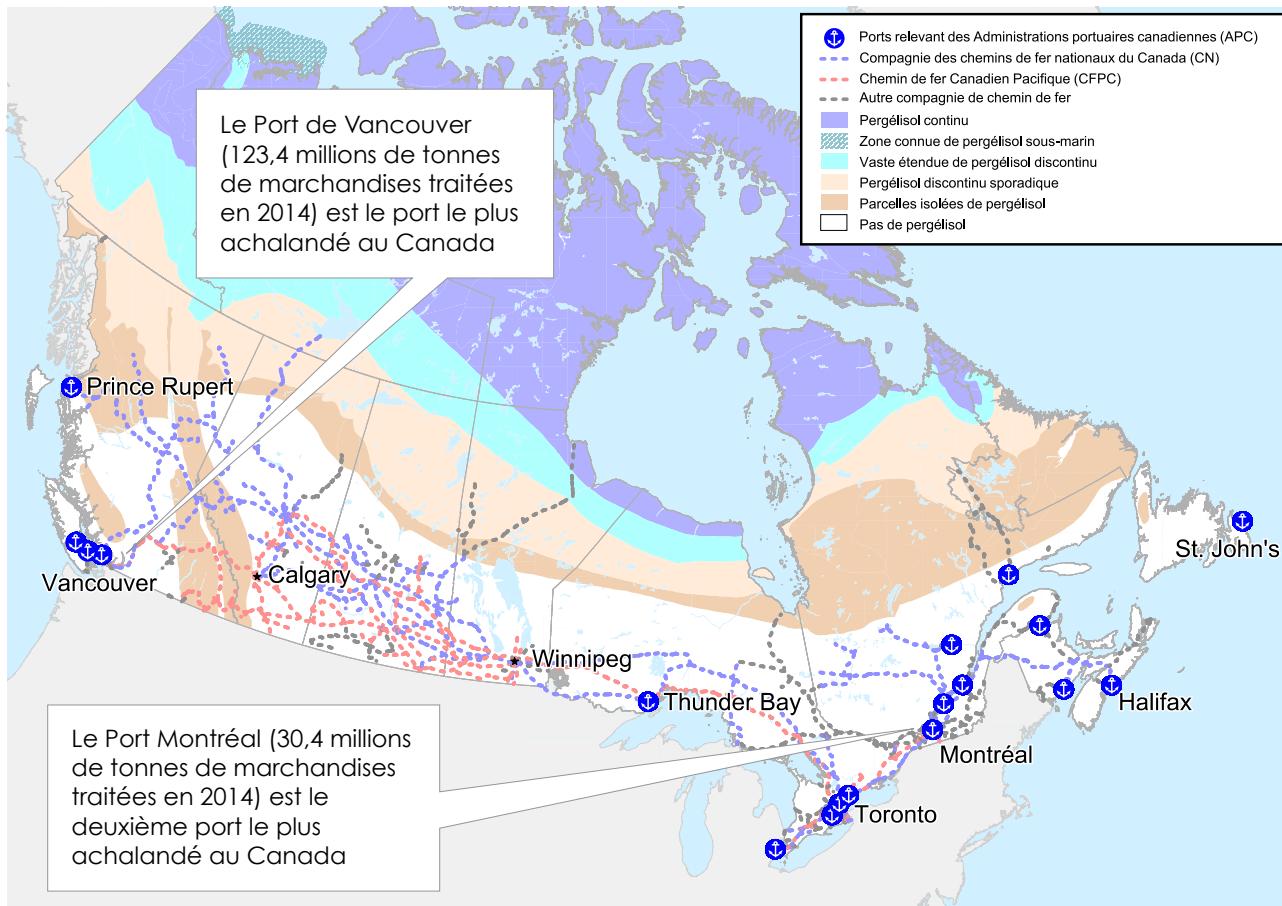
RÉSEAU DE TRANSPORT DU CANADA

Les Canadiens dépendent des services de transport pour leurs déplacements quotidiens et pour le transport des ressources et des produits vitaux à l'économie. Les collectivités et les marchés du Canada sont très dispersés, couvrant une distance de plus de 5 000 km de l'est vers l'ouest et de 4 500 km du nord au sud. Des industries telles que la fabrication, l'énergie, l'exploitation minière et l'agriculture, ainsi que des services tels que les soins de santé et le commerce de détail, dépendent tous du fonctionnement fiable du réseau de transport.

Tous les modes de transport, chacun avec ses propres caractéristiques uniques, jouent des rôles précis dans les mouvements locaux, nationaux et internationaux (Figure 1 et Figure 2). En tout, le réseau de transport canadien (y compris les autoroutes, les voies ferrées, les aéroports, les ports et les installations connexes) a permis le déplacement de plus de 1 040 billions de dollars en commerce de marchandises en 2014 (Transports Canada, 2015).

Le secteur des transports est conjointement gouverné par les gouvernements fédéral, provinciaux et municipaux du Canada. En règle générale, le gouvernement fédéral supervise le transport international et interprovincial (y compris les secteurs de l'aviation, maritime et ferroviaire); les gouvernements provinciaux sont responsables du transport intraprovincial (y compris les autoroutes); et les gouvernements municipaux sont responsables de gérer le transport urbain (y compris le transport en commun et les routes locales). Le secteur privé joue aussi un rôle important en tant que propriétaires, exploitants et gestionnaires d'infrastructures et d'actifs, y compris l'infrastructure ferroviaire, les véhicules, les navires et les aéronefs.

Figure 1 : Aperçu du réseau d'administrations portuaires canadiennes, des Grands Lacs et du réseau ferroviaire national, y compris les statistiques clés sur le commerce et les passagers pour le transport maritime et ferroviaire.



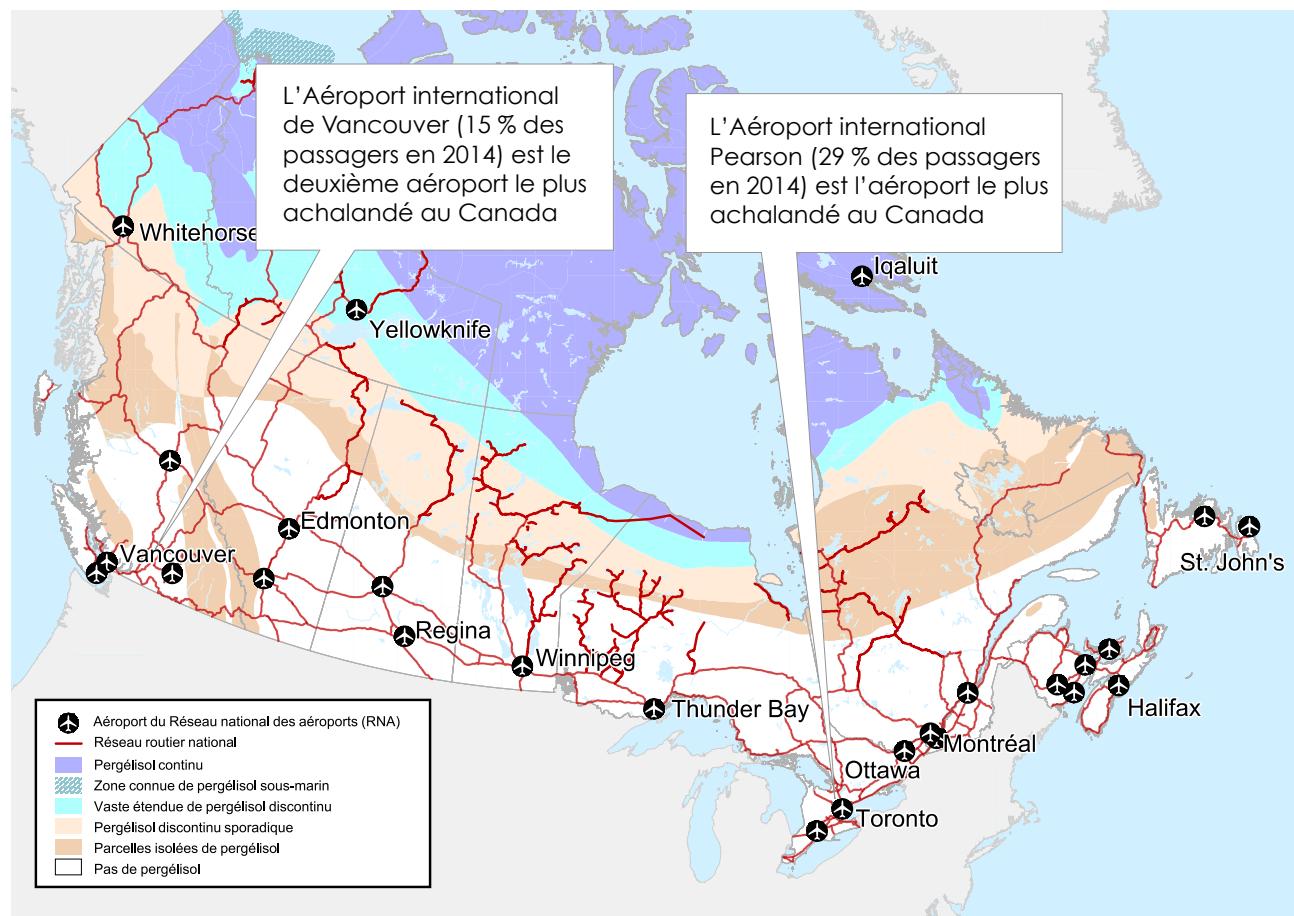
Le réseau ferroviaire du Canada

- 320,2 million de tonnes de marchandises transportées par rail (en 2014)
- 126,2 milliards de dollars en trafic du commerce international par rail (en 2014)
- 45 742 kilomètres (km) de rails :
 - CN en détient 49,2 % (22 517 km)
 - CP en détient 26,1 % (11 927 km)
- 3,77 millions de passagers par VIA Rail (en 2014)

Réseau portuaire du Canada

- 567 installations portuaires, 902 ports de pêche et 202 ports récréatifs
- Les 18 administrations portuaires canadiennes ont traité 62 % du tonnage total qui a traversé les ports du Canada
- Le réseau des Grands Lacs et de la Voie maritime du Saint-Laurent couvrent 15 grands ports internationaux et 50 ports régionaux qui sont reliés à 40 autoroutes provinciales et autoroutes des États-Unis et 30 voies ferroviaires

Figure 2 : Aperçu du réseau national d'aéroports et du réseau d'autoroutes national, y compris les statistiques clés sur le commerce et les passagers pour le transport aérien et routier.



Système de l'aviation canadienne

- 647 transporteurs aériens canadiens
- 26 aéroports du RNA du Canada ont traité environ 90 % de la circulation aérienne totale du transport de passagers (2014)
- 1,1 million de tonnes de marchandises déchargées aux aéroports canadiens (2014)

Transport routier en Canada

- > 1,3 million de kilomètres de routes publiques au Canada
 - 34 % sont asphaltés
- Le plus grand secteur des transports du Canada
 - > 62 000 entreprises de camionnage sont exploitées
- 371 milliards de dollars en circulation en camionnage entre le Canada et les États-Unis (2014)

CHANGEMENTS OBSERVÉS ET PRÉVUS AU CLIMAT ET À L'HYDROLOGIE DU CANADA

Le Canada a connu un certain nombre de modifications aux variables climatiques affectant le secteur des transports, y compris la température, les précipitations, le pergélisol, le niveau relatif de la mer, la glace de mer, des lacs et des rivières, des niveaux d'eau à l'intérieur, et les événements météorologiques extrêmes; et d'autres changements à ces variables sont projetés (tableau 1).

Tableau 1 : Sommaire des changements observés et prévus aux variables climatiques et hydrologiques pertinentes pour le réseau de transport du Canada. (Source : Warren et Lemmen, 2014; autres sources indiquées)

Variable	Changements observés	Changements prévus
Température	<p>Le Canada s'est réchauffé.</p> <ul style="list-style-type: none"> La température atmosphérique moyenne a augmenté de 1,5 °C au cours de la période de 1950 à 2010. Les journées chaudes d'été sont devenues plus fréquentes depuis 1950, alors que la fréquence des nuits froides a diminué à l'échelle nationale. 	<p>Le Canada continuera à se réchauffer.</p> <ul style="list-style-type: none"> Le réchauffement sera le plus élevé en hiver, avec les plus grandes augmentations de température prévues dans le nord du Canada. L'amplitude du réchauffement prévu varie grandement en fonction du scénario d'émission. On prévoit que les jours inhabituellement chauds auront lieu plus souvent au cours du 21^e siècle, alors que les jours et les nuits inhabituellement froids deviendront moins fréquents. On prévoit que les vagues de chaleur deviendront plus longues, plus fréquentes et plus intenses. D'ici le milieu du siècle, on prévoit qu'une journée d'extrême chaleur qui se produit une fois aux vingt ans deviendra un événement qui se produit une fois aux cinq ans dans la plupart des régions du Canada.
Précipitation et couverture de neige	<p>Le Canada est, en règle générale, devenu plus humide.</p> <ul style="list-style-type: none"> La moyenne annuelle de précipitations a augmenté au cours des dernières décennies. Les chutes de neige annuelles ont diminué au-dessus d'une bonne partie du sud du Canada et ont augmenté dans le nord au cours des six dernières décennies. 	<p>Une grande partie du Canada continuera à devenir plus humide, avec des différences régionales dans les tendances saisonnières.</p> <ul style="list-style-type: none"> Les précipitations peuvent diminuer en été et en automne dans certaines parties du sud du Canada. <p>Une grande partie du Canada verra une couverture de neige réduite.</p> <ul style="list-style-type: none"> On prévoit que la couverture de neige diminuera dans le sud du Canada (particulièrement dans les montagnes de la côte ouest), alors qu'on prévoit qu'elle augmentera dans le nord du Canada en raison de précipitations accrues. <p>On prévoit que les événements de fortes précipitations se produiront plus souvent.</p> <ul style="list-style-type: none"> On prévoit que les rares événements de précipitations extrêmes se produiront deux fois plus souvent d'ici le milieu du siècle au-dessus d'une grande partie du Canada, par rapport à la période 1950-2010

Variable	Changements observés	Changements prévus
Pérgélisol	<p>Le pergélisol s'est réchauffé.</p> <ul style="list-style-type: none"> Les températures du pergélisol à de nombreux sites partout au Canada ont augmenté au cours des deux ou trois dernières décennies. 	<p>On prévoit que le pergélisol continuera à se réchauffer à des taux plus élevés que ceux observés à ce jour.</p> <ul style="list-style-type: none"> Il faudra de nombreuses décennies, voir plusieurs siècles, pour que le pergélisol plus froid se dégèle complètement.
Niveau de la mer relatif	<p>Les niveaux de la mer ont changé au Canada.</p> <ul style="list-style-type: none"> Le niveau de la mer relatif a commencé à augmenter au Canada atlantique et dans la mer de Beaufort (plus de 3 mm par année) et sur la côte du Pacifique à un degré moindre (le niveau de la mer mondial moyen a augmenté de 1,6 mm par année entre 1880 et 2012). Là où le niveau de la mer a augmenté, les ondes de tempête et l'érosion des côtes se sont amplifiées (Atkinson, et coll., 2016). Le niveau de la mer relatif a diminué dans des régions où le sol a monté en raison du relèvement postglaciaire. Le niveau de la mer relatif a diminué d'environ 10 mm par années dans les environs de la baie d'Hudson. 	<p>Les niveaux de la mer continueront à changer.</p> <ul style="list-style-type: none"> Les estimations des changements futurs dans le niveau de la mer mondial d'ici l'année 2100 varient de quelques dizaines de centimètres à plus d'un mètre. Les changements prévus au Canada varient d'augmentations pouvant atteindre jusqu'à 100 cm sur les côtes de l'Atlantique, du Pacifique et de la mer de Beaufort à des réductions de presque 100 cm au centre de l'Arctique.
Glace marine	<p>La superficie de la glace marine de l'Arctique a grandement diminué.</p> <ul style="list-style-type: none"> La superficie minimale de la glace à la fin de l'été a diminué de 13 % par décennie entre 1979 et 2012. La superficie maximale de la glace marine en hiver a diminué de 2,6 % par décennie. La couverture de glace est devenue de plus en plus dominée par la mince glace de première année, avec une réduction importante de la superficie de glace épaisse pluriannuelle. La glace marine d'hiver a aussi diminué dans les régions de Terre-Neuve-et-Labrador et du golfe du Saint-Laurent. 	<p>La superficie et l'épaisseur de la glace marine dans l'Arctique canadien continueront à diminuer.</p> <ul style="list-style-type: none"> Certains modèles prévoient un été presque sans glace avant le milieu du siècle dans l'océan Arctique. La glace marine d'été pourrait persister plus longtemps dans la région de l'archipel Arctique du Canada.
Glace lacustre et fluviale	<p>La durée de la couverture de glace diminue.</p> <ul style="list-style-type: none"> Une grande partie du Canada a vu des tendances vers des dates sans glace (lacs) et des dates de débâcle des glaces (rivières) plus hâtives depuis le milieu du 20e siècle et cette tendance est particulièrement évidente dans l'Ouest canadien. 	<p>On prévoit que la durée de la couverture de glace continuera à diminuer.</p> <ul style="list-style-type: none"> On prévoit que des dates de débâcle plus hâtives et des dates de gel plus tardives réduiront la durée de la couverture de glace de jusque qu'à un mois d'ici le milieu du siècle.
Niveau des eaux intérieures	<p>Le niveau des eaux intérieures a été hautement variable avec des épisodes de niveau moins élevé qu'à la normale.</p> <ul style="list-style-type: none"> Les niveaux des eaux des Grands Lacs étaient en dessous des moyennes à long terme de 1997 à 2012 (Shlozberg et coll., 2014), mais plus élevés que la normale en 2013 et 2014 (Dorling et Hanniman, 2016; Great Lakes Environmental Research Laboratory, 2015). 	<p>On prévoit que le niveau des eaux intérieures continuera à fluctuer, avec une tendance prévue vers des niveaux d'eau plus bas.</p> <ul style="list-style-type: none"> On prévoit que les épisodes de faibles niveaux d'eau auront lieu plus fréquemment dans certains plans d'eau douce (p. ex., les Grands Lacs et la rivière Mackenzie). Certains modèles prévoient des réductions des niveaux d'eau de 0,5 à 1 m dans les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent d'ici 2055 (Shlozberg et coll., 2014; Brown et coll., 2012).

SENSIBILITÉS DU TRANSPORT CANADIEN AU CLIMAT

Tous les réseaux de transport sont sensibles au climat. Ces sensibilités se traduisent en dommages à l'infrastructure et en sa détérioration, en perturbations aux activités de transport et en conditions non sécuritaires. Certaines des composantes les plus vulnérables du réseau de transport du Canada sont intégrantes aux collectivités éloignées et dépendantes des ressources dans le Nord. Toutefois, un climat changeant et des conditions météorologiques extrêmes toucheront tous les modes de transport dans chaque région canadienne.

Les sensibilités du transport au climat et aux conditions météorologiques extrêmes sont illustrées par les impacts des événements météorologiques aigus qui ont eu lieu au cours des dernières années. Par exemple, la catastrophe la plus coûteuse du Canada, les inondations de juin 2013 en Alberta, a entraîné un montant estimatif de six milliards de dollars en dommages et en coûts de rétablissement et a été témoin de la destruction de 1 000 km de routes et de l'emportement de centaines de ponts et de ponceaux. Dans le même ordre d'idée, la crue éclair de juillet 2013 dans la région du Grand Toronto, laquelle est considérée comme la catastrophe naturelle la plus dispendieuse de l'Ontario, a entraîné des retards importants dans le transport en commun, la fermeture de routes et l'annulation de vols (Environnement Canada, 2014).

Les événements météorologiques extrêmes ne sont pas le seul risque climatique auquel fait face le transport. D'autres risques pour le réseau de transport du Canada, associés aux changements climatiques, comprennent les suivants :

- Les changements et les fluctuations de température contribuent à la détérioration de l'infrastructure et aux difficultés opérationnelles, particulièrement dans les régions de pergélisol du nord du Canada, mais aussi dans l'ensemble du sud du Canada en raison des cycles changeants de gel et dégel au cours de l'hiver et des vagues de chaleur au cours de l'été.
- Les conditions changeantes de la glace touchent les activités maritimes et la navigation des navires, particulièrement dans le nord du Canada, avec des conséquences généralisées (positives et négatives) pour le développement économique, le commerce et la sécurité.
- L'augmentation du niveau de la mer et les tempêtes peuvent accroître les risques d'érosion de la côte, d'inondation et de dommages connexes, avec des conséquences pour l'infrastructure et les activités de transport dans les zones côtières du Canada.
- Un faible niveau des eaux intérieures (particulièrement dans les Grands Lacs) peut réduire la capacité des navires et poser des difficultés pour la navigation.

TENDANCES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

Les tendances dans les événements de précipitations extrêmes ont été difficiles à relever parmi les données climatiques en raison de la variabilité spatiale des tendances de précipitations. Toutefois, les données d'assurance démontrent que les catastrophes naturelles augmentent au Canada, y compris les événements associés aux inondations, aux vents et aux feux de friches (Institute for Catastrophic Loss Reduction, 2012).

Bien que de nombreux facteurs autres que les changements climatiques contribuent aux pertes croissantes en assurance (y compris l'exposition des propriétés, la richesse croissante et l'infrastructure vieillissante), cette tendance démontre une tendance de vulnérabilité de l'infrastructure au Canada aux événements météorologiques extrêmes (Warren et Lemmen, 2014).

OPTIONS D'ADAPTATION

Les options d'adaptation pour le transport peuvent comprendre des solutions d'ingénierie et technologiques, ainsi que des approches axées sur la politique, la planification, la gestion et l'entretien. Voici quelques exemples des chapitres de ce rapport :

- Changer de mélanges de revêtement pour les routes; par exemple, utiliser des revêtements qui résistent mieux à la chaleur.
- Accroître la capacité de drainage des infrastructures, y compris la taille des ponceaux.
- Accroître l'entretien, y compris le nettoyage des débris des ponceaux afin de réduire les risques d'inondation et déneiger afin de maintenir la stabilité du pergélisol sous les routes vulnérables.
- Mettre en œuvre des éléments chauffants et des ventilateurs pour accroître la tolérance des contrôleurs de feux de circulation aux températures extrêmes et des thermosiphons pour maintenir la stabilité du pergélisol dans les aéroports.
- Modifier les exigences en matière de conception de l'infrastructure afin d'inclure des considérations relatives aux changements climatiques ou introduire de nouveaux seuils d'événements d'inondation.
- Accroître l'altitude ou déménager les nouvelles infrastructures, dans la mesure du possible.
- Changer les procédures d'ingénierie, comme l'accroissement des seuils de température pour les voies ferroviaires et la réduction du risque de flambage au cours de larges écarts de température.
- Accroître la surveillance des événements météorologiques et de la condition des infrastructures.
- Mettre en œuvre ou améliorer les avis et les avertissements aux voyageurs afin de communiquer les conditions de déplacement et les retards aux services au cours des événements météorologiques.

Il y a deux catégories de réponse aux changements climatiques : l'atténuation et l'adaptation.

L'atténuation signifie les interventions humaines visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

L'adaptation signifie toute activité qui réduit les impacts négatifs des changements climatiques ou qui tire profit des nouvelles possibilités. Cela comprend les mesures prises avant que les impacts soient observés (anticipatoires) et après que les impacts ont été ressentis (réactives). L'adaptation peut être planifiée (c. à d. le résultat de décisions politiques délibérées) ou spontanée, comme c'est le cas de l'adaptation réactive (Warren et Lemmen, 2014).

RÉFÉRENCES

- 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.
- 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>
- Bush, E.J., Loder, J.W., James, T.S., Mortsch, L.D., et Cohen, S.J. (2014). Un aperçu des changements climatiques au Canada. 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. 23-64). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- 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. (2014). *Les dix événements marquants au Canada en 2013*. Repéré à <https://ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=5BA5EAFC-1>
- Great Lakes Environmental Research Laboratory. (2015). *Water levels of the Great Lakes*. Repéré à <http://www.glerl.noaa.gov/pubs/brochures/lakelevels/>
- Institute for Catastrophic Loss Reduction. (2012). *Telling the weather story*. Préparé pour le Bureau d'assurance du Canada. Repéré à http://assets.ibc.ca/Documents/Studies/McBean_Report.pdf
- 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 et Council of the Great Lakes Region. Repéré à <http://mowatcentre.ca/low-water-blues/>
- Transports Canada. (2015). *Les transports au Canada 2014 : un survol et addenda statistique*. Repéré à <http://www.tc.gc.ca/fra/politique/anre-menu.htm>
- Warren, F.J., et Lemmen, D.S. (2014). *Synthèse*. 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. 1-18). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.



2 · Synthèse

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE

AUTEUR PRINCIPAL :
KATHY PALKO¹

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Palko, K. (2017). Synthèse. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 13-30). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ Transports Canada, Ottawa (ON)

Le transport joue un rôle névralgique dans les déplacements des marchandises et des personnes au Canada, soutenant tous les secteurs de l'économie ainsi que la qualité de vie des Canadiens. Les impacts des changements climatiques et des événements météorologiques extrêmes présentent à la fois des risques et des occasions en ce qui concerne les infrastructures et les activités liées au transport. La façon dont les Canadiens s'adapteront aux changements climatiques jouera un rôle crucial pour assurer la prospérité durable de notre pays.

La présente synthèse résume les constatations de sept chapitres fondamentaux du rapport *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016*, et présente des exemples d'impacts climatiques régionaux, les impacts propres à certains modes de transport (p. ex., transport routier, ferroviaire, maritime, aérien et systèmes de transport urbain), ainsi que les approches en matière d'adaptation mises en œuvre dans l'ensemble du Canada. (Les références des exemples présentés dans ce chapitre apparaissent tout au long du rapport.)

Voici les conclusions de haut niveau tirées du rapport :

- **Les infrastructures de transport sont essentielles au commerce intérieur et international du Canada, sont vulnérables aux perturbations et aux dommages causés par les changements climatiques et les événements météorologiques extrêmes, et cette situation pose des risques pour les autres secteurs de l'économie.** Des études en cours visent à mieux comprendre ces vulnérabilités, et des mesures d'adaptation sont mises en œuvre afin de réduire les impacts futurs. Les chapitres sur les régions présentent les détails d'initiatives visant le réseau des Grands LacsVoie maritime du SaintLaurent, l'isthme de Chignecto (systèmes routier et ferroviaire), le Port Metro Vancouver, le port de Saint John et d'autres infrastructures liées au commerce.
- **Les perturbations et les retards dus aux conditions climatiques liés aux déplacements des passagers pourraient survenir plus souvent à l'avenir.** Ces événements peuvent causer l'isolement temporaire des collectivités éloignées des régions nordiques dont la desserte dépend d'une seule route ou d'un seul aéroport, et causer des dommages coûteux et perturber les déplacements dans les grandes régions urbaines. Les redondances dans les systèmes de transport (qui offrent plusieurs modes de transport) sont une façon de réduire ces impacts.
- **Les systèmes de transport du Nord subissent certains des impacts les plus importants dus au réchauffement, et les températures continueront d'augmenter au Nord plus rapidement que dans toute autre région au Canada.** La dégradation du pergélisol (dégel) a causé des dommages aux routes, aux voies ferroviaires de même qu'aux voies de circulation et aux pistes d'aéroports, et continuera à présenter des risques pour la sécurité et l'efficacité et pour les budgets d'entretien liés au transport dans le Nord. Les périodes d'ouverture et les capacités de fonctionnement de certaines routes d'hiver (routes de glace) ont également diminué au cours des dernières années, entraînant le besoin d'offrir d'autres méthodes de transport.
- **Les changements climatiques devraient offrir des possibilités pour le secteur canadien du transport.** Les avantages potentiels comprennent la prolongation des saisons de navigation maritime et de la construction, des besoins réduits en matière d'entretien hivernal, une efficacité opérationnelle accrue du transport ferroviaire et une efficacité énergétique accrue pour tous les modes. Par ailleurs, la fonte des glaces de mer ouvre lentement les eaux arctiques à de nouvelles routes de navigation; cependant, la mobilité accrue de la glace de mer en été ainsi que l'augmentation de l'érosion côtière et des inondations causées par les ondes de tempête présentent des difficultés constantes pour l'expédition, l'exploration et pour les infrastructures côtières associées.
- **Les approches réactives de gestion des risques climatiques (p. ex., en réponse à des impacts ou à des événements passés) sont communes dans le secteur canadien du transport.** Parallèlement, il est possible de relever des exemples dans toutes les régions et pour tous les modes de transport de mesures qui sont adoptées en prévision des conditions climatiques futures. De nombreux propriétaires et exploitants du secteur public et du secteur privé ont adapté leurs activités en

fonction des enquêtes et des leçons apprises à la suite d'événements passés liés aux conditions météorologiques. De plus en plus, les décideurs du secteur du transport adoptent la planification proactive.

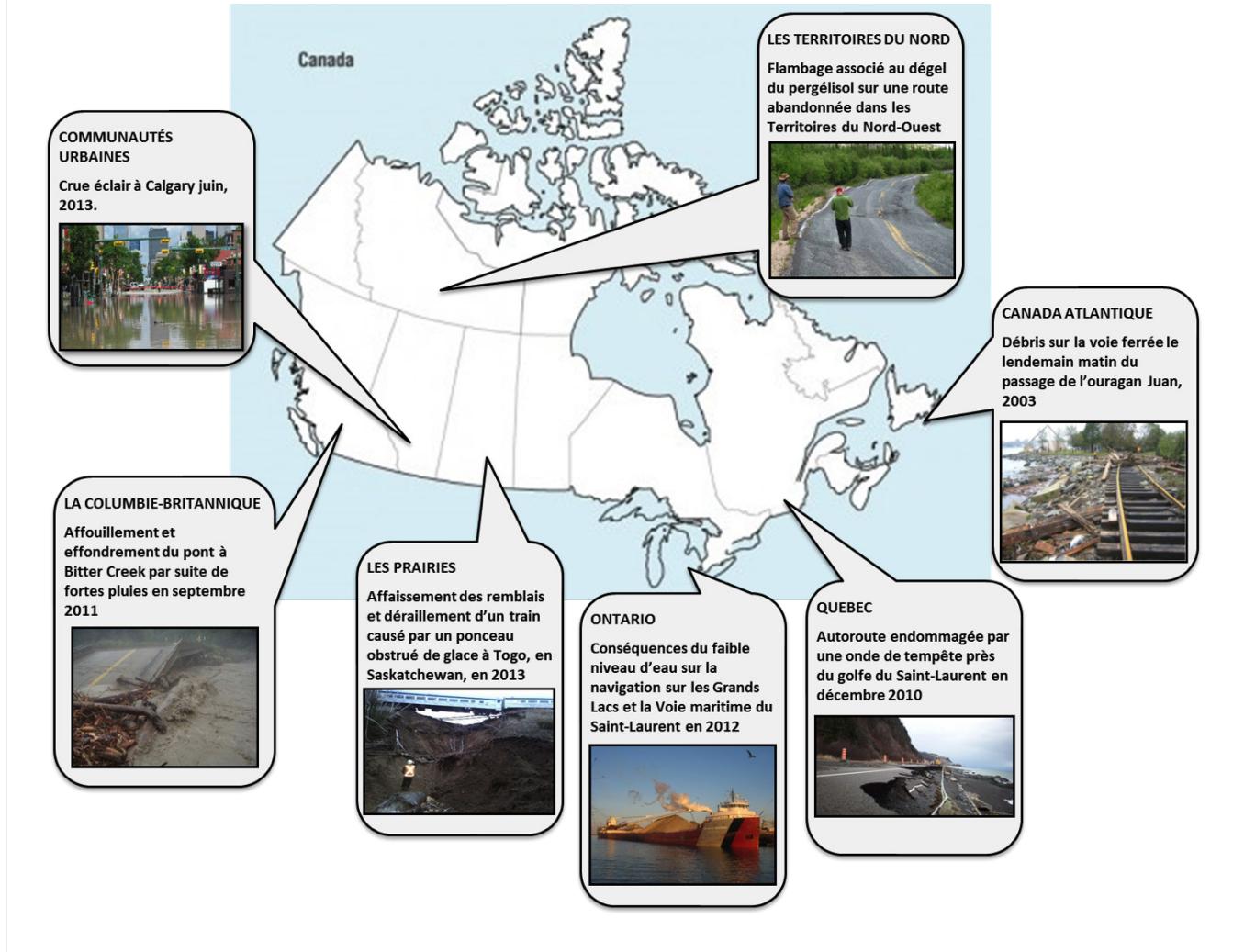
- **De plus en plus, les décideurs du secteur du transport adoptent une approche de gestion des risques afin de réduire les risques liés au climat pour leurs infrastructures et leurs activités.** Un éventail de pratiques particulières sont utilisées pour améliorer la résilience climatique des systèmes de transport, y compris l'intégration des considérations climatiques dans la planification organisationnelle, les changements dans les stratégies et la conception; l'évaluation des risques et de la vulnérabilité; les adaptations structurelles et physiques et les technologies intelligentes; et les changements dans les opérations et l'entretien.

RISQUES CLIMATIQUES RÉGIONAUX

Malgré les variations considérables qui existent dans le climat canadien, les systèmes de transport dans l'ensemble du pays partagent un grand nombre des mêmes risques climatiques; les praticiens peuvent donc tirer bénéfice de l'expérience des uns et des autres. Les risques communs à toutes les régions comprennent des événements météorologiques extrêmes (en particulier les précipitations abondantes) ainsi que des températures extrêmes et des alternances thermiques. Des événements extrêmes ont touché les collectivités dans l'ensemble du pays, y compris les grands centres urbains, entraînant des milliards de dollars en pertes liées aux catastrophes. Les provinces et les territoires côtiers sont confrontées à des risques communs liés aux inondations causées par les ondes de tempête, aux variations du niveau de la mer et à l'érosion côtière. Les régions nordiques du Canada, y compris les trois territoires et le nord de certaines provinces, sont toutes confrontées à des risques liés au dégel du pergélisol.

Des exemples d'impacts passés sur le système de transport de chaque région causés par les changements climatiques et des événements extrêmes sont représentés dans la figure 1. Ces impacts sont typiques des nombreux risques, mais pas tous ceux auxquels ces régions seront confrontées.

Figure 1. Des exemples d'impacts passés sur le système de transport de chaque région causés par les changements climatiques et des événements extrêmes. (Sources : Ontario - Déchargement du Arthur M. Anderson à Huron dans l'État d'Ohio, le 29 novembre 2008, par Zars²/CC BY-SA 3.0, de Wikimedia Commons; Communautés urbaines- Frank Frigo, ville de Calgary; les sources des autres photos sont indiquées dans d'autres chapitres)



IMPACTS PARTICULIERS À CHAQUE MODE

À l'instar des risques climatiques régionaux, les quatre grands modes de transport canadiens, à savoir le transport routier, ferroviaire, maritime et aérien, partagent de nombreux risques communs pour leurs infrastructures et leurs activités. En outre, en raison de l'intégration des modes de transport et de leur proximité physique les uns aux autres, les impacts climatiques qui affectent négativement un mode de transport ont tendance à avoir des impacts négatifs sur les autres. Par exemple, la ColombieBritannique a connu de nombreuses défaillances simultanées et séquentielles des routes et des lignes de chemin de fer, qui longent souvent des rivières et parcourent souvent des corridors montagneux.

2 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AMAnderson.jpg>

Chaque mode de transport est également confronté à des risques qui lui sont propres. Les sections ci-dessous décrivent quelquesunes des façons dont le climat et les conditions météorologiques perturbent les systèmes urbains canadiens de transport routier, ferroviaire, maritime et aérien à la lumière des constatations du présent rapport. (Note : Les dessins sont pour fins d'illustration seulement et ne sont pas destinés à être techniquement exacts.)

TRANSPORT ROUTIER

Les impacts liés au climat et aux conditions météorologiques sur le transport routier (figure 2) peuvent compromettre la sécurité et l'efficacité, perturber les activités et augmenter les coûts d'entretien et de fonctionnement. Les changements prévus dans certaines variables climatiques peuvent également fournir des avantages pour le transport routier. Par exemple, les températures hivernales plus douces peuvent donner lieu à une plus grande efficacité énergétique des véhicules, à des saisons de construction prolongées et à des besoins d'entretien hivernal réduits.

Figure 2 : Comprendre comment le climat et les conditions météorologiques peuvent affecter le transport routier. (Illustration créée par www.soaringtortoise.ca)

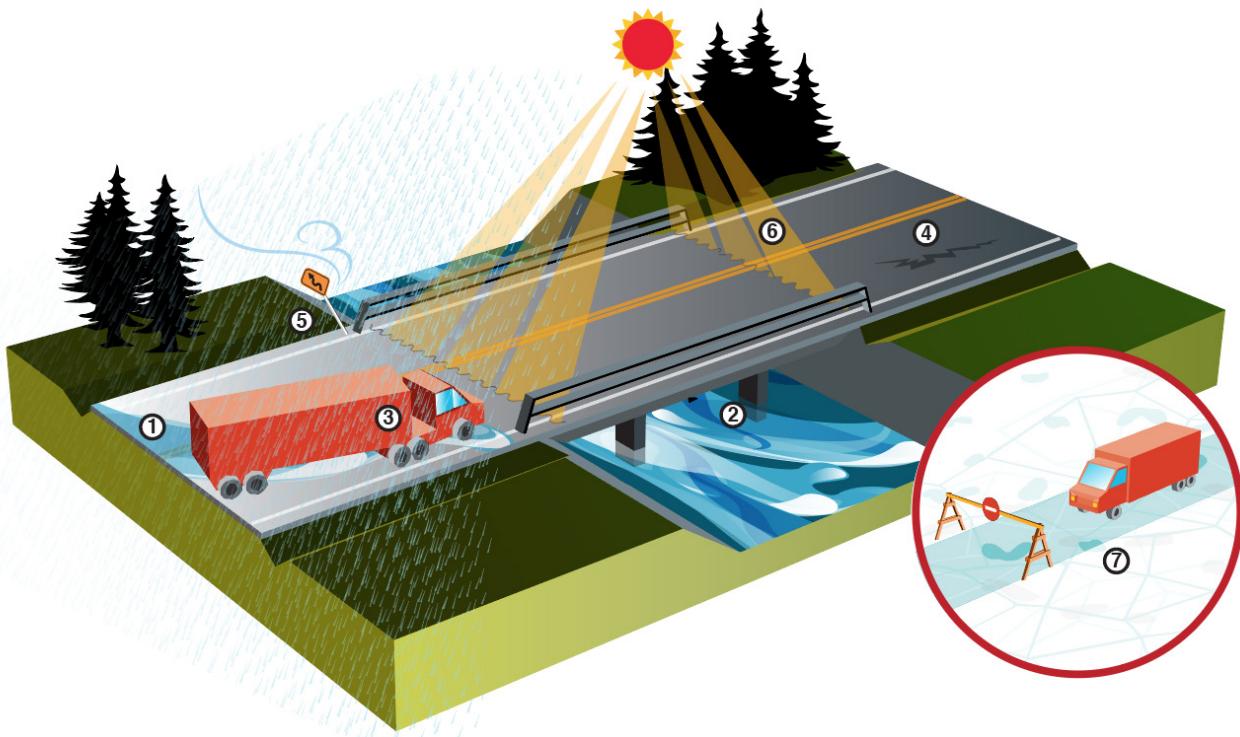


Tableau 1 : Exemples d'impacts directs de divers facteurs climatiques sur le transport routier.

EXEMPLES D'IMPACTS CLIMATIQUES SUR LE TRANSPORT ROUTIER		FACTEURS CLIMATIQUES
①	Inondation, dommages et affouillement des routes et des ponts	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (pluies intenses) et eaux stagnantes, glissements de terrain, coulées de boue, inondations résultant d'embâcles et débris d'inondations associés Ondes de tempête et hausse du niveau de la mer dans les zones côtières
②	Affouillement des ponts¹	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (pluies intenses, érosion résultant d'inondations)
③	Traction et stabilité réduites des véhicules; problèmes de visibilité	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes Pluie verglaçante Vents violents (y compris la poudrerie)
④	Dommages et détérioration des routes	<ul style="list-style-type: none"> Températures élevées (ramollissement, orniérage, ressauage et remontée de la chaussée) Cycles de gel et de dégel (déformation, cisaillement, détérioration de la chaussée) Réchauffement et dégel du pergélisol (tassement du sol, instabilité de pente, problèmes de drainage, fissuration) Précipitations extrêmes (remblais affaiblis, dépressions)
⑤	Dommages aux structures routières (y compris la signalisation et les feux de circulation); obstructions (p. ex., lignes électriques et arbres tombés), fermetures de ponts	<ul style="list-style-type: none"> Vents forts Précipitations extrêmes Pluie verglaçante
⑥	Expansion thermique des joints de pont pouvant entraîner la dilatation	<ul style="list-style-type: none"> Températures élevées
⑦	Intégrité réduite des routes d'hiver; périodes d'ouverture raccourcies	<ul style="list-style-type: none"> Hausse des températures

¹ Affouillement fait référence à l'érosion des sédiments à la base des piliers de pont, des piles et d'autres structures sous-marines

TRANSPORT FERROVIAIRE

À l'instar du transport routier, la sécurité, l'efficacité et la fiabilité du transport ferroviaire peuvent être compromises par les impacts climatiques illustrés à la figure 3. Les précipitations extrêmes et les ondes de tempête peuvent causer des affaissements, alors que la dégradation du pergélisol et les températures extrêmes peuvent entraîner la réduction de la vitesse des trains et des déraillements. Parallèlement, les températures hivernales plus douces projetées pour l'ensemble du Canada peuvent atténuer les problèmes mécaniques et les problèmes causés aux voies ferroviaires par le froid extrême.

Figure 3 : Comprendre comment le climat et les conditions météorologiques peuvent affecter le transport ferroviaire. (Illustration créée par www.soaringtortoise.ca)

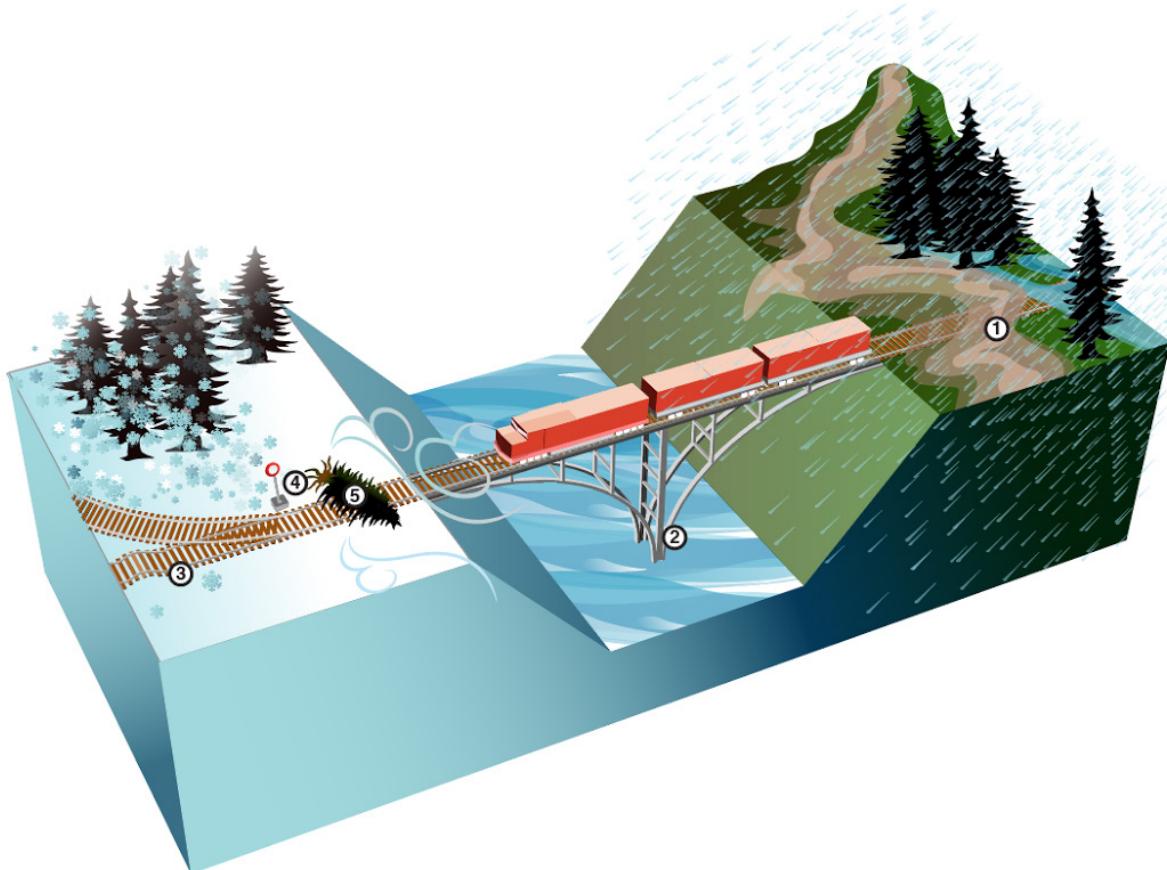


Tableau 2 : Exemples d'impacts directs de divers facteurs climatiques sur le transport ferroviaire.

EXEMPLES D'IMPACTS CLIMATIQUES SUR LE TRANSPORT FERROVIAIRE	FACTEURS CLIMATIQUES
<p>① Inondation, affouillement et obstruction des voies ferrées, des remblais, des ponts et des ponceaux; inondation des tunnels au-dessous du sol</p>	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (pluies intenses) et eaux stagnantes, glissements de terrain, coulées de boue, éboulements rocheux, et débris d'inondations et inondations résultant d'embâcles Ondes de tempête et hausse du niveau de la mer dans les zones côtières
<p>② Affouillement des ponts ferroviaires et endommagement des structures de ponts causé par les embâcles</p>	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (pluies intenses, érosion résultant d'inondations)
<p>③ Gauchissement des rails</p>	<ul style="list-style-type: none"> Dégel du pergélisol Chaleur extrême ou de grandes variations de température
<p>④ Bris des rails et dysfonctionnements et défaillances de l'équipement (peut comprendre des roues brisées, efficacité réduite des freins, gel des aiguillages)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Froid extrême
<p>⑤ Dommages à l'équipement de signalisation, entraves sur la voie ferrée ((p. ex., lignes électriques et arbres tombés), renversement de wagon</p>	<ul style="list-style-type: none"> Vents forts Précipitations extrêmes Pluie verglaçante

TRANSPORT AÉRIEN

Bon nombre des impacts sur le transport aérien illustrés à la figure 4 peuvent occasionner des retards des vols, des déroutements et des annulations. Peu d'accidents sont causés par les conditions climatiques en l'absence d'autres facteurs. Les systèmes d'atterrissement aux instruments et d'autres innovations permettent aux aéronefs de voler en toute sécurité dans des conditions météorologiques difficiles, et les avions sont maintenus au sol lorsque les conditions sont considérées comme dangereuses. Les risques climatiques pour l'infrastructure aéroportuaire tendent à présenter de plus grands défis pour les petits aéroports canadiens qui ne disposent pas des mêmes technologies et ressources que les grands aéroports.

Figure 4 : Comprendre comment le climat et les conditions météorologiques peuvent affecter le transport aérien. (Illustration créée par www.soaringtortoise.ca)

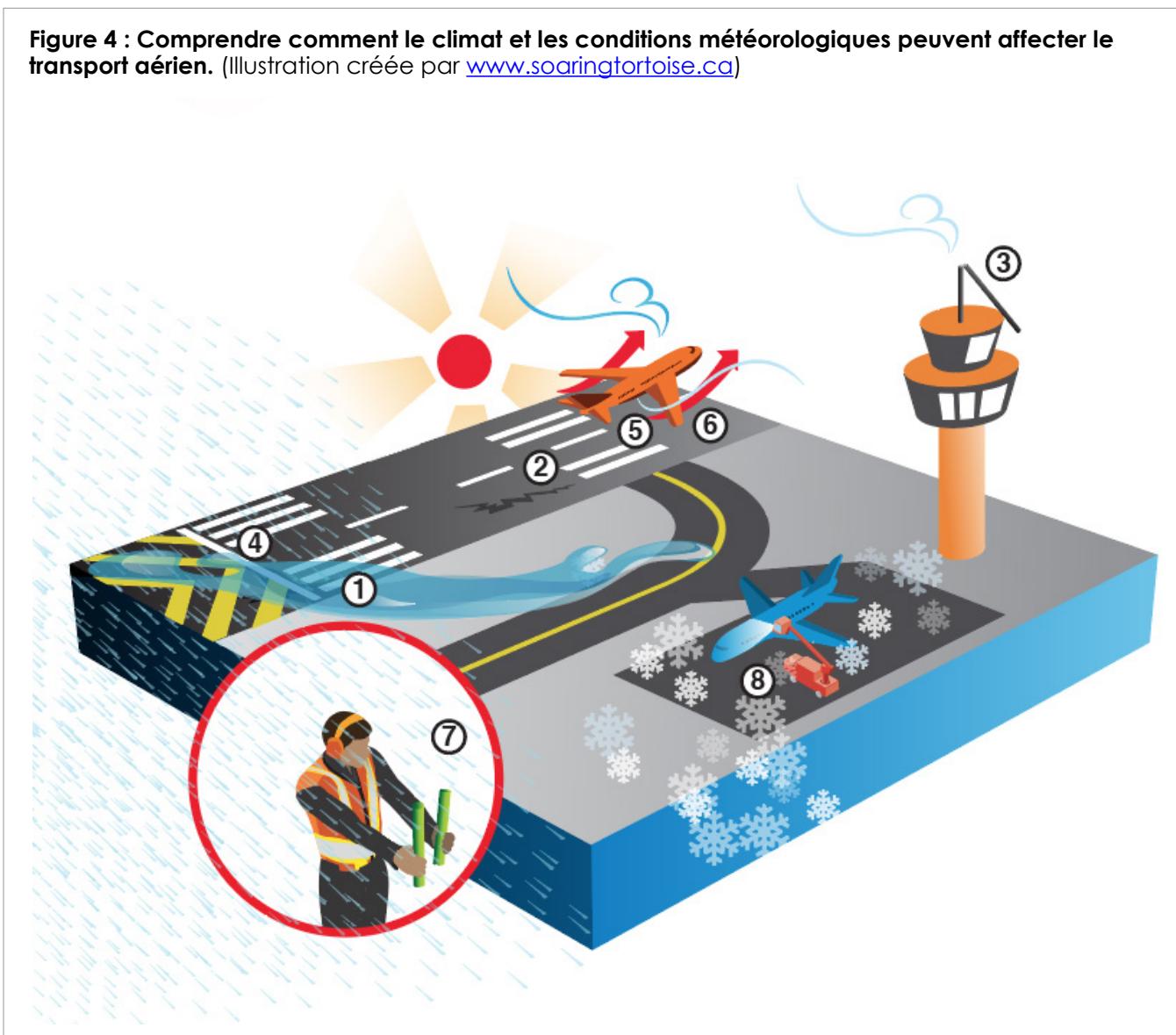


Tableau 3 : Exemples d'impacts directs de divers facteurs climatiques sur le transport aérien.

EXEMPLES D'IMPACTS CLIMATIQUES SUR LE TRANSPORT AÉRIEN	FACTEURS CLIMATIQUES
① Inondation des pistes et des voies de circulation, et dommages aux structures et équipements aéroportuaires	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (pluies intenses) et eaux stagnantes Ondes de tempête et hausse du niveau de la mer dans les zones côtières
② Dommages aux pistes et aux voies de circulation	<ul style="list-style-type: none"> Températures élevées (ramollissement de la chaussée, orniérage, ressauage et remontée de la chaussée) Cycles de gel et de dégel (déformation, cisaillement, détérioration de la chaussée) Réchauffement et dégel du pergélisol (tassemement du sol, instabilité de pente, problèmes de drainage, fissuration) Précipitations extrêmes (remblais affaiblis, dépressions)
③ Dommages aux terminaux et à l'équipement de navigation	<ul style="list-style-type: none"> Vents forts Précipitations extrêmes
④ Traction réduite des pistes	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes Pluie verglaçante
⑤ Portance réduite des avions au décollage (les avions nécessitent plus de carburant ou doivent être plus légers)	<ul style="list-style-type: none"> Températures élevées extrêmes
⑥ Atterrissage ou décollage impossible	<ul style="list-style-type: none"> Brouillard extrême (faible visibilité) Vent (forts vents latéraux ou arrière affectent certaines pistes)
⑦ Impacts opérationnels (dysfonctionnement et panne de l'équipement, problème de santé et de sécurité au travail)	<ul style="list-style-type: none"> Températures extrêmes (chaleur et froids extrêmes)
⑧ Utilisation accrue de produits déglaçant sur les pistes Utilisation accrue de produits de dégivrage et antigivrage sur les aéronefs	<ul style="list-style-type: none"> Changements des conditions de précipitations

TRANSPORT MARITIME

Les impacts illustrés à la figure 5 peuvent perturber le transport maritime et compromettre l'efficacité des activités portuaires et maritimes. Par exemple, la baisse des niveaux d'eau dans les voies navigables intérieures peut réduire le rapport coûtefficacité du transport maritime en diminuant la capacité de charge des navires et causer une préférence accrue pour d'autres ports ou d'autres modes de transport. Les dangers pour la navigation maritime liés au changement des conditions des glaces et des tempêtes peuvent poser des risques pour la sécurité. Les ports situés le long des côtes canadiennes de l'Atlantique et du Pacifique sont soumis à des impacts causés par la hausse du niveau de la mer et l'augmentation des ondes de tempête, et certains peuvent aussi être vulnérables à l'érosion côtière. Le réchauffement des températures peut offrir des possibilités pour le transport maritime, y compris une plus longue saison d'exploitation et l'ouverture potentielle de routes maritimes dans les eaux arctiques; toutefois, ces possibilités sont tempérées par les défis pour la navigation et la sécurité posés par la glace de mer mobile durant l'été et la glace plus ancienne et épaisse.

Figure 5 : Comprendre comment le climat et les conditions météorologiques peuvent affecter le transport maritime. (Illustration créée par www.soaringtortoise.ca)

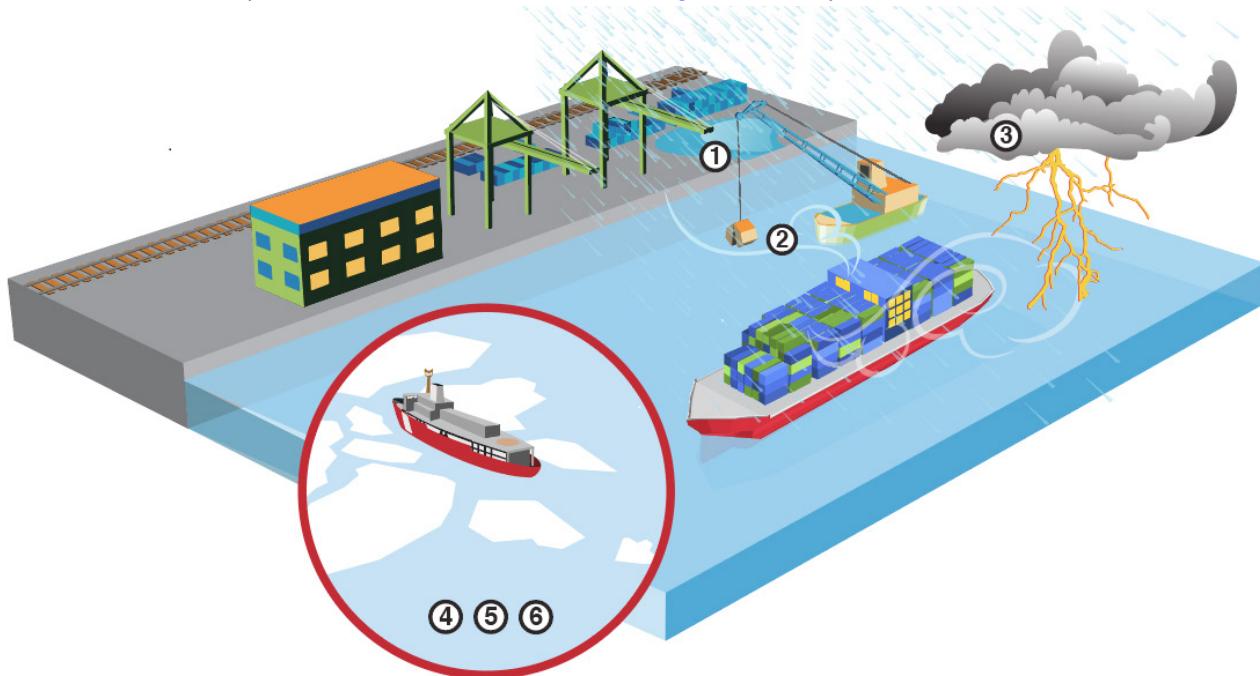


Tableau 4 : Exemples d'impacts directs de divers facteurs climatiques sur le transport maritime.

EXEMPLES D'IMPACTS CLIMATIQUES SUR LE TRANSPORT MARITIME		FACTEURS CLIMATIQUES
①	Inondation ou dommages aux installations portuaires	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (pluies intenses) et eaux stagnantes Ondes de tempête et hausse du niveau de la mer, érosion dans les zones côtières Pluie verglaçante (dommages causés par l'affouillement par la glace aux structures portuaires et aux aides visuels à la navigation) Faibles niveaux d'eau (dommages et détérioration accélérée des infrastructures exposées)
②	Accès réduit ou accru aux ports; besoins de dragage	<ul style="list-style-type: none"> Hausse des niveaux de la mer (p. ex., dans les provinces maritimes et en Colombie-Britannique) permettant l'accès à des navires plus lourds (tirants d'eau accrus) Niveaux d'eau élevés empêchant le passage des navires sous les ponts Baisse des niveaux de la mer (p. ex., dans la baie d'Hudson) et des niveaux d'eau douce (p. ex., dans les Grands Lacs) empêchant l'accès aux navires plus lourds
③	Dangers liés à la navigation – tempêtes et événements de vent (vagues)	<ul style="list-style-type: none"> Mouvement des vagues (manœuvre des navires difficiles) Fonte des glaces de mer (les eaux libres accentuent l'impact des tempêtes et des événements de vent)
④	Dangers liés à la navigation – détachement des glaces de mer	<ul style="list-style-type: none"> Fonte des glaces (glaces de mer à la dérive dans des zones inattendues)
⑤	Saison de navigation prolongée ou raccourcie	<ul style="list-style-type: none"> Débâcles précoces des glaces, saisie des glaces retardée (saison de navigation prolongée); débâcles tardives des glaces, saisie précoce des glaces (saison raccourcie)
⑥	Nouvelles occasions pour le transport maritime	<ul style="list-style-type: none"> Fonte des glaces de mer (créant des eaux libres dans des endroits où la navigation était impossible)

TRANSPORT URBAIN

Les impacts sur les systèmes de transport urbain (figure 6) comprennent plusieurs des mêmes problèmes et des occasions recensées pour les systèmes de transport routier et ferroviaire dans les sections ci-dessus. Les risques touchant aux systèmes urbains en particulier sont liés aux systèmes de transport souterrains et aux systèmes électriques. Les transitions entre les modes de transport de passagers causées par les conditions météorologiques sont également plus présentes dans le contexte urbain. Par exemple, les températures et les précipitations extrêmes de même que les vents forts contribuent tous à réduire le pourcentage de déplacements effectués par la marche ou le vélo.

Figure 6 : Comprendre comment le climat et les conditions météorologiques peuvent affecter le transport urbain. (Illustration créée par www.soaringtortoise.ca)

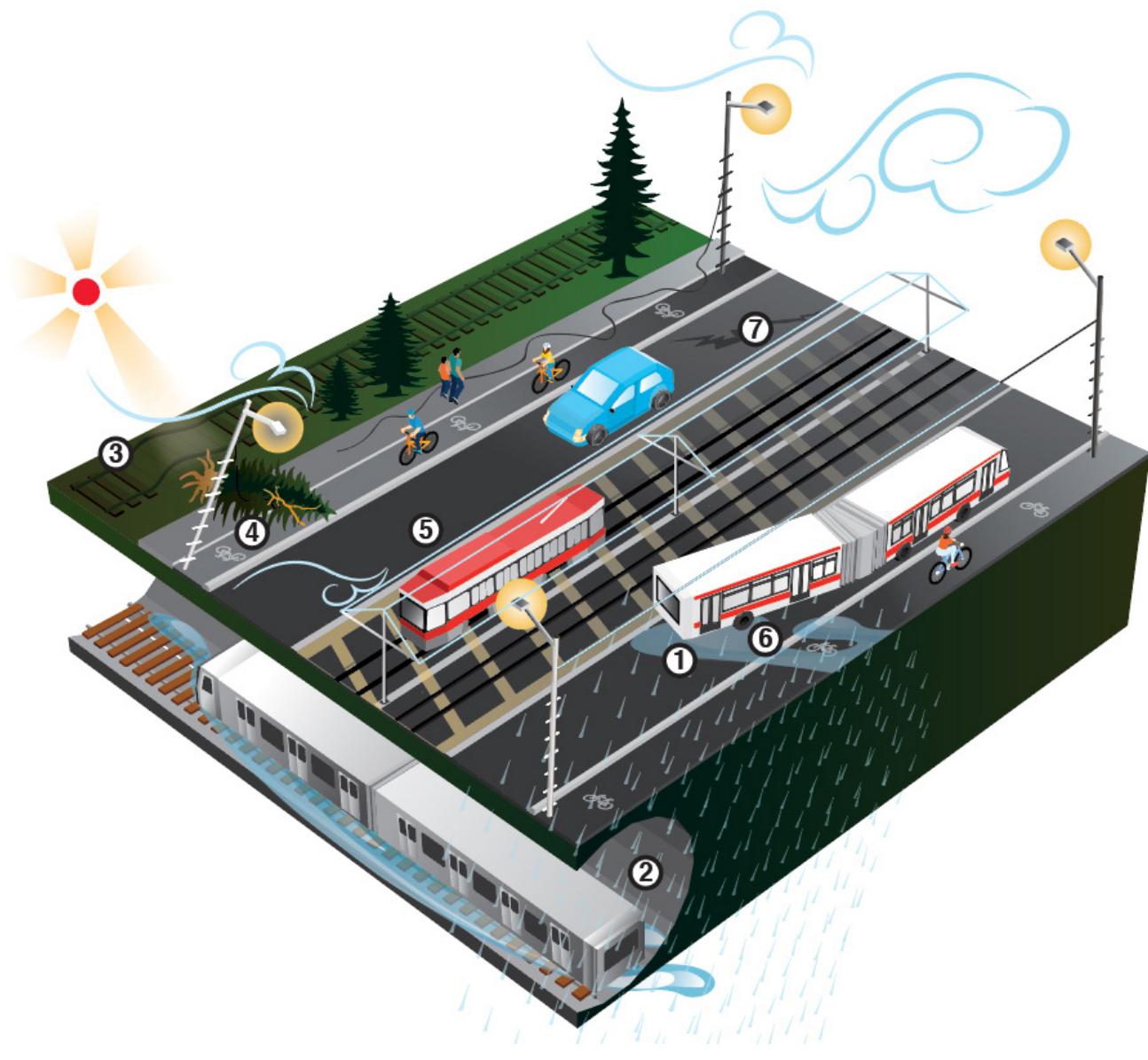


Tableau 5 : Exemples d'impacts directs de divers facteurs climatiques sur le transport urbain.

EXEMPLES D'IMPACTS CLIMATIQUES SUR LE TRANSPORT URBAIN	FACTEURS CLIMATIQUES
<p>① Inondation, dommages, et affouillement des infrastructures de surface (p. ex., les ponceaux, les routes, les trottoirs et les pistes cyclables)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (pluies intenses), problèmes de drainage, et inondations causées par les embâcles connexes Ondes de tempête et hausse du niveau de la mer dans les zones côtières
<p>② Inondation des systèmes de transport souterrains (p. ex., les tunnels de métro)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (surcharge des systèmes de drainage)
<p>③ Gauchissement des rails</p>	<ul style="list-style-type: none"> Froid extrême (bris des conduites d'eau) Chaleur extrême ou de grandes variations de température
<p>④ Dommages aux feux de circulation, à la signalisation; affaissement de lignes électriques; arbres entravant les routes</p>	<ul style="list-style-type: none"> Vents forts
<p>⑤ Perte de courant (fils électriques aériens pour les tramways et les trolleybus; feux de circulation)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes
<p>⑥ Traction et stabilité réduites des véhicules; problèmes de visibilité</p>	<ul style="list-style-type: none"> Vents forts
<p>⑦ Dommages et détérioration des routes et des ponts</p>	<ul style="list-style-type: none"> Pluie verglaçante
<p>⑧</p>	<ul style="list-style-type: none"> Chaleur extrême
<p>⑨</p>	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes
<p>⑩</p>	<ul style="list-style-type: none"> Pluie verglaçante
<p>⑪</p>	<ul style="list-style-type: none"> Vents violents (y compris la poudrerie)
<p>⑫</p>	<ul style="list-style-type: none"> Températures élevées (ramollissement de la chaussée, orniérage, ressauage et remontée de la chaussée)
<p>⑬</p>	<ul style="list-style-type: none"> Cycles de gel et de dégel (déformation, cisaillement, détérioration de la chaussée)
<p>⑭</p>	<ul style="list-style-type: none"> Réchauffement et dégel du pergélisol (tassement du sol, instabilité de pente, problèmes de drainage, fissuration)
<p>⑮</p>	<ul style="list-style-type: none"> Précipitations extrêmes (remblais affaiblis, dépressions, affouillement de ponts)

APPROCHES EN MATIÈRE D'ADAPTATION

Les propriétaires et les opérateurs de systèmes de transport utilisent une variété d'approches différentes pour atténuer les risques climatiques, y compris :

- **Intégration des considérations climatiques dans la planification, les politiques et les conceptions organisationnelles** – Il s'agit de la pratique consistant à prendre systématiquement en considération les risques climatiques dans les exigences et les plans organisationnels globaux.
- **Réalisation d'évaluations des risques et de la vulnérabilité** – Processus consistant à évaluer la vulnérabilité des infrastructures et des activités de transport aux changements climatiques et les risques associés. Les résultats peuvent orienter les décisions en matière d'investissements et les décisions opérationnelles.
- **Mise en œuvre de mesures d'adaptations structurelles et physiques (ingénierie)** – Des solutions qui améliorent la résilience physique des réseaux de transport ou des composantes de l'infrastructure. Dans certains cas, les adaptations structurelles font partie de stratégies et de programmes globaux d'adaptation au climat.
- **Intégration de technologies intelligentes** – Technologies et outils de surveillance et de communication; ceux-ci fournissent des données climatiques et météorologiques pour soutenir la prise de décision en matière d'adaptation et permettent un suivi en temps réel de l'état des actifs.
- **Modification des pratiques relatives aux activités et à l'entretien** – Ce type d'approches est souvent moins coûteux à mettre en œuvre.

Des exemples de chacune de ces approches en matière d'adaptation sont présentés ci-dessous (tableau 6) en fonction des constatations du présent chapitre. La liste présente des exemples concrets de mesures d'adaptation mises en œuvre dans l'ensemble du Canada.

Tableau 6 : Exemples d'approches en matière d'adaptation recensées dans le présent rapport

Activités d'adaptation	Chapitre de référence
Planification, politiques et conceptions organisationnelles	
Le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la C.B. exige maintenant que les travaux de conception d'infrastructure tiennent compte de l'adaptation aux changements climatiques, et a élaboré un ensemble de pratiques exemplaires théoriques.	Colombie-Britannique
TransLink, l'autorité de transport régional de Vancouver, a intégré la responsabilité pour les risques liés aux changements climatiques dans ses processus de gestion financière.	Urbain
Les plans de modernisation à long terme du port Saint John tiennent compte de la hausse du niveau de la mer.	Atlantique
Certaines administrations, comme la ville de Sept-Îles, utilisent les exigences en matière de zonage pour contrôler l'utilisation des terres côtières, et réalisent des analyses coûtsavantages pour les structures menacées.	Québec
Plusieurs administrations mettent à jour les périodes de retour et les débits conceptuels pour les réseaux de gestion des eaux pluviales, y compris les poncieux, pour tenir compte de la fréquence ou de l'ampleur accrue des épisodes futurs de précipitations intenses.	Prairies Ontario Atlantique

Activités d'adaptation	Chapitre de référence
Adaptations structurelles et physiques (ingénierie)	
Le ministère des Transports du Nouveau Brunswick a reconstruit et soulevé un pont sur la route principale menant à PointeduChêne pour tenir compte des futurs scénarios de hausse du niveau de la mer.	Atlantique
Le ministère des Transports du Québec a surdimensionné le diamètre des ponceaux de 10 % pour aider la gestion des événements de précipitations abondantes.	Québec
L'aéroport Norman Wells et l'aéroport international d'Ottawa ont rainuré leurs pistes afin d'améliorer la traction et le drainage lors de précipitations abondantes.	Nord Ontario
Les praticiens de transport mettent en œuvre et testent diverses techniques d'ingénierie comme les thermosiphons pour réduire le dégel du pergélisol sous les infrastructures, et utilisent des technologies de fibre optique pour surveiller la dégradation du pergélisol.	Nord Québec
Le système « SuperPave » est utilisé pour les routes de l'Ontario afin de déterminer les mélanges optimaux de revêtements en fonction des conditions de température locales.	Ontario
Les ingénieurs du GO train augmentent les températures idéales de pose et de libération des contraintes des rails afin de réduire les risques de gauchissement des rails en raison des températures élevées.	Ontario
Évaluations des risques et de la vulnérabilité	
L'Autorité aéroportuaire du Grand Toronto (GTAA), le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la C.B., certaines municipalités et autres entités ont utilisé le Protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) pour évaluer les infrastructures de transport (voir encadré).	Colombie-Britannique Prairies Ontario Atlantique
Les sociétés de transport maritime ont mené des évaluations des risques de l'exploitation hivernale et mis en place des procédures d'hivernisation propres aux navires afin de réduire les risques posés par les changements des conditions des glaces dans les eaux arctiques.	Nord
Les compagnies ferroviaires entreprennent des évaluations de la vulnérabilité et la cartographie du SIG pour les zones à risque de glissements de terrain, d'affouillement et d'autres risques naturels.	Colombie-Britannique Prairies
Technologies intelligentes	
Les provinces utilisent les stations météoroute (SMR) pour orienter les activités de fonctionnement et d'entretien; les entreprises de camionnage surveillent les événements météorologiques en temps réel sur leurs réseaux pour permettre le déroutement efficace.	Prairies Ontario
Des capteurs de mesure du vent sont installés sur certains ponts ferroviaires permettant aux opérateurs ferroviaires de retarder le passage ou d'ajuster la vitesse; dans la région du Grand Toronto, Metrolinx et GO Transit ont installé des avertisseurs de crue dans les corridors de circulation.	Prairies Urbain

Activités d'adaptation	Chapitre de référence
Les compagnies de chemin de fer surveillent activement les événements météorologiques, les risques climatiques et l'état des actifs en installant des détecteurs d'emportement par les eaux et des systèmes de détection de mouvement par laser, en utilisant la fibre optique pour détecter les mouvements sur les pentes, en mesurant la stabilité de la voie à l'aide de détecteurs interférométriques, et en installant des systèmes d'alerte de conditions météorologiques extrêmes.	Colombie-Britannique
Les ports maritimes, tels que Port Saint John, utilisent des outils de prévisions météorologiques et de prévision des vagues en temps réel, y compris la bouée météorologique côtière « SmartAtlantic » pour appuyer la planification et la navigation.	Atlantique
Les exploitants de navires sur le réseau des Grands LacsVoie maritime du SaintLaurent utilisent des systèmes d'information sur le tirant d'eau à bord et d'autres services de navigation électronique pour soutenir la navigation dans des conditions de bas niveau d'eau; dans les eaux arctiques, les navires utilisent la technologie radar et satellite pour obtenir des cartes, des images et des prévisions des glaces en temps quasi réel.	Nord Ontario
Le Centre de géomatique du Québec et le ministère de la Sécurité publique ont mis en œuvre un outil de cartographie interactive en ligne (le portail GéoRISC) pour la région du SaguenayLacSaintJean afin de permettre aux décideurs de limiter et de réduire les impacts des inondations et en définitive planifier des itinéraires de rechange.	Québec
Opérations et exigences et pratiques d'entretien	
Dans le but de maintenir l'intégrité des routes d'hiver dans le Nord canadien, les exploitants arrosent les routes et les ponts et construisent des caches de neige à des points clés le long des routes d'hiver à des fins de réparation.	Nord Ontario
La ville de Toronto inspecte et nettoie plus régulièrement les ponceaux de drainage pour éviter les problèmes lors d'événements de précipitations extrêmes.	Urbain
Le ministère des Transports du Québec a mis en place un programme de surveillance thermique pour 13 pistes d'aéroport au Nunavik. Elles sont construites sur des terrains sensibles au dégel du pergélisol.	Québec
Certaines administrations utilisent une combinaison déneigement et d'application de sel afin de mieux réagir aux conditions de pluie verglaçante.	Urbain
Les transporteurs dans les aéroports du Nord ont élaboré des mécanismes de dégivrage portables pour satisfaire plus aisément aux exigences en matière de dégivrage des aéronefs.	Nord Prairies
Les entreprises de camionnage utilisent des technologies pour réduire la consommation de carburant qui améliorent du même coup la résilience climatique. Les dispositifs aérodynamiques (les carénages et jupes de remorque) peuvent améliorer la stabilité des camions lors d'événements de vent, et les générateurs auxiliaires de bord (APU) peuvent aider les camionneurs à gérer une fréquence accrue de vagues de froid ou de vagues de chaleur.	Prairies

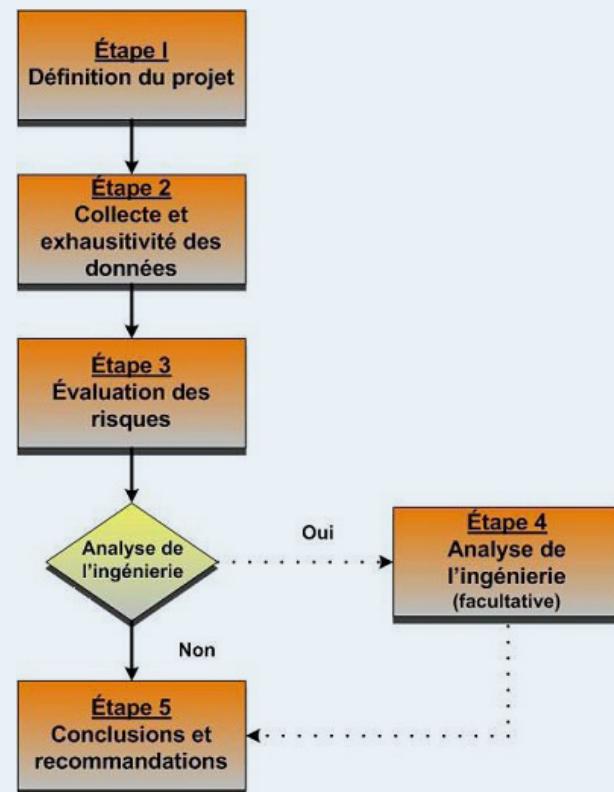
ADAPTATION DES PRATIQUES D'INGÉNIERIE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Bien que les ingénieurs aient longtemps considéré les paramètres liés au climat dans le plan de conception technique, la pratique consistait généralement à analyser les tendances historiques. Compte tenu du rythme actuel des changements climatiques, cette approche n'est plus fiable. Les associations provinciales d'ingénieurs réagissent en ajoutant de nouvelles exigences professionnelles pour faire en sorte de tenir compte des effets potentiels des changements climatiques dans le processus de conception pour la durée de vie prévue de l'infrastructure. Il s'agit d'un changement culturel pour les organismes responsables de l'infrastructure, pour les consultants effectuant des plans de conception technique et pour les clients qui commandent les travaux. Il est attendu que les futurs travaux d'ingénierie relatifs à la réhabilitation et à la conception de nouvelles infrastructures refléteront cette approche et ces avancées.

Le protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP), dirigé par Ingénieurs Canada, est un processus en cinq étapes mis sur pied pour analyser la vulnérabilité de l'ingénierie des systèmes d'infrastructure individuels en fonction du climat actuel et des projections climatiques. Depuis 2012, le protocole a été appliqué à une grande variété de types d'infrastructure, notamment les routes et les aéroports.

Pour obtenir plus d'informations, consulter le site <http://pievc.ca/fr>

Figure 7 : Le processus du protocole d'ingénierie du CVIIP. (Source : Ingénieurs Canada)



CONCLUSION

Les recherches menées dans le cadre du présent rapport indiquent que les changements climatiques et les conditions météorologiques extrêmes ont une incidence sur tous les modes de transport dans toutes les régions du Canada, et que de nombreux risques climatiques augmentent. Les efforts d'adaptation entrepris à ce jour témoignent de la volonté des gouvernements, des organismes et du secteur privé canadiens d'atténuer les risques pour la sécurité, l'efficacité et la fiabilité des transports posés par les changements climatiques. Parallèlement, des lacunes et des obstacles subsistent, y compris les limitations liées aux projections climatiques locales, ainsi que les contraintes liées aux ressources et aux capacités, en particulier dans le Nord canadien. Les progrès réalisés par la science et la technologie, ainsi que la formation, les outils et l'orientation pour les praticiens ont le potentiel d'aider le secteur à relever ces défis. La coordination entre les champs de compétences et avec l'industrie et les chercheurs jouera un rôle essentiel pour l'avancement des solutions en matière d'adaptation et l'amélioration de la résilience du secteur face à ces risques croissants.



3 · Les Territoires du Nord

CHAPITRE 3 : LES TERRITOIRES DU NORD

AUTEUR PRINCIPAL :

KALA PENDAKUR¹

COLLABORATEURS :

JACKIE DAWSON (UNIVERSITÉ D'OTTAWA),
KATERINE GRANDMONT (UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL),
DOUG MATTHEWS (MATTHEWS ENERGY CONSULTING),
ART STEWART (GOUVERNEMENT DU NUNAVUT)

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Pendakur, K. (2017). Les Territoires du Nord. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 32-72). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ Le Conference Board du Canada, Ottawa (ON)

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions.....	34
1.0 Introduction.....	34
1.1 Aperçu régional	35
2.0 Une introduction au système de transport du Nord du Canada.....	36
2.1 Aperçu du système	37
2.2 Transport routier	39
2.3 Aviation	40
2.4 Transport maritime	41
2.5 Transport ferroviaire	41
3.0 Climat	42
3.1 Tendances et prévisions.....	42
3.1.1 Atmosphère.....	42
3.1.2 Cryosphère	43
3.1.3 Niveau de la mer	46
4.0 Transport de surface	47
4.1 Incidences climatiques sur le transport routier.....	47
4.1.1 Routes praticables en toutes saisons	47
4.1.2 Routes hivernales.....	48
4.2 Risques futurs	48
4.2.1 Routes praticables en toutes saisons	48
4.2.2 Routes hivernales.....	49
4.3 Pratiques d'adaptation	51
4.3.1 Pratiques d'entretien et de surveillance.....	51
4.3.2 Planification et emplacement de l'infrastructure	52
4.3.3 Techniques et technologies de construction des routes praticables en toutes saisons	53
5.0 Transport ferroviaire.....	57
6.0 Transport aérien.....	58
6.1 Incidences du climat sur le transport aérien.....	58
6.2 Risques futurs	58
6.3 Méthodes d'adaptation.....	59
7.0 Transport maritime.....	61
7.1 Incidences du climat sur le transport maritime (y compris les lacs et les rivières)	61
7.2 Risques et possibilités futurs.....	62
7.3 Pratiques d'adaptation	64
7.3.1 Adaptations pour les navires et la navigation	64
7.3.2 Adaptations pour les installations maritimes	65
8.0 Lacunes en matière de renseignements.....	66
9.0 Conclusions.....	67
Références	68

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- **Le Nord canadien a connu l'un des plus importants réchauffements de la planète.** De 1948 à 2014, la région de la toundra arctique s'est réchauffée de 2 °C, tandis que la région des montagnes de l'Arctique et des fjords du Nunavut a connu une hausse de température de 1,6 °C. Le plus grand réchauffement (2,6 °C) s'est produit dans le district du Mackenzie. Ces changements ont des incidences considérables sur les gens, les terres, les écosystèmes et l'infrastructure.
- **La dégradation du pergélisol pose des risques immédiats et futurs pour l'infrastructure du transport dans le Nord.** Les températures à la hausse ont accru la vulnérabilité des routes, des voies ferrées et des voies de circulation et des pistes d'aéroports aux risques associés au tastement du sol, à l'instabilité de la pente et au flambage. Le réchauffement continu dégradera davantage le pergélisol, ce qui entraînera des conséquences pour la sécurité du transport, l'efficacité du système, les services communautaires et les budgets d'entretien dans le Nord.
- **Les changements au climat régional ont réduit les périodes d'ouverture et les capacités de charge de certaines routes d'hiver dans les dernières années, ce qui a dans certains cas entraîné des ajustements coûteux.** Les routes hivernales sont une composante saisonnière clé de l'infrastructure du transport des territoires (particulièrement dans les Territoires du Nord-Ouest) et sont essentielles au réapprovisionnement communautaire. Bien que les périodes d'ouverture soient toujours variables d'une année à l'autre, les récentes augmentations de la température de surface ont raccourci la période d'ouverture de certaines routes hivernales. Cette situation a créé le besoin d'une solution de recharge et souvent de méthodes plus coûteuses d'expédition, comme le transport aérien.
- **Les changements climatiques qui ouvrent les eaux marines dans le Nord à l'exploration et à l'expédition rendent également ces activités plus difficiles.** Les températures à la hausse ont mené à une diminution rapide de l'étendue de la glace marine et ont réduit les volumes de la glace marine pluriannuelle. Bien que ces changements ouvrent lentement les voies d'eau à de nouvelles voies de navigation, la mobilité accrue de la glace marine estivale ainsi que l'érosion côtière accrue et les inondations causées par les ondes de tempête présentent des difficultés du point de vue de l'expédition, de l'exploration et de l'infrastructure côtière associée.
- **Bien que de nombreuses techniques d'adaptation puissent servir à maintenir les routes, les voies ferrées et les voies de circulation et les pistes sur le sol riche en pergélisol, certaines peuvent coûter trop cher.** Plusieurs pratiques reposent sur la disponibilité de l'équipement et du matériel spécialisés, lesquelles peuvent être coûteuses pour le transport vers des régions nordiques.

1.0 INTRODUCTION

Le Nord canadien connaît actuellement l'une des plus importantes tendances de réchauffement de la planète entière (Bush *et coll.*, 2014). Les températures changeantes, les régimes de précipitations et la fréquence des tempêtes se répercutent sur les écosystèmes, les moyens de subsistance et l'infrastructure du Nord, y compris le transport. En plus de supporter des conditions météorologiques hostiles, la plus grande partie de l'infrastructure du Nord canadien a été conçue et construite de façon à être exploitée dans une fourchette de conditions propres à des conditions environnementales et climatiques en pleine évolution et qui continueront de changer au cours des années à venir (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 2009). En particulier, les températures changeantes du Nord se répercutent sur l'intégrité structurelle des bâtiments, les routes (toutes saisons et saisonnières), les pistes d'aéroports, l'infrastructure ferroviaire et marine, les voies navigables et les autres formes d'infrastructure. Dans les circonstances extrêmes, les changements ont contribué à la défaillance de l'infrastructure (Gouvernement du Nunavut *et coll.*, 2011). Les

températures changeantes affectent aussi la durée des saisons des routes hivernales, ce qui entraîne parfois le recours à d'autres méthodes d'expédition plus coûteuses afin de rejoindre les collectivités éloignées (Gouvernement du Nunavut et coll., 2011). Les perturbations résultantes des activités de transport peuvent également se répercuter sur le réapprovisionnement communautaire et la salubrité alimentaire. Pour ce qui est de l'eau, les tendances des formes des glaces marines ont modifié les pratiques de récolte d'aliments traditionnelles et l'expédition de marchandises par la mer (Gouvernement du Nunavut et coll., 2011).

Les tendances du réchauffement de la température et les tempêtes de plus en plus violentes devraient se poursuivre à l'avenir. Bien que les gouvernements et les spécialistes du Nord aient commencé la planification et l'adaptation en vue des changements climatiques, des pratiques et des stratégies de renforcement de la résistance sont requises afin d'assurer la fiabilité et la longévité de l'infrastructure et des systèmes de transport dans le Nord du Canada.

Ce chapitre évalue les nombreuses difficultés et possibilités pour le transport, associées aux changements climatiques dans les trois territoires nordiques du Canada : le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest et le Nunavut. Le chapitre fournit un aperçu régional de la géographie et des réseaux de transport distincts des territoires; aborde la question des changements observés et prévus dans le climat nordique; donne des exemples des incidences connexes sur le transport; décrit les pratiques d'adaptation permettant d'atténuer ces incidences et cerne les lacunes en matière de connaissances et de recherches à combler en ce qui a trait aux risques et aux possibilités climatiques futurs. Cette synthèse des renseignements vise à améliorer la compréhension des risques climatiques et des pratiques d'adaptation dans le secteur du transport et à éclairer la prise de décisions.

1.1 APERÇU RÉGIONAL

Le Nord canadien se caractérise par sa grande superficie, son relief diversifié et accidenté, son climat hostile, son sol gelé (c.-à-d. pergélisol) et ses voies d'eau et eaux marines gelées de manière saisonnière. Le relief du Nord se compose entre autres de longues côtes, de la chaîne de montagnes la plus haute du Canada (Saint Elias au Yukon), de régions densément boisées (la majeure partie du Yukon et une bonne partie des Territoires du Nord-Ouest) et de toundra (dans l'ensemble du Nunavut, une bonne partie des Territoires du Nord-Ouest et dans l'extrême Nord du Yukon).

Même si les capitales des trois territoires ont toutes des populations excédant 7 000 personnes, les nombreuses autres collectivités de la région comportent généralement de petites populations situées loin les unes des autres, la plupart d'entre elles étant seulement atteignables par voie aérienne ou maritime (voir le tableau 1). Ces caractéristiques présentent des défis pour l'infrastructure et les activités du transport, ainsi que pour le développement économique et social au sens plus large, dans le Nord.

Tableau 1 : Aperçu démographique des territoires du Nord (estimations des populations de 2014).
(Source : Statistique Canada, 2012a, b, c et Statistique Canada, 2014)

Indicateur	Yukon	Territoires du Nord-Ouest	Nunavut	Total
Population	36 510	43 623	36 585	116 718
Aire (km²)	474 713	1 143 793	1 877 788	3 496 294
Densité de population/km²	0,1	0,04	0,02	0,03
Nombre de collectivités	19	33	25	77

Les économies des territoires sont essentiellement fondées sur les ressources : l'exploitation minière et la production pétrolière et gazière sont les principaux moteurs économiques de la région. L'activité minière et la production pétrolière dans le Yukon et les Territoires du Nord-Ouest dépendent fortement du transport et des systèmes routiers pour les approvisionnements et les exportations. Cela comprend un certain nombre de routes hivernales clés qui appuient les projets de développement des ressources, en particulier dans les Territoires du Nord-Ouest (par exemple, la route d'hiver entre Tibbitt et Contwoyto : voir l'étude de cas 1). Par contre, les activités économiques du Nunavut comptent surtout sur le transport maritime puisqu'aucune route ne relie les collectivités et que le transport des marchandises par voie aérienne coûte cher. À l'avenir, le transport maritime devrait jouer un rôle accru dans les économies des territoires.

Le Nord possède également une économie sociale dynamique, avec un mélange varié de peuples et de cultures. En 2011, 52 % de la population des Territoires du Nord-Ouest, 86 % du Nunavut et 17 % du Yukon s'identifiaient comme autochtones (Statistique Canada, 2011). De nombreux modes de vie traditionnels pour les Premières Nations (p. ex., chasse, pêche et piégeage) nécessitent une facilité de déplacement partout sur les terres, soit des routes accessibles sur la neige et la glace. Les Inuits, qui ont traditionnellement utilisé la glace marine comme « autoroute » vers les ressources, ont été contraints de s'adapter à la glace marine qui s'amincit. Cela a amené l'obligation de parcourir de plus grandes distances pour chasser et capturer des animaux qui ont changé leurs mouvements migratoires (Inuit Circumpolar Council, 2008). Les résidents du Nord sont aussi touchés par les coûts de transport élevés, qui se reflètent dans le prix des aliments, du carburant et d'autres marchandises.

2.0 UNE INTRODUCTION AU SYSTÈME DE TRANSPORT DU NORD DU CANADA

Bien que les réseaux de transport des territoires soient similaires à certains égards, l'infrastructure de chaque territoire présente des caractéristiques uniques. Par exemple, le Nunavut n'a pas de routes praticables en toutes saisons qui le relient au sud du Canada; il compte plutôt sur le transport aérien et maritime. Le Yukon dépend principalement du transport routier et a des routes praticables en toutes saisons qui le relient à toutes les collectivités, sauf Old Crow. Les Territoires du Nord-Ouest, quant à eux, dépendent du transport maritime, ferroviaire, aérien et routier (tableau 2).

Le paysage gelé offre des possibilités de transport, ce qui jette les bases saisonnières des routes hivernales. L'hiver, la glace marine, riveraine et lacustre peut faciliter le déplacement des marchandises et des gens dans l'ensemble des territoires. Toutefois, les périodes d'ouverture des routes hivernales sont limitées, les routes étant d'ordinaire seulement ouvertes de novembre-décembre à mars-avril (Prowse et coll., 2009). De plus, les conditions de pergélisol nuisent à la stabilité de l'infrastructure du transport toutes saisons, y compris les routes et les pistes d'aéroports.

L'été, les eaux navigables servent à des fins d'expédition, permettant le réapprovisionnement communautaire des régions éloignées. Le secteur aérien joue un rôle important dans les trois territoires et sert de liaison à longueur d'année entre les collectivités du Nord et le sud du Canada pour les services médicaux et d'évacuation essentiels.

À la lumière des risques que pose les changements climatiques pour les systèmes de transport du Nord (détaillé dans les sections subséquentes), la nécessité d'adaptation relative aux transports a été reconnue par les gouvernements fédéral et territoriaux. Le gouvernement des Territoires du Nord-Ouest a commandé l'élaboration d'un plan d'adaptation aux changements climatiques pour le ministère des Transports en 2013 (Deton'Cho-Stantec, 2013). Le Nunavut a établi le Centre sur les changements climatiques du Nunavut, a publié un rapport axé sur les incidences des changements climatiques et les adaptations à ceux-ci, et a collaboré avec l'Institut canadien des urbanistes à l'élaboration d'une « trousse à outils de planification des adaptations » en 2011 (Gouvernement du Nunavut, 2011; Bowron et Davidson, 2011). Le gouvernement du Nunavut a également produit un rapport sur les défis d'ingénierie pour l'infrastructure côtière, dont les quais, par rapport aux

incidences des changements climatiques (Journeaux Assoc., 2012). Des travaux d'adaptation sont en cours au Yukon, particulièrement au Collège du Yukon et par l'intermédiaire du Yukon Climate Change Secretariat (Northern Climate ExChange, 2014a et 2014b). Plusieurs de ces efforts ont été entrepris en collaboration avec des ministères fédéraux, dont Transports Canada et Ressources naturelles Canada.

2.1 APERÇU DU SYSTÈME

La figure 1 et le tableau 2 présentent un aperçu des voies et de l'infrastructure de transport dans le Nord canadien. Les sections suivantes traitent de l'importance régionale de chacun des principaux moyens de transport : le transport routier, l'aviation, le transport maritime et le transport ferroviaire, plus en profondeur.

Figure 1: Carte des principales infrastructures de transport dans le Nord du Canada. Il convient de souligner que le réseau routier national comprend les routes d'hiver.

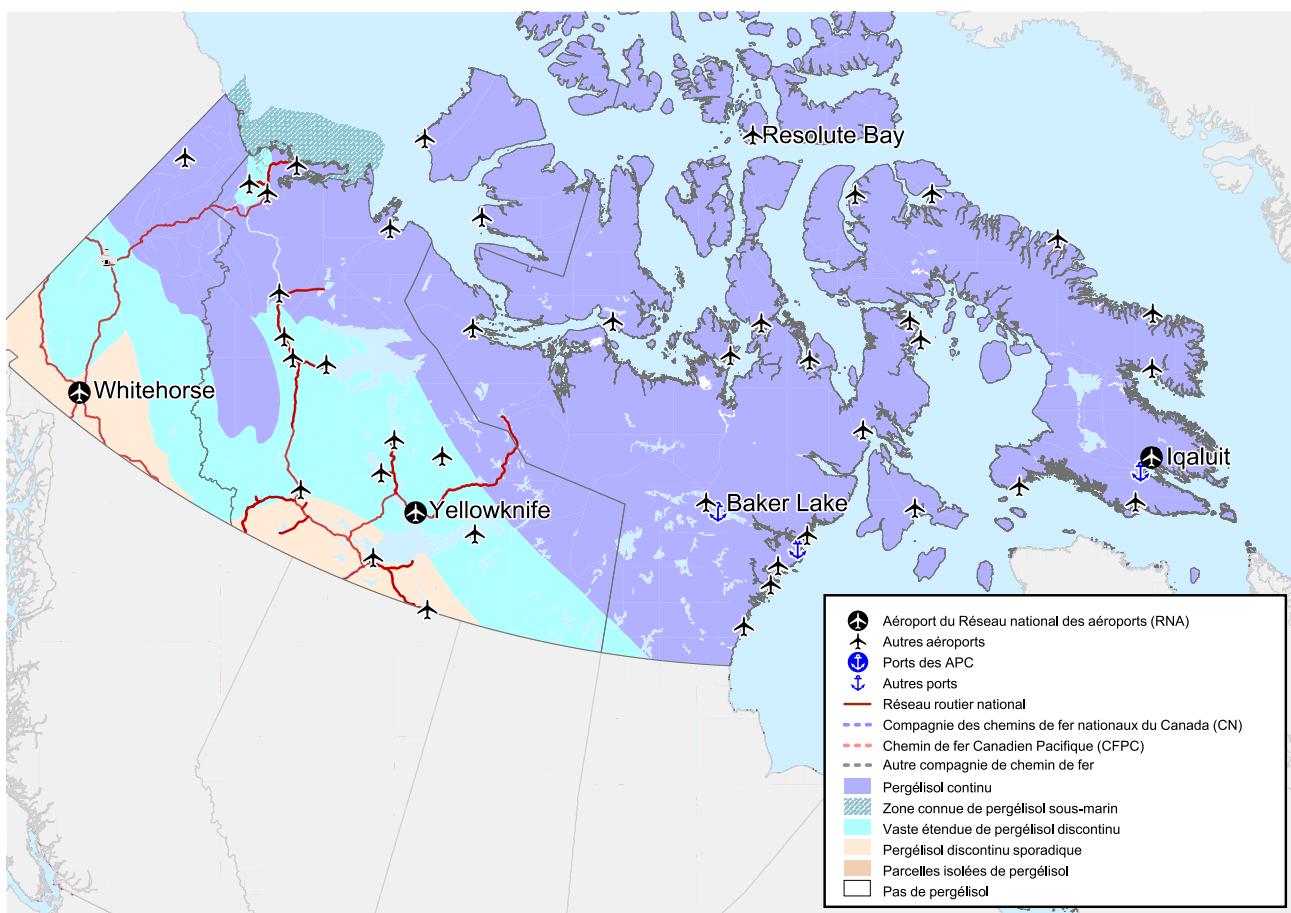


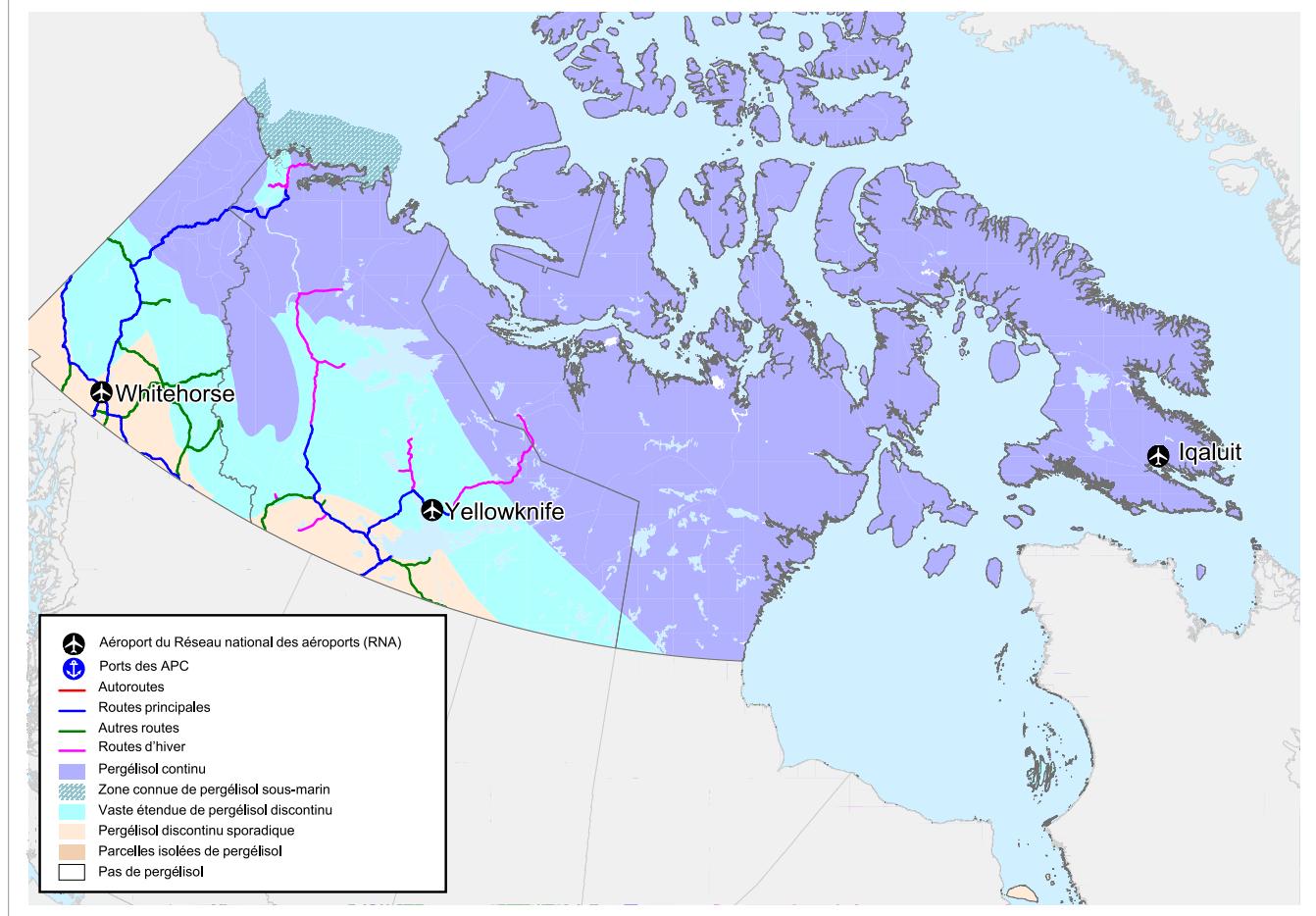
Tableau 2 : Aperçu des réseaux de transport dans les territoires.

	Yukon	Territoires du Nord-Ouest	Nunavut
Autoroutes	<ul style="list-style-type: none"> • 4 800 km de routes praticables en toutes saisons - 1 069 km de routes principales du réseau routier national - 5 % de routes pavées - 40 % de routes scellées par morceau - Les autres sont en gravier • 129 ponts • À l'exception d'Old Crow, chaque collectivité du Yukon est reliée à l'autoroute 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 200 km de routes praticables en toutes saisons - 576 km de routes principales du réseau routier national - 45 % de routes pavées ou scellées par morceau - 27 % de routes en gravier • Plus de 300 ponts • 4 postes de traverse (autoroutes 1 et 8) ouverts de mai à juin et d'octobre à décembre • 1 625 km de route hivernale de construction publique • Routes hivernales construites et entretenues par le secteur privé, y compris la route d'hiver de 570 km entre Tibbitt et Contwoyto, empruntée par l'industrie et le public 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune route reliant les collectivités • Chaque collectivité a une série de sentiers d'accès qui mènent à des zones de chasse, de pêche et de camping • Aucun système routier hivernal à ce jour
Aéroports	<ul style="list-style-type: none"> • 4 aéroports et 25 aérodromes - Une plateforme internationale (Whitehorse) - Deux aéroports (Whitehorse et Watson Lake) ont des pistes pavées; tous les autres ont des pistes d'atterrissement en gravier 	<ul style="list-style-type: none"> • 27 aéroports - La plateforme (Yellowknife) dessert les provinces ainsi que les collectivités des Territoires du Nord-Ouest - Deux plateformes régionales (Norman Wells et Inuvik) - 24 aéroports communautaires - Six aéroports munis de pistes pavées; tous les autres ont des pistes en gravier 	<ul style="list-style-type: none"> • 25 aéroports - Deux aéroports (international d'Iqaluit et Rankin Inlet) munis de pistes pavées; tous les autres ont des pistes en gravier
Maritime	<ul style="list-style-type: none"> • Liaisons avec le réseau de transport maritime avec escale en Alaska par l'intermédiaire de ports tels que ceux de Skagway, AK et Haines, Yukon 	<ul style="list-style-type: none"> • Remorques et barges de réapprovisionnement exploitées par le secteur privé desservant l'industrie, les résidents et livrant du carburant pour la production d'électricité • Barges d'approvisionnement exploitées par le secteur privé pour les collectivités • Installations fédérales, camps d'exploration et collectivités arctiques • Le transport fluvial (y compris le fleuve Mackenzie) est particulièrement important pour le réapprovisionnement des collectivités et la livraison de carburant à l'industrie et aux résidents 	<ul style="list-style-type: none"> • Pangnirtung est dotée d'un petit port pour petits bateaux qui comprend un quai fixe, un brise-lames et une rampe de ravitaillement par mer • Aucune autre collectivité n'est pourvue d'installations portuaires • L'accès maritime joue un rôle vital pour le réapprovisionnement communautaire; toutefois, peu de collectivités sont pourvues d'installations d'amarrage.
Ferroviaire	<ul style="list-style-type: none"> • Capacités ferroviaires limitées au Yukon à des fins touristiques 	<ul style="list-style-type: none"> • La Mackenzie Northern Railway sert au transport de marchandises en vrac de l'Alberta à Hay River et à Enterprise 	<ul style="list-style-type: none"> • Il n'y a actuellement pas de voies ferroviaires au Nunavut

2.2 TRANSPORT ROUTIER

Au Yukon, le réseau de transport terrestre est relativement bien développé, avec des routes qui relient toutes les collectivités sauf une (Old Crow, la collectivité la plus au nord du territoire, est reliée à la péninsule continentale de façon saisonnière seulement au moyen de routes hivernales se prolongeant jusqu'à Inuvik et en Alaska). Par contre, peu de collectivités des Territoires du NordOuest et aucune collectivité du Nunavut sont reliées au sud du Canada par le système d'autoroutes national (Prolog Canada Inc., 2011). Le système routier praticable en toutes saisons dans les Territoires du Nord-Ouest est en cours d'expansion par la construction d'une route de Tuktoyaktuk à Inuvik (qui devrait se terminer en 2018) (Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, 2015a). De plus, des services de traversier ont été ajoutés sur les fleuves Peel et Mackenzie, et on envisage de prolonger la route du Mackenzie praticable en toutes saisons vers le nord. Le prolongement de l'autoroute réduirait le besoin d'utilisation d'une route hivernale et engendrerait des avantages économiques pour les collectivités en bordure de la route entre Wrigley et Tuktoyaktuk (Gouvernement du Yukon et coll., 2008).

Tel qu'il a été discuté, les routes hivernales constituent un aspect important du réseau de transport de surface du Nord canadien. Les marchandises transportées comprennent le carburant en vrac, les marchandises séchées et d'autres articles avec une capacité de charge maximale des camions de 64 000 kg (Sous-groupe de travail fédérale/provinciale/territoriale sur les transports du Nord, 2015). Au Yukon, les routes hivernales facilitent le transport communautaire (Deton'Cho-Stantec, 2013). Il n'y a pas de système routier hivernal au Nunavut; toutefois, le gouvernement du Nunavut est à évaluer la faisabilité de la mise en place d'un réseau saisonnier reliant la région de Kivalliq au nord du Manitoba (Brownie, 2013). Les routes hivernales sont beaucoup moins coûteuses que les routes praticables en toutes saisons et ont une empreinte environnementale bien moindre (Association des transports du Canada, 2010). Bien que les coûts d'une route praticable en toutes saisons d'une largeur de 9 m dans les Territoires du Nord-Ouest puissent varier de 1,2 million de dollars canadiens à 1,5 million de dollars canadiens par kilomètre (avec des frais d'entretien allant jusqu'à 15 000 \$ du kilomètre par année), il en coûte entre 10 000 \$ canadiens et 20 000 \$ canadiens par kilomètre par saison pour ouvrir et exploiter les routes hivernales (Association des transports du Canada, 2010).

Figure 2. Réseau routier au Yukon et du Nord-Ouest territoires.

2.3 AVIATION

Pour les collectivités non reliées par des routes praticables en toutes saisons ou hivernales, le transport aérien est crucial. C'est particulièrement vrai au Nunavut et dans les Territoires du Nord-Ouest, où l'aviation assure le réapprovisionnement et le transport communautaires à longueur d'année. Pour vous donner une idée de sa prédominance, considérez que plus de 110 000 personnes sont embarquées et débarquées d'un avion à l'aéroport d'Iqaluit en 2006, malgré une population d'environ 6 000 personnes à l'époque (Dunlavay et coll., 2009). Même si les collectivités du Yukon ne sont pas aussi tributaires du transport aérien en raison du vaste réseau routier du territoire, l'aviation demeure importante pour les collectivités isolées telles qu'Old Crow.

Bien que certaines pistes dans les territoires soient pavées, elles sont pour la grande majorité en gravier. Les pistes pavées et en gravier ont différents degrés de sensibilité au climat (en particulier aux changements des conditions du sol) et requièrent donc différentes méthodes d'adaptation. Toutefois, bien que les pistes en gravier soient plus faciles d'entretien dans un contexte nordique, aucun aéronef navette de nouvelle génération n'est certifié pour rouler sur des surfaces non pavées (Parlement du Canada, 2011). Le Boeing 737200, qui n'est plus fabriqué depuis les années 1980, est l'aéronef équipé pour le gravier le plus moderne. Toutefois, ce modèle a des coûts de consommation de carburant et d'entretien plus élevés que les aéronefs plus modernes (Parlement du Canada, 2011).

2.4 TRANSPORT MARITIME

Le transport maritime est également important pour le réapprovisionnement communautaire (p. ex., le transport de nourriture et de carburant) pendant les mois d'expédition dans les Territoires du Nord-Ouest et au Nunavut. Malgré son littoral, le long de la mer de Beaufort, le Yukon n'a pas d'installation maritime, bien qu'il y ait une infrastructure d'amarrage en bordure de la rivière Yukon. Le transport maritime a beau être plus rentable que le transport aérien au Nunavut, il est souvent entravé par une infrastructure portuaire insuffisante et des conditions difficiles sur l'eau. Cambridge Bay est dotée d'installations de base, et seule Pangnirtung a une installation portuaire. Le transport maritime intérieur de la baie d'Hudson à Baker Lake (en passant par Chesterfield Narrows) sert à livrer des fournitures de carburant et de construction par barge et par pétrolier afin d'appuyer la construction et l'exploitation de la mine d'or MeadowBank (Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2012). On envisage également d'accroître l'usage marin par endroits. À Pond Inlet, un nouveau port maritime et pour petits bateaux est prévu; cela augmenterait la capacité de la collectivité en matière de réapprovisionnement en nourriture, en carburant et en d'autres biens (Gouvernement du Canada, 2015). En outre, le projet d'infrastructure marine d'Iqaluit, comprenant la construction d'un port et d'une installation de transport maritime, vise à réduire les temps de déchargement et à améliorer la sécurité des travailleurs (Gouvernement du Nunavut, 2015).

Les Territoires du Nord-Ouest sont dotés d'un vaste réseau de navires et d'installations de transport fluvial utilisé pour le réapprovisionnement communautaire. Le fleuve Mackenzie sert de voie d'expédition de fret pour le transport de biens aux collectivités en bordure de la rivière, le delta du Mackenzie, la côte de la mer de Beaufort et l'intérieur de l'archipel arctique canadien (Deton'Cho-Stantec, 2013). De plus, certains suggèrent que les installations maritimes du port de Tuktoyaktuk autrefois utilisées à l'appui des activités pétrolières et gazières dans la mer de Beaufort puissent être modifiées de façon à permettre des activités extracôtières et des opérations de recherche et de sauvetage (Matthews, 2014). Toutefois, le port n'est pas adapté à de plus grands navires et comporte actuellement un chenal d'accès peu profond de 32 km dont certaines sections font moins de quatre mètres de profondeur (Prolog Canada Inc, 2011).

2.5 TRANSPORT FERROVIAIRE

L'infrastructure ferroviaire est restreinte dans les territoires, mais fournit d'importants services à certains endroits. Par exemple, la Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada (CN) met en circulation un train de retour de marchandises en vrac par jour à Enterprise et à Hay River, dans les Territoires du NordOuest, qui approvisionne la collectivité et l'industrie minière (Gouvernement du Yukon et coll., 2008). La ligne est l'une des voies les plus coûteuses du réseau du CN en raison de la zone de service difficile; par exemple, l'assiette des rails est construite sur du pergélisol, ce qui limite la vitesse des trains (Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, 2015a). Le maintien du service est important; toutefois, plus de la moitié des marchandises en vrac qui entrent sur le territoire le font par voie ferroviaire (p. ex., le pétrole, les produits agricoles et les produits forestiers) (Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, 2011).

La seule ligne ferroviaire en exploitation au Yukon est la White Pass and Yukon Route, qui fait office de train touristique de la Colombie-Britannique à Skagway, en Alaska (White Pass and Yukon Route, 2015). Cela pourrait cependant changer; une étude se penchant sur la possibilité d'une liaison ferroviaire de l'Alaska et du Yukon aux voies ferrées nord-américaines a été réalisée. Cet itinéraire constituerait une autre charnière nord-américaine entre le littoral du Pacifique par des ports dans le nord de la Colombie-Britannique et en Alaska (Gouvernement du Yukon et coll., 2008).

3.0 CLIMAT

Les territoires du Nord canadien se caractérisent par de longs hivers froids interrompus par des étés brefs et relativement frais. Les précipitations sont légères, particulièrement dans les parties occidentales et septentrionales de la région, et se produisent surtout au cours des mois d'été. Il existe une grande variabilité régionale dans les températures et les précipitations saisonnières. Par exemple, les températures hivernales moyennes dans la partie septentrionale de la région tournent autour de -37 °C, mais de -18 °C seulement dans le sud (Environnement Canada, 2015). Les températures estivales moyennes varient entre 16 °C dans le sud et 6 °C dans le nord. La variabilité entre les saisons, les années et les décennies est importante.

Un aspect essentiel du système climatique nordique est la cryosphère : zones terrestres, d'eaux douces et marines gelées de façon saisonnière ou permanente. Cela comprend la neige, les glaciers et le pergélisol, ainsi que la glace lacustre, riveraine et marine. Bon nombre des répercussions des changements climatiques les plus marquantes observées dans le Nord canadien se rapportent à des changements dans la cryosphère (Derksen et coll., 2012).

Un élément final du système climatique nordique est le climat maritime. Bien que les changements dans la température, la salinité et d'autres paramètres océaniques se répercutent grandement sur les écosystèmes et les modes de vie traditionnels nordiques ; ce chapitre tient seulement compte de la façon dont les changements dans le niveau de la mer modifient l'infrastructure du transport côtier.

3.1 TENDANCES ET PRÉVISIONS

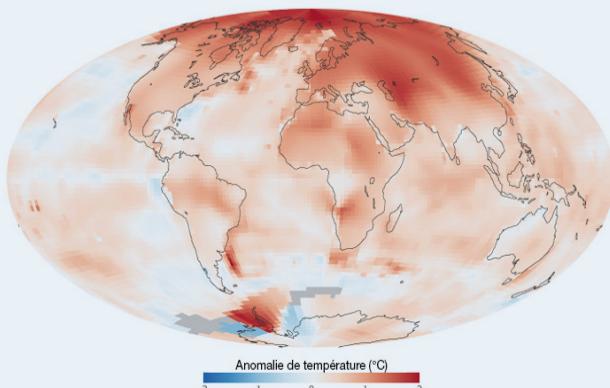
3.1.1 Atmosphère

Les régions arctiques se sont réchauffées et continueront de le faire, plus rapidement que la plupart des régions du monde, en partie en raison du phénomène connu sous le nom d'amplification arctique (voir encadré). Le Nord canadien a déjà connu l'un des plus importants réchauffements de la température de l'air à la surface observés sur toute la planète (Bush et coll., 2014). Le plus grand réchauffement observé, soit 2,6 °C pour la période entre 1948 et 2014, est survenu dans le district du Mackenzie, dans les Territoires du Nord-Ouest (Environnement Canada, 2015). Au cours de la même période, la tendance du réchauffement au Canada était de 1,6 °C, et d'environ 0,8 °C à l'échelle planétaire. Le réchauffement dans le reste du Nord canadien était égal ou supérieur au réchauffement observé dans le pays dans son ensemble pour la période de 1948 à 2014, avec un réchauffement de 2 °C observé dans la région de la toundra arctique, et de 1,6 °C pour les montagnes de l'Arctique et la région des fjords du Nunavut.

QU'EST-CE QUE L'AMPLIFICATION ARCTIQUE?

L'amplification arctique renvoie au taux accéléré de réchauffement qui caractérise les régions arctiques par rapport au reste du monde (figure 3). Bien que de nombreux facteurs contribuent à ce phénomène, un facteur clé est l'absorption de chaleur en surface accrue associée aux réductions de la couverture de neige et de glace marine. La neige et la glace sont très efficaces, tandis que les surfaces plus sombres d'eau libre et de toundra absorbent la chaleur, ce qui cause un réchauffement accru (National Aeronautics and Space Administration, 2013).

Figure 3 : Les anomalies de la température mondiale de 2000 à 2009, montrant à quel point une région est plus chaude (rouge) ou plus froide (bleu) que la norme pour cette région de 1951 à 1980. Bien que les températures globales moyennes entre 2000 et 2009 aient été plus élevées d'environ 0,6 °C qu'elles ne l'ont été de 1951 à 1980, l'Arctique s'est réchauffé d'environ 2 °C. (Source : NASA/, JPL-Caltech)



Les prévisions laissent entendre que le réchauffement du Nord se poursuivra jusqu'à dépasser celui du Canada dans son ensemble, le plus grand réchauffement ayant lieu l'hiver et l'automne (Bush et coll., 2014). Dans les modèles de changements climatiques, l'ampleur du réchauffement, pour la dernière partie du siècle présent, est fortement tributaire du niveau d'émissions de gaz à effet de serre mondial. Dans un scénario de fortes émissions, un réchauffement hivernal de plus de 10 °C est prévu pour de grandes parties du Nord. Même dans un scénario de faibles émissions, les températures hivernales moyennes vont augmenter de plus de 5 °C.

Toutes les régions du Nord canadien affichent également des précipitations accrues depuis 1948, avec une très grande variabilité d'une année à l'autre (Prowse et coll., 2009). Bien que la région soit dominée par des masses d'air froid l'hiver, une variabilité accrue du courant-jet dans les dernières années (Francis et Vavrus, 2012) a entraîné davantage de cas d'advection d'air chaud hivernal dans le Nord (vents forts provenant de régions plus chaudes) (Wang, 2006). Cela peut avoir comme résultat de la pluie verglaçante, du brouillard et des dégels, qui occasionnent des problèmes pour les systèmes de transport. Les prévisions climatiques indiquent que les précipitations continueront d'augmenter dans tous les scénarios, les augmentations les plus importantes ayant lieu en automne et en hiver. Des augmentations des précipitations hivernales de plus de 25 % sont prévues pour certaines parties de l'est et du centre de l'Arctique d'ici l'an 2050 (Bush et coll. et coll., 2014).

Il a été clairement établi que la fréquence et l'intensité des tempêtes dans l'Arctique vont croissant (Manson et Solomon, 2007). Les zones d'eau libre de plus en plus grandes entraînent des tempêtes cycloniques plus intenses. Ces tempêtes prendront de l'ampleur et de la vigueur compte tenu que, selon les projections, l'étendue de la glace marine diminuera de plus en plus. (Simmonds et Keay, 2009). Les tempêtes sont plus communes dans l'est de l'Arctique, en raison de la trajectoire de la tempête dans la baie de Baffin. Il y a de nombreux exemples récents d'épisodes de vents violents, dont un en 2006 à Pangnirtung, au Nunavut, où des vents aussi rapides que 125 km/h ont détruit un bâtiment et brisé des fenêtres (Hanesiak et coll., 2010). Pendant un épisode semblable en 2007 à Iqaluit, au Nunavut, des vents allant jusqu'à 140 km/h ont arraché des sections du toit de plusieurs bâtiments (Hanesiak et coll., 2010). Les ondes de tempête, où les niveaux d'eau excèdent les niveaux des marées en raison de la pression atmosphérique et des vents liés aux tempêtes, sont particulièrement préoccupantes le long de la côte de la mer de Beaufort, vu sa faible profondeur. Plusieurs sites dans cette région ont enregistré des ondes de tempête de plus de 2 m (Forbes et Frobel, 1985), et les effets se sont ressentis jusqu'à 30 km à l'intérieur du delta du Mackenzie (Kokelj et coll., 2012). Lorsque des ondes de tempête se produisent pendant des périodes de couverture de glace complète, il peut en résulter des crêtes de pression qui modifient le fond marin à proximité de la rive, ce qui risque d'entraver l'accès aux installations côtières.

3.1.2 Cryosphère

Des changements ont été observés dans tous les éléments de la cryosphère et le taux de changement a accéléré au cours des dernières années (Derksen et coll., 2012). Ces changements comprennent des diminutions de l'étendue et de la durée de la couverture de neige au cours des 40 dernières années ainsi qu'une nette évolution vers un bilan de masse négatif (perte du volume de glace) dans les glaciers arctiques et les calottes glaciaires depuis 2005 (Derksen et coll., 2012). Les changements de la glace marine, du pergélisol et de la couverture de glace riveraine et lacustre revêtent une pertinence particulière pour le transport dans le Nord.

La glace marine est l'une des caractéristiques les plus distinctives du Nord canadien (Ford et coll., 2016). L'hiver, lorsque la couverture glacielle est pour ainsi dire complète, la côte est protégée contre les effets des vagues, et la glace permet le transport entre les collectivités et l'accès aux zones de chasse et de pêche. Lorsque la glace est en mouvement, le vent et les courants peuvent causer la collision des marées et former des crêtes de pression, ce qui complique les déplacements dans l'eau et sur la glace. La glace marine épaisse accumulée sur plusieurs années associée à la rupture d'îles de glace et d'icebergs générée par les glaciers en vêlage présente également des risques importants pour le transport marin (Prowse et coll., 2009).

Pour l'Arctique dans son ensemble, l'étendue moyenne de la glace marine au mois de septembre décroît à un rythme de 13,3 % par décennie, tandis que l'étendue en mars décroît à un rythme de 2,6 % par décennie (National Snow and Ice Data Centre, 2016) (figures 4a, b, c). Dans l'Arctique canadien, le niveau de perte varie de 2,9 % par décennie dans l'archipel de l'Arctique canadien (AAC) (bien que certaines régions de l'AAC présentent des niveaux beaucoup plus élevés) à 10,4 % par décennie dans la baie d'Hudson (Tivy et coll., 2011). Ce déclin de la couverture de glace marine a entraîné un prolongement de la saison d'eau libre d'en moyenne cinq jours par décennie dans l'ensemble de l'Arctique depuis 1979 (Stroeve et coll., 2014), et de 3,2 à 12 jours par décennie dans le Nord canadien. Par exemple, dans la baie Resolute, au Nunavut, la saison de fonte s'est allongée de presque 30 jours sur une période de 30 ans, principalement en raison d'un retard dans le gel (St-Hilaire-Gravel et coll., 2011). Cette diminution de l'étendue de la glace marine signifie que des vagues plus grosses et plus puissantes atteignent la côte (Overeem et coll., 2011). Cela entraîne alors une érosion et des inondations accrues (Solomon et coll., 1994). La plus grande augmentation du fetch (longueur de l'eau libre) survient généralement en septembre, qui est souvent aussi la période la plus orageuse de l'année (Atkinson, 2005).

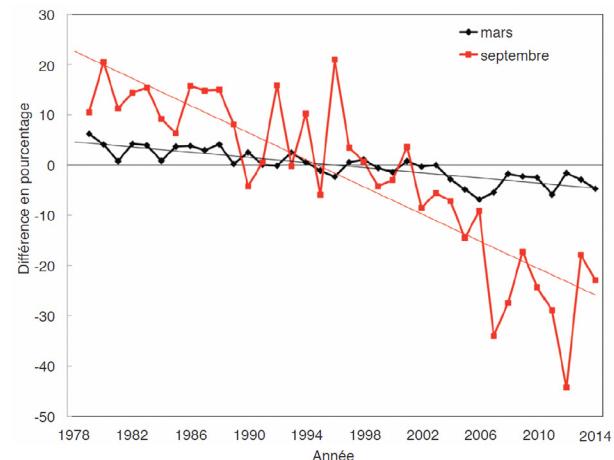
Ces tendances dans la couverture glacielle marine devraient continuer ou s'accélérer (Vaughn et coll., 2013), certains modèles prévoyant une perte quasi complète de la couverture de glace marine estivale avant le milieu du siècle (Wang et Overland, 2012). La glace marine arctique s'amincit également : il est prévu que l'épaisseur moyenne de la glace printanière diminue de 2,4 m en 2008 (Kwok et coll., 2009) à 1,4 m d'ici 2050 (Stroeve et coll., 2012).

Figures 4a, b, c : Changements dans l'étendue des glaces marines de l'Arctique depuis 1981.

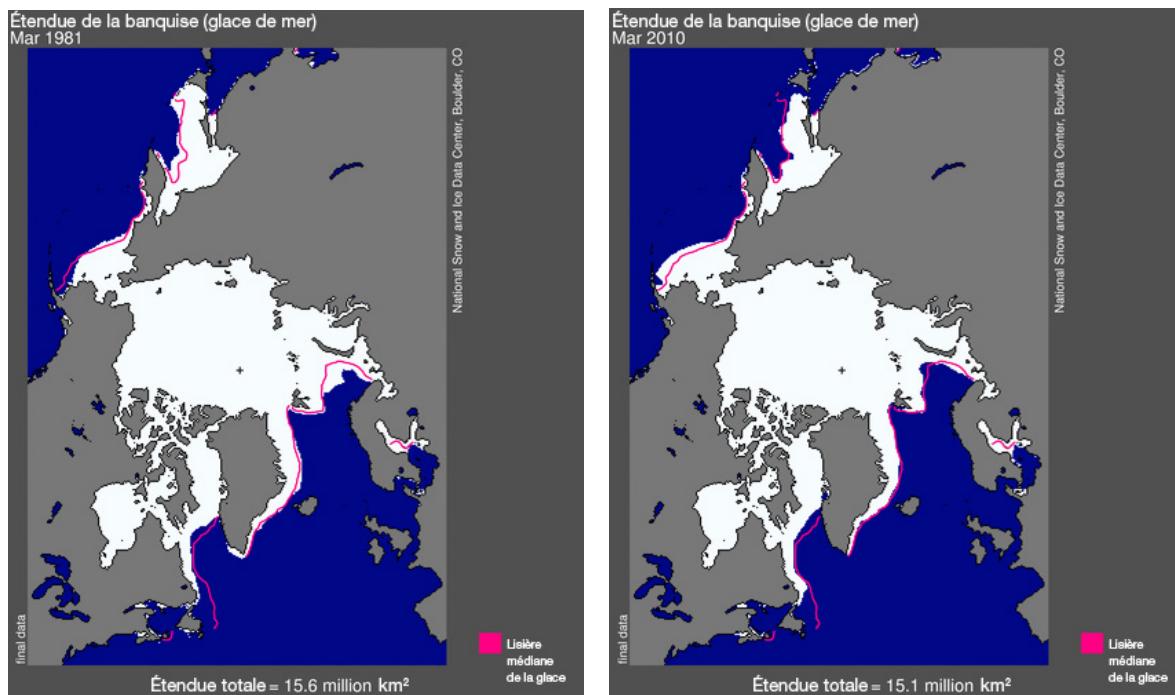
(Source : Gracieuseté du National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder)

Le pergélisol, qui est un sol gelé en permanence, sous-tend pratiquement tous les territoires du Nord canadien. Il peut être continu ou discontinu ou se manifester par parcelles (Smith et Burgess, 2004). Le pergélisol peut mesurer jusqu'à plusieurs mètres d'épaisseur, mais peut faire seulement dix mètres d'épaisseur ou moins dans les parties les plus au sud de la zone de pergélisol. Au-dessus du pergélisol, une couche de surface (connue sous le nom de couche active) dégèle l'été et gèle de nouveau l'hiver. L'épaisseur de la couche active peut varier entre des dizaines de centimètres à plusieurs mètres. Le climat (y compris la température de l'air et la couverture de neige) est le principal facteur contrôlant l'occurrence et l'état thermique du pergélisol. Les changements climatiques peuvent entraîner le réchauffement et le dégel du pergélisol. Le réchauffement du pergélisol réduit l'intégrité structurelle de l'infrastructure qui repose sur le pergélisol pour une fondation stable, tandis que le dégel du pergélisol riche en glace mène à l'affaissement de la surface (enfoncement), à des changements hydrologiques et à l'instabilité de la pente. Cela pose des risques pour l'infrastructure, les routes, les bandes d'atterrissements et les voies ferrées.

4a – Anomalies de l'étendue de glace marine dans l'Arctique (par rapport aux valeurs moyennes pour la période de 1981-2010) pour le mois où l'étendue de glace est à son maximum (mars) et le mois où l'étendue de glace est à son minimum (septembre) (Perovich et coll., 2014).



4b – Comparaison de la superficie moyenne mensuelle de la glace marine entre mars 1981 et mars 2010; la ligne magenta désigne la glacielle médiane pour mars pour la période visée (National Snow and Ice Data Center [É.-U.], 2016).



4c – Comparaison de la superficie moyenne mensuelle de la glace marine entre septembre 1981 et septembre 2010; la ligne magenta désigne la glacielle médiane pour septembre pour la période visée (National Snow and Ice Data Center [É.-U.], 2016). La diminution de l'étendue minimale de glace est beaucoup plus marquée que les changements maximaux dans l'étendue des glaces marines.

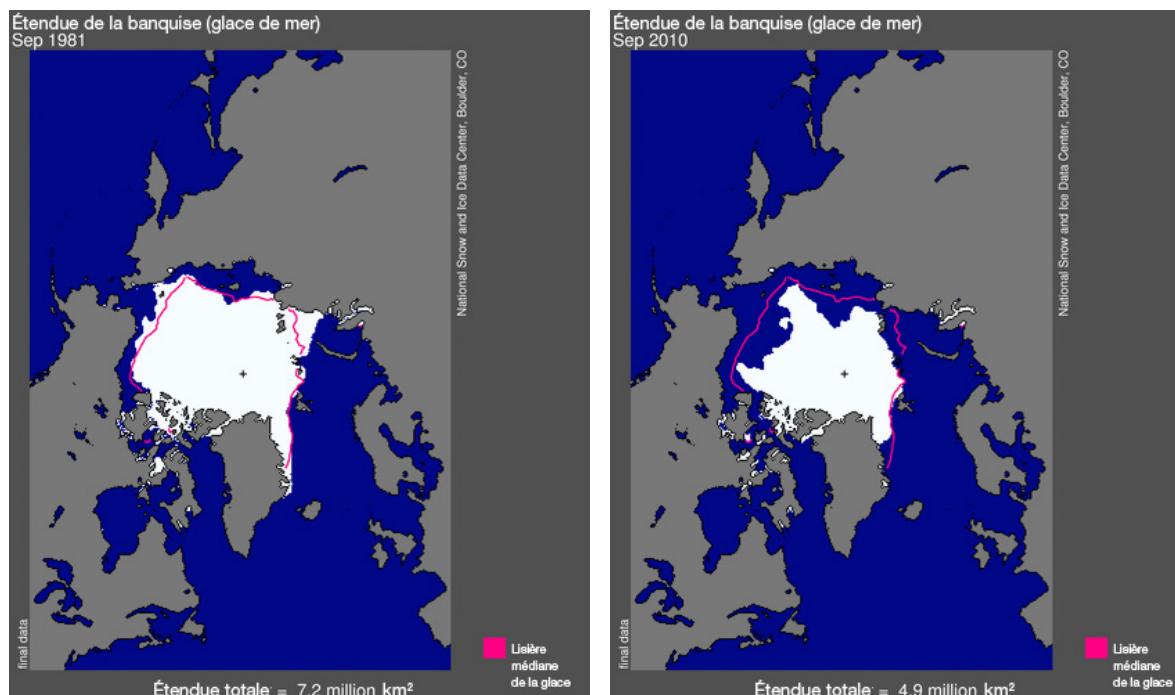


Figure 5 : La température annuelle moyenne du sol (TAMS) dans le Nord canadien enregistrée pendant l'Année polaire internationale (2007-2009). B et C montrent des séries temporelles d'anomalies normalisées en fonction de la température du pergélisol (par rapport à la moyenne de 1988 à 2007) pour un emplacement situé à proximité de Norman Wells (12 m de profondeur) et à Alert (15 m de profondeur). (Source : Derksen et coll., 2012)

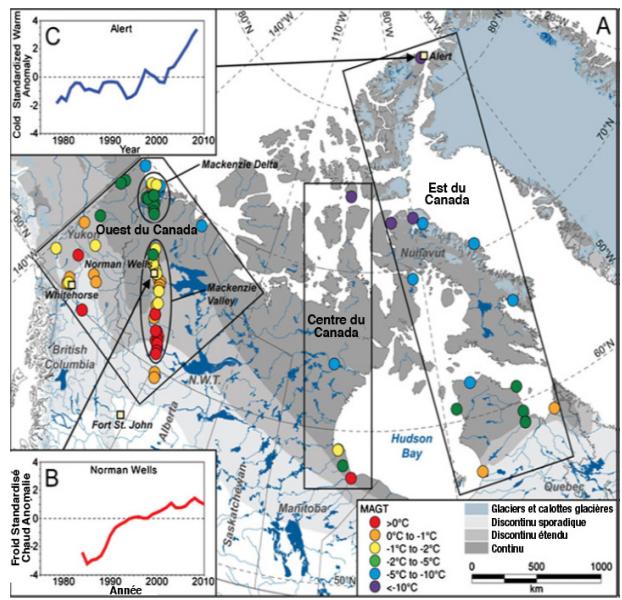
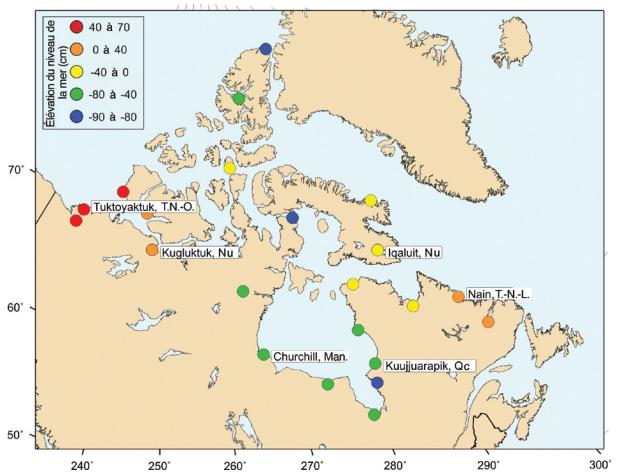


Figure 6 : Changements du niveau de la mer relatifs médians prévus en 2100 dans un scénario d'émissions de gaz à effet de serre élevées (RCP8.5; après James et coll., 2014). Les scénarios et les méthodes employés sont décrits dans Atkinson et coll., 2016. (Source : Ressources naturelles Canada)



Un certain nombre d'aperçus exhaustifs de l'état du pergélisol au Canada (Burn et Kokelji, 2009) indiquent que, à quelques exceptions près, les températures du pergélisol sont à la hausse. En règle générale, le pergélisol plus froid situé plus au nord connaît de plus fortes augmentations de température que le pergélisol plus chaud. Les tendances sur plusieurs décennies montrent un réchauffement des températures du sol entre 0,2 °C par décennie dans le sud et le centre de la vallée du Mackenzie et 1,2 °C par décennie dans l'est de l'Arctique (figure 5). Ces taux semblent être à la hausse, les données pour la période de 2008 à 2013 affichant un réchauffement moyen de 1,5 °C par décennie pour 10 sites couvrant une gamme d'environnements arctiques (Smith et coll., 2013). Le réchauffement du sol est également associé à une augmentation de l'épaisseur de la couche active saisonnière.

Ces tendances devraient se maintenir à mesure que le climat continue de se réchauffer (Woo et coll., 2007). Les régions qui connaissent les plus grandes réactions thermiques ne sont toutefois pas celles qui montrent les plus grandes répercussions physiques (Smith et Burgess, 2004). Par exemple, lorsqu'il y a une grande augmentation de la température du sol accompagné d'une très faible teneur en glace de sol, les répercussions physiques du réchauffement du pergélisol sont minimes.

La température de l'air influence aussi fortement les dates de gel et de rupture de la glace riveraine et lacustre, alors que les changements de la température de l'air et de la couverture de neige se répercutent sur l'épaisseur de la glace (Brown et Duguay, 2010). La durée et l'épaisseur de la couverture glacielle sont cruciales pour la durabilité de nombreuses routes hivernales dans les territoires du Nord canadien. Le gel retardé et les dates de rupture devancées observées au cours des dernières années devraient se poursuivre, des simulations portant à croire que d'ici le milieu du siècle, le gel aura lieu environ 15 jours plus tard que par le passé et que la rupture se produira de 5 à 25 jours plus tôt. Pour la même période, on prévoit que les épaisseurs de glace maximales diminueront de 20 à 30 cm (Brown et Duguay, 2010).

3.1.3 Niveau de la mer

Les changements du niveau de la mer dans les territoires du Nord canadien sont dominés par un mouvement vertical de la terre qui a cours depuis la dernière glaciation, lorsque la terre sous les nappes de glace était enfoncée

de centaines de mètres, et a lentement rebondi sur des milliers d'années (Atkinson et coll., 2016). Ce phénomène, connu sous le nom d'ajustement isostatique glaciaire, fait en sorte que le niveau de la mer observé chute dans la plus grande partie de l'Arctique canadien, malgré le fait que le niveau moyen de la mer à l'échelle planétaire ait augmenté. Une exception notable est la région du delta du Mackenzie et de Beaufort dans l'ouest de l'Arctique qui est proche de la marge de la dernière nappe de glace et dont le niveau de la mer est à la hausse pour cette raison. Les registres de données de marégraphes couvrant les 50 dernières années indiquent que le niveau de la mer a augmenté de 2,4 mm par année à Tuktoyaktuk, dans les Territoires du Nord-Ouest, mais décliné de 1,5 mm par année à Alert, au Nunavut (Ford et coll., 2016).

Les tendances futures des changements du niveau de la mer seront semblables aux tendances historiques, l'ampleur des changements étant influencée par les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle planétaire et les hausses connexes du niveau moyen de la mer à l'échelle planétaire. Là où la terre s'élève rapidement, le niveau de la mer futur devrait continuer de chuter, même dans un scénario d'émissions de gaz à effet de serre élevées, et certains endroits pourraient connaître une baisse de plus de 80 cm du niveau de la mer d'ici 2100 (figure 6). Là où la terre s'enfonce lentement, y compris dans la région du delta du Mackenzie et de Beaufort, le niveau de la mer devrait s'élever de plus de 40 cm d'ici 2100. Quoi que ce changement n'est pas entièrement due aux changements climatiques, l'adaptation sera toujours requise.

Une conséquence importante de l'élévation du niveau de la mer est l'augmentation associée d'événements extrêmes liés au niveau de la mer. Par exemple, à Tuktoyatuk, l'élévation du niveau de la mer devrait faire passer la fréquence d'un événement qui arrivait autrefois une fois tous les 25 ans à une fois tous les quatre ans d'ici 2100. En d'autres termes, le niveau d'inondations associé à un événement se produisant une fois tous les dix ans à Tuktoyatuk devrait passer de 1,1 m actuel à 2,1 m d'ici 2100 (Lamoureux et coll., 2015).

Même si les changements du niveau de la mer se répercuteront sur le transport et l'infrastructure côtière associée à long terme, particulièrement dans le delta du Mackenzie et la région de Beaufort, les changements à court terme de l'étendue et de la durée de la couverture glacielle marine produiront des conséquences beaucoup plus lourdes sur l'érosion des côtes et les inondations (Ford et coll., 2016). L'érosion des côtes et les dommages connexes à l'infrastructure sont déjà un enjeu de taille pour bien des collectivités de l'ouest de l'Arctique. Par exemple, Tuktoyatuk a subi une érosion des côtes si importante que plusieurs bâtiments, dont l'école communautaire et la poste de police, ont été déménagés afin d'assurer la sécurité des résidents (Gouvernement du Nunavut et coll., 2011).

4.0 TRANSPORT DE SURFACE

4.1 INCIDENCES CLIMATIQUES SUR LE TRANSPORT ROUTIER

Tel qu'il a été mentionné, les routes sont essentielles au fonctionnement socioéconomique de nombreuses collectivités du Nord. Cette section résume les incidences attendues sur les routes relativement à différents facteurs climatiques.

4.1.1 Routes praticables en toutes saisons

Le réchauffement des températures dans le Nord canadien a des incidences importantes sur les routes, surtout celles construites sur le pergélisol (Northern Climate ExChange, 2014b). Les conditions de pergélisol sont particulièrement éprouvantes pour les ingénieurs qui travaillent aux frontières méridionales du Nord, où les températures du sol fluctuent entre -1 °C et 0 °C. Le réchauffement et le dégel du pergélisol riche en glace peuvent conduire à un tassement du sol, à une instabilité de la pente, à des problèmes de drainage et à la fissuration de la chaussée (voir figure 7) (Montufar et coll., 2011). Par exemple, l'autoroute 3 dans les Territoires du Nord-Ouest a été conçue pour préserver le pergélisol, mais le volume élevé de l'eau de fusion dû au réchauffement des températures n'a pas été pris en compte et l'infrastructure a donc défailli (Northern Climate ExChange, 2014b).

Figure 7: Tassement différentiel lié au dégel du pergélisol le long d'une section abandonnée de l'autoroute 4 dans les Territoires du NordOuest, à l'est de Yellowknife. (Source : Ressources naturelles Canada)



Les précipitations extrêmes ont aussi touché les routes et les ponts. Par exemple, les fortes pluies et les crues soudaines à Pangnirtung, au Nunavut, ont érodé un pont communautaire important, isolé 200 résidents et bloqué l'accès à d'importants services municipaux (CBC News, 2008). Une enquête sur le terrain a déterminé que les fortes pluies, les températures plus chaudes que d'ordinaire, la présence de matières riches en glace et les fissures de gel étaient les principaux facteurs contributifs (Hsieh et coll., 2011).

4.1.2 Routes hivernales

Les températures plus élevées nuisent également aux routes hivernales, qui peuvent être construites sur la terre, sur la glace lacustre ou riveraine ou (rarement) rattachée par la glace marine à la rive. Bien que les périodes d'ouverture aient toujours varié selon l'endroit et l'année, les récentes augmentations de la température de l'air à la surface et les réductions de la couverture de neige ont diminué la durée de la période d'ouverture et la capacité de charge maximale à bien des endroits (Furgal et Prowse, 2008). Cela a donné lieu à un rajustement coûteux en 2006, où environ 1 200 charges ont dû être transportées par voie aérienne pendant l'été et l'automne à la suite d'une saison d'activité sur les routes d'hiver écourtée sur la route d'hiver entre Tibbitt et Contwoyto (Andrey et coll., 2014).

Les problèmes de drainage sont aussi à même de s'intensifier en période de temps extrême, alors que le débit d'eau peut réduire l'intégrité des routes hivernales, des ponts aux traversées de cours d'eau et des ponceaux. Par exemple, des sections des routes hivernales de la vallée du Mackenzie et des Tlicho ont été inondées et fermées ces dernières années, et certaines sections de la route hivernale des Tlicho ont été fermées pour cause d'inondations (Deton'Cho-Stantec, 2013).

4.2 RISQUES FUTURS

4.2.1 Routes praticables en toutes saisons

Une menace importante pour l'intégrité des routes dans la plupart des territoires est la dégradation continue du pergélisol riche en glace. On s'attend à ce que cela continue de causer des problèmes liés au tassement du sol et à l'affaissement des remblais routiers : à long terme, la dégradation du pergélisol peut contribuer à la défaillance des pentes sur les côtés de l'autoroute, à un envasement accru (en référence au déplacement du matériau d'appui vers le bas et à l'écart de la chaussée) (Alberta Transportation, 2003), ainsi qu'à l'enfoncement et à la fissuration des accotements (Deton'Cho-Stantec, 2013).

Les précipitations extrêmes plus fréquentes agravaient le risque d'inondations à certains endroits, causant l'emportement par les eaux des routes et des ponts, une friction réduite et des problèmes de drainage liés à un dimensionnement inadéquat des ponceaux. Une fonte des neiges de volume important peut aussi causer des inondations et accroître la pression de l'eau interstitielle et l'érosion, endommageant le pergélisol (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Cela aura des conséquences sur les routes, les ponts aux traversées de cours d'eau et la stabilité de la pente. Les gouvernements territoriaux sont au courant de ces risques et prennent des mesures pour renforcer l'intégrité structurelle du sol qui sous-tend l'infrastructure de transport (plus de détails à la section 4.3). En outre, les chutes de neige et les tempêtes limitent la visibilité pour les conducteurs et peuvent entraîner des fermetures de routes.

4.2.2 Routes hivernales

À mesure que le climat se réchauffe, les routes hivernales dans le Nord canadien, tant publiques que privées, sont à risque en raison des saisons d'ouverture écourtées et des coûts accrus. La glace lacustre, riveraine et marine amincie aura des retombées négatives sur la durée de la saison et la stabilité des routes hivernales (Bush et coll., 2014), tandis que les conditions du pergélisol changeantes se répercutent sur la viabilité et l'intégrité structurelle de certaines routes (McGregor et coll., 2008).

La tendance vers des saisons d'ouverture plus courtes est déjà évidente. Par exemple, la date d'ouverture moyenne pour la circulation légère sur la traversée du pont de glace du fleuve Mackenzie a été reportée d'en moyenne plus de trois semaines depuis 1996 (Frugal et Prowse, 2008). À l'avenir, certaines routes hivernales pourraient devenir impraticables, bien que le moment et les lieux restent à déterminer. D'autres voies ou modes de transport devront être envisagés avant l'atteinte de ces seuils (Frugal et Prowse, 2008) (voir l'étude de cas 1).

ÉTUDE DE CAS 1 : CONSÉQUENCES D'UN CLIMAT CHANGEANT POUR LA ROUTE HIVERNALE ENTRE TIBBITT ET CONTWOYTO

La route d'hiver entre Tibbitt et Contwoyto (TCWR; figure 8) est une route industrielle privée de 570 km (aussi empruntée par le public) dans les Territoires du Nord-Ouest et le Nunavut. Elle fournit l'accès et l'approvisionnement à trois mines de diamant actives et à d'autres sites miniers. La plus grande partie de la route est bâtie sur des lacs gelés, et la construction et l'ouverture de la route sont toutes deux tributaires des variations climatiques. Ainsi, les tendances du réchauffement de l'hiver ont été déterminées comme préoccupantes pour la longévité de la route.

Faits sur la TCWR

- La TCWR est la route hivernale de circulation intense la plus occupée du monde, ayant vu circuler un nombre record de 10 922 charges (330 002 tonnes) en 2007. Elle permet l'accès à une région desservie par aucune autre autoroute.
- L'épaisseur de glace minimale requise pour les charges très légères est de 70 cm, alors que 107 cm sont requis pour le chargement maximal (42 tonnes). Un géoradar sert à mesurer l'épaisseur de la glace.
- La construction de la route prend environ cinq à six semaines avant l'ouverture chaque année.
- La TCWR est généralement ouverte pendant 8 à 10 semaines, période d'ouverture qui commence entre le 26 janvier et le 11 février et qui se termine entre le 21 mars et le 16 avril.

Tendances climatiques : L'analyse des données climatiques régionales démontre que la durée de la saison d'ouverture de la TCWR correspond à la température et à des variables connexes, y compris les degrés-jours de gel, les degrés-jours de fonte et l'épaisseur de la glace : parmi ceux-ci, l'indicateur le plus significatif d'une saison plus longue est l'accumulation de degrés-jours de gel. Les températures

...

...

hivernales dans la région ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies (figure 9); en conséquence, les degrés-jours de gel et l'épaisseur de la glace maximale annuelle observée ont tous deux diminué, tandis que les degrés-jours de fonte ont augmenté.

Les prévisions futures correspondent aux tendances observées. Les scénarios de changements climatiques (en l'absence de mesures d'adaptation) prévoient que la durée de la saison d'ouverture des routes diminuera d'environ 65 jours en 2010 à 58 jours d'ici 2020 et à 49 jours d'ici 2050 (avec une marge d'erreur de 6 à 8 jours par saison).

Coûts d'adaptation : Il est possible que la route hivernale demeure viable jusqu'en 2050, bien qu'il puisse y avoir des coûts considérables liés aux horaires souples et à des exigences accrues en matière de construction et d'entretien. Ces coûts sont estimés entre 55 et 155 millions de dollars² sur un horizon de 35 ans.

Il existe aussi un important risque de perturbations associé à l'ouverture tardive, à la fermeture précoce ou à la nonouverture de la route. Si la durée de la saison de la TCWR passe sous la barre des 45 jours, la route ne pourra plus répondre à la demande d'une saison moyenne. Cela a des conséquences directes sur la production minière. Dans ces circonstances, les coûts les plus importants risquent d'être liés à l'adoption d'autres modes de transport. Le coût total estimé de ce scénario sur 35 ans est d'environ 213 millions de dollars, avec un coût maximal de 1,8 milliard de dollars (principalement constitué de pertes de production).

En somme, les changements à la durée d'ouverture de la TCWR créent des risques économiques importants pour les exploitants et les utilisateurs, à supposer que la demande de la route augmente ou reste stable. Une meilleure compréhension des seuils climatiques et des coûts associés pour les propriétaires et les utilisateurs des routes peuvent aider à éclairer les évaluations économiques et de la vulnérabilité futures de ces routes hivernales.

Rédigé sur la base des conclusions de Perrin et al., 2015.

Figure 8 : Carte du parcours de la TCWR à travers les Territoires du NordOuest et le Nunavut. (Source : Tibbitt to Contwoyo Winter Road Joint Venture)

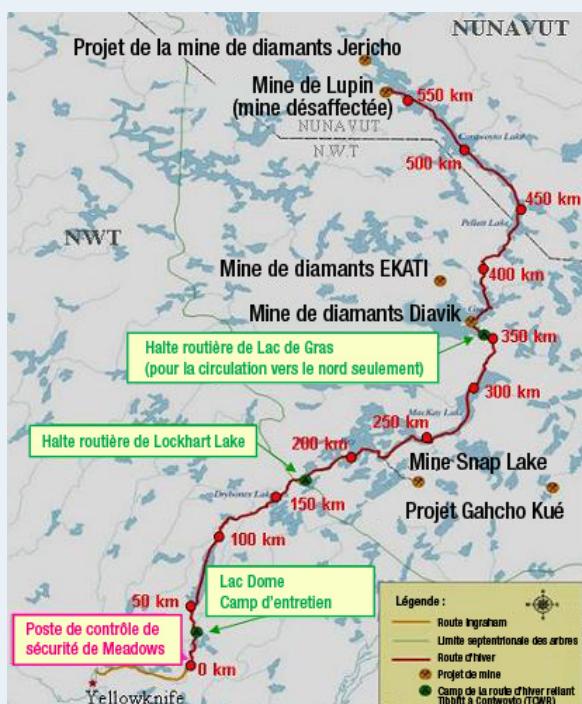
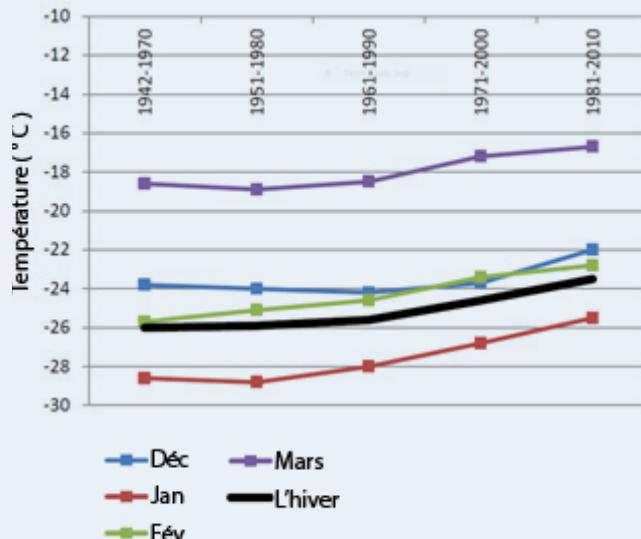


Figure 9 : Les températures moyennes historiques observées à Yellowknife pendant cinq périodes de climat normal antérieures. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



² Ces estimations représentent des valeurs actualisées nettes en dollars de 2015 avec un taux d'actualisation appliqué de 4 %.

4.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

Les pratiques d'adaptation liées aux routes varient en fonction de la saison et du type de route (p. ex., praticables en toutes saisons par opposition à hivernales). En règle générale, les approches d'adaptation liées aux routes nordiques relèvent de trois principales catégories : pratiques d'entretien et de surveillance, planification et emplacement de l'infrastructure et techniques et technologies de construction.

4.3.1 Pratiques d'entretien et de surveillance

4.3.1.1 Routes praticables en toutes saisons

La surveillance continue des conditions de l'infrastructure est importante afin de cerner les priorités d'entretien, en prévision des changements climatiques graduels et des événements météorologiques extrêmes. Dans les régions à risque de dégel du pergélisol, les routes praticables en toutes saisons peuvent être entretenues par divers moyens, y compris le déneigement des sections vulnérables des routes construites sur le pergélisol (p. ex., les pentes latérales), la réalisation d'évaluations des itinéraires de substitution avant la reconstruction et l'élargissement des accotements (Association des transports du Canada, 2010). Les ponceaux dont le pergélisol se dégrade rapidement peuvent être remplacés ou agrandis si la capacité de ruissellement est excédée, et les fossés et le drainage qui les accompagnent peuvent être améliorés dans ce cas aussi (Deton'Cho-Stantec, 2013). À mesure que le pergélisol dégèle, les routes praticables en tout temps pouvant supporter une circulation dense, en particulier des véhicules lourds, nécessiteront plus d'entretien que les routes à plus faible circulation.

La surveillance peut aussi atténuer l'incidence des feux de forêt, qui donnent souvent lieu à la fermeture de tronçons de route. Bien que des retards soient inévitables, un système de notification du public peut aider à atténuer les congestions et d'autres effets de la fermeture. Il est aussi important de surveiller les conditions du sol après un feu de forêt, puisque les feux touchent habituellement le pergélisol sous-jacent (Semeniuk, 2014).

4.3.1.2 Routes hivernales

Les pratiques de maintien de l'intégrité des routes hivernales comprennent le déneigement préventif, ainsi que la construction et l'entretien des caches de neige (stocks de neige utilisés comme matériau d'appui pour les segments de routes hivernales dégradées). Le déneigement permet aux fronts de gel de pénétrer le sol plus vite, retirant la chaleur du sol et favorisant la formation de glace, alors que les caches de neige construites à proximité des voies d'accès terrestres difficiles permettent la reconstruction rapide de tronçons terrestres (Deton'Cho-Stantec, 2013). Pour améliorer le drainage, l'aplanissement des pentes latérales sur les routes hivernales permet d'enlever en douceur la neige de l'infrastructure (Deton'Cho-Stantec, 2013). Les pratiques opérationnelles consistent entre autres à asperger les routes et les ponts hivernaux d'eau afin d'épaissir la glace et de retarder la fermeture. Vers la fin de la saison d'ouverture, certains exploitants permettent également le transport de nuit seulement, lorsque la nappe de glace est à son plus fort (Rawlings et coll., 2009).

Plusieurs organisations ont produit des documents d'orientation pour aider les spécialistes dans la construction et la maintenance des routes hivernales, dont l'Association des transports du Canada (2011), le gouvernement des Territoires du NordOuest (2015b et 2015c), le Groupe de l'Association canadienne de normalisation (2010) et l'Initiative de normalisation des infrastructures du Nord du Conseil canadien des normes (2015). Ces lignes directrices traitent de la sécurité générale de la glace, du comportement de la glace sous un chargement, de la gestion de la couverture glacielle, de la gestion en fin de saison (entre autres). Les moyens de composer avec la fissuration de la glace sont aussi détaillés afin d'assurer la sécurité de la traversée des plans d'eau gelés; ces risques pour les routes peuvent être atténués à long terme par l'établissement de traversées permanentes, y compris des ponts sur les « goulots d'étranglement » (points de congestion créés par l'aménagement d'un réseau) (Rawlings et coll., 2009). Par exemple, le pont du Deh Cho, qui traverse une section d'une largeur d'un kilomètre du fleuve Mackenzie, est conçu pour éliminer les perturbations saisonnières du transport routier lorsque les ponts de glace et les services de traversier deviennent non disponibles

(Bureau du vérificateur général du Canada, 2011). Pour les routes hivernales traversant de la glace, des ponceaux temporaires peuvent également être convertis en ponceaux permanents, y compris des systèmes permettant de gérer les débits plus élevés (p. ex., des systèmes de ponceaux empilés) (Deton Cho-Stantec, 2013). De plus, d'autres itinéraires sont envisageables lorsque des segments de route deviennent peu fiables (Deton Cho-Stantec, 2013) (p. ex., accroître le recours au transport par barge ou construire plus de routes praticables en toutes saisons onéreuses) (Furgal et Prowse, 2008).

4.3.2 Planification et emplacement de l'infrastructure

L'emplacement de l'infrastructure est un facteur important pour les décideurs, les ingénieurs et les planificateurs du Nord canadien. Les renseignements référentiels critiques comprennent les données concernant le climat local, les conditions et la sensibilité du pergélisol et les contraintes posées par le terrain. La cartographie du pergélisol et la surveillance géotechnique, y compris les évaluations du type de sol et la teneur en glace de sol, sont également effectuées afin d'éviter la construction sur un sol trop sensible (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Les améliorations aux bases de données du pergélisol et l'analyse des conditions du pergélisol pourraient appuyer davantage les gouvernements territoriaux dans la planification et la prise de décisions afin de permettre une plus grande compréhension des moyens de maintenir l'infrastructure de transport sur le pergélisol (Ministère de l'environnement du Yukon, 2009). Des bases de données de cette nature sont tenues par la commission géologique du Canada.

Bon nombre des documents d'orientation susmentionnés sont aussi utiles au moment de déterminer les emplacements optimaux pour les routes praticables en toutes saisons et les routes hivernales. De plus, des lignes directrices de l'usage des terrains applicables à la construction des routes ont été élaborées. Elles encouragent les soumissionnaires à considérer la topographie unique du Nord canadien (p. ex., les pingos³ et le pergélisol), le drainage et la végétation, ainsi que les incidences sociales et économiques des routes proposées pendant la planification et la conception des projets (Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 2010).

³ Réfère aux collines formées de roche et de sol ayant un centre composé de glace qui se produisent dans les zones riches en pergélisol de l'Arctique.

4.3.3 Techniques et technologies de construction des routes praticables en toutes saisons

Plusieurs méthodes ont été élaborées pour préserver le pergélisol pendant la construction (voir la figure 10 et l'étude de cas 2) (Beaulac et Doré, 2006). Ces méthodes ont des conséquences financières et (tableau 3) et des objectifs fonctionnels différents (limitation de l'apport de chaleur, extraction de la chaleur et préservation de l'intégrité des remblais).

Tableau 3 : Comparaison de l'applicabilité et du coût relatif des techniques d'application pour les routes du Nord. (Source: Beaulac and Doré, 2006)

Technique	Pergélisol continu (froid)	Pergélisol discontinu (chaud)	Pergélisol sporadique	Entretien requis	Commentaires
Épaississement des remblais	\$	\$\$	\$\$\$	S. O.	L'application et le coût dépendent du matériel disponible.
Matériaux d'isolation (polyuréthane et tourbe)	\$\$\$	\$\$\$	N/R	Faible	Il faut importer des matériaux encombrants. Plus efficace si utilisée en combinaison avec des méthodes d'extraction de la chaleur.
Galeries paravalanche Ou galeries pare soleil	\$\$\$	\$\$\$	N/R	Considérable	Niveau élevé d'entretien.
Surface réflechissante	\$\$\$	\$\$\$	N/R	Considérable	Niveau élevé d'entretien.*
Conduits d'air	\$\$\$\$	\$\$\$\$	N/R	Modéré	Solution possible si elle est bien conçue pour éviter l'accumulation d'eau dans les conduits.
Thermosiphons	\$\$\$\$\$	\$\$\$\$\$	N/R	Modéré	Plus adaptée à des problèmes graves localisés.
Remblai à convection	\$\$\$\$	\$\$\$\$	N/R	Faible	Technique prometteuse. Requiert de la roche résistante et la capacité de produire le matériau précisé à proximité du terrain de construction.
Dissipateur de chaleur	\$\$\$\$	\$\$\$\$	N/R	Faible	Il faut importer des matériaux encombrants. Technique prometteuse.
Géotextile et géogrille	\$\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$\$	Faible	Réduira probablement les problèmes de tassement et de fissuration.
Bermes	\$\$\$	\$\$\$	N/R	Faible	Plus efficace si utilisée en combinaison avec des méthodes d'extraction de la chaleur. Des matériaux granulaires doivent être disponibles.
Prédégel	\$\$\$	\$\$\$	\$\$\$	S.O.	Solution possible si le temps le permet.
Excavation et remplacement	\$\$	\$\$\$	\$\$\$\$	S.O.	Disponibilité des matériaux granulaires.
Déneigement	\$\$\$	\$\$\$	\$\$\$	S.O.	Solution exigeant beaucoup de travail. Requiert un centre de service à proximité du site aux fins de protection.

Application suggérée.

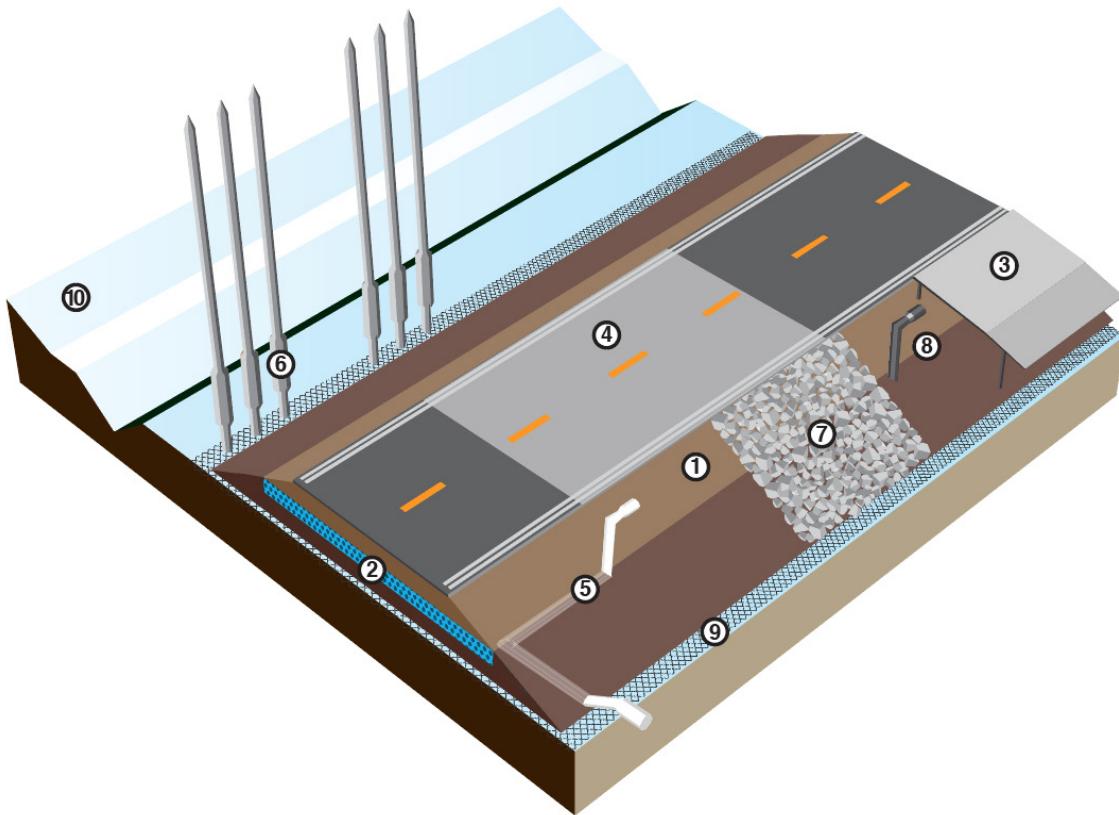
Application possible, mais pas optimale.

§ 2 : sans objet : N/R · N/R

REMARQUE : \$, \$\$, \$\$\$, \$\$\$\$, \$\$\$\$\$\$ représentent une échelle relative, où \$ représente le coût relatif le plus faible et \$\$\$\$\$\$, le plus élevé.

*Les surfaces réfléchissantes ou à albédo élevé n'ont pas nécessairement des niveaux d'entretien élevé. Les niveaux varient en fonction de l'application.

Figure 10. Illustration conceptuelle des techniques d'adaptation décrites à la section 4.3.3.
 (Illustration créée par www.soaringtortoise.ca)



Les méthodes visant à limiter l'apport de chaleur comprennent :

- ① **L'épaisseur des remblais** (p. ex., augmentation de la largeur et de la planéité) aide à maintenir les conditions de pergélisol dans les régions froides ou modérément froides (mais pas dans les régions nordiques relativement plus chaudes puisque la couche de pergélisol active peut être trop épaisse). Cette méthode réduit la pénétration de la chaleur sous le remblai (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Le matériau employé pour compléter le remblai est un facteur important; par exemple, le polystyrène démontre une résistance à long terme à l'humidité et à la compression sur les routes et les pistes (Beaulac et Doré, 2006).
- ② Les **matériaux d'isolation** (y compris le polystyrène, le polyuréthane, le béton cellulaire et un bloc de polystyrène expansé) peuvent servir à préserver l'intégrité structurelle des chaussées et à empêcher le pergélisol de refroidir l'hiver (Montufar et coll., 2011).
- ③ Les **galeries paravalanche et pare-soleil** protègent les pentes des remblais contre la neige en guise d'isolant, permettent à l'air froid de circuler pendant l'hiver et éliminent la radiation solaire directe l'été (Beaulac et Doré, 2006). Les galeries paravalanche ont un bon rendement à bien des endroits, mais requièrent un entretien régulier et présentent des risques lorsqu'elles sont surchargées de neige.
- ④ Les **surfaces réfléchissantes** (figure 11), telles que les surfaces pavées peintes en blanc, réduisent l'absorption de radiation solaire. Bien qu'elle se soit avérée efficace, cette méthode a un coût initial élevé et peut réduire la traction sur les courbes, les intersections et les zones de freinage après des périodes pluvieuses (Beaulac et Doré, 2006).

Figure 11 : Section d'essai de traitement de surface à albédo élevé (en tons clairs). (Source : Paul Murchison)



Les méthodes d'extraction de la chaleur du sol les plus communes pendant l'hiver comprennent :

- ⑤ Les **conduits d'air par convection** se situent sous les remblais afin de permettre l'extraction de la chaleur par convection naturelle (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Ils peuvent être orientés dans la direction du vent dominant ou construits horizontalement (Association des transports du Canada, 2010).
- ⑥ Les **thermosiphons** sont des dispositifs de refroidissement passifs servant à extraire la chaleur du sol l'hiver et à préserver les fondations des routes et des bâtiments dans le pergélisol « chaud » (voir figure 12). Il a été prouvé que ces systèmes, utilisés dans les territoires et le Nord du Québec, refroidissent le sol, augmentent la limite du pergélisol et stabilisent les fondations au fil du temps (Montufar et coll. 2011). Bien qu'il y ait eu des problèmes avec des thermosiphons peu efficaces dans les territoires, on les a attribués à une installation et à un entretien mal faits. La figure 12 présente la mécanique derrière cette technologie, et la figure 13 illustre un thermosiphon en utilisation à l'aéroport d'Inuvik.

Figure 12 : Illustration de l'échange de chaleur dans un thermosiphon. (Source : Igor Holubec)

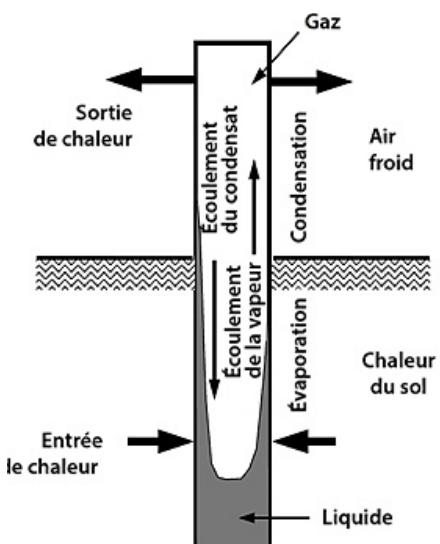


Figure 13 : Fondation à thermosiphon à courbe plate dans un garage d'entretien aéroportuaire à Inuvik, dans les Territoires du Nord-Ouest. (Source : Igor Holubec)



Toutes les variétés de thermosiphons (p. ex., thermopiles, thermosiphons à conduit incliné et thermosiphons à tube de vaporisation à courbe plate) fonctionnent selon le même principe : un dispositif à convection en deux phases extrait et décharge la chaleur du sol, refroidissant le pergélisol. L'hiver, lorsque l'air est plus froid que le sol, les thermosiphons entraînent la condensation des gaz dans le conduit au-dessus du sol et les amènent à la base du conduit souterrain. L'air froid abaisse donc la pression des fluides dans le conduit, ce qui engendre l'évaporation et l'achèvement de l'échange de chaleur. L'été, les faibles températures du sol sont maintenues par une couche d'isolation (Holubec, 2008).

- ⑦ Les **remblais à convection** renvoient à la création de remblais avec de la roche inerte, grossière et de faible densité (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Les grands vides interreliés résultants aident à la convection de l'air, extrayant la chaleur tout en maintenant l'intégrité structurelle du remblai (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012).
- ⑧ Les **dissipateurs de chaleur** sont composés de matériaux géocomposites perméables et d'un mince recouvrement en plastique ondulé sous un remblai. Ceuxci permettent l'extraction de la chaleur l'hiver lorsque l'air circule à travers les couches (Montufar et coll., 2011). Il s'est avéré que les dissipateurs de chaleur réduisaient grandement les températures du sol (Montufar et coll., 2011).

Les méthodes pour améliorer la stabilité des remblais comprennent :

- ⑨ Les **géotextiles** (c.-à-d. tissus perméables) réduisent le tassemement dû au dégel en séparant le remblai du sol sous-jacent et en empêchant le « déplacement » du remblai. Ces matériaux sont typiquement appliqués aux sections pourvues d'une couche active profonde et mal drainées, dans lesquelles le mélange de sols d'infrastructure et de remblai est probable (Association des transports du Canada, 2010).
- ⑩ Les **bermes** (souvent dotées de douces pentes) protègent les remblais bas contre un dégel excessif (Beaulac et Doré, 2006) en agissant comme obstacle physique à l'accumulation de neige, comme une clôture de neige (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012).

Les techniques de renforcement additionnelles comprennent le prédégel du pergélisol afin de réduire les effets du tassemement dû au gel et au dégel, ainsi que l'excavation et le remplacement du pergélisol riche en glace par du remblayage (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012).

ÉTUDE DE CAS 2 : TECHNIQUES D'ESSAI POUR PRÉVENIR LE DÉGEL DU PERGÉLISOL

Un tronçon de route expérimental le long d'un segment de la route de l'Alaska a été construit en 2008 afin de mettre à l'essai des techniques d'ingénierie conçues pour prévenir le dégel du pergélisol sous l'infrastructure de la route. Le site d'essai, à 5 km au sud-est de Beaver Creek (Yukon) dans une zone de pergélisol discontinu, a été divisé en douze sections de 50 m, y compris une section de contrôle non perturbée. Voici quelques-unes des techniques mises à l'essai : remblais à convection d'air avec de la roche concassée, drains de chaleur, [galeries paravalanches à convection thermoréflectrices], canaux de convection d'air longitudinaux, traitements de surface de granulat réfléchissants, remblais couverts par une pelouse et déblaiement des pentes latérales (décrit dans les sections précédentes).

Les recherches se poursuivent, mais les résultats des trois premières années de surveillance donnent à penser que certaines techniques ont le potentiel de favoriser la formation de pergélisol (ou la recongélation du sol) et l'amincissement de la couche active, préservant le pergélisol ou réduisant le taux de dégradation (Malenfant-Lepage et coll., 2012).

Les trois techniques les plus prometteuses comprennent les canaux de convection d'air longitudinaux, les [galeries paravalanches à convection thermoréflectrices] et les remblais à convection d'air. Ces

...

techniques emploient l'« effet de cheminée », qui laisse l'air froid descendre dans le remblai et se réchauffer. L'air plus léger et plus chaud est ensuite relâché vers le haut, retirant la chaleur du remblai et abaissant la température du sol. Le granulat de couleur pâle a aussi démontré un fort potentiel de réduction du réchauffement de la subsurface. Les sept techniques ont généré des résultats supérieurs au scénario du « laisser-faire ».

Les résultats laissent également entendre que le débit d'eau dans le sol est un facteur clé de la dynamique du transfert de chaleur et de la dégradation du pergélisol sur le site d'essai (De Grandpré et coll., 2012). Un fossé de drainage a été creusé à l'automne 2010 afin d'abaisser la nappe d'eau, de décroître le débit d'eau et de réduire la quantité de chaleur dégagée par le remblai routier. Depuis lors, le niveau et le débit d'eau ont considérablement diminué. Des modèles sont en cours d'élaboration afin de permettre une meilleure compréhension des procédés de transfert de chaleur et d'extraction engendrés par ces techniques.

Une des principales conclusions de ce travail est qu'aucune technique ne peut être efficacement mise en œuvre sans une évaluation approfondie du terrain environnant à l'échelle appropriée. Cela comprend des renseignements sur la composition du sol du site (y compris la répartition et le volume de la glace); les propriétés thermophysiques, l'histoire, les processus particuliers favorisant ou soutenant le pergélisol et la sensibilité du réseau de drainage au changement.

Rédigé par Katerine Grandmont (*Laboratoire de géomorphologie et géotechnique des régions froides, Université de Montréal*).

5.0 TRANSPORT FERROVIAIRE

Les voies ferrées jouent un plus petit rôle dans les territoires que dans d'autres régions canadiennes, mais fournissent tout de même des services importants. De façon semblable à l'infrastructure routière, le réseau ferroviaire est particulièrement vulnérable aux effets de la dégradation du pergélisol. Le dégel peut causer un déchaussage, des gouffres, des nids-depoule et des problèmes de tassement pour les chemins de fer du Nord canadien (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Les adaptations associées peuvent être actives, retirant la chaleur du remblai, ou passives, réduisant l'absorption de la chaleur (Ferrell et Lautala, 2010). Certaines solutions d'ingénierie peuvent également s'appliquer à l'infrastructure ferroviaire, dont l'élargissement des remblais et l'installation de thermosiphons, de galeries paravalanches et l'isolation. Les méthodes suivantes peuvent aussi être utilisées.

- **Les remblais avec conduits de ventilation** renvoient aux conduits sur le bord du remblai de sol traditionnel, permettant à l'air de circuler à travers le remblai et tirant la chaleur du sol. Ces conduits peuvent être scellés afin de réduire l'absorption de la chaleur pendant les mois d'été (Ferrell et Lautala, 2010).
- **Les remblais en pierre** sont utilisés pour créer de l'espace lacunaire à l'intérieur des remblais et permettre à l'air de pénétrer dans la structure et à la convection naturelle de retirer la chaleur de la subsurface (Ferrell et Lautala, 2010).
- **Les galeries paravalanches et pare-soleil** réduisent l'accumulation de neige et la radiation solaire sur le remblai (Ferrell et Lautala, 2010). Elles peuvent également réduire l'infiltration d'eau et permettre la circulation de l'air, retirant la chaleur des surfaces du remblai (Ferrell et Lautala, 2010).

Les conditions météorologiques extrêmes peuvent endommager les remblais et créer des affouillements et des éboulements de sol ou de roches, ce qui peut entraîner la fermeture de lignes ferroviaires (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). L'incorporation de ponceaux de plus forte capacité pour les remblais et les ponts peut atténuer les effets du drainage saisonnier et des événements extrêmes (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Certaines compagnies ferroviaires ont également des plans d'exploitation hivernale comprenant le déneigement, le sablage et le salage, des inspections des voies et des roues, des ordres temporaires

de marche au ralenti et des initiatives de formation du personnel (Lemmen et Warren, 2004). Bien que le transport ferroviaire soit restreint dans le Nord canadien, le développement d'une plus grande infrastructure ferroviaire pourrait se faire dans le futur (Ministère de la voirie et des travaux publics du Yukon, 2013). Pour une évaluation plus détaillée des incidences et des adaptations liées au secteur ferroviaire du Canada, reportez-vous aux autres chapitres régionaux.

6.0 TRANSPORT AÉRIEN

6.1 INCIDENCES DU CLIMAT SUR LE TRANSPORT AÉRIEN

Pour les collectivités du Nord qui ne sont pas reliées par des routes, les perturbations de l'aviation peuvent nuire grandement à la mobilité et restreindre l'approvisionnement en marchandises. Par exemple, en 2014, lorsque le Nord canadien a cloué au sol tous ses vols en partance et à destination d'Iqaluit pendant un blizzard, les passagers à Pangnirtung, à Qikiqtaarjuaq, à Hall Beach, à Igloolik, à Cape Dorset, à Pond Inlet et à Clyde River ont été touchés (CBC News, 2014).

Les facteurs de contrainte climatique qui touchent le transport aérien dans le Nord comprennent le brouillard, la pluie verglaçante, les précipitations abondantes, les vents violents et les rafales de neige. Le brouillard et la condensation extrêmes peuvent retarder les vols et faire fermer les aéroports, en particulier dans les collectivités côtières (Klock et coll., 2001). Bien que les données sur le brouillard et la condensation soient limitées, les témoignages directs indiquent que les épisodes de brouillard se font plus fréquents dans les territoires, ce qui occasionne une visibilité réduite dans les aéroports (Deton'Cho-Stantec, 2013). Comme peu de collectivités possèdent ces systèmes de navigation, les approches aux aéroports sont plus difficiles. Par exemple, en 2013, huit aéroports des Territoires du NordOuest n'avaient pas en place les systèmes de navigation nécessaires pour aider les pilotes à atterrir pendant leur approche (Deton'Cho-Stantec, 2013). Ainsi, dans des conditions de brouillard extrême, ces aéroports sont contraints de suspendre leurs activités (Deton'Cho-Stantec, 2013). Par exemple, l'aéroport de Wekweeti, dans les Territoires du NordOuest, a été fermé pendant une semaine en septembre 2011 en raison d'un brouillard dense (Deton'Cho-Stantec, 2013).

La pluie et la pluie verglaçante peuvent également se répercuter sur les activités en diminuant la traction sur les pistes et les voies de circulation, ce qui nécessite le recours à des produits de dégivrage avant le décollage. Une perte de friction et l'inondation des pistes peuvent aussi donner lieu à des annulations de vols, comme cela a été le cas à Inuvik en 2011 lorsque le personnel au sol était incapable de garder la piste dégagée (Deton'Cho-Stantec, 2013). Par surcroît, comme pour les routes praticables en tout temps et hivernales, les températures changeantes de l'air peuvent entraver l'intégrité structurelle du pergélisol sous les pistes et les voies de circulation.

Les pistes et les voies de circulation en gravier posent également des défis uniques pour l'aviation dans le Nord canadien, puisqu'elles peuvent s'affaiblir considérablement après les périodes de pluies abondantes ou de dégel printanier (Transports Canada, 2016). L'affaiblissement de ces surfaces peut limiter ou neutraliser complètement l'utilisation des pistes (Transports Canada, 2016). Ceci révèle l'étendue d'un autre problème de capacité : de nombreuses bandes d'atterrissements dans le Nord canadien sont seulement à même d'accueillir des aéronefs relativement petits (Parlement du Canada, 2011).

6.2 RISQUES FUTURS

Les températures de l'air à la hausse continueront de se répercuter sur les conditions du pergélisol, posant un risque pour l'intégrité des pistes en gravier et pavées. Les précipitations accrues peuvent mener à une traction et à une visibilité réduites. Ces changements se feront de plus en plus sentir sur la planification, la conception et l'entretien des aéroports dans le Nord.

Enfin, on prévoit que les températures extrêmes associées aux vitesses croissantes et variables du vent auront des conséquences sur les aéroports. Par exemple, les vents violents contribuent à des blizzards et à des tempêtes de neige graves qui limitent la visibilité et ont le pouvoir de ralentir les opérations aéroportuaires. Ces enjeux sont résumés au tableau 4.

Tableau 4 : Aperçu des répercussions du climat et des conditions météorologiques extrêmes sur le transport aérien.

Facteur climatique	Répercussion sur l'aviation
Température de l'air	La dégradation du pergélisol peut endommager et dégrader les pistes et les voies de circulation (Gouvernement du Nunavut et coll., 2011).
Neige	Les chutes de neige accrues peuvent causer des inondations pendant les saisons de dégel, endommageant le pergélisol sous les pistes et les voies de circulation (Deton'Cho-Stantec, 2013). Les blizzards, les rafales de neige et les tempêtes hivernales peuvent réduire la visibilité et retarder les opérations aériennes (p. ex., par l'accumulation de neige sur les pistes) (Hanesiak et coll., 2009).
Précipitations	Les précipitations accrues peuvent réduire la traction sur les pistes et les voies de circulation (Best et coll., 2014). Les périodes intenses de pluie verglaçante peuvent causer des retards dans les vols et amener les avions à éprouver des problèmes de freinage et glissement hors des bandes d'atterrissements (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012).
Brouillard	Les épisodes de brouillard accrus peuvent nécessiter une formation et des procédures additionnelles pour le personnel de l'aéroport afin d'assurer la sécurité (Deton'Cho-Stantec, 2013). Les périodes de brouillard intense peuvent retarder les vols jusqu'à ce que la visibilité s'améliore (Deton'Cho-Stantec, 2013).

6.3 MÉTHODES D'ADAPTATION

Les moyens de remédier à la dégradation du pergélisol touchant les pistes et les voies de circulation ressemblent à ceux appliqués aux routes praticables en toutes saisons vu les similitudes entre ces types d'infrastructure (voir l'étude de cas 3). De façon générale, les aéroports dans le Nord réagissent à ces changements en l'absence de planification stratégique à long terme.

Les aéroports dotés de pistes en gravier peuvent pallier le tassemement du sol résultant du dégel du pergélisol en ajoutant des matériaux à la piste et à la voie de circulation. Le gravier est plus facile à refaire ou à pulvériser et à remplacer que la chaussée (Deton'Cho-Stantec, 2013). Il est également possible de reconstruire les pistes en gravier sans avoir à transporter d'équipement lourd spécialisé au site.

En cas de précipitations abondantes, le rainurage sur les pistes et les voies de circulation pavées peuvent améliorer la traction et le drainage. Cette méthode est appliquée à l'aéroport de Norman Wells dans les Territoires du Nord-Ouest afin d'accroître le drainage et d'améliorer la friction de surface (Deton'Cho-Stantec, 2013). Le coût du rainurage varie selon le type de matériau de piste (p. ex., béton ou asphalte), le type et la taille du granulat (p. ex., calcaire, gravier, etc.), l'âge et l'état de la surface de la piste, l'envergure du projet et les facteurs liés aux coûts locaux (p. ex., coûts du carburant, équipement de soutien, coûts de mobilisation) (Best et coll., 2014). Bien qu'il ait été prouvé que le rainurage des pistes améliore le drainage de l'eau, rehausse la friction et réduit les besoins en sablage, cette technique est relativement onéreuse (Deton'Cho-Stantec, 2013). Dans l'éventualité où le rainurage et/ou le sablage ne suffiraient pas à accroître la traction et à améliorer le drainage, de la machinerie lourde a déjà été utilisée afin d'enlever l'accumulation d'eau.

Les aéroports appliquent de plus en plus de sable aux surfaces afin de contrer les effets de l'eau stagnante et de la pluie verglaçante (Deton'Cho-Stantec, 2013). Les besoins en sablage vont croissant : par exemple, l'aéroport de Norman Wells a augmenté son utilisation de sable de 10 à 15 tonnes par année avant 2000 à plus de 150 tonnes par année en 2012 (Deton'Cho-Stantec, 2013).

Les aéroports tentent d'atténuer les effets des importantes chutes de neige sur le pergélisol (isolation thermique) en enlevant la neige dès que possible. Pour permettre aux avions de fonctionner pendant les périodes de chutes de neige abondantes, le personnel des aéroports dégagé continuellement les pistes et les voies de circulation afin de permettre aux avions de décoller et d'atterrir en toute sécurité.

Des agents de dégivrage sont souvent utilisés dans les aéroports du Nord afin de contrer la contamination des ailes d'aéronefs (p. ex., par la glace, la neige ou la pluie verglaçante) (Deton'Cho-Stantec, 2013). Les agents de dégivrage peuvent aussi servir à éliminer les contaminants des pistes et des voies de circulation. Ces produits contiennent du glycol, et il a été suggéré que le ruissellement issu de ces composés pouvait causer des températures plus élevées du sol et d'autres répercussions environnementales. On a demandé l'élaboration d'une stratégie de gestion du glycol puisque le volume de glycol utilisé dans les aéroports du Nord est en augmentation (Deton'Cho-Stantec, 2013).

ÉTUDE DE CAS 3

ÉTUDE DE CAS 3 : AMÉLIORATIONS DE L'INFRASTRUCTURE À L'AÉROPORT INTERNATIONAL D'IQALUIT

L'aéroport international d'Iqaluit est extrêmement important pour les collectivités du Nunavut vu le manque d'accès aux routes dans la région. Lorsque l'aéroport a été construit en 1942, on en connaissait peu sur le pergélisol sousjacent et son importance pour la sécurité et la viabilité des opérations aéroportuaires. Toutefois, de nombreux problèmes liés au pergélisol, dont les problèmes de stabilité des pistes découlant du tassemement dû au dégel des sols riches en glace, sont survenus à l'aéroport durant ses années d'exploitation. De concert avec le besoin d'expansion et de remplacement des installations, les problèmes liés au pergélisol ont donné lieu à l'élaboration d'un plan d'amélioration par des partenaires des secteurs public et privé.

En 2013-2014, le projet d'amélioration de l'aéroport international d'Iqaluit a été lancé; à ce moment-là, l'importance de comprendre la nature, l'emplacement et l'influence de l'infrastructure de la dégradation du pergélisol était clairement établie. Un certain nombre de projets de recherche ont été entrepris, employant une variété de techniques, dont le géoradar, l'analyse du noyau du pergélisol, la cartographie des dépôts superficiels et la télédétection, afin de produire des connaissances propres au site sur les propriétés du pergélisol et de modéliser les interactions entre le pergélisol, le climat et l'infrastructure de l'aéroport (actuelle et celle proposée). Une conclusion clé de ce travail est que le pergélisol tend à subir un réchauffement plus important sous la chaussée que les remblais (et d'autres surfaces « acclimatées »).

Les données recueillies ont servi à éclairer la prise de décisions en matière d'infrastructure. Des cartes ont été produites afin de localiser les endroits potentiellement problématiques pour l'infrastructure actuelle et celle proposée (p. ex., sols sensibles au dégel et/ou terrain difficile pour la construction); une voie de circulation a été déplacée avec une barrière isolante afin de réduire les dommages au pergélisol; l'importance de retirer l'épaisse couverture de neige dans les emplacements clés a été reconnue; des thermosiphons ont été installés sous les bâtiments de l'aéroport et le drainage a été amélioré afin de réduire l'infiltration d'eau de surface dans le pergélisol. En règle générale, des décisions d'ingénierie et opérationnelles ont été prises à l'aéroport en ce qui concerne l'intégrité du pergélisol sousjacent.

Rédigé par Art Stewart (Division des politiques des transports et de la planification, Gouvernement du Nunavut); Anne-Marie LeBlanc (Commission géologique du Canada, Ressources naturelles du Canada); et Sharon Smith (Direction du Centre et du Nord du Canada – Commission géologique du Canada).

7.0 TRANSPORT MARITIME

7.1 INCIDENCES DU CLIMAT SUR LE TRANSPORT MARITIME (Y COMPRIS LES LACS ET LES RIVIÈRES)

Les facteurs climatiques touchant le transport maritime dans le Nord canadien comprennent les tendances changeantes de la glace marine, les épisodes pluvieux, les vents puissants et variables et les niveaux changeants de l'eau.

Tel qu'il est mentionné à la section 3, les dernières décennies ont été le théâtre de changements radicaux dans le régime de la glace marine de l'Arctique (Bush et coll., 2014; Dawson et coll., 2014). Bien que les diminutions de l'étendue et de la durée de la glace marine présentent des possibilités économiques importantes sur le plan du trafic maritime et de la durée de la saison d'expédition, plusieurs obstacles à l'expansion du transport dans l'Arctique subsistent. Par exemple, la grande variabilité d'une année à l'autre de la glace dans l'Arctique canadien a des incidences importantes sur l'assurance maritime, les investissements ainsi que les normes de construction navale (Ellis et Brigham, 2009). Peu de navires commerciaux destinés à la navigation à longueur d'année sont actuellement exploités dans l'Arctique canadien (à l'exception des brise-glace nucléaires) (Ellis et Brigham, 2009).

Les changements de la glace marine sont aussi associés à l'érosion des côtes, à des problèmes de navigation et à des dommages de l'infrastructure. La répartition changeante de la glace pluriannuelle a conduit au détachement de la glace et à sa migration dans des endroits inattendus, créant des obstacles et des dangers pour les navires de marchandises (Deton'Cho-Stantec, 2013). Ce phénomène a des conséquences sur la capacité de recherche et de sauvetage, l'expédition hivernale, la sécurité des passagers et la navigation côtière (en particulier à proximité de Terre-Neuve). Pour le moment, les gros icebergs sont suivis à l'aide de relevés satellites et aériens afin de limiter les complications potentielles (National Snow and Ice Data Centre, 2016).

La glace marine en déclin crée également de plus grosses dépenses et de plus longues périodes d'eau libre, ce qui empire les incidences des épisodes de tempêtes et de vents, perturbe les voies d'expédition et accroît la difficulté des manœuvres dans les chenaux étroits (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Les conditions changeantes de la glace peuvent également accentuer la vulnérabilité des collectivités du Nord : les conditions de glace récentes dans l'Arctique canadien ont ralenti le réapprovisionnement en carburant et en marchandises dans certaines collectivités du Nunavut, par exemple (CBC News, 2015a).

Pour les opérations portuaires, les ondes de tempête et les pluies extrêmes peuvent provoquer des crues soudaines, perturber le transport et poser des risques pour la sécurité humaine. Par exemple, les ondes de tempête ont inondé les installations portuaires à Tuktoyatuk, suspendant temporairement les opérations (Deton'Cho-Stantec, 2013). Les forts vents associés aux tempêtes peuvent également occasionner des difficultés de navigation, particulièrement dans les chenaux et les ports d'escale étroits, en raison d'embâcles de glaces, de goulets d'étranglement de glace (point de congestion créé par de la glace) et des effets des vagues (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012).

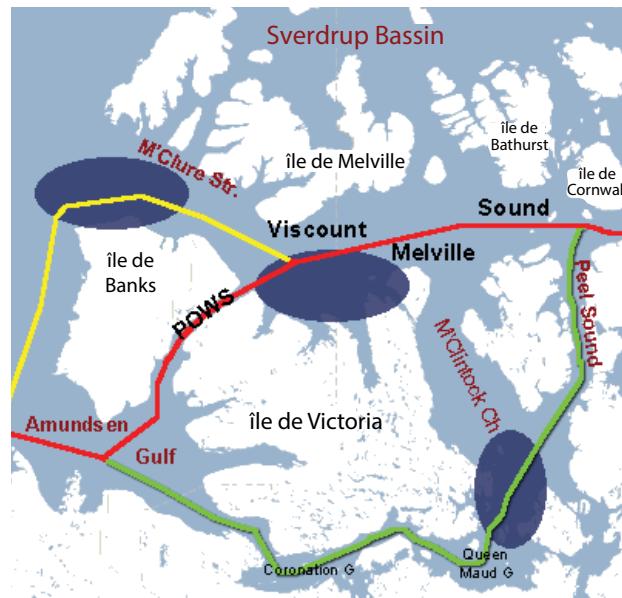
Pour le transport riverain, les niveaux d'eau plus bas ont nécessité l'utilisation de barge plus légères ou de plus petites charges pour maintenir les normes de sécurité, nuisant aux opérations dans certains cas (Deton'Cho-Stantec, 2013). Par exemple, les faibles niveaux d'eau dans le fleuve Mackenzie ont retardé l'expédition de marchandises aux collectivités du Nord dans les dernières années, laissant les résidents sans accès aux marchandises et aux biens nécessaires jusqu'à ce que des expéditions soient rendues possibles par d'autres moyens plus coûteux (comme le transport aérien ou routier) (CBC News, 2015b et 2015c). La dégradation du pergélisol le long des rives et des versants des vallées a aussi causé des glissements et des obstructions routières par endroits, obligeant les transporteurs riverains à réviser leur trajectoire (Deton'Cho-Stantec, 2013).

7.2 RISQUES ET POSSIBILITÉS FUTURS

Le passage du NordOuest n'est pas censé devenir une voie viable dans un avenir rapproché en raison « du caractère saisonnier, des conditions de la glace, d'un archipel complexe, de restrictions de tirant d'eau, de goulots d'étranglement, du manque de cartographies adéquates, des limites des assurances et d'autres coûts » (IMG-Golder Environmental Consulting, 2012) (voir l'étude de cas 4 et l'étude de cas 5). Partout dans la région nordique, le transport de marchandises devrait augmenter afin de répondre au développement des ressources en expansion, aux collectivités grandissantes et au tourisme croissant. Toutefois, les coûts opérationnels demeureront élevés en raison de la présence de glace et des frais connexes (Ellis et Brigham, 2009).

À long terme, les prévisions climatiques laissent croire que d'ici le milieu du siècle, les conditions changeantes de la glace de mer permettront de nouvelles voies pour des navires renforcés contre les glaces dans le pôle Nord et de nouvelles voies dans le passage du NordOuest (Smith et Stephenson, 2013). Si le passage du NordOuest devient une voie d'expédition viable et, lorsqu'il le deviendra, il faut envisager sérieusement des services tels que des stations de ravitaillement, des remorqueurs et de réparations d'urgence. La figure 14 indique les différentes voies dans le passage du NordOuest.

Figure 14 : Voies et goulots d'étranglement de glace du passage du NordOuest (Mudge et coll., 2011). La voie la plus profonde est présentée en rouge, celle qui est peu profonde en vert et la moins parcourue en jaune. De plus, les goulots d'étranglement apparaissent en bleu. POWS est le détroit du Prince de Galles. (Source : ASL Environmental Sciences Inc.)



ÉTUDE DE CAS 4

ÉTUDE DE CAS 4 : LE PASSAGE DU NORDOUEST EST-IL DEVENU VIABLE?

Le 19 septembre 2014, le vraquier brise-glace MV Nunavik est passé à l'histoire en transportant 23,000 tonnes métriques de concentré de nickel en provenance de Deception Bay au Québec vers Bayuquan en Chine, par le passage du Nord-Ouest. Avant ce voyage historique, un seul navire de marchandises complet avait traversé le passage du NordOuest, et aucun ne l'avait fait sans assistance. Au cours des dernières années, le trafic dans le passage du NordOuest s'est accru, mais a été dominé par des touristes d'aventure et des yachts privés. Les transits de marchandises commerciales complets ont été extrêmement limités, même si l'on vante la distance réduite et le potentiel d'économies de carburant et de coûts que procure cette voie. La traversée du Nunavik a pris 27 jours, soit environ 15 jours de moins qu'un passage dans le canal de Panama. Le navire de classe polaire 4 DNV-GL, propulsé par un moteur diesel à bas régime capable de développer près de 30 000 chevaux, est l'un des navires les plus aptes du monde à résister aux eaux arctiques recouvertes de glace. Le navire est équipé d'un système « IceNav » sophistiqué doté d'un radar maritime visant à détecter les dangers liés aux glaces et de déterminer les voies efficaces et sécuritaires.

Ce voyage historique, ainsi que le premier voyage de marchandises effectué par le MV Orion en 2013, prouve que le passage du NordOuest a le potentiel de devenir une voie d'expédition viable. Toujours est-il que seulement deux navires de marchandises ont effectué le légendaire trajet, et pour cause. Le passage demeure extrêmement risqué à parcourir, compte tenu de ses conditions de glace et météorologiques très imprévisibles, de ses eaux mal cartographiées et d'un manque de navires ayant des capacités structurelles et techniques suffisantes. Il est peu probable que le passage du NordOuest devienne une voie d'expédition principale à court terme et à moyen terme (Mudge et coll., 2011).

Rédigé par Jackie Dawson (Département de géographie, environnement et géomatique ; Université d'Ottawa).

ÉTUDE DE CAS 5

ÉTUDE DE CAS 5 : DÉVELOPPEMENT DES RESSOURCES DANS LA RÉGION DE LA MER DE BEAUFORT

Une couverture glacielle marine réduite résultant d'un climat changeant a incité les industries pétrolières et maritimes à voir les eaux de l'ouest de l'Arctique avec un intérêt croissant. On estime que la région de la mer de Beaufort (eau au nord du Canada et de l'Alaska) contient 10 milliards de barils de pétrole (Houseknecht et coll., 2012), et les entreprises pétrolières et gazières détiennent actuellement des licences d'une valeur avoisinant les deux milliards de dollars canadiens en travaux d'exploration au cours des dix prochaines années (Ellis et Brigham, 2009).

Il subsiste plusieurs défis relatifs à l'extraction des ressources dans l'Arctique, dont le besoin d'améliorer la sécurité (c.-à-d. une capacité accrue de recherche et de sauvetage et de réponse aux catastrophes) et l'infrastructure de soutien, ainsi que des problèmes liés aux conditions de la glace changeantes et difficiles à prévoir (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Il existe aussi d'autres enjeux liés à la saison allongée et à l'étendue accrue de l'eau libre, dont les conditions de brouillard dangereux plus fréquentes, ainsi que de plus grands dangers liés aux vents, aux vagues et à l'érosion. Ces enjeux sont problématiques pour une région dépourvue de cartes hydrographiques complètes.

L'érosion des côtes touche également l'île de Tuktoyatuk, qui protège le port de Tuk : la base de fournitures et de soutien prévue pour les activités extracôtières. L'île recule à un rythme d'environ 2 m par année. « Si l'île s'érode ou devient percée, il y a un risque d'effets négatifs plus importants comme l'érosion du littoral intérieur du port ou des dommages à l'infrastructure pendant les ondes de tempête ou les effets normaux des vagues, particulièrement compte tenu de la hausse des niveaux de la mer » (Mudge et coll., 2011). Ironiquement, les changements climatiques qui ouvrent la mer de Beaufort à l'exploration et au transport risquent de rendre l'exploration difficile.

Rédigé par Doug Matthews (Matthews Energy Consulting)

Bien que la couverture de glace marine réduite puisse accroître les activités maritimes à long terme, l'infrastructure et les opérations maritimes resteront vulnérables à la glace marine décroissante et aux changements du niveau de la mer tout au long du 21^e siècle. Malgré la hausse des niveaux de la mer à l'échelle planétaire, la plus large part du Nord canadien devrait connaître un déclin dans le niveau relatif de la mer en raison de l'ajustement isostatique glaciaire (concept présenté à la section 4). En conséquence, certaines régions du Nord canadien pourraient affronter des problèmes de navigation tels que les profondeurs sous la quille, ainsi que des difficultés à accéder à l'infrastructure côtière étant donné les niveaux d'eau plus faibles (Mudge et coll., 2011). Les annulations de voyages et les moindres capacités de charge résultant des profondeurs de la quille des navires non sécuritaires se répercutent sur la livraison des fournitures essentielles des centres de distribution régionaux aux collectivités rurales (White et coll., 2007).

Les exceptions à cette tendance comprennent Tuktoyatuk et Sachs Harbour (dans les Territoires du NordOuest), qui connaîtront une élévation du niveau de la mer (James et coll., 2014). Les risques associés à des niveaux de la mer plus élevés comprennent une plus grande érosion des côtes, une action des vagues et des embruns plus intenses, une exposition accrue des ponts de quai et des vagues plus hautes (touchant les structures) (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Les problèmes découlant de l'érosion par les vagues et des ondes de tempête s'aggraveront dans ces régions aussi, en conséquence de la couverture glacielle marine réduite (créant de plus vastes étendues d'eau libre) et de l'élévation des niveaux de la mer (étude de cas 5).

L'érosion accrue des côtes nécessitera un entretien et un remplacement de l'infrastructure riveraine et côtière plus fréquents et plus coûteux (Couture et coll. 2015). Parmi les exemples de risques additionnels de l'élévation des niveaux de la mer, citons la hauteur accrue des vagues (causant des impacts sur les structures) et l'érosion accrue de l'infrastructure conçue pour résister à des conditions particulières des niveaux de la mer (Mudge et coll., 2011). À l'inverse, des profondeurs sous la quille accrues dans ces régions pourraient présenter des possibilités de meilleure capacité des navires.

Bref, les possibilités liées à l'ouverture de voies de transport sont également accompagnées de défis en matière de sécurité (c.-à-d. des risques plus élevés associés à l'action du vent, des vagues et de la glace) et de protection environnementale (érosion accrue des rives).

7.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

Les approches d'adaptation pour le transport maritime peuvent être catégorisées en pratiques pour les navires et la navigation, ainsi que celles liées à l'infrastructure côtière.

7.3.1 Adaptations pour les navires et la navigation

La navigation commerciale dans l'Arctique à court terme sera essentiellement limitée aux passages saisonniers au moyen de navires adaptés aux conditions de la glace qui sont variables et imprévisibles d'une année à l'autre (White et coll., 2007; James et coll., 2014; IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Pour atténuer les risques posés par les conditions changeantes de la glace, de nombreuses entreprises ont mené des évaluations des risques de l'exploitation hivernale et des procédures d'hivernisation propres aux navires (Patterson, 2012). Dans bien des cas, les dommages aux navires peuvent être prévenus par une planification soignée des trajets et la prudence opérationnelle (Deton'Cho-Stantec, 2013). Les navires sont souvent équipés d'équipement de navigation et de communications additionnel afin de surveiller les conditions de la glace; cela comprend les systèmes IceNav intégrant un radar maritime avancé, un radar de détection de cibles amélioré et des technologies de communication par satellite pour obtenir des cartes des glaces et des visionneurs de graphiques électroniques (Patterson, 2012). Il est également possible d'ajouter de l'équipement brise-glace aux navires (Journeaux, Assoc., 2012). Si la glace marine s'est accumulée dans une zone d'ancrage, un remorqueur ou le navire peut faire des manœuvres de va-et-vient pour casser la glace (Journeaux, Assoc., 2012). La disponibilité des remorqueurs peut toutefois être un problème. Les risques pour les hélices et les gouvernails en eaux peu profondes (p. ex., pendant

le réapprovisionnement communautaire) peuvent être atténués par l'utilisation de navires de marchandises plus gros et plus durables et par le transfert de la marchandise sur des navires plus petits et plus légers le long des parties du littoral problématiques (un processus nommé « allègement ») (Deton'Cho-Stantec, 2013).

La surveillance de la glace marine et les renseignements en temps réel pour le système des environnements côtiers (SmartICE) sont un exemple novateur d'une technologie habilitante pouvant servir à fournir aux navires qui empruntent les eaux arctiques des renseignements précis et opportuns sur les conditions des glaces (Fournier et Caron-Vuotari, 2013). Mis sur pied par le centre de recherche à Nain, SmartICE combine la télédétection et les connaissances traditionnelles des Inuits afin de fournir des renseignements pertinents et accessibles sur l'épaisseur, la concentration et la rugosité de la glace marine pour déterminer la sécurité en fonction du mode, de la durée du voyage et du type de voyage (p. ex., récréatif ou industriel) et d'autres facteurs (NAIN Research Centre Kaujisapvinga, 2015).

Les navires voyageant le long des rivières doivent souvent réduire leurs charges de marchandises pour passer dans des zones côtières peu profondes (Deton'Cho-Stantec, 2013). À l'avenir, les niveaux d'eau réduits pourraient nuire davantage à la capacité de chargement des barge à faible tirant d'eau (Deton'Cho-Stantec, 2013). Dans ce cas, le rajustement des charges de certaines barge peut être insuffisant : il arrive qu'une révision de l'itinéraire soit requise afin de traverser certaines zones. Le long du fleuve Mackenzie, les barge ont révisé leur itinéraire et réduit leur vitesse en passant par des eaux difficiles (Deton'Cho-Stantec, 2013).

Les gouvernements ont un rôle important à jouer dans le soutien de la navigation maritime. Les services suivants ont été jugés essentiels au transport maritime sécuritaire : la production de cartes de navigation; le déploiement et la maintenance d'aides à la navigation; la fourniture de renseignements météorologiques et sur les glaces et de services de brise-glace ainsi que le contrôle et la surveillance du trafic maritime (Bureau du vérificateur général du Canada, 2014). De plus, l'Organisation maritime internationale (OMI) a élaboré un code polaire, couvrant une gamme complète de questions de conception, de construction, d'équipement, d'opérations, de formation, de recherche et de sauvetage et de protection environnementale applicables aux navires exploités dans les eaux entourant les deux pôles (Organisation maritime internationale, 2016).

7.3.2 Adaptations pour les installations maritimes

Pour l'infrastructure maritime dans l'ouest de l'Arctique vulnérable aux ondes de tempête et à l'érosion des côtes, les pratiques visant à réduire les risques comprennent la cartographie des zones les plus susceptibles d'être touchées et la construction de défenses pour limiter les dommages. Les littoraux peuvent être protégés par la construction de barrières composées de sacs de sable, de navires coulés et de roches et de gravier pour réduire les incidences de l'action érosive des vagues (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012). Toutefois, bien que les structures de défense de la mer aident à protéger la côte, il faut prendre en compte les changements dans la dynamique des sédiments côtiers qui peuvent se produire en raison d'une construction ou d'un climat changeant. Dans certains cas, il peut être nécessaire de déménager une infrastructure sur terre de réapprovisionnement en marchandises (p. ex., rampes de distribution de carburants et infrastructure de tuyauteries) pour prévenir les dommages (Deton'Cho-Stantec, 2013). Les études du comportement de la glace marine peuvent aider à déterminer les emplacements de quais et les voies d'expédition appropriés. Les quais peuvent être munis de systèmes destinés à réduire au minimum le développement de glace marine. Dans un avenir immédiat, il se peut que les jetées et les structures d'ancrage doivent faire l'objet de réparations et de reconstruction à la suite d'impacts de la glace de mer (IMG-Golder Corporation Environmental Consulting, 2012).

Pour les installations en bordure des rivières, plusieurs pratiques d'adaptation ont été appliquées à ce jour. Le long du fleuve Mackenzie, des points d'ancrage ont été déplacés pour permettre aux barge de décharger la marchandise dans des emplacements stables plus près de la rive où moins d'érosion a eu lieu. Les rampes en gravier ont aussi été rétablies afin de remplacer les matériaux érodés à certains endroits (Deton'Cho-Stantec, 2013).

Dans certains cas, il peut être nécessaire de draguer les ports si les niveaux d'eau chutent. Cela s'est fait dans plusieurs collectivités du Nord par le passé, y compris Tuktoyaktuk et Hay River (sur le Grand lac des Esclaves) afin de composer avec les conditions d'eau peu profonde. Toutefois, les opérations de dragage requièrent des ressources substantielles qui peuvent constituer des obstacles pour bien des collectivités. Par exemple, le coût pour draguer un chenal plus profond à Tuktoyaktuk afin de permettre le passage de navires de marchandises a été estimé à plus de 100 millions de dollars (Deton'Cho-Stantec, 2013). Il serait peut-être plus nécessaire de transférer le chargement entre des navires de différentes tailles pour permettre le passage dans des ports peu profonds et pendant les épisodes de vents violents. Par contre, ce processus ralentit les navires qui transportent des marchandises vers d'autres endroits (Deton'Cho-Stantec, 2013).

8.0 LACUNES EN MATIÈRE DE RENSEIGNEMENTS

Il existe un certain nombre de lacunes dans les renseignements disponibles relativement à la détermination des incidences climatiques sur le transport dans la région du Nord canadien. Cela comprend des renseignements climatiques fiables et pertinents, de la formation disponible, des orientations et des outils et de l'information technique pour l'infrastructure.

En ce qui a trait aux renseignements climatiques, les gouvernements territoriaux et d'autres ont exprimé un intérêt à élaborer des scénarios de changements climatiques régionaux en vue d'améliorer la compréhension des conditions futures (Ministère de l'environnement du Yukon, 2009). Dans un sondage des spécialistes du secteur minier et du transport au Yukon, les participants ont affirmé le besoin de données climatiques à échelle réduite : certains ont fait part de leur préoccupation à propos du fait que les données qu'ils utilisaient ne convenaient pas à leur région. Les prévisions liées à des éléments climatiques comme la pluie sur la neige, les interactions de la neige et du pergélisol et les relations entre la neige fondue et la pluie sont particulièrement recherchées (Northern Climate ExChange, 2014b). Il y a également deux difficultés notables dans l'obtention de ces scénarios de changements climatiques pour les territoires : peu de données de référence sont disponibles à l'échelle locale et la capacité dans les Territoires du Nord-Ouest est restreinte en raison de ressources financières et humaines limitées (Gouvernement du Nunavut et coll., 2011). Le nombre limité de stations météorologiques dans le Nord et la faible couverture temporelle des archives sur le climat présentent aussi des difficultés pour la création de scénarios de changements climatiques locaux. Les spécialistes ont en outre indiqué qu'ils leur manquent des outils d'orientation plus pratiques et plus conviviaux pour l'utilisation des données climatiques, ainsi qu'une formation à l'intention des spécialistes et des décideurs (Northern Climate ExChange, 2014b).

Élaborer davantage de normes de construction, de codes et de renseignements sur la planification communautaire qui tiennent compte des changements prévus dans le climat seraient aussi profitables. Ces efforts devraient considérer les orientations techniques actuelles sur la prise en compte des changements climatiques futurs au moment d'ériger une construction sur le pergélisol (Auld et coll., 2010) et compléter l'initiative de normalisation des infrastructures du Nord du Conseil canadien des normes qui a élaboré des normes pour ce qui suit : 1) fondations à thermosiphon (Groupe CSA, 2014a); 2) modération des effets de la dégradation du pergélisol sur les fondations des bâtiments (Groupe CSA, 2014b); 3) gestion des risques liés aux accumulations de neige changeantes pour les bâtiments dans le Nord canadien (Groupe CSA, 2014c) et 4) planification, conception et maintenance du système de drainage dans les collectivités du Nord (Groupe CSA, 2015). Les variables pertinentes comprennent la teneur en glace de sol ainsi que les températures du sol et les épaisseurs du pergélisol réelles et prévues. De tels renseignements pourraient servir à élaborer des cartes identifiant les régions convenant au développement de l'infrastructure (Champalle et coll., 2013), et être utilisés à l'échelle régionale et locale pour déterminer les régions peu, modérément ou très vulnérables (Calmels et coll., 2015).

Des outils améliorés permettant l'échange de l'information entre les spécialistes du Nord et les résidents sont un autre aspect important à considérer à l'avenir. Des outils tels que le Portail d'échange sur l'adaptation aux changements climatiques dans l'Arctique contribuent à faciliter la communication des pratiques exemplaires d'adaptation parmi les collectivités circumpolaires (Arctic Adaptation Exchange, 2014).

Pour le transport maritime, la mise à jour des bases de données géospatiales pour tenir compte des défis et des occasions présentés par un climat changeant est important. Cela consiste entre autres à mettre à jour les cartes et les cartes de navigation de façon à refléter la couverture de glace et le trafic, ainsi qu'à fournir à la communauté maritime des renseignements et des stratégies d'établissement de cartes pour lui permettre de gérer l'incertitude climatique future. Des données accessibles au public sur l'érosion des côtes seraient particulièrement bénéfiques (Champalle et coll., 2013). Par exemple, le système d'information côtière (maintenu par la Commission géologique du Canada) apporte des changements côtiers qualitatifs basés sur plusieurs années de vidéos et de photographies aériennes pouvant être utilisées par les collectivités qui expérimentent des changements côtiers (Couture et coll., 2015). Qui plus est, la surveillance hydrologique améliorée permettrait une meilleure compréhension des incidences des changements climatiques sur les volumes de ruissellement, les taux d'évaporation et les niveaux d'eau et profiterait aux opérations de réapprovisionnement communautaire dans les Territoires du NordOuest. Enfin, la surveillance améliorée des niveaux d'eau, comprenant un réseau de surveillance des niveaux d'eau et un service de consultation sur la glace et les débris, serait d'intérêt pour les exploitants de barge de toute la région (Deton'Cho-Stantec, 2013).

Pour les corridors terrestres, une cartographie plus précise des sensibilités géographiques (p. ex., la stabilité de la pente) et des dangers appuyerait le développement d'une infrastructure plus appropriée⁴. Comme le transport de surface se fait plus coûteux et difficile à établir et à maintenir dans le contexte de températures plus chaudes, il faudrait peut-être aussi envisager de nouvelles technologies de transport pour le Nord canadien. Les hydravions ont été étudiés comme solution de rechange au transport de surface pour de nombreuses marchandises (dont la nourriture) vers les collectivités du Nord et les sites d'extraction des ressources – des prototypes d'une capacité de transport de charges de 10 et de 70 tonnes sont en cours d'élaboration, et des essais sont en cours pour des applications précises (dont l'utilisation dans des régions nordiques éloignées) (Canadian Shipper, 2013). Toutefois, le calendrier pour l'adoption de cette technologie demeure incertain. Enfin, même si des renseignements sur les techniques d'adaptation et les pratiques liées aux routes (hivernales et praticables en toutes saisons) dans les régions du Nord sont facilement accessibles, d'autres recherches sur les risques et l'adaptation pour d'autres modes seraient utiles.

9.0 CONCLUSIONS

Vu le degré de changements climatiques observés et prévus pour le Nord canadien, d'importantes recherches ont été entreprises afin d'évaluer les possibilités et les défis concernant le transport dans la région. Le présent chapitre a fait allusion à certaines constatations clés émergeant de ces travaux en expansion. Bien que les recherches actuelles puissent aider les gouvernements, les collectivités et les spécialistes à se préparer aux conditions futures, il existe toujours des lacunes pour appuyer le transport efficace et fiable des marchandises et des gens dans le Nord, maintenant et à l'avenir.

Ce chapitre a décrit les vulnérabilités de l'infrastructure et des opérations de transport dans le Nord aux répercussions des changements climatiques. Il a également défini des mesures d'adaptation (actuelles et potentielles) pour régler ces problèmes. Les thèmes sous-jacents comprennent les conséquences de la dégradation du pergélisol pour l'infrastructure du transport (y compris les routes praticables en toutes saisons, les routes hivernales et les pistes et les voies de circulation); les difficultés pour le transport

⁴ Voir : Blais-Stevens et Behnia (2015)

dans le Nord résultant d'un mouvement plus important de la glace marine, d'ondes de tempête et de l'érosion des côtes; et les difficultés de composer avec les changements climatiques étant donné la grande superficie de la région et les ressources humaines et financières limitées.

Tel qu'il est mentionné tout au long du présent chapitre, de nombreuses pratiques, y compris des pratiques de maintenance adaptive, des investissements technologiques et des techniques de construction, ont été mises en œuvre par les secteurs public et privé afin d'amoindrir les incidences d'un climat changeant sur les gens et les chaînes d'approvisionnement. La maintenance adaptive requiert une collecte de renseignements constante et cohérente (par exemple, veiller à ce qu'un équipement de déneigement soit en place et surveiller les conditions météorologiques). Les investissements technologiques peuvent être relativement simples (p. ex., rainurage de la chaussée afin d'améliorer la traction sur les pistes et les voies de circulation) ou plus considérables (p. ex., installation de thermosiphons). La construction adaptive nécessite la détermination de la nature du risque (p. ex., le dégel du pergélisol) et le choix de la technique qui convient (c.-à-d. renforcer les remblais à l'aide de géotextiles). Quelle que soit l'approche, il est évident que le secteur du transport dans le Nord canadien affrontera des changements importants aux conditions d'exploitation à court et à long terme et qu'il a commencé à s'adapter.

RÉFÉRENCES

- Affaires autochtones et Développement du Nord Canada. (2010, janvier). *Lignes directrices sur l'aménagement des Terres du Nord. Accès : routes et sentiers*. Repéré à <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/fra/1100100023568/1100100023583>
- Alberta Transportation. (2003, juin). Glossary – Erosion and Sedimentation Terms. Repéré à <http://www.transportation.alberta.ca/Content/docType372/Production/refmatglsry2.pdf>
- 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.
- Arctic Adaptation Exchange. (2014). About. Repéré à <http://arcticadaptationexchange.com/about>
- 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. (2005). Observed storminess patterns and trends in the circum-Arctic coastal regime. *Geo-Marine Letters*, 25(2), 98-109.
- 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., Waller, J., Eng, S., Klaassen, J., Morris, R., Fernandez, S., Cheng, V., et MacIver, D. (2010). The changing climate and national building codes and standards. Résumé présenté à la American Meteorological Society : Ninth Symposium on the Urban Environment. Session 5 : Global Climate Change and Urbanization. Keystone, CO.
- Beaulac, I., et Doré, G. (2006). Permafrost degradation and adaptations of airfields and access roads, Nunavik, Québec, Canada (document de travail). Repéré à https://www.researchgate.net/publication/237558706_PERMAFROST_DEGRADATION_AND_ADAPTATIONS_OF_AIRFIELDS_AND_ACCESS_ROADS_NUNAVIK_QUEBEC_CANADA
- Best, M., Walkington, P., et Zuzelo, P. (2014). Runway Grooving in Canada, Ottawa (YOW), Runway 07-25. Présenté à SWIFT 2014. Vancouver, BC.
- Blais-Stevens, A., et Behnia, P. (2015). Debris flow susceptibility mapping using a qualitative heuristic method and Flow-R along the Yukon Alaska Highway Corridor, Canada. *Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions*, 3(5), 3509-3541.
- Bowron, B., et Davidson, G. (2011, mars). *Climate change adaptation planning : A Nunavut toolkit*. Ottawa, ON : Canadian Institute of Planners, Gouvernement du Nunavut, et Gouvernement du Canada. Repéré à <https://www.cip-icu.ca/Files/Resources/NUNAVUT-TOOLKIT-FINAL>
- Brown, L., et Duguay, C. (2010). The response and role of ice cover in lake-climate interactions. *Progress in Physical Geography*, 34(5), 671-704.
- Brownie, D. (2013, octobre). *A Northern transportation strategy for Canada : Discussion paper*. PROLOG Canada Inc., et Van Horne Institute. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/eng/ctareview2014/pdf/Van%20Horne%20Institute/NorthernTransportationDiscussionPaper.pdf>

- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2012). *Rapport d'enquête maritime M12H0012*. Repéré à <http://www.bst-tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/marine/2012/m12h0012/m12h0012.asp>
- Bureau du vérificateur général du Canada. (2011). *Projet du pont de Deh Cho dans les Territoires du Nord-Ouest — Ministère des Transports*.
- Bureau du vérificateur général du Canada. (2014). Chapitre 3 – La navigation maritime dans l'Arctique canadien. Dans *Automne 2014 — Rapport de la commissaire à l'environnement et au développement durable*. Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Burn, C., et Kokelj, S. (2009). The environment and permafrost of the Mackenzie Delta area. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20, 83-105.
- Bush, E.J., Loder, J.W., James, T.S., Mortsch, L.D. et Cohen, S.J. (2014). Un aperçu des changements climatiques au Canada. 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. 23-64). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Calmels, F., Roy, L.-P., Laurent, C., Pelletier, M., Kinnear, L., Benkert, B., Horton, B., et Pumple, J. (2015).
- Vulnerability of the North Alaska Highway to permafrost thaw : A field guide and data synthesis*. Whitehorse, YK : Northern Climate ExChange, Yukon Research Centre. Repéré à http://yukoncollege.yk.ca/downloads/permafrost_report.pdf
- Canadian Shipper. (2013, 3 mars). Are plans to employ airships for freight transport in northern Canada a viable option or just hot air? Repéré à <http://www.canadianshipper.com/sustainability/are-plans-to-employ-airships-for-freight-transport-in-northern-canada-a-viable-option-or-just-hot/1002112967/>
- CBC News. (2008, 11 juin). *Pangnirtung in state of emergency during heavy floods*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/north/pangnirtung-in-state-of-emergency-during-heavy-floods-1.725661>
- CBC News. (2014, 8 janvier). *Canadian North cancels Iqaluit flights*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/north/canadian-north-cancels-iqaluit-flights-1.2489352>
- CBC News. (2015a, 21 juillet). *Ice conditions hold up resupply of Iqaluit, east Hudson Bay*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/north/ice-conditions-hold-up-resupply-of-iqaluit-east-hudson-bay-1.3161723>
- CBC News. (2015b, 28 mai). *Water levels dropping in NWT due to ongoing drought*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/north/water-levels-dropping-in-n-w-t-due-to-ongoing-drought-1.3090386>
- CBC News. (2015c, 3 juillet). *Mackenzie River water levels could affect barges for second straight year*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/north/mackenzie-river-water-levels-could-affect-barges-for-second-straight-year-1.3136854>
- Champalle, C., Sparling, E., Tudge, P., Riedlspurger, R., Ford, J., et Bell, T. (2013). *Adapting the built environment in a changing northern climate : A review of climate hazard-related mapping and vulnerability assessments of the built environment in Canada's North to inform climate change adaptation*. Rapport pour les Ressources naturelles Canada. Ottawa, ON.
- Conseil canadien des normes. (2015). *Initiative de normalisation des infrastructures du Nord*. Repéré à <https://www.scc.ca/fr/inin>
- Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière. (2015, septembre). *Réseau routier national du Canada : Rapport annuel 2014*. Repéré à <http://www.comtc.ca/french/rapports.htm>
- Couture, N., Forbes, D., Fraser, P., Fobel, D., Jenner, K., Manson, G., Solomon, S., Szlavko, B., et Taylor, R. (2015). A coastal information system for the Southeastern Beaufort Sea, Yukon and Northwest Territories. *Geological Survey of Canada, Open File 7778*.
- Dawson, J. (2015). *Warming of the North – What's happening? Implications for arctic marine transportation*. [Présentation]. *Warming of the North 2015*. Ottawa, ON.
- Dawson, J., Johnston, M., et Stewart, E. (2014). Governance of Arctic expedition cruise ships in a time of rapid environmental and economic change. *Ocean and Coastal Management*, 28, 88-99.
- De Grandpré, I., Fortier, D., et Stephani, E. (2012). Degradation of permafrost beneath a road embankment enhanced by heat advected in groundwater. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 49(8), 953-962.
- Derksen, C., Smith, S., Sharp, M., Brown, L., Howell, S., Copland, L., Mueller, D., Gauthier, Y., Fletcher, C., Tivy, A., Bernier, M., Bourgeouis, J., Brown, R., Burn, C., Duguay, C., Kushner, P., Langlois, A., Lewkowicz, A., Royer, A., et Walker, A. (2012). Variability and change in the Canadian cryosphere. *Climate Change*, 115(1), 59-88.
- Deton'Cho-Stantec. (2013, août). *Change and challenge: Climate change adaptation plan for the Northwest Territories*. Department of Transportation. Préparé pour le ministère des transports, Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest. Yellowknife, NT.
- Dunlavy, J., Lipai, M., et Baldwin, G. (2009). Transportation in the North. *EnviroStats*, 3(1), 3-6.
- Ellis, B., et Brighton, L. (Eds.). (2009). *Arctic marine shipping assessment 2009 report*. Le Conseil de l'Arctique. Repéré à <http://www.pame.is/index.php/projects/arctic-marine-shipping/amsa/amsa-2009-report>
- Environnement Canada. (2015). *Bulletins des tendances et des variations climatiques – Résumé de l'année 2014*. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/sc-cs/default.asp?lang=Fr&n=60AC2030-1>
- Ferrell, S., et P. Lautala. (2010, 25 mai). Rail embankment stabilization on permafrost - Global experiences. *Proceedings of the AREMA 2010 Annual Conference & Exposition*. Orlando, FL. Repéré à https://www.arema.org/proceedings/proceedings_2010.aspx

- Forbes, D., et Frobel, D. (1985). Coastal erosion and sedimentation in the Canadian Beaufort Sea. Current Research Part B. *Geological Survey of Canada, Paper 85-1B* (1985): 69-80.
- Ford, J.D., Bell, T., et Couture, N.J. (2016). Perspectives relatives à la région de la côte Nord du Canada. 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. 153-208). Ottawa, ON: Gouvernement du Canada.
- Fournier, S., et Caron-Vuotari, M. (2013). *Changing tides: Economic development in Canada's northern marine waters*. Ottawa, ON: The Conference Board of Canada.
- Francis, J. et Vavrus, S. (2012). « Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. » *Geophysical Research Letters*, 39(6).
- Furgal, C., et Prowse, T.D. (2008). Nord du Canada. Dans D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (Éds.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (pp. 57-118). Ottawa, ON: Gouvernement du Canada.
- Gouvernement du Canada. (2015, 26 juin). *La ministre Aglukkaq annonce un financement pour une nouvelle installation marine à Pond Inlet* (Communiqué de presse). Repéré à <http://www.gov.nu.ca/fr/developpement-economique-et-des-transports/news/la-ministre-aglukkaq-annonce-un-financement-pour-une>
- Gouvernement du Yukon, Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, et Gouvernement du Nunavut (2008). *Northern connections : A multi-modal transportation blueprint for the North*. Repéré à <http://www.hpw.gov.yk.ca/fr/general/publications.html>
- Gouvernement du Nunavut. (2011). *Upagiaqtavut. Setting the course: climate change impacts and adaptation in Nunavut*. Iqaluit, NU: Ministère de l'environnement.
- Gouvernement du Nunavut. (2015, 30 juillet). *La ministre Aglukkaq annonce du financement fédéral pour les infrastructures du port maritime et des installations de ravitaillement par mer d'Iqaluit*. Repéré à <http://www.gov.nu.ca/fr/developpement-economique-et-des-transports/news/la-ministre-aglukkaq-annonce-du-financement-federal>
- Gouvernement du Nunavut, des Territoires du Nord-Ouest, et du Yukon. (2011, avril). *La Stratégie d'adaptation panterritoriale. Une vision nordique*. Repéré à <http://www.anorthernvision.ca/fr/strategy/>
- Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest. (2011). *On track: Status, challenges, and current initiatives of the Department of Transportation*. Yellowknife, NT: Ministère des transports.
- Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest. (2015a). *MLAs view progress on Inuvik-Tuktoyaktuk Highway*. Repéré à <http://www.gov.nt.ca/newsroom/mlas-view-progress-inuvik-tuktoyaktuk-highway>
- Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest. (2015b). *Guidelines for safe ice construction*. Yellowknife, NT: Ministère des transports.
- Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest. (2015c). *Northwest Territories transportation strategy 2015-2040*. Yellowknife, NT: Ministère des transports.
- Groupe CSA. (2014a). *Fondations à thermosiphon de bâtiments construits dans des régions pergélisolées* (CAN/CSA-S500-F14). Toronto, ON : Association canadienne de normalisation.
- Groupe CSA. (2014b). *Modérer les effets de la dégradation du pergélisol des structures existantes* (CAN/CSA-S501-F14). Toronto, ON : Association canadienne de normalisation.
- Groupe CSA. (2014c). *Gestion des risques liés aux charges neigeuses sur les infrastructures du Grand Nord canadien* (CAN/CSA-S502-F14). Toronto, ON : Association canadienne de normalisation.
- Groupe CSA. (2015). *Planification, conception et maintenance de systèmes de drainage dans les communautés du Nord* (CAN/CSA-S503-F15). Toronto, ON : Association canadienne de normalisation.
- Hanesiak, J., Stewart, R., Taylor, P., Moore, K., Barber, D., McBean, G., Strapp, W., Wolde, M., Goodson, R., Hudson, E., Hudak, D., Scott, J., Liu, G., Gilligan, J., Biswas, S., Desjardins, D., Dyck, R., Fargey, S., Field, R., Gascon, G., Gordon, M., Greene, H., Hay, C., Henson, W., Hochheim, K., Laplante, A., Martin, R., Melzer, M., et Zhang, S. (2010). *Storm Studies in the Arctic (STAR)*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Janvier.
- Holubec, I. (2008, mars). *Flat loop thermosyphon foundations in warm permafrost*. Rapport préparé pour le ministère des travaux publics et des services des Territoires du Nord-Ouest et le Conseil canadien des ingénieurs. Repéré à <https://pievc.ca/government-northwest-territories-thermosyphon-foundations-warm-permafrost>
- Houseknect, D., Bird, K., et Garrity, C. (2012). *Assessment of undiscovered petroleum resources of the Amerasia Basin petroleum province*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 5146.
- Hsieh, E., Tchekhovski, A., et Mongeau, R. (2011) *Collapse of permafrost and failure of bridges in the community of Pangnirtung, Nunavut*. 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference.
- Hunter, C. (2013, mars). *Assurer la durabilité des infrastructures dans le nord du Canada*. Ressources naturelles Canada. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/science/article/11701>
- IMG-Golder Corporation Environmental Consulting. (2012). *Vulnerability assessment of the mining sector to climate change: Task 1 Report*. Cambridge Bay, NU: Nunavut Regional Adaptation Collaborative.
- Inuit Circumpolar Council. (2008). *The sea ice is our highway: An Inuit perspective on transportation in the Arctic*. Repéré à http://www.inuitcircumpolar.com/uploads/3/0/5/4/30542564/20080423_iccamsa_finalpdfprint.pdf
- James, T., Henton, J., Leonard, L., Darlington, A., Forbes, D., et Craymer, M. (2014). *Relative sea-level projections in Canada and the adjacent mainland United States*. Commission géologique du Canada. Ressources naturelles Canada. Dossier public 7737. Repéré à http://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/geott/ess_pubs/295/295574/of_7737.pdf

- Journeaux Assoc. (2012). Engineering challenges for coastal infrastructure/docks with regard to climate change in Nunavut. Report No. L-11-1472. Government of Nunavut. Repéré à http://climatechangenunavut.ca/sites/default/files/docks_final.pdf
- Klock, R., Hudson, E., Aihoshi, D., et Mullock, J. (2001). *Le temps au Yukon, dans les territoires du Nord-ouest et dans l'ouest du Nunavut*. Ottawa, ON : NAV CANADA.
- Kokelj, S., Lantz, T., Solomon, S., Pisaric, M., Keith, D., Morse, P., Thienpoint, J., Smol, J., et Esagok, D. (2012). « Using multiple sources of knowledge to investigate environmental change: Regional ecological impacts of a storm surge event in the Outer Mackenzie Delta, NWT. » *Arctic*, 65(3), 257-272.
- Kwok, R., Cunningham, G., Wensnahan, M., Rigor, I., Zwally, H., et Yi, D. (2009). « Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. » *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114, 1-16
- Lamoureux, S., Forbes, D., Bell, T., Manson, G., Rudy, A., Lalonde, J., Brown, M., Smith, I., James, T., Couture, N., Whalen, D., et Fraser, P. (2015). Chapter 7: The impact of climate change on infrastructure in the western and central Canadian Arctic. In G. Stern and A. Gaddan (Éds.), *From science to policy in the western and central Canadian Arctic: An integrated regional impact study (IRIS) of climate change and modernization* (pp. 300-341). Ville de Québec, QC: ArcticNet.
- Lemmen, D.S., et Warren, F.J. (Éds.). (2004). *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*. Ottawa, ON: Gouvernement du Canada.
- Malenfant-Lepage, J., Doré, G., et Fortier, D. (2012). Thermal effectiveness of the mitigation techniques tested at Beaver Creek Experimental road site based on a heat balance analysis (Yukon, Canada). Compte-rendu de la 15e conférence internationale sur l'ingénierie des régions froides, 19-22 août, Québec, Canada (comptes rendus). pp. 42-51.
- Manson, G. K., et S. M. Solomon. (2007). Past and future forcing of Beaufort Sea coastal change. *Atmosphere-Ocean* 45, no. 2 (2007): 107-122.
- Matthews, D. (2014). *Tuktoyaktuk: The base for the Beaufort*. Government of the Northwest Territories.
- McGregor, R., Hassan, M., et Hayley, D. (2008). *Climate change impacts and adaptation: Case studies of roads in Northern Canada*. Ottawa, ON : Association des transports du Canada.
- Ministère de l'environnement du Yukon (2009, février). *Plan d'action du gouvernement du Yukon sur le changement climatique*. Whitehorse, YT: Gouvernement du Yukon. Repéré à <http://www.env.gov.yk.ca/air-water-waste/ccactionplan.php>
- Ministère de la voirie et des travaux publics du Yukon. (2013). *Ingénierie des transports*. Whitehorse, YT: Gouvernement du Yukon. Repéré à <http://www.hpw.gov.yk.ca/fr/trans/engineering/index.html>
- Montufar, J., Regehr, J., Milligan, C., et Alfaro, M. (2011). *Roadbed stability in areas of permafrost and discontinuous permafrost: A synthesis of best practices*. Montufar & Associates.
- Mudge, T., Fissel, D., Martinez de Saavedra Alvarez, M., et Marko, J. (2011). Investigations of variability for ship navigation through the Northwest Passage, 1982-2010. *Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. July 10-14, Montréal (Québec). Repéré à <http://www.aslenv.com/reports/IPS-POAC2011.pdf>
- NAIN Research Centre Kaujisapvinga. (2015). *SmartICE*. Nunatsiavut, Newfoundland and Labrador. Repéré à <http://nainresearchcentre.com/research-projects/smartice/>
- National Aeronautics and Space Administration. (2013). *Arctic amplification*. Repéré à <http://climate.nasa.gov/news/927/>
- National Snow and Ice Data Centre. (2016). *Sea ice index, extent, concentration, and concentration Anomalies*. Repéré à http://nsidc.org/cgi-bin/bist/bist.pl?annot=1&leg-end=1&scale=50&tab_cols=2&tab_rows=2&config=seacie_index&submit=Refresh&mo0=09&hemis0=N&img0=ext-n&mo1=09&hemis1=N&img1=conc&year0=2010&year1=1981
- Northern Climate ExChange. (2014a). *Compendium of Yukon climate change science 2003-2013*. Whitehorse, YT: Yukon Research Centre, Yukon College.
- Northern Climate ExChange. (2014b). *Enhancing knowledge transfer to decision makers with respect to climate change impacts on the cryosphere*. Whitehorse, YT: Yukon Research Centre, Yukon College.
- Organisation maritime internationale. (2016). *Transports maritimes dans les eaux polaires : Élaboration d'un code international de sécurité pour les navires opérant dans les eaux polaires (Recueil sur la navigation polaire)*. Repéré à <http://www.imo.org/fr/MediaCentre/HotTopics/polar/Pages/default.aspx>
- Overeem, I., Anderson, R., Wobus, C., Clow, G., Urban, F., et Matell, N. (2011). Sea ice loss enhances wave action at Arctic coast. *Geophysical Research Letters*, 38, 1-6.
- Parlement du Canada. (2011). *Délibérations du Comité sénatorial permanent des Transports et des communications : Fascicule 2 - Témoignages du 19 octobre 2011*. Repéré à <http://www.parl.gc.ca/content/sen/committee/411%5CTRCM/02EVA-49097-f.HTM>
- Patterson, J. (2012). *Benchmarking of best practices for Arctic shipping*. WWF Canada. Repéré à http://awsassets.wwf.ca/downloads/wwf_arctic_shipping_best_practices_report_2012_1.pdf
- Perovich, D., Gerland, S., Hendricks, S., Meier, W., Nicolaus, M., et Tschudi, M. (2014). *Arctic report card : Update for 2014 – Sea ice*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Repéré à http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/sea_ice.html
- Perrin, A., Dion, J., Eng, S., Sawyer, D., Nodelman, J.R., Comer, N., Auld, H., Sparling, E., Harris, M., Nodelman, J.Y.H., et Kinnear, L. (2015). *Economic implications of climate change adaptations for mine access roads in Northern Canada*. Northern Climate ExChange, Yukon Research Centre, Yukon College.
- PROLOG Canada Inc. (2011). *The Northern transportation systems assessment Executive summary*. Repéré à http://www.miningnorth.com/_rsc/site-content/library/ExecutiveSummary_E.pdf

- Prowse, T., Furgal, C., Bonsal, B., et Edwards, T. (2009). Climatic conditions in Northern Canada: Past and future. *Ambio*, 38(5), 257-265.
- Rawlings, M., Bianchi, R., et Douglas, R. (2009). Winter roads and ice bridges: Anomalies in their seasonal usage and what we can learn from them. Document préparé pour présentation à la session « Economic Implications of Climate Change » de la conférence annuelle 2009 de l'Association des transports du Canada. Vancouver, BC.
- Ressources naturelles Canada. (2004). Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne. (éds.) D. Lemmen et F. Warren. Ottawa (Ontario).
- Semeniuk, I. (2014, July 14). What wildfires in the Northwest Territories say about climate change. *The Globe and Mail*. Repéré à <http://www.theglobeandmail.com/news/national/what-wildfires-in-the-northwest-territories-say-about-climate-change/article19606467/>
- Simmonds, I., et Keay, K. (2009). Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationships with storm behavior. *Geophysical Research Letters*, 36, 1-5.
- Smith, S., et Burgess, M. (2004). Sensitivity of permafrost to climate warming in Canada. *Geological Survey of Canada, Bulletin* no. 579, 24 p.
- Smith, S., Riseborough, D., Ednie, M., et Chartrand, J. (2013). A map and summary database of permafrost temperatures in Nunavut, Canada. *Geological Survey of Canada, Open File* 739, 20 p.
- Smith, L., et Stephenson, S. (2013). New trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(13), E1191-E1195.
- Solomon, S., Forbes, D., et Kierstead, B. (1994). Coastal impacts of climate change: Beaufort Sea erosion study. *Geological Survey of Canada, Open File* 2890, 85 p.
- Sous-groupe de travail fédérale/provinciale/territoriale sur les transports du Nord. (2015, mars). *Report on winter roads*. Transports Canada.
- St-Hilaire-Gravel, D., Forbes, D., et Bell, T. (2011). Multitemporal analysis of a gravel-dominated coastline in the central Canadian Arctic Archipelago. *Journal of Coastal Research*, 28(1), 421-441.
- Statistique Canada. (2011). Enquête nationale auprès des ménages de 2011. No. 99-012-X2011059 au catalogue.
- Statistique Canada. (2012a). Territoires du Nord-Ouest (code 61) et Yukon (code 60) (table). Profil du recensement. Recensement de la population de 2011. No. 98-316-XWF au catalogue.
- Statistique Canada. (2012b). Nunavut (code 62) et Yukon (code 60) (table). Profil du recensement. Recensement de la population de 2011. No. 98-316-XWF au catalogue.
- Statistique Canada. (2012c). Yukon (code 60) et Canada (code 01) (table). Profil du recensement. Recensement de la population de 2011. No. 98-316-XWF au catalogue.
- Statistique Canada. (2014). Estimations démographiques annuelles : Canada, provinces et territoires (Tableau 1.1-1 : Estimations annuelles de la population au 1^{er} juillet, perspective nationale - Population). No 91-215-X au catalogue.
- Statistique Canada. (2015). Table 051-0001 - Population selon le sexe et le groupe d'âge, par province et territoire (Nombre, hommes et femmes).
- Stroeve, J., Kattsov, V., Barrett, A., Serreze, M., Pavlova, T., Holland, M., et Meier, W. (2012). Trends in sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geophysical Research Letters*, 39(16), 1-7.
- Stroeve, J., Markus, T., Boisvert, L., Miller, J., et Barrett, A. (2014). Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss. *Geophysical Research Letters*, 41(4), 1216-1225.
- Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie. (2009, 26 novembre). *Franc Nord : Adaptation de l'infrastructure du Nord canadien au changement climatique*.
- Tibbitt to Contwoyo Winter Road Venture. (n.d.) Maps. Repéré à <http://www.jvtcwinterroad.ca/maps.html>
- Tivy, A., Howell, S., Alt, B., McCourt, S., Chagnon, R., Crocker, G., Carrières, T., et Yackel, J. (2011). Trends and variability in summer sea ice cover in the Canadian Arctic based on the Canadian Ice Service Digital Archive, 1960-2008 and 1968-2008. » *Journal of Geophysical Research*, 116(3), 1-25.
- Transports Canada. (2014). Définitions. Repéré à <http://www.tc.gc.ca/fra/aviationcivile/publications/tp1247-definitions-1410.htm>
- Transports Canada. (2016). *Circulaire d'information : Pistes sans revêtement en dur*. No 300-004. Repéré à <http://www.tc.gc.ca/fra/aviationcivile/opssvs/servicesdegestion-centredereference-ci-300-300-004-1497.htm>
- Vaughan, D., Comiso, J., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K., et Zhang, T. (2013). Observations : Cryosphere. Dams T. Stocker, D. Qin, G. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, et P. Midgley. (Éds.), *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK et New York, NY : Cambridge University Press.
- Wang, M., et Overland, J. (2012). A sea ice free summer Arctic within 30 years : An update from CMIP5 Models. *Geophysical Research Letters*, 39(18), (2012), 1-6.
- Wang, X. (2006). Climatology and trends in some adverse and fair weather conditions in Canada, 1953–2004. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 111(D9), 1-27.
- White, D., Gerlach, S., Loring, P., Tidwell, A., et Chambers, M. (2007). Food and water security in a changing Arctic climate. *Environmental Research Letters*, 2, 1-4.
- White Pass and Yukon Route Railroad. (2015). *History*. Repéré à <http://wpyr.com/history/>
- Woo, M., Mollinga, M., et Smith, S. (2007). Climate warming and active layer thaw in the boreal and tundra environments of the Mackenzie Valley. *Canadian Journal of Earth Sciences* (44) 6, 733-743.



4 · COLOMBIE-BRITANNIQUE

CHAPITRE 4 : LA COLOMBIE- BRITANNIQUE

AUTEURS PRINCIPAUX :

DIRK NYLAND¹
JOEL R. NODELMAN²

COLLABORATEUR :

JIM BARNES (MINISTÈRE DES TRANSPORTS ET DE
L'INFRASTRUCTURE DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE)

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Nyland, D., et Nodelman, J.R. (2017). La Colombie-Britannique. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 74-114). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique
² Nodelcorp Consulting Inc.

TABLE DES MATIERES

Principales conclusions	76
1.0 Introduction	77
1.1 Population	78
1.2 Économie	78
1.3 Géographie	79
2.0 Climat	80
2.1 Tendances observées	81
2.2 Projections sur les changements	83
3.0 Aperçu du système de transport de la Colombie-Britannique	85
3.1 Système routier	85
3.2 Transport ferroviaire	87
3.3 Transport aérien	87
3.4 Transport maritime	88
4.0 Réseaux routiers	89
4.1 Effets climatiques historiques	89
4.2 Risques climatiques futurs	92
4.3 Pratiques d'adaptation	95
5.0 Transport ferroviaire	96
5.1 Effets climatiques historiques	96
5.2 Risques climatiques futurs	100
5.3 Pratiques d'adaptation	100
6.0 Transport aérien	103
6.1 Effets climatiques historiques	103
6.2 Risques climatiques futurs	105
6.3 Pratiques d'adaptation	106
7.0 Transport maritime	106
7.1 Effets climatiques historiques	107
7.2 Risques climatiques futurs	107
7.3 Pratiques d'adaptation	108
8.0 Pratiques provinciales d'adaptation au climat	108
9.0 Lacunes dans les renseignements et les connaissances qui nuisent au processus décisionnel	110
10.0 Conclusion	111
Références	112

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- **Les systèmes de transport en Colombie-Britannique ont démontré une vulnérabilité aux événements météorologiques extrêmes et aux changements climatiques.** Les effets particulièrement inquiétants comprennent ceux associés à ce qui suit :
 - les précipitations extrêmes, comme les flux atmosphériques (la tempête Pineapple Express), qui affectent les réseaux routiers et ferroviaires, les voies de transport maritime et les installations aéroportuaires;
 - l'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête, qui augmentent les risques d'inondations et de dommages aux infrastructures côtières fixes, y compris l'aéroport international de Vancouver, l'aéroport Sandspit sur Haida Gwaii et Port Metro Vancouver;
 - les grands vents, qui affectent les voies de transport maritime;
 - les problèmes de visibilité, qui affectent les activités aéroportuaires, notamment dans la région de l'intérieur de la Colombie-Britannique.
- **Les voies de transport terrestre de la Colombie-Britannique occupent souvent des corridors à accès restreint dans les montagnes et le long des côtes.** Dans cet environnement, les inondations (associées aux événements de précipitation extrême ou à la fonte des neiges) et les ruptures de versants ont causé des défaillances d'infrastructure sur les réseaux routiers et ferroviaires par le passé. Typiquement, les événements qui ont affecté l'un de ces modes de transport ont également affecté l'autre.
- **Alors que les efforts précédents pour réduire les risques climatiques pour les systèmes de transport sont souvent réactifs et basés sur des données historiques, certaines indications montrent que cette approche est en train de changer.** Les entités de transport sont maintenant prêtes à participer à des études sur les changements climatiques plus larges tournées vers l'avenir et à intégrer leurs constatations dans leurs systèmes.
- **Les évaluations de la vulnérabilité aux changements climatiques de même que des critères de conception d'infrastructure révisés et actualisés peuvent contribuer à améliorer les efforts de planification et d'adaptation relatifs à l'infrastructure de transport de la Colombie-Britannique.** Le gouvernement provincial a procédé à des évaluations de la vulnérabilité des réseaux routiers et continue de surveiller et d'évaluer la hausse du niveau de la mer. Le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique est l'une des premières administrations à demander que les plans de conception d'infrastructure réalisés pour le Ministère tiennent compte des effets des changements climatiques.
- **Compte tenu de l'interdépendance des réseaux de transport en Colombie-Britannique, cette situation présente une occasion de partager la recherche, l'analyse des risques et l'adaptation des pratiques exemplaires entre les divers modes de transport.**

1.0 INTRODUCTION

La Colombie-Britannique est la troisième provinces des plus grandes au Canada et la plus à l'ouest, couvrant plus de 95 millions d'hectares de terre et d'eau douce (soit 10 % de la surface terrestre du Canada; et 27 200 km de littoral (KnowBC, 2016). Sa géographie est accidentée – de vastes chaînes de montagnes enneigées s'étendent le long de la côte et à travers des régions occidentale et méridionale de la province, tandis que le Centre et le NordEst sont caractérisés par des vallées et de larges plaines. Les systèmes de transport provinciaux doivent composer avec de nombreuses anses dans le littoral et de nombreux corridors étroits dans les montagnes composés de quelques grands cols et de centres urbains séparés par de grandes distances. Les activités et les possibilités économiques sont réparties dans l'ensemble de la province, à l'instar des populations et des réseaux de transport.

Comme élément de la côte du Pacifique, le réseau de transport de la Colombie-Britannique fournit un lien essentiel entre l'Amérique du Nord et l'Asie, et facilite la circulation des personnes et des biens pour soutenir le commerce provincial, national et international. Dans ce contexte, les infrastructures aériennes, maritimes, routières et ferroviaires de la Colombie-Britannique doivent être résistantes, efficaces et efficientes. Bien que l'infrastructure en Colombie-Britannique soit conçue pour résister à certains types de conditions météorologiques et climatiques, l'élaboration et le maintien d'un système de transport viable dans le contexte des changements climatiques projetés – y compris la température, les précipitations, les configurations des conditions météorologiques extrêmes et d'autres variables – sont essentiels. Les systèmes de transport dans la province présentent une vulnérabilité tant aux événements météorologiques extrêmes qu'aux changements progressifs des conditions climatiques. Alors que les difficultés persistent en ce qui a trait au recensement de l'emplacement et du niveau critique des points vulnérables de l'infrastructure et à la communication de ces derniers aux décideurs, les progrès accomplis dans l'avancement global de l'adaptation au climat sont évidents.

Le présent chapitre examine les interactions et les vulnérabilités de l'infrastructure et des activités de transport en regard des conditions climatiques et météorologiques changeantes de la Colombie-Britannique. Le chapitre s'attardera surtout sur les approches d'ingénierie à l'adaptation au climat dans le secteur des transports. La science et la pratique de l'adaptation sont des activités relativement nouvelles dans le domaine de l'ingénierie, alors que l'étude des conditions climatiques futures demeure un défi et constitue une nouvelle façon de penser pour les ingénieurs professionnels (voir l'encadré ci-dessous).

ADAPTATION DES PRATIQUES D'INGÉNIERIE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Bien que les ingénieurs aient longtemps considéré les paramètres liés au climat dans le plan de conception technique, la pratique consistait généralement à analyser les tendances historiques. Compte tenu du rythme actuel des changements climatiques, cette approche n'est plus fiable. Les associations provinciales d'ingénieurs réagissent en ajoutant de nouvelles exigences professionnelles pour faire en sorte de tenir compte des effets potentiels des changements climatiques dans le processus de conception pour la durée de vie prévue de l'infrastructure. Il s'agit d'un changement culturel pour les organismes responsables de l'infrastructure, pour les consultants effectuant des plans de conception technique et pour les clients qui commandent les travaux. Il est attendu que les futurs travaux d'ingénierie relatifs à la réhabilitation et à la conception de nouvelles infrastructures refléteront cette approche et ces avancées.

En raison du caractère nouveau de ce domaine et des limites actuelles des modèles climatiques comme moyens pour fournir des renseignements aux concepteurs-projeteurs, il est encore impossible de répondre à de nombreuses questions. Par exemple, un paramètre climatique particulier comme les vents extrêmes aura une incidence considérable sur la fonctionnalité et la sécurité future d'un pont conçu aujourd'hui. Le niveau d'incertitude qui existe dans les prévisions sur le comportement potentiel de ce paramètre dans 75 ans est une question avec laquelle la plupart des ingénieurs n'ont jamais eu à traiter auparavant.

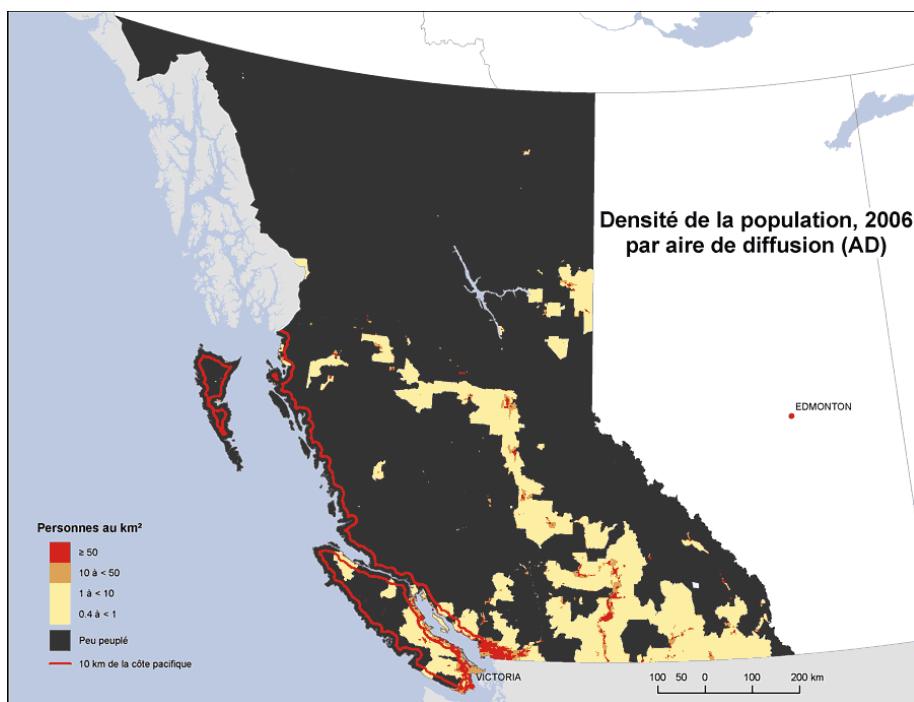
Il faudra du temps aux ingénieurs pour mettre en place des procédures et des processus qui permettront la gestion efficace des changements climatiques, et de maximiser la probabilité que les infrastructures construites aujourd'hui demeurent sûres et efficaces aux fins d'utilisation publique pour toute leur durée de vie.

1.1 POPULATION

En octobre 2014, la population de la Colombie-Britannique s'élevait à 4,7 millions (gouvernement de la Colombie-Britannique, 2015a). La population est en croissance et de plus en plus urbaine, le Grand Vancouver connaissant la plus forte croissance (gouvernement de la Colombie-Britannique, 2015b). En 1981, 22 % de la population de la Colombie-Britannique résidait dans les zones rurales et, en 2011 ce pourcentage est passé à 14 % (Statistique Canada, 2011). Alors que le nombre total de résidents dans les zones rurales est resté relativement constant au cours de cette période, à environ 600 000, la population urbaine est passée de 2,1 millions à 3,8 millions.

La majorité de la population de la province est concentrée dans les régions côtières du sud (figure 1). La population de la capitale, Victoria, située au sud de l'île de Vancouver, s'élève à 327 000, alors que celle du Grand Vancouver, dans la partie sud continentale de la province, s'élève à 2,4 millions et compte pour 60 % de la population de la province (gouvernement de la Colombie-Britannique, 2015b).

Figure 1 : Densités de la population de la Colombie-Britannique pour l'année 2006. Les grands centres urbains se trouvent sur la côte sud, tandis que les régions situées dans les montagnes et au nord sont très faiblement peuplées. (Source : Statistique Canada)



1.2 ÉCONOMIE

En 2013, le produit intérieur brut (PIB) de la Colombie-Britannique s'élevait à 215 milliards de dollars, soit environ 13 % du PIB canadien (Statistique Canada, 2011). Historiquement, l'activité économique de la Colombie-Britannique repose sur les ressources naturelles, y compris la foresterie, l'exploitation minière et la pêche. Bien que ces secteurs soient encore importants aujourd'hui, le secteur des services a gagné en importance, représentant désormais quatre emplois sur cinq. Les secteurs de services clés comprennent les finances, les assurances, l'immobilier, le transport, le commerce de détail et le commerce en gros, le tourisme, l'éducation et le secteur manufacturier.

L'économie de la Colombie-Britannique dépend fortement du commerce, y compris des importations et des exportations internationales et interprovinciales (tableau 1). Le commerce dans la région de l'Asie-Pacifique a augmenté de façon considérable depuis 2001. Compte tenu de la croissance de

la Chine en tant que centre mondial dans le secteur manufacturier, la demande pour les ressources naturelles de la Colombie-Britannique a augmenté. En 2011, la Colombie-Britannique a exporté davantage vers les États de la côte du Pacifique qu'aux États-Unis.

Les exigences accrues de la Chine et de l'Inde ont mis à l'épreuve la capacité de l'infrastructure de transport de la Colombie-Britannique à répondre à ces nouvelles possibilités. L'infrastructure de la Colombie-Britannique a joué un rôle clé dans le commerce international en raison de son emplacement stratégique. Par exemple, Prince Rupert, le port canadien le plus près de la région de l'Asie-Pacifique, permet de sauver près de 68 heures d'expédition par rapport aux endroits situés plus au sud comme Long Beach à Los Angeles (port de Prince Rupert, 2014).

Tableau 1 : Commerce international et interprovincial en Colombie-Britannique en 2013 (Source : Statistique Canada, 2015a).

VOLET DE COMMERCE	VALEUR	POURCENTAGE DU PIB PROVINCIAL
Exportations	Internationales	49,2 milliards de dollars
	Interprovinciales	35,7 milliards de dollars
Importations	Internationales	57,8 milliards de dollars
	Interprovinciales	41,8 milliards de dollars

1.3 GÉOGRAPHIE

La géographie unique de la Colombie-Britannique influe fortement sur les systèmes de transport de la province (figure 2). Généralement, les voies de transport terrestre suivent les voies fluviales et les cols de montagne, contrastant avec les agencements en mode linéaire typiques de beaucoup d'autres régions du Canada. Par conséquent, les routes comportent souvent des itinéraires indirects de même que des changements importants d'élévation.

Figure 2 : Attributs physiologiques de la Colombie-Britannique. (Source : Encyclopedia of British Columbia et KnowBC.com)

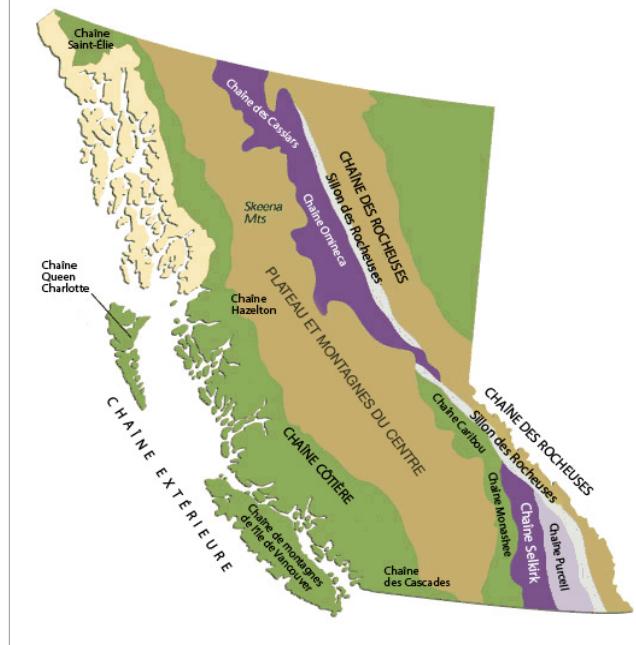


Figure 3 : Les écoprovinces de la Colombie-Britannique : Zones climatiques de la Colombie-Britannique. (Source : Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique)



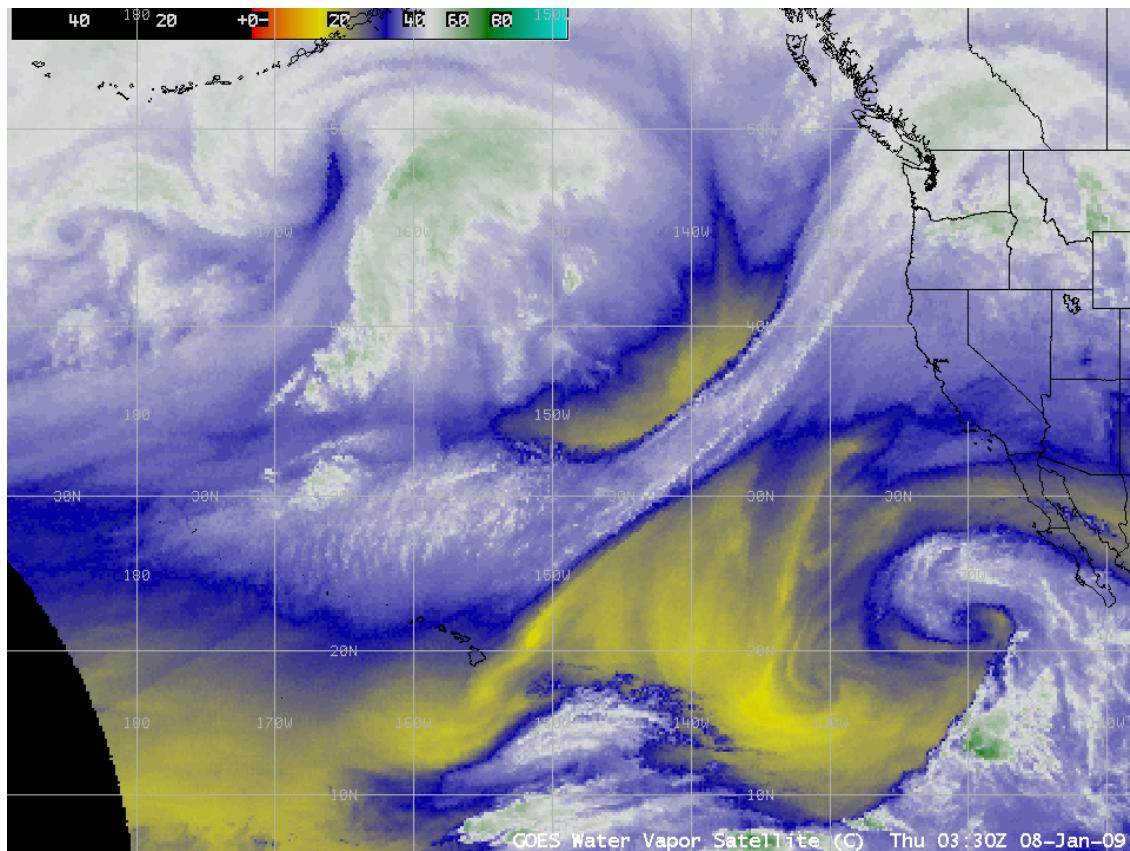
La Colombie-Britannique est composée de dix écoprovinces telles qu'elles sont définies par le système de classification des écorégions provinciales (figure 3). Les écoprovinces sont des zones qui présentent des processus climatiques, une océanographie, une topographie et un relief régionaux uniformes. Chacune possède un climat unique et des sensibilités au risque différentes aux changements climatiques attendus. Les écoprovinces correspondent généralement aux caractéristiques physiographiques de la province, à l'instar des principaux corridors de transport. Dans ce contexte, il est possible d'évaluer la manière dont les tendances liées aux changements climatiques en Colombie-Britannique peuvent affecter les systèmes de transport à l'aide des projections généralisées sur les changements climatiques pour les écoprovinces pertinentes de la Colombie-Britannique.

2.0 CLIMAT

La diversité du paysage, y compris les grandes chaînes de montagnes, de même que la proximité de la Colombie-Britannique à l'Océan pacifique, a une grande influence sur les régimes climatiques dans différentes régions de la province (Pacific Climate Impacts Consortium, 2013a). L'une des caractéristiques importantes du climat de la Colombie-Britannique est un phénomène connu sous le nom de « flux atmosphérique » qui est associé à de très abondantes précipitations et dont les répercussions ont été importantes sur les systèmes de transport. Les flux atmosphériques sont de longs panaches étroits d'humidité très concentrée dans l'atmosphère qui déplacent l'humidité depuis les régions tropicales vers les pôles à travers les latitudes moyennes. « Pineapple Express » est le terme utilisé pour caractériser un flux atmosphérique dont les origines proviennent du Pacifique occidental, à l'est d'Hawaii, qui se déplace et qui influe sur la côte ouest de l'Amérique du Nord entre la Colombie-Britannique et la Californie (figure 4). Typiquement, les flux atmosphériques sont d'une largeur de plusieurs centaines de kilomètres et d'une longueur de milliers de kilomètres, et contiennent entre 3 cm et 6 cm de vapeur d'eau au cœur du flux (Pacific Climate Impacts Consortium, 2013a).

Les flux atmosphériques surviennent le plus souvent à l'automne et à l'hiver en Colombie-Britannique. Leurs répercussions sont plus importantes dans les régions côtières, où l'air chargé de vapeur d'eau s'élève au-dessus de la chaîne côtière et entraîne des précipitations abondantes. Les répercussions ont été considérables. Par exemple, le cas extrême de janvier 2009 présenté à la figure 4 a duré deux jours et a coûté près de 16 millions de dollars, tandis qu'un autre événement de deux jours en juin 2011 a causé des inondations et a coûté plus de 85 millions de dollars. En 2012, 15 cas répertoriés d'inondation ont touché plus de 100 collectivités en Colombie-Britannique (Pacific Climate Impacts Consortium, 2013a).

Figure 4 : Rivière atmosphérique sillonnant la Colombie-Britannique le 8 janvier 2009. Les couleurs de l'image ci-dessous représentent la vapeur d'eau au milieu des couches supérieures de l'atmosphère. Les nuances de blanc au vert indiquent les zones humides à nuageuses, et les nuances de bleu au jaune indiquent les zones plus sèches. (Source : Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies / University of Wisconsin – Madison)



2.1 TENDANCES OBSERVÉES

Le Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC) a mené d'importants travaux de caractérisation du climat actuel, de détermination des tendances, et de projection des conditions climatiques futures pour de nombreuses régions de la Colombie-Britannique. Ces rapports présentent une analyse des tendances à travers la province pour la période de 1901 à 2009 (tableau 2). Au cours de cette période, la Colombie-Britannique a connu des changements dans la température et dans les précipitations. Ces tendances se sont accélérées depuis les années 1950. Dans l'ensemble, la température dans la province a augmenté de 0,18 °C par décennie depuis 1951, une augmentation globale de 1 °C. Concurremment, la province a connu généralement des étés, des printemps et des automnes plus humides et des hivers nettement plus secs.

Tableau 2 : Tendances de la température et des précipitations en Colombie-Britannique par écoprovince. (Source : Pacific Climate Impacts Consortium, 2013b)

Écoprovince	Tendances de la température (°C par décennie)		Tendances des précipitations (mm/saison par décennie)			
	1901–2009	1951–2009	1901–2009		1951–2009	
			PÉA	H	PÉA	H
Région centrale de l'intérieur	0,13	0,20	3	3	3,7	3
Région méridionale des montagnes intérieures	0,12	0,16	5	4	7,7	12
Plaines de la Taïga/plaines boréales	0,22	0,25	3,3	2	2,3	1
Région sub-boréale de l'intérieur	0,19	0,25	3,7	3	3,3	3
Région montagneuse boréale septentrionale	0,16	0,21	3	4	2,3	5
Dépression de Géorgie	0,12	0,20	4,7	6	5	13
Région méridionale de l'intérieur	0,12	0,21	4,3	3	6,7	6
Région des côtes et des montagnes	0,13	0,18	3	8	8	6
Moyenne provinciale	0,13	0,18	3,33	3,67	4,33	-5,44

PÉA = Printemps, été, automne

H = Hiver

Le niveau relatif de la mer (par rapport à la hauteur de la terre) est également en train de changer en Colombie-Britannique, avec une variabilité importante dans les zones côtières. Par exemple, au cours des 50 dernières années, le niveau de la mer a augmenté de 3,1 cm à Victoria, et de 2,0 cm à Vancouver, mais a diminué de 8,4 cm à Tofino (Vadeboncoeur, 2016). Bon nombre de facteurs contribuent aux changements au niveau des océans, y compris les effets des conditions atmosphériques et océanographiques, comme les ondes de tempête et les cycles de variabilité climatique (p. ex., oscillation décennale du Pacifique) [Vadeboncoeur, 2016]. L'un des principaux facteurs ayant une incidence sur le changement relatif du niveau de la mer en Colombie-Britannique est le mouvement vertical du sol, qui est attribuable à une combinaison d'activité tectonique (interactions des plaques océaniques Juan de Fuca et du Pacifique avec la plaque nord-américaine), d'ajustement glacio-isostatique (le mouvement continu du sol autrefois couvert de glaciers provenant de la dernière période glaciaire) et de changements à la masse glaciaire de la chaîne côtière et du golfe d'Alaska (Vadeboncoeur, 2016). Parmi les autres facteurs contribuant à la variabilité régionale du niveau de la mer, on retrouve l'influence de la fonte des glaciers sur les eaux océaniques à proximité et les modifications à la topographie de la surface océanique en raison des courants océaniques changeants (Vadeboncoeur, 2016).

En plus de représenter une menace d'inondations côtières à long terme, l'élévation du niveau de la mer augmente le risque d'inondations par les ondes de tempête. L'eau plus profonde augmente la hauteur et l'énergie des vagues. Les niveaux d'eau élevés extrêmes, qui se produisent généralement lorsque des ondes de tempête se superposent aux marées hautes, peuvent être particulièrement destructeurs pour les infrastructures côtières.

2.2 PROJECTIONS SUR LES CHANGEMENTS

L'outil Plan2Adapt (Pacific Climate Impacts Consortium, 2013c), conçu par le Pacific Climate Impacts Consortium, fournit des projections généralisées sur les changements climatiques pour la Colombie-Britannique pour trois horizons prévisionnels ainsi que pour chacune des désignations d'écoprovvince au moyen d'un ensemble type de projections par modèle climatique (tableaux 3 et 4). Les projections correspondent généralement aux tendances climatiques observées (section 2.1). Globalement, le climat en Colombie-Britannique se transformera et connaîtra au cours des 80 prochaines années un réchauffement annuel pouvant atteindre 2,7 °C, des hivers plus humides, des étés généralement plus secs et des périodes beaucoup plus longues sans gel.

Tableau 3 : Changements projetés à des variables climatiques sélectionnées pour la province de la Colombie-Britannique pour trois périodes de temps – années 2020, 2050 et 2080. Les changements projetés sont calculés par rapport aux données pour la période de référence de 1961 à 1990. La moyenne de l'ensemble est une valeur médiane, obtenue d'un ensemble de 15 projections du modèle climatique mondial (MCM) pour A2 et B1. (Pacific Climate Impacts Consortium, 2013c)

Variable climatique	Saison	Changements projetés par rapport à la période de référence de 1961 à 1990 Moyenne de l'ensemble		
		Années 2020 (2010-2039)	Années 2050 (2040-2069)	Années 2080 (2070-2099)
Température moyenne	Annuelle	+1,0	+1,8 °C	+2,7 °C
Précipitations	Annuelle	+4 %	+6 %	+9 %
	Été	+0 %	1 %	+0 %
	Hiver	+4 %	+8 %	+13 %
Chutes de neige	Hiver	2 %	10 %	12 %
	Printemps	30 %	58 %	70 %
Journées sans gel	Annuelle	+10 jours	+20 jours	+30 jours

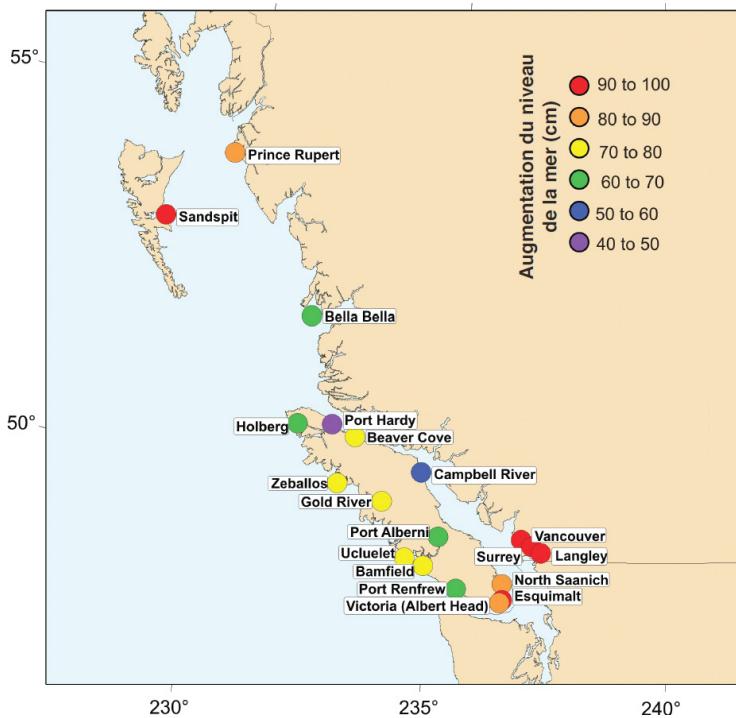
Tableau 4 : Changements projetés dans des variables climatiques sélectionnées pour les années 2080 pour les écoprovinces de la Colombie-Britannique. « + » indique une augmentation, « - » indique une diminution. (Source : Pacific Climate Impacts Consortium, 2013c)

Écoprovince	Augmentation de température annuelle moyenne	Précipitations				Journées sans gel	Sommaire
		Annuelles	Étés	Hivers	Chutes de neige		
Région centrale de l'intérieur	+2,6	+	-	+	-74%	+35	Hivers plus chauds et humides Étés beaucoup plus secs
Région méridionale des montagnes intérieures	+2,7	+	-	+	-69%	+34	Hivers plus chauds et humides Étés beaucoup plus secs
Plaines de la Taïga	+3,0	+	+	+	-75%	+21	Hivers et étés plus chauds et humides
Plaines boréales	+2,8	+	Aucun changement	+	-75%	+21	Hivers plus chauds et humides Aucun changement aux précipitations estivales
Région sub boréale de l'intérieur	+2,6	+	Aucun changement	+	-75%	+30	Hivers plus chauds et humides Aucun changement aux précipitations estivales
Dépression de Géorgie	+2,6	+	-	+	-54%	+26	Hivers plus chauds et humides Étés plus secs
Région méridionale de l'intérieur	+2,8	+	-	+	-75%	+37	Hivers plus chauds et humides Étés beaucoup plus secs
Région des côtes et des montagnes	+2,4	+	-	+	-71%	+35	Hivers plus chauds et humides Étés beaucoup plus secs

Les changements climatiques sont non seulement reliés à des conditions de réchauffement, mais aussi à des événements météorologiques extrêmes tels que les précipitations de forte intensité (Murdock and Sobie, 2013). Les analyses préliminaires du Pacific Climate Impacts Consortium indiquent que la fréquence des événements de type « Pineapple Express » va augmenter de 2041 à 2070, où les plus fortes hausses auront lieu sur la côte. Le nombre moyen de jours de flux atmosphériques annuels devrait approximativement doubler dans la plupart des régions, y compris à l'intérieur.

Les changements projetés liés au niveau de la mer en Colombie-Britannique (figure 5) sont semblables aux modèles historiques (section 2.1). Les élévations du niveau de la mer les plus importantes devraient se produire le long de la région continentale méridionale et du sud-est de l'île de Vancouver. L'élévation du niveau de la mer devrait être moins importante dans les zones où il y a un soulèvement tectonique considérable. Les projections varient en fonction des scénarios d'émissions, et les variations du niveau relatif de la mer pourraient être négligeables à certains endroits dans le cadre d'un scénario de faible croissance des émissions.

Figure 5 : Projections de l'élévation relative du niveau de la mer pour l'année 2100 selon la valeur médiane du scénario d'émissions élevées (RCP8.5; après James et coll., 2014; Atkinson et coll., 2016). Voir Vadeboncoeur (2016) pour obtenir des renseignements supplémentaires sur les projections relatives au niveau de la mer. (Source : Ressources naturelles Canada)



3.0 APERÇU DU SYSTÈME DE TRANSPORT DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE

Le système de transport de la Colombie-Britannique englobe une variété de modes de transport différents, y compris des systèmes de routes et d'autoroutes, des réseaux ferroviaires, maritimes et aériens, de même que des systèmes urbains de transport en commun. Les divers centres et réseaux liés à ces différents modes de transport interagissent pour offrir un système de transport cohérent qui soutient les habitants et l'économie de la province de la Colombie-Britannique, comme l'illustrent les figures 6 et 7. L'alignement des principaux corridors et centres de transport le long des côtes et dans les cols et les corridors montagneux est évident.

Le présent chapitre porte sur les systèmes de transport routier, ferroviaire, maritime et aérien; les systèmes de transport urbain sont abordés dans le chapitre 9. Bien que ce chapitre aborde chaque mode de transport individuellement, il est important de comprendre qu'ils sont fortement intégrés. Les répercussions météorologiques qui affectent un mode de transport peuvent également avoir des effets négatifs sur d'autres modes.

3.1 SYSTÈME ROUTIER

La Colombie-Britannique compte plus de 46 000 km de routes, incluant les routes provinciales (12 700 km) et secondaires (33 300 km) (ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014a; figure 7), en plus des autres routes municipales et fédérales. Le système routier compte plus de 2 800 ponts (ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014a).

Figure 6 : Les principales infrastructures de transport en Colombie-Britannique, y compris dans les zones de pergélisol.

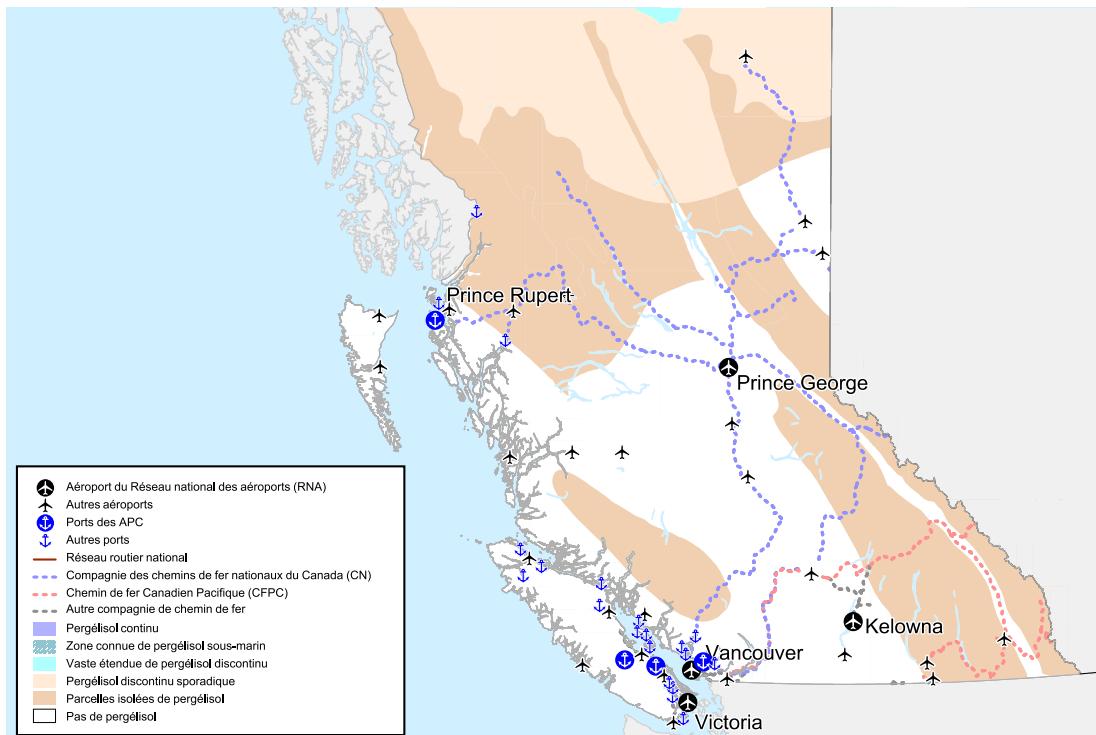
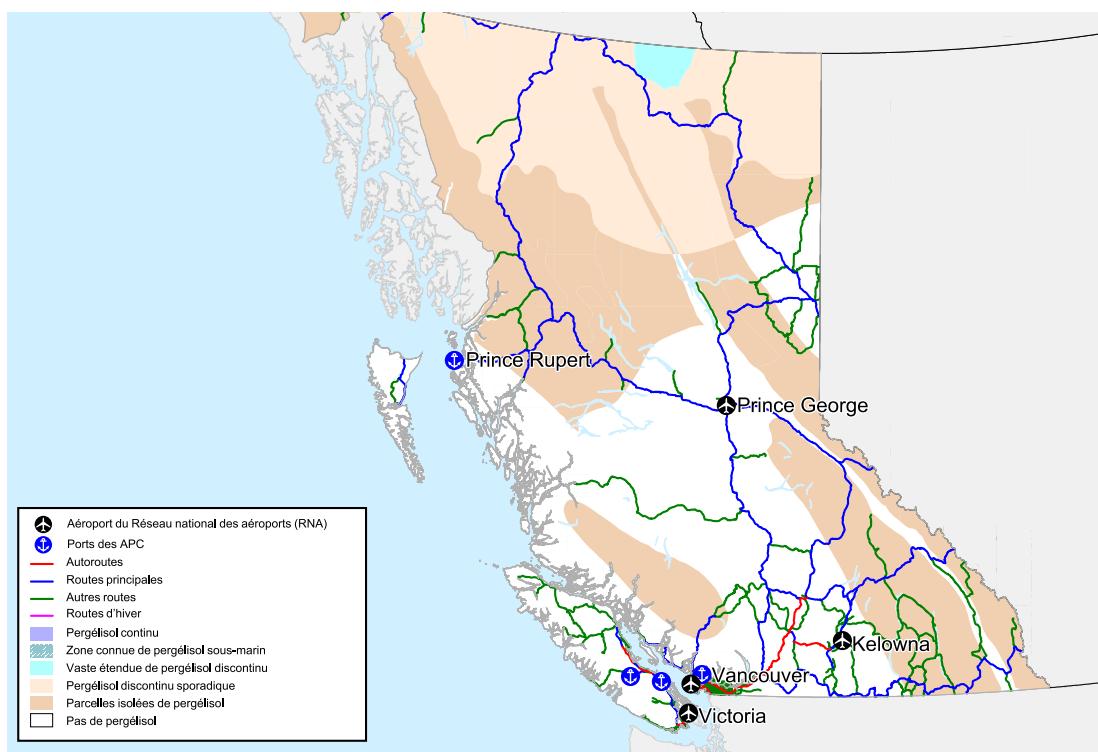


Figure 7 : Infrastructure routière en Colombie-Britannique.



En 2013, trois millions de véhicules routiers étaient immatriculés en Colombie-Britannique, ce qui représente 13 % du total des véhicules routiers immatriculés au Canada lors de cette même année. Ce nombre comprend 2,7 millions de véhicules légers (voitures, VUS et camions légers), soit environ un véhicule par 1,7 personne dans la province (Statistique Canada, 2015b). La population de la Colombie-Britannique est donc fortement dépendante du système routier. Les interruptions d'accès aux réseaux routiers causées par les conditions climatiques peuvent avoir une incidence considérable sur la vie et la subsistance des habitants de la Colombie-Britannique.

3.2 TRANSPORT FERROVIAIRE

La Colombie-Britannique compte environ 6 500 km de chemins de fer (figure 6), principalement desservis par le Canadian National (CN) (~ 4 400 km) et le Canadian Pacifique (CP) (~ 1 720 km). Les chemins de fer régionaux représentent 402 km supplémentaires de voies ferrées. Cette imposante infrastructure est conçue pour faciliter la circulation efficace des marchandises qui passent par la Porte d'entrée de l'AsiePacifique. Les voies ferrées permettent d'assurer un service à longueur d'année, vingtquatre heures sur vingtquatre aux réseaux de ports et de terminaux de Vancouver et de Prince Rupert.

Les principales lignes ferroviaires du CN en Colombie-Britannique s'étendent de Vancouver à Edmonton, en Alberta, de Fort Nelson à Vancouver et de Prince Rupert à Edmonton. Le CN emploie trois terminaux intermodaux dans la province situés à Vancouver, Prince George et Prince Rupert (CN, 2015). Le CN exploite également un service intermodal de Prince Rupert, en Colombie-Britannique à Whittier, en Alaska. Surnommé l'aquatrain, les wagons sont chargés directement sur une barge et transportés. L'Alaska dépend entièrement du service aquatrain du CN pour le transport de ses marchandises, car ce service est relié à toutes les lignes de trains de marchandises de l'Alaska (Alaskarails, 2015).

La ligne principale du CP s'étend de Vancouver à un terminal intermodal à Calgary, en Alberta. Le CP possède également un terminal intermodal à Vancouver (CP, 2015).

En 2013, le système ferroviaire de la Colombie-Britannique a transporté 63 millions de tonnes de marchandises, ce qui représente plus de 20 % du total canadien (Statistique Canada, 2015c). Parmi ces marchandises, les principaux produits transportés, en tonnage, étaient le charbon, le bois et les produits du bois, le soufre, le ciment, les automobiles et le blé. Bon nombre de ces marchandises reflètent la nature de l'économie de la Colombie-Britannique qui est axée sur les ressources, et témoignent de l'impact du commerce avec les États de la côte du Pacifique.

En plus de services de transport de marchandises, VIA Rail offre des services passagers par l'entremise de deux corridors, de Toronto, Ontario à Vancouver (Le Canadien) [Via Rail, 2015a] et de Jasper, Alberta à Prince Rupert, Colombie-Britannique (Ouest canadien) [Via Rail, 2015b].

3.3 TRANSPORT AÉRIEN

La Colombie-Britannique compte 39 aéroports homologués par le gouvernement fédéral pour le service passagers, en plus de 251 aéroports, aérodromes, héliports terrestres et hydroaérodromes enregistrés (Transports Canada, 2015; gouvernement de la Colombie-Britannique, 2016a). Les aéroports certifiés comprennent Vancouver, le deuxième aéroport le plus achalandé au Canada, Victoria le dixième plus achalandé de même que Kelowna, le onzième plus achalandé (Travel BC, 2016). (Voir la figure 6 pour les principaux aéroports). L'aéroport international de Vancouver (YVR) a accueilli plus de 19 millions de passagers et plus de 256 900 tonnes de marchandises en 2014 (Administration de l'aéroport de Vancouver, 2014). Il est prévu que les plans d'expansion de l'aéroport augmenteront la capacité.

3.4 TRANSPORT MARITIME

La Colombie-Britannique dispose de trois ports internationaux, quatre ports régionaux, et de 40 ports locaux (voir la figure 6 pour principaux ports). Le Port Metro Vancouver est le premier port maritime en importance et le plus achalandé du Canada, représentant des échanges commerciaux de plus de 187 milliards de dollars par année avec plus de 160 pays (Port Metro Vancouver, 2014), et un apport d'environ 10,5 milliards de dollars supplémentaires à l'économie nationale (gouvernement de la Colombie-Britannique, 2011a). Les trois ports à conteneurs de Vancouver, Prince Rupert et Nanaimo de même que les grands ports à Kitimat et Squamish sont interconnectés aux systèmes ferroviaire et routier. Les ports de Stewart, Port Alberni et Victoria sont seulement reliés au réseau routier. Prince Rupert, dont la capacité est de 750 000 EVP – les expéditions par conteneurs sont mesurées en équivalents vingt pieds (EVP), représentant un conteneur d'expédition de taille standard (gouvernement de la Colombie-Britannique, 2011b; Groupe de la Banque mondiale, 2016), est le terminal du corridor nord de la porte d'entrée du Pacifique. Vancouver est le terminal pour le corridor sud de la porte d'entrée du Pacifique, prenant en charge près de 2,9 millions d'EVP de trafic conteneurs annuellement (Port Metro Vancouver, 2015a).

En 2010, les ports maritimes de la province ont pris en charge :

- 85 millions de tonnes de trafic de marchandises;
- 2,86 millions d'EVP de trafic de conteneurs.

Les principales exportations, en tonnage, étaient le charbon, les produits forestiers, le grain, la potasse, les produits pétroliers et les métaux, les minéraux et les produits chimiques. Les principales importations comprenaient les voitures, les articles ménagers, les matériaux de construction, la machinerie, les produits de manufacture, les métaux de base et les boissons. Les ports maritimes de la Colombie-Britannique prennent en charge également un important volume de trafic passagers. Par exemple, en 2014, le port de Vancouver a pris en charge 812 000 passagers de croisières (Port Metro Vancouver, 2015b).

Les traversiers sont un autre élément clé du système de transport maritime de la province. En 2014, 7,7 millions de véhicules ont été transportés par traversier par l'entremise du système de traversiers de la province, ce qui représente 19,8 millions de passagers sur 171 000 appareillages (British Columbia Ferry Services Inc., 2015). BC Ferries, autrefois une société d'État et maintenant une entreprise commerciale, dispose de 35 navires et de 47 ports d'escale qui fournissent des services de transport passagers et de marchandises pour les régions côtières de la Colombie-Britannique. Les liaisons par traversier avec les États-Unis depuis la Colombie-Britannique comprennent l'Alaska Marine Highway System, qui assure le transport entre Prince Rupert et le sud-est de l'Alaska. Dans le Sud, des traversiers desservent les emplacements côtiers et insulaires entre la Colombie-Britannique et l'État de Washington. À l'intérieur des terres, des traversiers assurent les services de traverse des passagers et de marchandises sur les rivières et les lacs. D'autres bâtiments tels que les bateaux-taxis assurent également le transport à divers endroits.

La prochaine section décrit les effets climatiques historiques, les risques climatiques futurs et les pratiques d'adaptation en ce qui concerne le transport routier, ferroviaire, aérien et maritime en Colombie-Britannique. La discussion sur les répercussions historiques comprend plusieurs études d'événements de cas portant sur des événements climatiques précis.

4.0 RÉSEAUX ROUTIERS

4.1 EFFETS CLIMATIQUES HISTORIQUES

Les autoroutes Colombie-Britannique ont présenté une vulnérabilité évidente aux événements de pluie extrêmes qui ont causé des affouillements, des blocages à la suite de coulées de boue et des fermetures de ponts. Les précipitations abondantes peuvent provoquer le débordement de rivières et de ruisseaux, et peuvent également causer des coulées de débris qui peuvent bloquer les routes et obstruer les ponceaux, entraînant des affouillements. Des débris peuvent également s'accumuler au niveau des structures de pont, pouvant entraîner la défaillance de ces dernières. Dans certains cas, ces événements peuvent entraîner l'isolement de communautés de leurs principaux axes de ravitaillement.

Trois événements, qui ont tous causé des affouillements, sont présentés ici pour illustrer les vulnérabilités au climat de l'infrastructure routière de la Colombie-Britannique. Les endroits où se sont produits ces événements ont fait l'objet, par la suite, d'évaluations de la vulnérabilité par le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique (voir la section 4.1.2).

Bella Coola – septembre 2010

Les 25 et 26 septembre 2010, un intense système frontal s'est immobilisé au-dessus de la côte du centre de la Colombie-Britannique, provoquant de fortes quantités de pluie qui ont dépassé les 200 mm qui reviennent une fois aux 200 ans (TranBC, 2016). Les précipitations ont causé des affouillements et des éboulements qui, en raison des inondations, ont forcé la fermeture de la route 20 entre Tatla Lake et Bella Coola (figure 8). La route était impraticable à 12 endroits, alors que 12,5 km de la route ont été endommagés, inondés ou tout simplement emportés. L'incidence de la fermeture de la route sur les collectivités locales a été aggravée par d'autres conséquences de la tempête en raison de la dépendance des résidents au diesel pour produire de l'électricité pour le chauffage, l'eau et d'autres services essentiels. L'accès par la route à Tatla Lake et à Bella Coola n'a pas été entièrement rétabli avant 17 jours et a entraîné des coûts de réparation des routes de 45 millions de dollars.

Figure 8 : Bella Coola – Répercussions des inondations sur la route 20 : Route Sallompt – Affouillement à l'approche du pont. (Source : Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique)



Pine Pass – juin 2011

Quinze sites le long de la route 97 dans le col Pine Pass ont été endommagés lors d'un épisode de pluie qui revient aux 100 ans entre les 25 et 26 juin 2011 (ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014b). Des routes ont été emportées et des ponts ont été inondés (figure 9). La tempête a affecté l'ensemble de la région de Peace en Colombie-Britannique, avec des inondations et des affouillements importants touchant plus de 280 endroits sur environ 140 routes. L'accès par la route au nord de Prince George a été fermé, limitant les déplacements touristiques entre la Colombie-Britannique et l'Alaska. La réparation des routes à la suite de cette tempête a pris tout l'été de 2012 et a entraîné des coûts de réparation de 80 millions de dollars.

Figure 9 : Pine Pass – Répercussions sur la route 97 : Accès par la route bloqué entre Pine Pass et Chetwynd. (Source : Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique)



Stewart – septembre 2011

Au début de septembre 2011, 333 mm de pluie sont tombés dans la région de Stewart en Colombie-Britannique, y compris 111 mm de pluie en une seule période de 24 heures (Fraser Basin Council, 2015). L'événement a provoqué d'importantes inondations et a entraîné des affouillements et des dommages à des ponts, y compris au pont de Bitter Creek (figure 10). Les affouillements et l'affaissement de ce pont ont forcé la fermeture de 61,5 km de la route 37A entre Stewart et à la jonction de la route 37 à Meziadin. L'affaissement du pont a isolé la ville de Stewart du reste de la Colombie-Britannique, laissant en plan 117 touristes et véhicules. Les touristes ont dû être transportés par les airs à Prince Rupert, tandis que les véhicules ont été extraits de la région à l'aide de barge. Un pont temporaire a été construit par le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, qui a ensuite été remplacé par une structure permanente. Le montant des dommages au réseau routier à la suite de la tempête a atteint 7 millions de dollars en coûts d'intervention et 11 millions de dollars en coûts pour les réparations qui ont été achevées au cours de l'été 2012.

Figure 10 : Stewart – Incidence des inondations sur la route 37A : Affaissement du point de Bitter Creek. (Source : Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique)



4.2 RISQUES CLIMATIQUES FUTURS

Le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique a terminé cinq évaluations à l'aide du protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) (voir l'encadré ci-dessous) afin de déterminer la vulnérabilité des infrastructures de transport routier en Colombie-Britannique en lien aux futurs changements climatiques, et de recenser de possibles mesures d'adaptation (tableau 5, figure 11) (ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014b). Les évaluations portaient sur un large éventail de conditions géographiques et climatiques.

Tableau 5 : Évaluations de la vulnérabilité par le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique. (Source : Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014c)

Écoprovince	Route	Emplacement	Date d'achèvement
Région méridionale de l'intérieur	Route Coquihalla (route provinciale 5)	Entre Niculum River et Dry Gulch	Juin 2010
Région sub-boréale de l'intérieur	Route 16 Yellowhead	Entre Vanderhoof et Priestly Hill	Avr. 2011
Région des côtes et des montagnes	Route 20	Région de Bella Coola	Sept. 2013
Région des côtes et des montagnes	Route 37A	Région de Stewart	Sept. 2013
Région sub-boréale de l'intérieur	Route 97	Région de Pine Pass	Sept. 2013

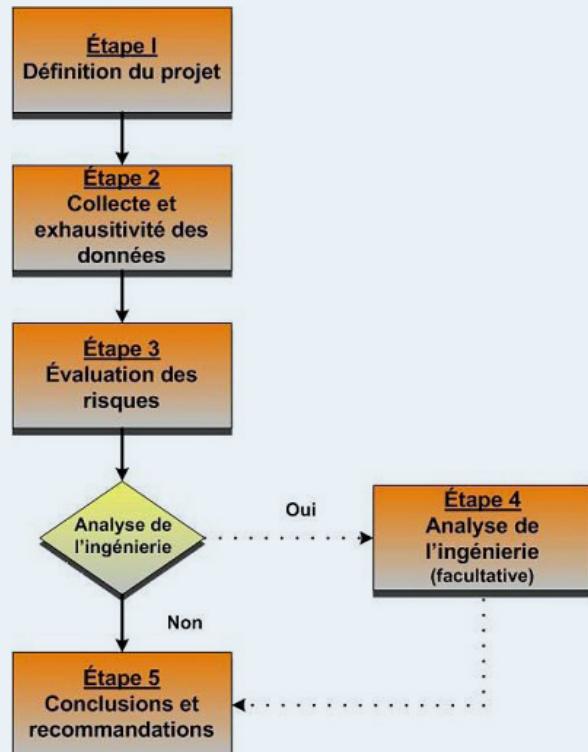
Figure 11 : Emplacement des évaluations de la vulnérabilité aux changements climatiques par le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique. (Source : Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique)



Le protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP), dirigé par Ingénieurs Canada, est un processus en cinq étapes mis sur pied pour analyser la vulnérabilité de l'ingénierie des systèmes d'infrastructure individuels en fonction du climat actuel et des projections climatiques (voir la figure 12). Depuis 2012, le protocole a été appliqué à une grande variété de types d'infrastructure, notamment les routes et les aéroports.

Pour obtenir plus d'informations, consulter le site <http://pievc.ca/fr>

Figure 12 : Le processus du protocole d'ingénierie du CVIIP. (Source : Ingénieurs Canada)



Les évaluations des routes Coquihalla et Yellowhead ont tenu compte d'un très large éventail d'éléments d'infrastructure et de paramètres climatiques, y compris les suivants :

- les températures faibles et élevées;
- les cycles de gel et de dégel;
- le gel et la pénétration du gel;
- les précipitations – les précipitations annuelles, très sévères; soutenues;
- la fréquence des chutes de neige; les tempêtes de neige et les blizzards;
- la pluiesurneige, la grêle/la pluie verglaçante; la pluie sur le sol gelé;
- les rafales ascendantes et descendantes;
- le dégel rapide; les événements de débit de pointe provoqués par la fonte des neiges (crue nivale);
- la glace et les étranglements de glace;
- le gel du sol.

Les résultats de ces deux évaluations ont permis de recenser une vulnérabilité commune – l'impact des précipitations extrêmes, comme les précipitations de haute intensité et de courte durée (PHICD) sur l'infrastructure de drainage des routes (voir l'encadré). Ce risque était plus prononcé sur le lieu de l'étude sur la route Coquihalla, où l'augmentation future de l'intensité et de la fréquence des phénomènes de flux atmosphériques a été désignée comme une vulnérabilité très importante. Une tendance en matière de risque semblable a été observée pour la route Yellowhead (ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014d).

À la suite de ces constatations et de récents événements extrêmes de précipitations en Colombie-Britannique qui ont endommagé les infrastructures routières, les trois autres évaluations des routes se sont concentrées sur les précipitations extrêmes et sur d'autres événements de drainage problématique.

CALCUL DES VALEURS DE PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES POUR ÉVALUER LA VULNÉRABILITÉ DE L'INFRASTRUCTURE

Les valeurs des événements extrêmes de précipitations relatifs à la conception ne sont pas toujours facilement disponibles aux fins d'évaluation de la vulnérabilité, en particulier pour les infrastructures plus âgées ou par l'entremise de travaux de projection climatique. Les valeurs utilisées pour les évaluations de la vulnérabilité dépendent de la conception du système d'infrastructure qui, dans le passé, comptait sur les renseignements climatologiques historiques sur les événements extrêmes. Elles peuvent varier considérablement selon l'emplacement, la topographie, les conditions météorologiques et climatiques locales et historiques et selon l'infrastructure en question. Par exemple, pour l'évaluation de la route Coquihalla, les précipitations de > 76 mm sur une période de 24 heures étaient considérées comme des événements extrêmes de précipitations, tandis que pour les évaluations de la route Yellowhead et des routes 20, 37A et 97, les valeurs de précipitations pour une période de 24 heures étaient de > 35 mm et de > 98 mm respectivement pour être considérées comme des événements extrêmes de précipitations. Alors que les protections générales décrites à la section 3 offrent un point de départ pour ce type d'analyse, elles ne représentent que la première étape de l'analyse plus ciblée qui est nécessaire pour répondre aux questions touchant à des systèmes d'infrastructure particuliers.

Tableau 6 : Sommaire des constatations des évaluations de la vulnérabilité aux changements climatiques par le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique.
(Source : Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014c)

Évaluation de la vulnérabilité	Sommaire des constatations
Coquihalla	Toutes les vulnérabilités de haut niveau relevées pour ce segment de route étaient liées à des événements relatifs aux PHICD. Les événements relatifs aux PHICD dominaient également les résultats relatifs aux vulnérabilités moyennes.
Yellowhead	Quatre-vingts pour cent des éléments de vulnérabilité élevée avaient trait à des événements de PHICD. Les autres facteurs de vulnérabilité incluaient : <ul style="list-style-type: none"> les vulnérabilités des structures des ponts aux températures élevées; la vulnérabilité aux effets du gel et au dégel lors de l'entretien hivernal; les vulnérabilités aux effets des crues nivales des systèmes de ponceaux.
Bella Coola	Les vulnérabilités élevées étaient liées aux effets des conditions des crues nivales sur les ouvrages de protection et les culéescaissons des ponts. Dans la catégorie des vulnérabilités moyennes, 27 % étaient liées à des événements relatifs aux PHICD. Les autres étaient liées à des événements relatifs aux crues nivales. Ces événements peuvent compromettre les ouvrages de protection et de stabilisation ainsi que les éléments de drainage d'une manière très similaire aux événements de PHICD.
Stewart	Mêmes résultats que l'évaluation de Bella Coola; 26 % des vulnérabilités étaient liées à des événements relatifs aux PHICD.
Pine Pass	Les vulnérabilités élevées étaient liées à l'impact des conditions relatives aux crues nivales et aux événements relatifs aux PHICD sur les ouvrages de protection et les culéescaissons des ponts, et sur les services publics de tiers. Parmi les vulnérabilités élevées, cinq étaient directement liées à des événements relatifs aux PHICD, tandis que les autres étaient associées à des conditions relatives aux crues nivales. Dans la catégorie de vulnérabilité moyenne, 53 % étaient liées à des événements relatifs aux PHICD. Les autres étaient associées à des événements relatifs aux crues nivales. Ces événements peuvent compromettre les ouvrages de protection et de stabilisation ainsi que les éléments de drainage d'une manière très similaire aux événements de PHICD.

Tous les cinq segments de route examinés présentaient également une vulnérabilité aux événements de débit de pointe provoqués par la fonte des neiges (conditions relatives aux crues nivales). Ces conditions ont généré des profils de risque très semblables à ceux associés aux précipitations extrêmes, avec un risque général accru de défaillance des appareils de drainage, des ponceaux et des ouvrages de stabilisation (ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014c). Ces vulnérabilités et les autres vulnérabilités potentielles recensées par les évaluations sont présentées dans le tableau 6.

4.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

À la suite de ses études sur les vulnérabilités liées aux changements climatiques, le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique exige maintenant que les plans de conception d'infrastructure réalisés pour le Ministère tiennent compte des effets des changements climatiques. Cela comprend une fiche de critères de conception dans laquelle le concepteur indique les renseignements référentiels sur la conception adaptée au climat, tous les autres facteurs relatifs aux changements climatiques ainsi que la manière avec laquelle la conception tient compte de ces changements climatiques pour la durée de vie de l'infrastructure. La Colombie-Britannique est l'une des premières administrations gouvernementales à exiger des mesures particulières d'adaptation aux changements climatiques à inclure dans les plans de conception d'infrastructure.

Le ministère des Transports et de l'Infrastructure fournit également des outils qui permettent d'atténuer les risques en matière de sécurité pour les usagers de la route posés par des conditions météorologiques extrêmes. Son programme DriveBC vise à améliorer la sécurité routière en fournissant de meilleurs renseignements en temps réel concernant les routes provinciales sur les conditions météorologiques extrêmes, les travaux routiers et les fermetures. Depuis le lancement du programme en 2005, l'outil DriveBC est l'outil en ligne le plus populaire du Ministère (ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2015).

5.0 TRANSPORT FERROVIAIRE

5.1 EFFETS CLIMATIQUES HISTORIQUES

Les mauvaises conditions météorologiques qui affectent les services de transport ferroviaire de marchandises en Colombie-Britannique peuvent affecter le transport de marchandises de manière considérable au Canada et possiblement le commerce international. L'industrie ferroviaire en Colombie-Britannique possède une vaste expérience en matière de gestion des effets des conditions climatiques sur ses opérations. Un examen des rapports du Bureau de la sécurité des transports (BST) révèle une tendance en cours et en évolution d'incidents ferroviaires associés à des événements climatiques, en particulier les événements de précipitations abondantes dans les corridors de transport de la Colombie-Britannique. Le système ferroviaire de la Colombie-Britannique a connu des incidents liés à des précipitations extrêmes, aux eaux de ruissellement printanier et au drainage. Ces événements peuvent fragiliser les voies ferrées et sont des facteurs importants contribuant à la boue et aux éboulements qui affectent les réseaux et le matériel ferroviaires. Les trois incidents dûs à des conditions météorologiques associées à divers degrés à des dommages causés à l'infrastructure, à des répercussions environnementales et à des blessures aux cheminots que nous présentons dans les prochains paragraphes pourraient servir de fondement pour évaluer la capacité des changements climatiques à exacerber les conditions qui, historiquement, ont causé des interruptions des services ferroviaires. Les trois incidents découlent de problèmes de précipitation et de drainage.

Conrad – mars 1997

Le 26 mars 1997, une grande dépression dans la plateforme a fait dérailler un train du Canadien National (CN) près de Conrad, en Colombie-Britannique. L'ingénieur en chef de train et le mécanicien de la locomotive du CN ont été blessés mortellement, quatorze wagons de marchandises et deux locomotives ont été détruits, et plus de 1 200 pieds de voie principale et de voie d'évitement ont été détruits (figure 13). Le carburant qui fuyait s'est enflammé et a causé un incendie difficile à combattre qui a nécessité un arrosage par hélicoptère afin d'être maîtrisé.

Le rapport d'enquête pour cet incident fournit de nombreux détails sur les conditions météorologiques avant l'incident qui ont provoqué ce déraillement (Bureau de la sécurité des transports du Canada, 1998). Il ressort des principaux points de l'analyse que la période d'octobre 1996 à mars 1997 a été la période de six mois la plus humide dans les 59 dernières années. Le 26 mars 1997, il s'agissait du 41^e jour de ruissellement dû à la fonte des neiges dans la région. Cependant, la vitesse de la fonte de neige a augmenté soudainement entre les 17 et 19 mars en raison des averses de pluie sur la neige. Le rapport conclut que la dépression a été causée par les éléments suivants :

1. le volume élevé d'eau de ruissellement au-dessus de la route transcanadienne adjacente n'a pas été capté par le système de drainage;
2. l'eau a pénétré dans le sol, a migré à travers les remblais de la route et s'est infiltrée dans la plateforme de la voie ferrée, entraînant sa déstabilisation qui a causé l'affaissement.

Figure 13 : Déraillement de train à Conrad, en Colombie-Britannique. L'affaissement du remblai a été causé par un événement de précipitation extrême. (Source : Bureau de la sécurité des transports du Canada)



Figure 14 : Déraillement de train à Komo, en Colombie-Britannique, causé par un éboulement de débris sur la voie ferrée. (Source : Bureau de la sécurité des transports du Canada)



Komo – novembre 2009

Le 17 novembre 2009, un train de marchandises du Canadien Pacifique (CP) roulait vers l'ouest entre Boston Bar et Vancouver, quand il a heurté un éboulement de roches, de boue et d'arbres. La locomotive et trois wagons chargés de concentrés de cuivre ont déraillé (figure 14). L'ingénieur en chef du train et le mécanicien ont subi des blessures qui ne laissaient pas craindre pour leur vie. Au moment de l'incident, de très grandes quantités de pluie s'abattaient sur la région causées par un phénomène de flux atmosphérique.

L'éboulement est survenu au cours d'une période de fortes pluies (Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2010). De grandes quantités d'eau ont transité par un ponceau routier au-dessus de la voie. Bien que le ponceau ait eu une capacité suffisante pour gérer le volume de l'eau, les mesures de détournement en aval du ponceau n'ont pu contenir l'importante quantité d'eau de débordement qui a alors formé sa propre voie qui a affecté la voie ferrée à un endroit où il n'y avait pas de ponceaux. La nouvelle voie de drainage a causé la chute de débris, de roches et de boue sur la voie inférieure.

Fernie – mars 2011

Le 8 mars 2011, 27 wagons chargés de charbon ont déraillé près de Fernie, en Colombie-Britannique. Personne n'a été blessé.

Le BST a attribué le déraillement à un renversement du rail, causé par un surécartement excessif (Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2012). L'inclinaison vers l'extérieur du rail haut est due à l'accumulation de glace entre le patin du rail et les semelles (figure 15). Au cours des quatre semaines précédentes, de nombreuses périodes de gel et de dégel ont été observées dans la région, et l'effet de pompage créé par les trains aspirait de l'eau de fonte qui s'accumulait à l'intérieur du rail. Le rapport du BST note également qu'entre les 11 et 20 février, la température ambiante était au-dessus de 0 °C le jour et sous le point de congélation la nuit. Il y a aussi eu des précipitations sous forme de pluie totalisant environ 23 millimètres entre les 11 et 14 février, suivies d'accumulations de neige d'environ 58 centimètres entre les 15 et 17 février. Après le 17 février et pour le reste du mois, la température est demeurée sous le point de congélation et est descendue à une température aussi froide que -32 °C. Bien que cet incident ait été attribué au gel et au dégel, la cause principale est attribuable à la grande quantité de neige, qui a contribué à l'accumulation de glace et de neige à la base des rails. Ce phénomène, combiné aux périodes de variation de la température inférieure et supérieure au point de congélation, a contribué au déraillement.

Il existe de nombreux autres exemples d'incidents qui démontrent la vulnérabilité du transport ferroviaire de la Colombie-Britannique aux précipitations extrêmes. Des résumés de haut niveau des dix autres incidents semblables survenus entre 1995 et 2009 sont présentés dans le tableau 8.

Figure 15 : Portion de la voie ferrée à Fernie, en Colombie-Britannique, montrant l'accumulation de glace. (Source : Bureau de la sécurité des transports du Canada)



Tableau 8 : Résumé d'incidents ferroviaires en Colombie-Britannique liés aux conditions climatiques (de 1995 à 2009).

Date	Location	Description	Référence
Janv. 1995	Procter	<ul style="list-style-type: none"> Un train de marchandises du CP entre en collision avec un rocher tombé sur la voie près de Procter. Trois locomotives et deux wagons ont déraillé et ont fait une chute de 125 pieds dans le lac Kootenay. Deux personnes sont décédées par noyade. Du soufre et du carburant diesel se sont déversés dans le lac. Accident dû à la pression exercée par des racines d'arbre, à des périodes de gel et de dégel et à l'écoulement de surface. 	Rapport du BST n° R95V0017 Procter – 20 janv. 1995
Mai 1998	Creston	<ul style="list-style-type: none"> Une dépression dans la plateforme a fait dérailler trois wagons et huit wagonstombereaux d'un train de marchandises du CP. Des concentrés d'argent et de plomb et du carburant diesel se sont échappés, et ont été récupérés par la suite. Accident attribué à la pluviosité record, au rendement du système de drainage, au talus abrupt et au fait que le matériel de remblayage de la plateforme était très susceptible d'être affaibli par l'eau. 	Rapport du BST n° R98V0100 Creston – 31 mai 1998
Nov. 2004	Ruby Creek	<ul style="list-style-type: none"> Un train du CN heurte un éboulis de roche. Le réservoir de carburant de la locomotive s'est perforé et du carburant s'est déversé dans le fleuve Fraser. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009 Annexe A
Déc. 2004	Glen Valley	<ul style="list-style-type: none"> Un train du CN entre en collision avec une coulée de boue. Huit wagons ont déraillé. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009 Annexe A
Août 2005	Lasha	<ul style="list-style-type: none"> Un train du CN entre en collision avec un glissement de terrain. Neuf wagons ont déraillé. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009 Annexe A
Oct. 2005	Yale	<ul style="list-style-type: none"> Un train de marchandises du CN entre en collision avec un glissement de terrain. Deux locomotives et sept wagons plats ont déraillé. La locomotive a déversé du carburant dans le fleuve Fraser. Un membre de l'équipe a été blessé et a été transporté à l'hôpital. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009 Annexe A
Janv. 2006	Albion	<ul style="list-style-type: none"> Deux locomotives du CP ont déraillé en position debout en raison d'un glissement de terrain. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009 Annexe A
Janv. 2007	Lasha	<ul style="list-style-type: none"> Un train du CN a heurté un glissement de terrain causant le déraillement de deux locomotives et du premier wagon. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009 Annexe A
Janv. 2007	Inkitsaph	<ul style="list-style-type: none"> La locomotive d'un train du CN a déraillé après avoir heurté un glissement de terrain. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009 Annexe A
Juil. 2008	Lasha	<ul style="list-style-type: none"> Quatre wagons chargés d'éthylèneglycol ont déraillé après avoir heurté une coulée de boue. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009 Annexe A

5.2 RISQUES CLIMATIQUES FUTURS

Comme les corridors ferroviaires en Colombie-Britannique longent le réseau routier de très près, partageant des corridors de transport dans les cols de montagne et des voies le long des rivières, il n'est pas rare qu'une défaillance du mécanisme de drainage d'un système ait une incidence négative sur l'autre. Dans plusieurs des études de cas examinés précédemment, les défaillances d'éléments du système routier ont entraîné des glissements de terrain sur le système ferroviaire. Par conséquent, les événements météorologiques violents qui affectent négativement un système peuvent avoir des répercussions simultanées sur les autres.

Selon les travaux effectués par le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique en matière de changements climatiques, dans ces mêmes corridors, les routes continueront d'être affectées par des événements de précipitations intenses entraînant des défaillances des éléments de drainage et une instabilité du talus, et que ces événements devraient augmenter en fréquence et en intensité à l'avenir. Compte tenu de la proximité entre les réseaux routier et ferroviaire en Colombie-Britannique et de l'historique de défaillances séquentielles et coïncidentes de ces derniers, il est raisonnable de prévoir des modèles de vulnérabilité semblable pour le système ferroviaire.

5.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

Malgré l'absence de références précises dans la littérature à des compagnies de chemin de fer qui effectuent des évaluations des changements climatiques et mettent en place des pratiques d'adaptation en Colombie-Britannique, on observe que les compagnies de chemin de fer en Colombie-Britannique déploient des efforts considérables pour lutter contre les effets des événements climatiques sévères, y compris les précipitations extrêmes. Les recommandations qui découlent de ces enquêtes et les activités de suivi sont très semblables à celles qui peuvent découler d'une analyse ciblée de l'évaluation des changements climatiques. Les analyses scientifiques réalisées dans le cadre du processus d'enquête du BST constituent une contribution essentielle à l'évaluation de l'adaptation aux changements climatiques, comme les travaux menés par le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique pour le réseau routier de la province. Des exemples de mesures sont présentés au tableau 9.

Tableau 9 : Exemple de mesures correctives dans les rapports du BST.

Date	Lieu	Mesures correctives	Référence
Janv. 1995	Procter CP	<ul style="list-style-type: none"> Des instructions ont été fournies aux employés sur l'inspection de base des talus rocheux, les principes de la stabilité des talus rocheux, et les méthodes relatives à la stabilisation et à la protection. Inspections annuelles approfondies des talus rocheux. Mise en œuvre d'inspections aériennes pour évaluer les caractéristiques du talus rocheux à des altitudes plus élevées. Mise en place d'une procédure d'évaluation et de consignation d'un large éventail de mesures d'atténuation relatives à l'instabilité des talus rocheux. 	Rapport du BST no R95V0017 Procter – 20 janv. 1995

Date	Lieu	Mesures correctives	Référence	
Mars 1997	Conrad	CN	<ul style="list-style-type: none"> Construction de systèmes de drainage de surface additionnels à Conrad, installation d'un prototype de détecteur d'affouillement. Utilisation de photographies aériennes pour recenser les endroits du corridor ThompsonFraser semblables à Conrad du point de vue géologique; inspection de ces sites et améliorations apportées au système de drainage. Réalisation d'inspections géotechniques du sous-sol à certains endroits sélectionnés et installation d'instruments (piézomètres pneumatiques) pour mesurer les pressions d'eau souterraine. Élaboration d'une procédure de surveillance et de contrôle des talus afin de permettre de signaler tous les incidents ayant trait aux éboulements et aux glissements de terrain au service géotechnique et de prendre des mesures correctives ou de compiler les données pour évaluer la stabilité à long terme des talus en terre. 	Rapport du BST n° R97V0063 Conrad – 26 mars 1997
Mai 1998	Creston	CP	<ul style="list-style-type: none"> Fourniture d'une formation sur la stabilité des talus en roche et en terre aux superviseurs de l'entretien de la voie. Lancement d'une nouvelle politique d'inspection des ponceaux exigeant que ces dernières soient effectuées tous les ans. Entente de services de Veille météorologique mondiale pour la mise en place d'un système d'avertissement fournissant des prévisions météorologiques détaillées et précises et des avertissements sur les conditions météorologiques sévères qui tiennent compte des points milliaires et de la position des gares. Instructions aux inspecteurs de la sécurité ferroviaire de concentrer leurs efforts sur les questions de drainage et d'examiner les pratiques d'entretien de la voie dans les territoires sujets à l'instabilité des talus. 	Rapport du BST n° R98V0100 Creston – 31 mai 1998
Nov. 2009	Komo	CN et CP	<ul style="list-style-type: none"> Surveillance du corridor du canyon du Fraser et inspection régulière par des ingénieurs géotechniques et des géoscientifiques. Recherches entreprises pour améliorer les détections d'éboulements et de glissements de terrain. 	Rapport du BST n° R09V0235 Komo – 17 nov. 2009
		CN	<ul style="list-style-type: none"> Installation d'un système d'urgence de détection des pentes instables et des affouillements dans la région de Komo. Mise en place d'un protocole exigeant que les superviseurs locaux communiquent avec le CN et le CP lors d'événements de pluie, de périodes de ruissellement exceptionnel et d'autres systèmes météorologiques potentiellement dommageables et informer les personnes-ressources des compagnies de chemin de fer en cas de problèmes. 	
Mars 2011	Fernie	CP	<ul style="list-style-type: none"> Des semelles laminées ont été installées et de nouveaux rails ont été posés où s'est produit le déraillement. Le panneau de vitesse de 30 mi/h a été déplacé pour faire en sorte que les trains terminent leur freinage avant de négocier cette courbe, diminuant ainsi les forces latérales dans la courbe. 	Rapport du BST n° R11V0057 Fernie – 8 mars 2011
		BST	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place d'une fréquence minimale pour les inspections électroniques de l'état géométrique de toutes les voies. 	

Beaucoup de ces exemples de mesures correctives correspondent au type de recommandations qui découlent des évaluations ciblées des vulnérabilités. Les mesures portent sur un large éventail d'activités de recherche, de surveillance, de procédure, d'entretien, d'établissement de rapports et d'ingénierie. De cela, nous pouvons conclure que les compagnies de chemin de fer en Colombie-Britannique mènent des activités visant à réduire les risques climatiques (voir l'encadré). Le BST et les compagnies de chemin de fer extrapolent à partir des analyses scientifiques des défaillances dues au climat afin de mettre en place des mesures et des approches généralisées visant à réduire le risque lié à ce genre d'événements sur l'ensemble du système ferroviaire en général.

L'APPROCHE DE L'INDUSTRIE FERROVIAIRE À L'ÉGARD DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MICHAEL GULLO, ASSOCIATION DES CHEMINS DE FER DU CANADA, COMMUNICATION PERSONNELLE, 2015)

Les investissements en capital dans le réseau ferroviaire visent à aborder diverses questions et divers défis, y compris la façon dont les événements météorologiques extrêmes tels que les inondations soudaines, les avalanches, les affouillements et le gel peuvent causer des interruptions de service dans le réseau ferroviaire et en périphérie. Pour assurer le mouvement efficace du trafic, les compagnies de chemin de fer investissent de façon importante dans l'amélioration de l'infrastructure des voies ferrées, exécutent des plans de préparation saisonniers, mettent à l'essai des systèmes d'avertissement de risques naturels, procèdent à des inspections régulières de la voie ferrée, et veillent à ce que des processus soient en place pour atténuer les effets des conditions météorologiques violentes et s'en rétablir. Diverses technologies sont utilisées pour déterminer l'état de l'infrastructure ferroviaire et du paysage qu'elle traverse, y compris les technologies suivantes :

- détecteurs interférométriques radar pour mesurer la stabilité de la voie;
- évaluation de la vulnérabilité de la région à risque et cartographie du SIG;
- cartographie des glissements de terrain; temporelle et spatiale;
- évaluation géotechnique des talus;
- système de détection de mouvement par laser;
- détection de mouvement des talus par fibre optique;
- études hydrauliques des rivières;
- évaluation et gestion des barrages de castor.

En ce qui a trait à la planification et aux opérations, l'industrie ferroviaire utilise généralement des prévisions et des considérations météorologiques à court terme plutôt que des projections climatiques à long terme. Les compagnies de chemin de fer sont préoccupées par les changements climatiques en raison de la possibilité que les événements météorologiques violents deviennent plus fréquents et/ou plus intenses et posent ainsi des risques considérables au réseau ferroviaire et à ses opérations. L'Association des chemins de fer du Canada et la American Association of Railroads ont tous deux établi des comités environnementaux dont les mandats abordent tous deux les événements météorologiques extrêmes et défavorables.

Comme dans le cas des autres modes de transport, le secteur ferroviaire nécessite une approche scientifique fondée sur des faits pour l'aider à déterminer à quels endroits sont attendus les effets des changements climatiques à court, moyen et long terme. Grâce à ces connaissances, les efforts d'adaptation dans l'industrie peuvent être ciblés et plus stratégiques au bout du compte.

6.0 TRANSPORT AÉRIEN

6.1 EFFETS CLIMATIQUES HISTORIQUES

Le climat affecte les systèmes de transport aérien de nombreuses façons, notamment : 1) les accidents dus aux conditions météorologiques; 2) les interruptions de service dues aux conditions météorologiques; et, 3) les répercussions sur les systèmes d'infrastructure physique.

Accidents dus aux conditions climatiques

L'industrie du transport aérien possède une vaste expérience de la gestion et de l'adaptation en matière de conditions climatiques, et a mis en place des procédures normalisées pour accéder aux prévisions météorologiques et les incorporer dans la planification des vols (Klock and Mullock, 2001). Les répercussions des événements météorologiques violents sont normalement gérées au moyen de pratiques d'évitement, ce qui entraîne des retards de vol, et de l'avancement technologique, qui intègre des systèmes de pointe d'instruments de bord. Il en résulte une très faible fréquence d'accidents dus aux conditions météorologiques.

En Colombie-Britannique, seulement sept incidents d'aviation auxquels les conditions météorologiques ont contribué au cours des treize dernières années ont été d'une ampleur suffisante pour justifier une enquête du BST (tableau 10).

Tableau 10 : Sommaire des incidents d'aviation dus aux conditions météorologiques.

Date	Incident	Facteurs météorologiques à l'œuvre
6 juin 2002	Collision avec le relief à Needle Peak en C. B. (Bureau de la sécurité des transports, 2003)	Conditions météorologiques défavorables en région montagneuse
19 janv. 2005	Contrôle entravé en raison du givrage de cellule à Kelowna en C. B. (Bureau de la sécurité des transports, 2005)	Conditions de givrage importantes en vol
8 mars 2006	Sortie de piste—collision avec le relief à Powell River en C. B. (Bureau de la sécurité des transports, 2007)	Vent arrière à l'approche; aquaplanage
7 févr. 2008	Perte de référence visuelle et collision avec le relief à Golden en C. B. (Bureau de la sécurité des transports, 2008)	Mauvaise visibilité
17 mars 2012	Sortie de piste à Blue River, en C. B. (Bureau de la sécurité des transports, 2013c)	Les conditions météorologiques se détérioraient
1er juin 2012	Perte de référence visuelle et collision avec le relief à Terrace en C. B. (Bureau de la sécurité des transports, 2013b)	Mauvaise visibilité
13 août 2012	Collision avec le relief à Kelowna en C. B. (Bureau de la sécurité des transports, 2013a)	Conditions d'altitude densité élevée et visibilité réduite.

Les rapports du BST démontrent que, historiquement, les conditions météorologiques sont rarement la seule cause des incidents d'aviation. Ce sont plutôt les conditions météorologiques et une erreur de pilotage qui se combinent pour provoquer l'incident. En outre, la relative rareté des incidents d'aviation dus aux conditions climatiques indique que l'industrie de l'aviation possède des stratégies de gestion et de développement technologique efficaces et continues pour prendre en charge les conditions météorologiques violentes, et les vols seront reportés lorsque les conditions ne sont pas sécuritaires.

Interruptions de service dues aux conditions météorologiques

Les annulations et les retards dus aux conditions météorologiques dans les services de transport aérien peuvent être très perturbants pour les personnes et l'économie canadienne, car ils peuvent avoir un effet d'entraînement dans l'ensemble du réseau aéroportuaire national. Les causes incluent les orages, le brouillard, la neige et la glace. Dans les régions montagneuses de la Colombie-Britannique continentale, les situations de brouillard et de visibilité provoquées par les conditions météorologiques peuvent s'avérer problématiques. Les variations dans le relief peuvent entraîner des conditions météorologiques très variées. Par exemple, l'aéroport régional de West Kootenay à Castlegar connaît de fréquents retards de vol en raison des plafonds bas et des montagnes environnantes, tandis que l'aéroport régional de Trail, situé à environ 40 km au sud de Castlegar, offre une plus grande fiabilité relativement à son horaire de vol en raison des meilleures conditions météorologiques qui prévalent. Les technologies de navigation peuvent jouer un rôle important dans la réduction du nombre de retards dus aux conditions météorologiques. Par exemple, l'aéroport régional Northwest à Terrace, dans les montagnes côtières, connaît souvent des conditions météorologiques très semblables à celles de l'aéroport régional de West Kootenay, mais compte beaucoup moins d'annulations dues aux conditions météorologiques. Cela peut être attribué aux systèmes d'atterrissement et aux instruments (ILS) employés à l'aéroport de Terrace qui ne sont pas installés à West Kootenay. Il peut en coûter bien audelà de 1 million de dollars pour installer ces systèmes, souvent considérés comme non rentables pour les petits aéroports.

Parmi les changements dans les paramètres qui peuvent affecter les opérations aéroportuaires et qui peuvent entraîner des retards et des annulations de vols, on compte les conditions météorologiques extrêmes, les ondes de tempête et l'élévation du niveau de la mer au fil du temps. Heureusement, les aéroports en Colombie-Britannique peuvent gérer la plupart des tempêtes de neige, éprouvant à l'occasion des retards de service. Le fait de posséder l'équipement de déneigement et le personnel appropriés peut aider à gérer ce type d'événement.

Les problèmes de visibilité sont plus problématiques. Alors que l'aéroport international de Vancouver est doté d'un ILS avancé (permettant l'atterrissement et le décollage dans des conditions de visibilité aussi faibles que 600 pieds), ce ne sont pas tous les aéroports en Colombie-Britannique qui sont équipés d'un ILS. Même si d'autres options de gestion telles que la qualité de navigation requise sont disponibles, elles requièrent souvent une coopération continue entre les aéroports régionaux et les transporteurs aériens. L'approche principale aux problèmes de visibilité est l'annulation de vols ou le détournement vers d'autres aéroports. Ces solutions peuvent causer des inconvénients aux passagers et, à long terme, compromettre la croissance régionale.

Répercussions sur les systèmes d'infrastructure physique

Les aéroports côtiers peuvent être exposés aux risques liés aux ondes de tempête et à l'élévation du niveau de la mer (voir l'encadré). Par exemple, en raison de sa faible élévation, l'infrastructure physique de l'aéroport international de Vancouver peut être affectée par des ondes de tempête et par l'élévation du niveau de la mer au fil du temps. Cet aéroport est une importante plaque tournante régionale, nationale et internationale, et l'interruption de service pourrait avoir des répercussions de grande envergure sur la fiabilité du transport aérien en Colombie-Britannique et ailleurs. L'aéroport est situé sur l'île de Sea Island, près du niveau de la mer, et également dans la plaine inondable de la rivière Fraser, où il existe un potentiel d'inondation à la suite de précipitations abondantes qui affectent le débit des rivières, en plus des ondes de tempête formées dans l'océan Pacifique et des conditions changeantes occasionnées par l'élévation du niveau de la mer. Un système de digue, d'environ 15 km de long, protège actuellement Sea Island. L'administration aéroportuaire a recourt à un programme permanent pour gérer les digues et évaluer régulièrement les risques d'inondation, et travaille en collaboration avec les gouvernements fédéral et provinciaux ainsi que les administrations locales pour définir les élévections de digues appropriées (Marion Town, Administration de l'aéroport de Vancouver, communication personnelle, 2015). Parmi les autres mesures pertinentes adoptées par l'aéroport de Vancouver, on compte des pistes orientées pour s'assurer d'offrir une piste face au vent dans presque toutes les conditions de vent, des investissements dans des mesures de contrôle de la neige et de la glace sur la chaussée ainsi que de dégivrage pour que les aéronefs puissent fonctionner en toute sécurité dans de très mauvaises conditions météorologiques.

AÉROPORT DE SANDSPIT

L'infrastructure et les opérations de transport à l'aéroport de Sandspit, à Haida Gwaii, sont vulnérables aux tempêtes hivernales et aux ondes de tempête connexes qui pourraient augmenter et présenter des problèmes connexes en raison de l'élévation du niveau de la mer au fil du temps. La piste traverse la flèche littorale, et les tempêtes hivernales importantes et fréquentes ont causé de lourds dommages dus aux vagues au perré, une structure en pente formée de pierres ou d'une autre matière, qui protège le rivage. Les débordements du barrage sont devenus plus fréquents au cours des dernières années alors que des réparations doivent être effectuées sur une base annuelle en raison des dommages, y compris des débris marins et du bois de grève sur la piste et des dommages aux feux de balisage et à la chaussée (figure 16). L'aéroport est également situé à l'intérieur de la voie migratoire du Pacifique, un itinéraire emprunté par les oiseaux migrateurs. Les exploitants d'aéroports ont observé des changements au cours de la dernière décennie chez les oiseaux migrateurs et résidents qui affectent également la gestion de l'aéroport.

À la lumière de ces changements, l'aéroport doit adapter ses activités en permanence pour assurer une sécurité permanente. La vulnérabilité de l'aéroport de Sandspit devrait faire l'objet d'une évaluation plus poussée, ainsi que de nouvelles approches et pratiques de gestion, car la fréquence et l'ampleur des ondes de tempête vont augmenter en raison de l'élévation du niveau de la mer.

Rédigé avec la collaboration du personnel de Transports Canada, Bureau de la région du Pacifique

Figure 16 : La piste de Sandspit en décembre 2011. L'extrémité de la piste a été soumise à d'importants débordements de vagues pendant une violente tempête, alors que le niveau de la mer s'est élevé à environ un mètre au-dessus de la piste. Une section de 250 m du perré endommagé a dû être refaite.



6.2 RISQUES CLIMATIQUES FUTURS

Bien que la visibilité soit une préoccupation constante pour les aéroports de la Colombie-Britannique, il est actuellement difficile de savoir comment les changements climatiques auront une incidence sur la situation. Dans ses évaluations de la vulnérabilité des routes, le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique mentionne que les modèles climatiques actuels ne permettent pas de prévoir les changements dans les conditions de visibilité dans le relief complexe des montagnes intérieures de la Colombie-Britannique. Le Pacific Climate Impacts Consortium a déterminé que ce problème devait faire l'objet d'études supplémentaires pour aborder spécifiquement les risques relatifs au transport dans la région de l'intérieur de la Colombie-Britannique.

Des hivers plus chauds et humides dans le futur pourraient signifier une baisse dans les retards de vol dus à la neige. Cependant, les projections des changements dans la fréquence et l'intensité des chutes de neige durant une saison hivernale plus courte restent incertaines. Il s'agit d'un autre domaine où la réalisation de travaux de modélisation supplémentaires pour évaluer la nature, la forme, la fréquence et l'intensité des futures chutes de neige pour les grands aéroports de la Colombie-Britannique serait utile.

L'élévation du niveau de la mer et l'augmentation connexe des inondations dues aux ondes de tempête constituent une menace pour les opérations à l'aéroport international de Vancouver et l'aéroport de Sandspit (en plus des inondations fluviales à l'aéroport international de Vancouver). Dans le cadre des travaux de l'aéroport international de Vancouver pour soutenir le Plan directeur de l'aéroport 2057, l'administration aéroportuaire évalue les effets des changements climatiques sur les opérations aéroportuaires. L'objectif de ces travaux sera d'examiner et de mieux comprendre les effets des changements climatiques projetés propres à Sea Island. Les travaux approfondis devraient comprendre le recensement et la quantification des risques possibles associés aux effets des changements climatiques sur les opérations des aéroports. Les résultats de ces études donneront lieu à des plans d'adaptation à partir desquels toute amélioration d'infrastructure serait incorporée et financée au moyen du programme d'investissements de l'administration aéroportuaire.

6.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

L'industrie aérienne gère les conditions météorologiques sur une base continue, ajustant ses pratiques à mesure que des changements dans les événements météorologiques sont observés. En ce sens, dans le cas de nombreux aéroports (avec des exceptions telles que l'aéroport international de Vancouver), l'adaptation a tendance à être essentiellement réactive plutôt que d'être mise en œuvre en prévision des changements futurs. Parallèlement, la technologie aéronautique évolue, ayant recours de plus en plus à des systèmes d'atterrissement aux instruments et à d'autres innovations permettant aux avions de voler en toute sécurité dans des conditions qui sont loin d'être idéales.

Bien qu'il existe très peu de renseignements relatifs à des études d'évaluation des risques liés aux changements climatiques pour le transport aérien en Colombie-Britannique, cela ne signifie pas que ces études ne sont pas en cours, car elles n'ont probablement pas encore été publiées ou ne sont pas encore disponibles dans le domaine public. Par exemple, un engagement a été pris visant à entreprendre une évaluation des risques liés aux changements climatiques pour l'aéroport international de Vancouver qui se penche sur les risques d'élévation du niveau de la mer et sur les implications pour l'examen et le renouvellement continus des systèmes de digue.

7.0 TRANSPORT MARITIME

Les événements météorologiques qui touchent les systèmes de transport maritime de la Colombie-Britannique, comme province côtière et plaque tournante nationale majeure pour les passagers et les marchandises, peuvent avoir des répercussions provinciales et nationales importantes. À l'instar du transport aérien, les répercussions préoccupantes pour le transport maritime sont les suivantes :

1. les accidents dus aux conditions météorologiques;
2. les interruptions de service dues aux conditions météorologiques;
3. les répercussions sur les systèmes d'infrastructure physique.

7.1 EFFETS CLIMATIQUES HISTORIQUES

L'industrie du transport maritime possède une vaste expérience de la gestion et de l'adaptation en matière de conditions climatiques, et a mis en place des procédures normalisées pour accéder aux prévisions météorologiques et les incorporer dans la planification des déplacements. Par conséquent, les répercussions des mauvaises conditions météorologiques sont normalement gérées au moyen de pratiques d'évitement (qui entraînent des retards), et de l'avancement technologique qui intègre des systèmes de surveillance météorologique et de navigation à la fine pointe. Par exemple, Environnement et Changement climatique Canada exploite un vaste réseau de prévisions météorologiques régionales, de sites d'observation et de fréquences radio sur les conditions météorologiques marines pour la côte de la Colombie-Britannique (gouvernement du Canada, 2016). Le système fournit des renseignements météorologiques continus pour le secteur maritime ainsi que des avertissements d'intempéries qui pourraient affecter les systèmes de transport maritime. Pour ces raisons, les accidents maritimes dus aux conditions météorologiques sont relativement rares en Colombie-Britannique. Un examen limité des rapports du BST indique que les incidents maritimes dus aux conditions météorologiques impliquent de fortes composantes d'erreur humaine.

Les ports maritimes de la Colombie-Britannique doivent être capables de gérer des vents violents et des pluies abondantes, habituellement de manière simultanée. En 2014, 4 % des services de traversier en Colombie-Britannique ont été retardés en raison de la météo. Les vents violents sont une cause fréquente de retard de même que les pluies abondantes (British Columbia Ferry Services Inc., 2016). Bien que le pourcentage ne soit pas important, il s'agit néanmoins de 6 600 traversées qui sont perturbées annuellement par des conditions météorologiques. Les conditions météorologiques violentes peuvent non seulement entraîner des retards ou des annulations, mais peuvent également affecter les systèmes d'infrastructure physique. Par exemple, le 3 novembre 2015, des vents violents ont poussé le *Queen of Nanaimo* (un service de traversier entre l'île de Vancouver et le continent) hors de position, provoquant une collision avec un quai flottant privé et des dommages à ce dernier (CBC News, 2013). Cependant, à ce jour, les dommages causés aux systèmes d'infrastructure physique résultant d'incidents liés aux conditions météorologiques ont été relativement rares.

7.2 RISQUES CLIMATIQUES FUTURS

Même si le vent est un paramètre névralgique dans les activités de prévisions sur les changements climatiques, la prévision de la nature et l'intensité des épisodes de vent de courte durée sont techniquement difficiles, et les modèles ont de la difficulté à simuler les vents de surface (Ingénieurs Canada, 2008; Griffin et coll., 2010). Il n'a pas été possible de relever d'études particulières visant à évaluer les effets des changements dans l'intensité et la fréquence des vents violents sur les opérations du secteur maritime. Les pratiques actuelles qui utilisent un réseau hautement perfectionné d'installations de surveillance et de prévision des conditions météorologiques pourraient suffire pour parer aux risques futurs. Néanmoins, les changements climatiques pourraient occasionner l'augmentation des annulations et des retards, entraînant des répercussions économiques. Il s'agit d'un domaine pouvant faire l'objet d'études plus approfondies.

L'analyse préliminaire (voir la section 2.2) pointe vers une augmentation probable de la fréquence des événements de flux atmosphériques d'ici la période 2041-2070, alors que les plus fortes hausses seront observées sur la côte. Le nombre moyen de jours de flux atmosphériques par an devrait approximativement doubler dans la plupart des endroits, y compris sur le continent. Il n'a pas été possible de relever d'études propres au secteur maritime ou des activités d'évaluation des effets des changements dans l'intensité et la fréquence des précipitations sur les opérations du secteur maritime en Colombie-Britannique.

Des études sont en cours pour examiner les scénarios d'inondations dues à la fonte des neiges au printemps, d'ondes de tempête côtières, de fortes marées et d'inondation dues à l'élévation du niveau de la mer dans les régions autour de la rivière Fraser, où sont situées un certain nombre

d'installations portuaires. Ces études sont en cours d'élaboration dans le cadre de la stratégie de gestion des inondations dans le Lower Mainland à laquelle participe un certain nombre d'entités, y compris les administrations municipales et le gouvernement provincial, le Conseil du bassin du Fraser et d'autres organisations comme le Port Metro Vancouver (Kerr Wood Leidal, 2015). Dans le cadre de cette stratégie, le Conseil du bassin du Fraser propose d'examiner la vulnérabilité aux inondations des infrastructures clés, tels que les ports, les voies ferrées, les aéroports, les autoroutes, les axes routiers importants ou d'urgence de même que les postes électriques de BC Hydro.

Antérieurement, la province réalisait des études pour évaluer les répercussions des inondations dues à l'élévation du niveau de la mer et aux changements climatiques sur le fleuve Fraser (Fraser Basin Council, 2014), et émettait également des lignes directrices pour la gestion de l'utilisation des terres à risque d'inondation côtière, et des digues de mer (Ausen Sandwell, 2011). De plus, les ingénieurs et les géoscientifiques de la Colombie-Britannique ont publié des lignes directrices pour la pratique professionnelle concernant les évaluations des inondations dans le contexte des changements climatiques (Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia, 2012). Le ministère des Forêts, des Territoires et des Opérations de ressources naturelles fournit des cartes des risques d'inondation côtière qui indiquent les répercussions de l'élévation du niveau de la mer sur l'ensemble du littoral de la province pour l'année 2100 (gouvernement de la Colombie-Britannique, 2016b). Les cartes indiquent clairement que d'ici 2100, la région près du port de Vancouver sera une région à risque élevé d'inondation, présentant des risques pour les infrastructures portuaires qui pourraient perturber la circulation de marchandises et les services dans et hors de la région du corridor sud de la porte d'entrée du Pacifique.

7.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

Le vaste réseau de stations de surveillance et de services de prévisions météorologiques pour le secteur maritime en Colombie-Britannique représente une réponse primaire à l'atténuation des risques climatiques. Le secteur ajuste ses pratiques pour gérer les intempéries, et pourrait bénéficier de l'ajustement des pratiques afin de tenir compte des changements climatiques à venir. Les risques à long terme pour les infrastructures côtières, y compris les ports, associés à l'élévation du niveau de la mer sont reconnus par le gouvernement provincial. Ce dernier a mis en place un plan d'action concret qui comprend la surveillance et des exigences précises pour l'entretien et l'amélioration des digues de mer.

8.0 PRATIQUES PROVINCIALES D'ADAPTATION AU CLIMAT

Le gouvernement de la Colombie-Britannique tente de mieux préparer la province à l'adaptation aux changements climatiques. Ces efforts comprennent un plan intitulé *Preparing for Climate Change: British Columbia's Adaptation Strategy* (Plan de préparation aux changements climatiques : Stratégie d'adaptation de la Colombie-Britannique) pour l'ensemble de la province, dont les objectifs sont d'établir une base de connaissances et d'outils, de tenir compte de l'adaptation dans le processus décisionnel du gouvernement, et d'évaluer les risques et de mettre en œuvre des mesures d'adaptation prioritaires dans les secteurs vulnérables au climat (ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique, 2010).

D'un intérêt particulier pour le transport, le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique a élaboré un ensemble de pratiques exemplaires théoriques fondées sur les résultats de leurs évaluations de la vulnérabilité aux changements climatiques des réseaux routiers de la Colombie-Britannique (ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique, 2014e). Ces meilleures pratiques conceptuelles sont généralement applicables à tous les systèmes d'infrastructure de transport, et sont regroupées en trois catégories principales : données, personnel et processus (voir l'encadré).

MINISTÈRE DES TRANSPORTS ET DE L'INFRASTRUCTURE DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE – PRATIQUES D'ADAPTATION AU CLIMAT

Les pratiques exemplaires conceptuelles élaborées par le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique comprennent les pratiques particulières qui suivent. Pour consulter le document complet sur les pratiques exemplaires, veuillez ouvrir le lien suivant : http://www.th.gov.bc.ca/climate_action/documents/MoTI-Climate%20Adaptation_Best%20Practices.pdf

Données

- Tenir à jour les données météorologiques et climatiques
- Établir des programmes de surveillance
- Toujours tenir compte des effets des événements extrêmes de précipitations
- Tenir compte de la combinaison et de la séquence des événements
- Identifier les sources offrant des renseignements rigoureux sur les changements climatiques
- Veiller à ce que les projections soient basées sur un ensemble de résultats générés par différents modèles climatiques

Personnel

- Rechercher l'équilibre entre les méthodes informatiques et le jugement professionnel
- Recenser, surveiller et gérer les problématiques relatives aux changements climatiques
- Mettre en place des équipes multidisciplinaires d'examen sur les changements climatiques
- Collaborer avec des professionnels qualifiés en matière climatique et météorologique

Processus

- Fournir des outils et la formation appropriée en matière d'évaluation de la vulnérabilité
- Utiliser la gestion du risque pour aborder les incertitudes
- Intégrer les mesures d'adaptation aux changements climatiques dans les cycles de planification
- Rendre obligatoire la prise en considération des changements climatiques dans les activités courantes

9.0 LACUNES DANS LES RENSEIGNEMENTS ET LES CONNAISSANCES QUI NUISENT AU PROCESSUS DÉCISIONNEL

Selon la présente évaluation, les lacunes qui suivent dans les connaissances et les renseignements doivent être traitées de manière prioritaire afin de faire avancer le processus décisionnel lié à l'adaptation des systèmes de transport en Colombie-Britannique.

- **Événements extrêmes de précipitations.** Les événements extrêmes de précipitations sont la principale préoccupation liée au climat pour les systèmes de transport routier et ferroviaire en Colombie-Britannique. Des travaux sont en cours pour caractériser la nature, la fréquence et l'intensité futures de ces événements. La portée de ces travaux pourrait être élargie pour faire en sorte que les décideurs disposent des outils et des renseignements suffisants pour orienter la conception, l'exploitation et la tenue à jour du système pour les conditions météorologiques et climatiques extrêmes futures. De plus, il serait utile de réaliser d'autres travaux pour caractériser les conditions qui ont une incidence sur le transport maritime ainsi que pour prévoir la fréquence et l'intensité des événements de précipitations.
- **Répercussions de l'élévation du niveau de la mer sur les systèmes d'infrastructure côtière.** L'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête présentent des risques pour les infrastructures côtières de la Colombie-Britannique, notamment l'aéroport international de Vancouver, l'aéroport de Sandspit et le Port Metro Vancouver. La Colombie-Britannique possède un programme actif pour évaluer ces risques et orienter les décideurs relativement aux mesures d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer. Les évaluations du risque continueront d'être un outil clé afin d'assurer que les propriétaires et les exploitants d'installations côtières essentielles en Colombie-Britannique possèdent l'information appropriée pour construire, modifier et entretenir les infrastructures qui sont adaptées à l'élévation du niveau de la mer.
- **Événements de vents marins.** Les vents violents peuvent occasionner l'annulation des départs et des retards dans le système de transport maritime. Les projections relatives aux changements dans la fréquence et l'intensité des événements de vents violents ne sont pas fiables. Des travaux supplémentaires dans ce domaine pourraient fournir aux décideurs une meilleure base pour planifier et mettre en œuvre des changements opérationnels pour l'adaptation aux changements dans la fréquence et l'intensité des événements de vents violents.
- **Problème de visibilité sur le continent.** La visibilité peut avoir des répercussions importantes sur les opérations routières et aéroportuaires en Colombie-Britannique continentale. Bien que ces problématiques soient prises en charge, les causes de la faible visibilité (brouillard) sur le continent, et les changements futurs probables dans les conditions qui ont conduit à ces événements en particulier, ne sont pas bien comprises. Des connaissances accrues sur ces répercussions météorologiques pourraient aider les décideurs à mettre en place de nouveaux systèmes et de nouvelles procédures d'adaptation aux changements prévus.

De manière générale, dans tous les modes de transport maritime en Colombie-Britannique, l'adaptation aux changements climatiques s'est faite de façon réactive, les problématiques ayant été abordées uniquement après que les répercussions eurent été observées. Cependant, pour certaines infrastructures, les récentes évaluations de la vulnérabilité se sont penchées sur les enjeux à long terme liés aux changements climatiques. Ces études sur les changements climatiques et leurs répercussions sur l'infrastructure permettront aux exploitants de mieux anticiper les problèmes, et favoriseront la mise en œuvre de mesures d'adaptation des installations, des actifs et des opérations aux risques posés par les changements climatiques. Compte tenu la contribution des secteurs ferroviaire, aérien et maritime aux économies provinciale et nationale, la réalisation d'autres évaluations de la vulnérabilité aux changements climatiques dans tous les modes de transport pourrait être bénéfique.

10.0 CONCLUSION

Le présent chapitre a démontré la vulnérabilité du système de transport de la Colombie-Britannique aux conditions météorologiques extrêmes et aux changements climatiques, présenté des pratiques pour réduire ces risques, et relevé les domaines pouvant nécessiter du travail supplémentaire. Le réseau de transport de la province est essentiel pour la circulation efficace des personnes et des marchandises par l'entremise des voies aérienne, maritime, ferroviaire et routière, à la fois à l'intérieur de la province et entre l'Amérique du Nord et l'Asie. Cependant, de nombreux corridors de transport en Colombie-Britannique, qui traversent des terrains montagneux et longent le littoral, sont vulnérables aux perturbations, et même aux défaillances dues aux événements climatiques.

Le chapitre permet également de constater que, de prime abord, les exploitants d'infrastructure en Colombie-Britannique réagissent aux problèmes plutôt que de les anticiper et de se préparer aux changements. Par conséquent, les incidences sur l'infrastructure pourraient être plus graves que si des mesures d'adaptation proactives et adaptatives étaient prises. Appuyées par des outils de collecte de données climatiques et météorologiques plus rigoureux et des directives efficaces en matière de modélisation et d'interprétation des données, les approches proactives (à savoir, des évaluations de la vulnérabilité, des exigences sur la conception de l'infrastructure) pourraient offrir aux décideurs du domaine du transport une base plus solide pour la prise de décisions adaptatives. Le partage d'études sur la vulnérabilité au climat entre les exploitants et les divers modes de transport pourrait permettre l'amélioration des connaissances et avantager le système de transport dans son ensemble.

Le ministère des Transports et de l'Infrastructure de la Colombie-Britannique a évalué la vulnérabilité aux changements climatiques de plusieurs routes de la province, et est l'une des premières administrations à exiger que les plans de conception de l'infrastructure routière pour le Ministère tiennent compte des conséquences des changements climatiques. C'est un indicateur important que les efforts d'adaptation dans le secteur des transports de la Colombie-Britannique progressent, tout en reconnaissant qu'il reste du travail à faire.

RÉFÉRENCES

- Administration de l'aéroport de Vancouver. (2014). *Vancouver Airport Authority 2014 annual report*.
- Alaskarails. (2015). Canadian National's AquaTrain. Repéré à <http://www.alaskarails.org/industries/aquatrain.html>
- Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia (APEGBC). (2012). *Professional practice guidelines – Legislated flood assessments in a changing climate in BC*. Repéré à <https://www.apeg.bc.ca/For-Members/Professional-Practice/Professional-Practice-Guidelines>
- 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.
- Ausen Sandwell. (2011). *Climate change adaption guidelines for sea dikes and coastal flood hazard land use*. British Columbia Ministry of Environment, Project 14311. Repéré à http://www.env.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/pdfs_word/draft_policy_rev.pdf
- British Columbia Ferry Services Inc. (2015). *Traffic statistics system : Total vehicle and passengers counts by route for April 2015*. Repéré à http://www.bcferry.com/files/AboutBCF/traffic_stats/April_2015_Traffic_Stats.pdf
- British Columbia Ferry Services Inc. (2016). *Is the ferry on time?* Repéré à http://www.bcferry.com/current_conditions/On_Time.html
- British Columbia Ministry of Environment. (2010). *Preparing for climate change : British Columbia's adaptation strategy*. Repéré à www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/climate-change/policy-legislation-and-responses/adaptation/adaptation_strategy.pdf
- British Columbia Ministry of Environment. (2015). *Ecoregion classification system*. Repéré à <http://www.env.gov.bc.ca/ecology/ecoregions/province.html>
- British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure. (2014a). *B.C. on the move : A 10-year transportation plan*. Discussion guide and survey : Public engagement, 14 octobre-12 décembre, 2014. Repéré à <http://engage.gov.bc.ca/transportationplan/process/>
- British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure. (2014b). *Analysis report for the climate change engineering vulnerability assessment – Final report*. Northwest Hydraulic Consultants et Pacific Climate Impacts Consortium.
- British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure. (2014c). *Review and analysis of climate change vulnerability assessments of Canadian water management and drainage infrastructure*. Nodelcorp Consulting Inc. et Pacific Climate Impacts Consortium. Repéré à http://www.th.gov.bc.ca/climate_action/documents/hwy_Risk_Assessments_from_Climate_Changes_Review.pdf
- British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure. (2014d). *Climate change engineering vulnerability assessment of three British Columbia highway segments : Highway 20 in the Bella Coola region, Highway 37A in the Stewart region, Highway 97 in the Pine Pass region*. Nodelcorp Consulting Inc. Repéré à http://www.th.gov.bc.ca/climate_action/documents/hwy20_bella_coola-hwy37A_Stewart-hwy97_Pine%20Pass.pdf
- British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure. (2014e). *Considerations for addressing climate change for water handling infrastructure in highway management, design, operation and maintenance in British Columbia : Best practices document*. Nodelcorp Consulting Inc., et Pacific Climate Impacts Consortium.
- British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure. (2015). *DriveBC data now online and open for business*. Repéré à <https://news.gov.bc.ca/releases/2015TRAN0118-001511>
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (1996). *Rapport d'enquête sur accident ferroviaire. Déraillement. Canadien Pacifique Limitée. Point milliaire 111,0, subdivision Nelson, près de Procter (Colombie-Britannique)*. 20 janvier 1995. Rapport numéro R95V0017. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/1995/r95v0017/r95v0017.asp>
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (1998). *Rapport d'enquête sur accident ferroviaire. Déraillement. Canadien National. Train numéro Q-102-51-26. Point milliaire 106,15, subdivision Ashcroft, Conrad (Colombie-Britannique)*. 26 mars 1997. Rapport numéro R97V0063. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/1997/r97v0063/r97v0063.asp>
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2000). *Rapport d'enquête sur accident ferroviaire. Déraillement en voie principale. Chemin de fer Canadien Pacifique. Train de marchandises numéro 981-31. Point milliaire 59,1, subdivision Nelson, Creston (Colombie-Britannique)*. 31 mai 1998. Rapport numéro R98V0100. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/1998/r98v0100/r98v0100.asp>
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2003). *Rapport d'enquête aéronautique. Vol VFR dans des conditions météorologiques défavorables et collision avec le relief. Cessna 182R Skylane (C-GASB). Needle Peak (Colombie-Britannique)*. 6 juin 2002. Rapport numéro A02P0109. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2002/a02p0109/a02p0109.asp>
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2005). *Rapport d'enquête aéronautique. Maîtrise difficile en vol en raison du givrage de la cellule. Beechcraft King Air 200 C-FCGL exploité par Northern Thunderbird Air Inc. 80 nm au nord-est de Kelowna (Colombie-Britannique)*. 19 janvier 2005. Rapport numéro A05P0018. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2005/a05p0018/a05p0018.asp>

Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2007). *Rapport d'enquête aéronautique. Sortie en bout de piste et collision avec le relief. Piper PA-31-350 Chieftain C-GNAY exploité par Orca Airways Ltd. Powell River (Colombie-Britannique)*. 8 mars 2006. Rapport numéro A06P0036. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2006/a06p0036/a06p0036.asp>

Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2008). *Rapport d'enquête aéronautique. Perte de référence visuelle et collision avec le relief. L'hélicoptère Bell 212 C-GERH exploité par Sequoia Helicopters Limited. 9 nm à l'ouest de Golden (Colombie-Britannique)*. 7 février 2008. Rapport numéro A08P0035. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2008/a08p0035/a08p0035.asp>

Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2010). *Rapport d'enquête ferroviaire. Déraillement en voie principale. Canadien National. Train de marchandises numéro J31753-15. Point miliaire 7,9, subdivision Yale, Komo (Colombie-Britannique)*. 17 novembre 2009. Rapport numéro R09V0235. <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/2009/r09v0235/r09v0235.asp>

Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2012). *Rapport d'enquête ferroviaire. Déraillement en voie principale. Du train-bloc de charbon no 861-060 exploité par le chemin de fer Canadien Pacifique. Au point miliaire 30,0 de la subdivision Cranbrook à Fernie (Colombie-Britannique)*. 8 mars 2011. Rapport numéro R11V0057. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/2011/r11v0057/r11v0057.asp>

Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2013a). *Rapport d'enquête aéronautique. Collision avec le relief. Piper PA-30, Twin Comanche, C-GLGJ. 18 NM à l'ouest de Kelowna (Colombie-Britannique)*. 13 août 2012. Rapport numéro A12P0136. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2012/a12p0136/a12p0136.asp>

Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2013b). *Rapport d'enquête aéronautique. Perte des repères visuels et collision avec le relief. Bailey Helicopters Ltd. Eurocopter AS350-B2 (Hélicoptère), C-FBHN. À 14 NM l'ouest de Terrace (Colombie-Britannique)*. 1 juin 2012. Rapport numéro A12P0079. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2012/a12p0079/a12p0079.asp>

Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2013c). *Rapport d'enquête aéronautique. Sortie de piste. Northern Thunderbird Air Inc., Beechcraft 1900C, C-GCMZ. Blue River (Colombie-Britannique)*. 17 mars 2012. Rapport numéro A12P0034. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/aviation/2012/a12p0034/a12p0034.asp>

CBC News. (2013, November 3). B.C. ferry crashes leaving Mayne Island : Queen of Nanaimo pushed by high winds. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/b-c-ferry-crashes-leaving-mayne-island-1.2335767>

CN. (2015). Cartes. Repéré à <http://www.cn.ca/fr/notre-entreprise/notre-reseau/cartes>

CP. (2015). Network and facilities. Repéré à <http://www.cpr.ca/en/choose-rail/network-and-facilities>

Fraser Basin Council. (2014). *Adaptation guidelines for flood hazards and risk assessments*. Repéré à http://www.fraserbasin.bc.ca/_Library/CCAQ_BCRAC/bcrac_profile_flood_hazards-risks_4b.pdf

Fraser Basin Council. (2015). *A climate adaptation case study in Canada's mining sector : Addressing weather-related challenges at the Galore Creek project, northwestern British Columbia*. Glare Creek Mining Corporation. Repéré à http://www.retooling.ca/_Library/Mining_Essentials/fbc_mining_case_study_galore_creek.pdf

Gouvernement de la Colombie-Britannique. (2011a). *The southern corridor, Canada's Pacific Gateway*. Repéré à http://www.pacificgateway.gov.bc.ca/documents/2010-2011/CPG_English/CPG_S_Corridor-English.pdf

Gouvernement de la Colombie-Britannique. (2011b). *The northern corridor, Canada's Pacific Gateway*. Repéré à http://www.pacificgateway.gov.bc.ca/documents/2010-2011/CPG_English/CPG_N_Corridor-English.pdf

Gouvernement de la Colombie-Britannique. (2011c). *Canada's Pacific Gateway*. Repéré à http://www.pacificgateway.gov.bc.ca/documents/2010-2011/CPG_English/CPG_Brochure-English.pdf

Gouvernement de la Colombie-Britannique. (2015a, March 18). *Quarterly population highlights, Issue 10-04*. Repéré à http://www.bcsstats.gov.bc.ca/AboutUs/News/15-03-18/Quarterly_Population_Highlights_-_Issue_14-04.aspx

Gouvernement de la Colombie-Britannique. (2015b, March 18). *2014 Sub-provincial population estimates*. Repéré à <http://www.bcsstats.gov.bc.ca/StatisticsBySubject/Demography/PopulationEstimates.aspx>

Gouvernement de la Colombie-Britannique. (2016a). *Certified airports in B.C.* Repéré à <http://www2.gov.bc.ca/gov/content/transportation/passenger-travel/air-or-rail-travel/certified-airports-in-bc>

Gouvernement de la Colombie-Britannique. (2016b). *Coastal flood hazard areas in British Columbia*. Repéré à http://www.env.gov.bc.ca/wsd/public_safety/flood/pdf_drawings/

Gouvernement du Canada. (2016). *Météo maritime pour : Pacifique – Côte sud*. Repéré à https://meteo.gc.ca/marine/region_f.html?mapID=02

Griffin, B., Kohfeld, K., Cooper, A., et Boenisch, G. (2010). *Wind speed variability and adaptation strategies in coastal regions of the Pacific Northwest*. School of Resource and Environmental Management, Simon Fraser University, Burnaby, BC. Repéré à http://www.sfu.ca/ccirc/workshop-10_04/brad_griffin.pdf

Groupe de la Banque mondiale. (2016). *Trafic de conteneurs dans les ports (TEU : unités équivalentes 20 pieds)*. Repéré à <http://donnees.banquemonde.org/indicateur/IS.SHP.GOOD.TU/countries/1W?display=graph>

- Ingénieurs Canada. (2008, avril). *Adaptation au changement climatique : Première évaluation nationale de la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques au Canada*. Conseil canadien des ingénieurs. Repéré à <https://pievc.ca/fr/documents-french>
- James, T., Henton, J., Leonard, L., Darlington, A., Forbes, D., et Craymer, M. (2014). *Relative sea-level projections in Canada and the adjacent mainland United States*. Commission géologique du Canada. Ressources naturelles Canada. Dossier public 7737. Repéré à http://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/geott/ess_pubs/295/295574/of_7737.pdf
- Kerr Wood Leidal. (2015). *Lower mainland flood management strategy – Analysis of flood scenarios*. Fraser Basin Council. Repéré à www.fraserbasin.bc.ca/_Library/Media/backgrounders_lmfsls.pdf
- Klock, R. et Mullock, J. (2001). *Le temps en Colombie-britannique : Prévision de zone graphique 31 – Région du Pacifique*. NAV Canada. Repéré à <http://www.navcanada.ca/FR/media/Publications/Local%20Area%20Weather%20Manuals/LAWM-BC-FR.pdf>
- KnowBC. (2016). BC facts. Harbour Publishing. Repéré à <http://knowbc.com/BC-Facts>
- Murdock, T.Q., et Sobie, S.R. (2013). *Climate extremes in the Canadian Columbia Basin : A preliminary assessment*. Repéré à <http://www.pacificclimate.org/resources/publications?-tid%5B%5D=48&keys>
- Pacific Climate Impacts Consortium. (2013a). *Atmospheric rivers : State of knowledge report*. Repéré à www.pacificclimate.org/sites/default/files/publications/Atmospheric%20Report%20Final%20Revised.pdf
- Pacific Climate Impacts Consortium. (2013b). *Regional climate summaries*. Repéré à [https://www.pacificclimate.org/news-and-events/news/2013/regional-climate-summaries](http://www.pacificclimate.org/news-and-events/news/2013/regional-climate-summaries)
- Pacific Climate Impacts Consortium. (2013c). *Plan2adapt*. Repéré à [https://www.pacificclimate.org/analysis-tools/Plan2Adapt](http://www.pacificclimate.org/analysis-tools/Plan2Adapt)
- Port Metro Vancouver. (2014). *Port Metro Vancouver financial 2014 annual report*. Repéré à http://issuu.com/portmetrovancouver/docs/pmv_2014financialreport?e=3721702/13278565
- Port Metro Vancouver. (2015a). *Container capacity improvement program : Planning ahead for Canada's trade future*. Repéré à <http://www.portmetrovancouver.com/wp-content/uploads/2015/05/pmv-container-capacity-improvement-program-update-may-2015.pdf>
- Port Metro Vancouver (2015b). *Statistics overview 2014*. Repéré à www.portmetrovancouver.com/wp.../2015/.../2014-statistics-overview.pdf
- Port of Prince Rupert. (2014). *Intermodal*. Repéré à <http://www.rupertport.com/shipping/intermodal>
- Statistique Canada. (2011). *Rencensement de la population de 2011. Population urbaine et rurale, par province et territoire (Colombie-Britannique)*. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/demo62k-fra.htm>
- Statistique Canada. (2015a). *Tableau 284-0038 - Produit intérieur brut, en termes de dépenses, provinciaux et territoriaux, annuel (dollars sauf indication contraire), CANSIM (base de données)*. Repéré à <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?id=3840038&retrLang=fra&lang=fra>
- Statistique Canada. (2015b). *Tableau 405-0004 - Immatriculations de véhicules automobiles, par province et territoire (Saskatchewan, Alberta, Colombie-Britannique), CANSIM (base de données)*. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/trade14c-fra.htm>
- Statistique Canada. (2015c). *Tableau 404-0021 - Transport ferroviaire, origine et destination des marchandises, annuel (tonnes), CANSIM (base de données)*. Repéré à <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?id=4040021&retrLang=fra&lang=fra>
- TranBC. (2016). *Fighting a flood: Highway 20, one year later*. Ministry of Transportation and Infrastructure Online. Repéré à <http://tranbc.ca/2011/10/13/fighting-a-flood-highway-20-one-year-later/#sthash.4lybCyg8.dpbs>
- Transports Canada. (2015). *Transport aérien*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/pacifique/aerien-menu-1381.htm>
- Travel BC. (2016). *British Columbia airlines and freight companies*. Repéré à <http://www.travel.bc.ca/transportation/airlines/>
- Vadeboncoeur, N. (2016). *Perspectives relatives à la région de la côte Ouest du Canada*. 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. 209-256). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- VIA Rail. (2015a). *Le canadien (Ouest du Canada)*. Repéré à http://www.viarail.ca/sites/all/files/media/pdfs/schedules/summer2015/40-41_Toronto-Winnipeg-Jasper-Vancouver.pdf
- VIA Rail. (2015b). *Ouest du Canada*. Repéré à http://www.viarail.ca/sites/all/files/media/pdfs/schedules/winter2015/44-45_Jasper-PrinceGeorge-PrinceRupert.pdf



5 • Prairies

CHAPITRE 5 : LES PRAIRIES

AUTEURS PRINCIPAUX :

AL PHILLIPS¹
WILL TOWNS²

COLLABORATEURS :

PETER DZIKOWSKI (ALBERTA TRANSPORTATION),
HUGH DONOVAN (VILLE D'EDMONTON),
NAOMI HAPPYCHUK (INITIATIVE POUR UNE PROSPÉRITÉ
DURABLE DANS LE NORD, UNIVERSITÉ DE WINNIPEG)

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Phillips, A., et Towns, W. (2017). Les Prairies. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 116-151). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ Transport Institute, Université du Manitoba, Winnipeg (MB)

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

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions.....	118
1.0 Introduction.....	118
1.1 Géographie et environnement physique.....	119
1.2 Économie	120
2.0 Survol du transport dans les Prairies	121
2.1 Transport routier	122
2.1.1 Routes d'hiver	122
2.2 Transport ferroviaire	123
2.3 Transport aérien	123
2.4 Transport maritime	124
3.0 Profil climatique	124
3.1 Tendances passées	124
3.2 Projections	127
3.3 Climat, conditions météorologiques et transport dans les Prairies.....	128
4.0 Transport routier	128
4.1 Impacts sur les infrastructures routières.....	128
4.2 Impacts sur les activités de camionnage.....	129
4.3 Mesures d'adaptation pour l'infrastructure routière	129
4.4 Mesures d'adaptation pour les exploitants du camionnage	133
4.5 Routes d'hiver	134
5.0 Transport ferroviaire.....	137
5.1 Impacts constatés dans le passé et risques futurs.....	137
5.2 Mesures d'adaptation pour les rails	142
6.0 Transport aérien.....	144
6.1 Impacts constatés dans le passé et risques futurs.....	144
6.2 Pratiques d'adaptation	145
7.0 Transport maritime.....	145
7.1 Impacts climatiques et possibilités futures.....	145
7.2 Mesures d'adaptation de l'infrastructure et des activités maritimes.....	146
8.0 Lacunes dans les renseignements et conclusions.....	147
Références	149

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- **Les inondations associées aux épisodes de précipitations extrêmes constituent un facteur qui motive les efforts d'adaptation aux changements climatiques dans le secteur des transports dans les Prairies. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité de ces épisodes est une préoccupation importante pour l'avenir.** Les stratégies de contrôle des inondations (p. ex. des programmes d'amélioration et d'expansion des ponceaux pour réduire les affouillements, l'imperméabilisation des pistes) sont des mesures d'adaptation essentielles pour les services ferroviaires, les aéroports (en particulier dans le nord des Prairies) et les routes de la région à ce jour.
- **La grande variabilité des conditions climatiques dans les Prairies fait en sorte que l'adaptation dans le secteur des transports dans cette région est susceptible de comprendre une combinaison de mesures réactives et de planification proactive.** Étant donné les incertitudes liées au climat et les obstacles liés aux coûts dans le secteur des transports, les décideurs dans les Prairies tendent à examiner les mesures d'adaptation opérationnelles au cas par cas. L'importance de la planification à long terme pour l'infrastructure (y compris les exigences en matière de zonage) est cependant mise en évidence par les dommages causés par les inondations récentes dans le Sud de l'Alberta et du Manitoba.
- **Des efforts sont déployés dans le but de remédier à la vulnérabilité des routes d'hiver à la hausse des températures dans les Prairies.** Bien que les changements de trajets et les mesures d'adaptation techniques aient contribué à prolonger les périodes d'ouverture au cours des dernières années, les réchauffements accrus projetés pourraient nécessiter la mise en œuvre de mesures d'adaptation plus importantes (à savoir, la construction de routes praticables en toutes saisons).
- **Le dégel du pergélisol dans les basses terres de la baie d'Hudson continuera d'être problématique pour la viabilité opérationnelle des services ferroviaires dans la région.** Depuis l'installation des rails dans les années 30, les ingénieurs géotechniques ont fait des efforts coûteux pour stabiliser l'assiette des rails. À long terme, le dégel du pergélisol devrait entraîner une augmentation des problèmes liés à la stabilisation, et ce, même si la disparition du pergélisol pourrait également améliorer la viabilité de certaines techniques.

1.0 INTRODUCTION

Les changements climatiques et les phénomènes météorologiques extrêmes présentent des défis et offrent des possibilités pour les Prairies, y compris pour la vaste infrastructure et les activités de transport de la région. L'un des objectifs du présent chapitre est de déterminer ce que l'on sait de la nature des impacts climatiques (tant positifs que négatifs) qui se font sentir actuellement et qui se feront sentir dans l'avenir dans les trois provinces des Prairies canadiennes, soit le Manitoba, la Saskatchewan et l'Alberta. Le chapitre vise également à recenser et à décrire les efforts déployés par les gouvernements et par les exploitants du transport pour adapter leurs pratiques et améliorer les infrastructures dans le but d'améliorer la résilience du réseau de transport de la région.

Bien qu'elles soient collectivement appelées « les Prairies » dans le présent chapitre à des fins de simplicité, les trois provinces sont bien distinctes. La section suivante examine quelquesunes des principales caractéristiques géographiques et économiques de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Manitoba. Un contexte régional plus spécifique est fourni lorsque nécessaire tout au long du chapitre. Les sections qui suivent se concentrent sur les impacts climatiques et sur les pratiques d'adaptation qui y sont associés pour chaque mode majeur de transport, les secteurs routier, ferroviaire, aérien et maritime, en fonction de l'information disponible et des expériences des praticiens.

1.1 GÉOGRAPHIE ET ENVIRONNEMENT PHYSIQUE

Les Prairies représentent collectivement environ 20 % de la superficie totale du territoire terrestre et des plans d'eau du Canada (Statistique Canada, 2005). Les Prairies s'étendent vers l'ouest de la baie d'Hudson à la crête des montagnes Rocheuses, traversant plusieurs grands bassins hydrographiques et zones géographiques (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). Il en résulte une importante diversité climatique (figure 1).

Les plaines arides de l'écozone centresud des Prairies occupent 25 % de la superficie terrestre de la région, caractérisée par des déficits hydriques persistants et souvent marqués. Cette écozone est le centre agricole et industriel de la région et l'une des plus largement modifiées au Canada, seule une fraction des prairies et moins de la moitié des zones humides qui existaient avant la colonisation européenne subsistent aujourd'hui (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). La région s'ouvre sur des plaines boréales dans le centre du Manitoba, le centre de la Saskatchewan et dans la majeure partie du centre et du nord de l'Alberta, une région caractérisée par des forêts mixtes et de conifères (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). Le bouclier boréal se trouve au nord et à l'est des plaines intérieures dans le nord de la Saskatchewan et le nordest du Manitoba.

Les quatre autres écozones se trouvent dans les zones limitrophes des Prairies, abritant une faible proportion de la superficie et de la population de la région. La taïga des plaines s'étend de la vallée du fleuve Mackenzie dans les Territoires du Nord-Ouest aux vallées tributaires du nordouest de l'Alberta. Elle contient des forêts dont la productivité est limitée en raison d'un climat plus frais et plus courte saison de croissance (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). La taïga du bouclier couvre la région subarctique du Canada, y compris dans la partie nord du Manitoba et de la Saskatchewan et le nord de l'Alberta. Les plaines hudsoniennes se trouvent dans le nordest des Prairies (qui renferment les basses terres de la baie d'Hudson). Elles sont composées en grande partie de vastes zones humides (Beaudoin et coll., 1997). La Cordillère montagnarde se trouve dans le sudouest de l'Alberta. La Cordillère comporte une grande diversité écologique associée à des paysages de hauts reliefs, allant des prairies à fétuque, de faible élévation, à la forêt montagnarde, aux forêts subalpines et à la toundra alpine (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). Les manteaux neigeux et les glaciers de montagne de la Cordillère alimentent la plupart des rivières et l'approvisionnement en eau du sud des Prairies (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008).

Dans les trois provinces, les climats sont tempérés, mais les températures et les niveaux de précipitations sont généralement plus élevés dans le sud, bien que les montagnes Rocheuses créent des variations climatiques localisées. En règle générale, les altitudes deviennent de plus en plus élevées d'est en ouest. Churchill, au Manitoba, qui se trouve au niveau de la mer sur la rive de la baie d'Hudson, représente le seul point d'accès des Prairies aux eaux marines. Presque toutes les infrastructures routières et ferroviaires sont concentrées dans l'écozone des Prairies, qui comprend également les cinq plus grandes villes de la région.

On trouve à l'est des montagnes rocheuses quelques limitations physiques aux moyens de transport de surface dans les Prairies. Les montagnes représentent une barrière évidente, bien que des corridors dans les Rocheuses existent depuis de nombreuses années. L'un des plus importants corridors est le col Crowsnest, qui relie par rails et par route l'Alberta et la ColombieBritannique (Babaian, 1985). Yellowhead, Kicking Horse, Howse, Athabasca et Vermillion sont également des routes montagneuses importantes. Le risque d'engorgement dans ces corridors de haute altitude représente l'un des principaux défis en matière de transport de surface dans les Prairies.

Dans les basses terres de la baie d'Hudson, le muskeg (« un tapis végétal vivant [recouvrant] la tourbe en présence d'une nappe phréatique très élevée » [Lautala et coll., 2008]) représente un autre défi en matière de transport. Le pergélisol contribue au faible niveau de compressibilité du terrain (Lautala et coll., 2008). Par conséquent, il est difficile de maintenir la stabilité des plateformes routières et des assiettes des rails dans ces environnements.

Figure 1 : Écozones des provinces des Prairies. (Source : Ressources naturelles Canada)

1.2 ÉCONOMIE

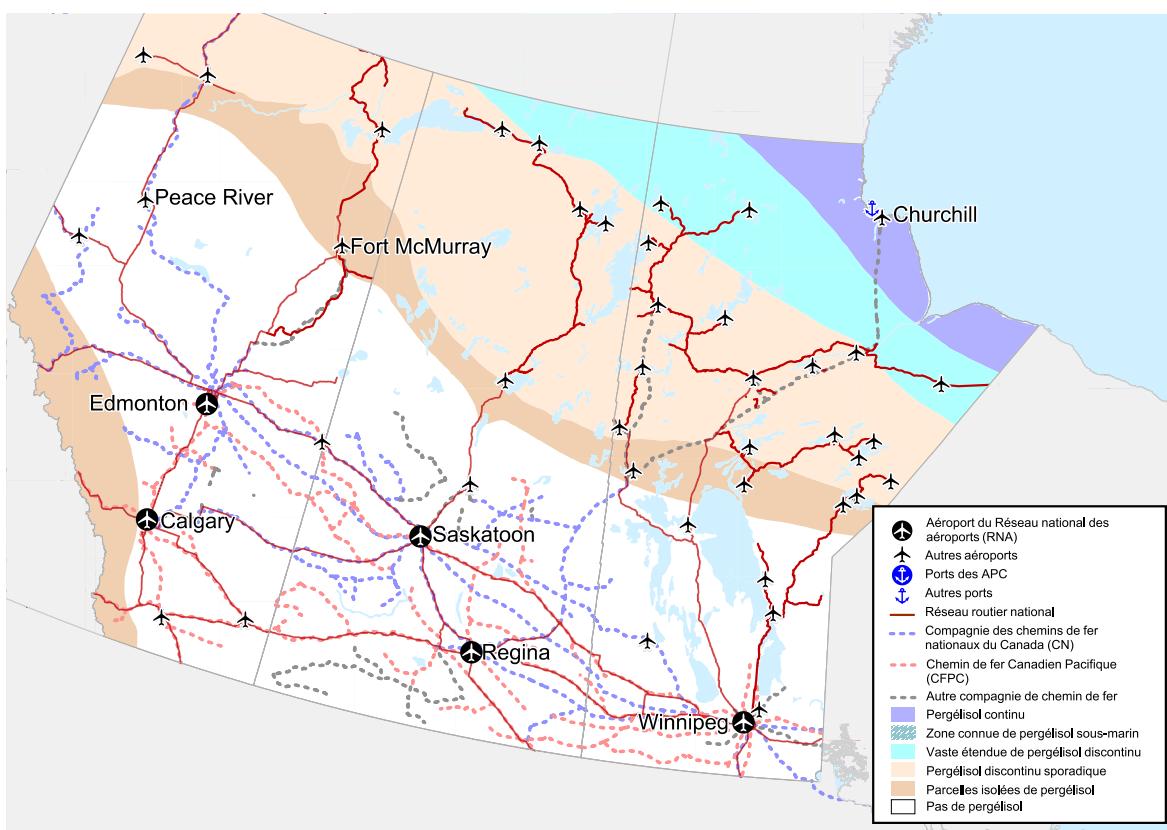
La force économique des Prairies provient de l'extraction des ressources naturelles. De 2010 à 2011, le produit intérieur brut (PIB) des trois provinces collectivement a augmenté de 11,1 % pour atteindre 429,5 milliards de dollars, soit près du double du taux de croissance nationale. En 2014, la contribution de la région au PIB du Canada totalisait 25,6 %. En 2014, l'Alberta a contribué la plus grande part du PIB combiné des Prairies, principalement en raison de ses vastes réserves de pétrole et de gaz et de sa grande population. En 2013, la contribution de l'Alberta au PIB régional était de 72 %, suivie de la Saskatchewan (14,7 %) et du Manitoba (13 %) (Statistique Canada, 2014a).

La part du PIB des Prairies découlant du transport et de l'entreposage est demeurée stable de 2009 à 2013, allant de 4,3 % à 4,4 % (Statistique Canada, 2014a). Alors que la désignation du transport et de l'entreposage du Système de classification des industries en Amérique du Nord représente la mesure la plus directe des contributions économiques liées au transport, le transport permet indirectement de nombreuses autres formes d'activités et de croissance économiques (Ebert, 2000).

2.0 SURVOL DU TRANSPORT DANS LES PRAIRIES

Le réseau de transport de la région des Prairies est vaste et composé de réseaux routiers, ferroviaires et aériens offrant diverses options pour le transport des personnes et des marchandises. Alors que le réseau de transport de surface des Prairies soutient une part importante de l'activité maritime d'autres régions du Canada, le transport maritime joue un rôle moins important dans les Prairies. Le seul port arctique du Canada se trouve à Churchill, au Manitoba. En 2016, en raison de la réduction du volume de céréales transitant par le port de Churchill, son propriétaire, la société OmniTRAX, a annoncé la fermeture du port pour le transport des céréales. À l'heure actuelle, le port demeure ouvert et maintient ses activités visant le réapprovisionnement du Nunavut. La figure 2 présente un aperçu des principales infrastructures de transport dans les Prairies.

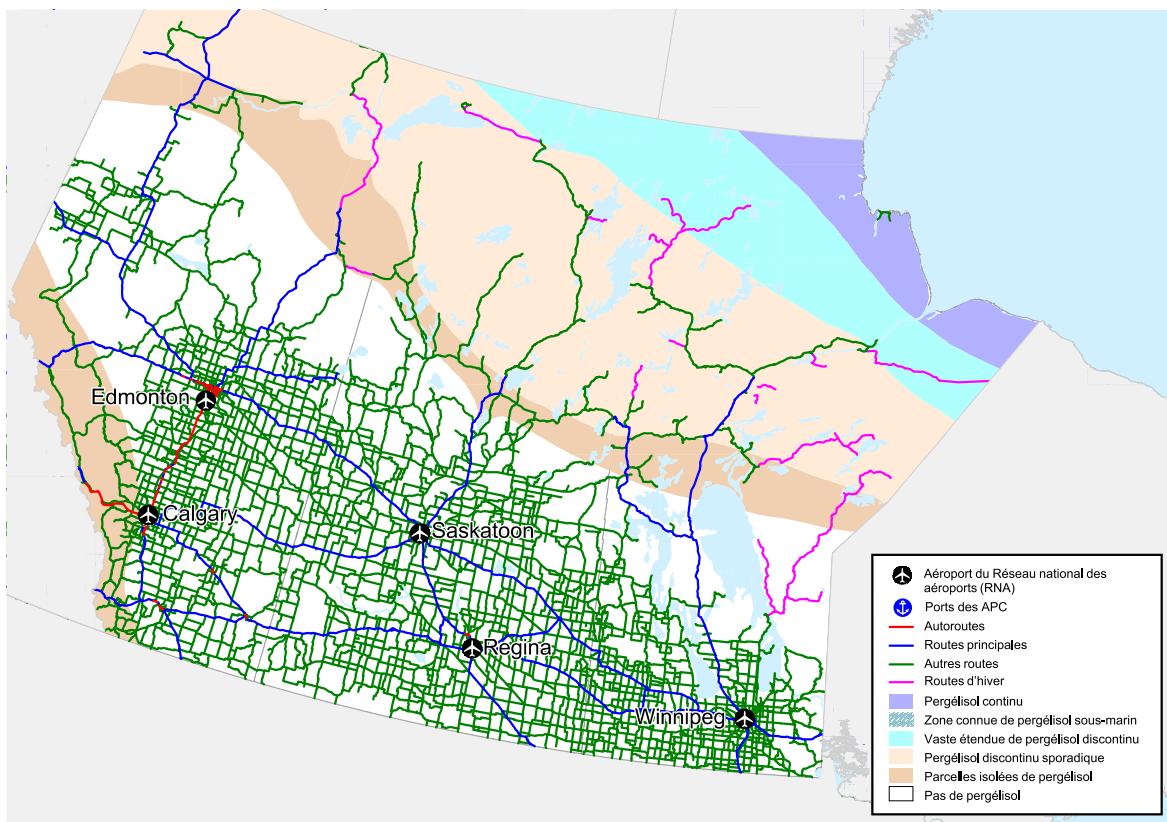
Figure 2 : Les principales infrastructures de transport dans les Prairies, y compris les zones de pergélisol. Notez que le réseau routier national représenté dans la figure comprend les routes d'hiver.



2.1 TRANSPORT ROUTIER

Les Prairies comptent un nombre relativement élevé de kilomètres de route par habitant en raison d'un vaste réseau routier municipal et provincial et d'une densité de la population plus faible que la moyenne nationale (3,3 km² contre 3,7 personnes par km²) (Statistique Canada, 2011). Les Prairies comptent 47 % des routes publiques canadiennes, bien que ce nombre chute à 26 % si l'on tient compte uniquement des routes goudronnées (Transports Canada, 2015). La Saskatchewan représente près de la moitié (48 %) du total de kilomètre routier de la région (295 100 km), l'Alberta occupe le deuxième rang avec 228 600 km (37 % des kilomètres routiers des Prairies), suivie du Manitoba avec 91 700 km (15 %) (Transports Canada, 2015). La figure 3 démontre l'étendue du réseau routier de la région des Prairies.

Figure 3 : Infrastructure routière dans les Prairies.



L'activité de camionnage est importante dans les Prairies; en grande partie, elle soutient le vaste marché de l'exportation agricole. Les postes frontaliers clés de fret routier dans les Prairies comprennent Emerson (Manitoba), Coutts (Alberta) et North Portal (Saskatchewan). Ces postes ont représenté collectivement 12 % du commerce routier du Canada avec les États-Unis en 2014, 9,2 % des exportations et 14,2 % des importations (Transports Canada, 2015).

2.1.1 Routes d'hiver

Les routes d'hiver (figure 3) constituent une partie importante du réseau routier de la région nord des Prairies, offrant un accès saisonnier aux collectivités éloignées et réduisant le tonnage de marchandises requérant le transport aérien plus coûteux. Les routes d'hiver permettent la livraison de nourriture, de carburant, d'équipement médical et de matériaux de construction (réduisant les coûts de ces produits); elles soutiennent également les économies locales et offrent un accès aux soins de santé et à d'autres parties de la région.

Les routes d'hiver du Manitoba, généralement ouvertes de la mijanvier à la mimars, couvrent environ 2 500 km et desservent 28 communautés totalisant 30 000 de population (Taylor et Perry, 2014). Comparativement, les routes d'hiver en Alberta et en Saskatchewan (dont les périodes d'ouverture sont semblables) sont modestes : l'Alberta compte deux routes totalisant 447 km, tandis que les trois routes d'hiver en Saskatchewan couvrent 274 km (Sous-groupe de travail fédéral/provincial/territorial sur les transports du Nord, 2015). On craint que les hivers plus doux associés aux changements climatiques entraînent des périodes d'ouverture raccourcies pour les transporteurs; par contre, comme indiqué à la section 4.5 et étude de cas 3, les saisons d'ouverture ont été plus longues au cours des dernières années (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008).

2.2 TRANSPORT FERROVIAIRE

Le transport ferroviaire contribue de manière importante au transport des marchandises dans les Prairies. Trois chemins de fer de classe 1³ (le Canadien National - CN, le Canadien Pacifique – CP, et Burlington Northern and Santa Fe - BNSF) transportent la grande majorité du fret ferroviaire dans la région. La plupart des voies ferroviaires sont situées dans des zones sans pergélisol. Une exception est la voie ferroviaire reliant Churchill, au Manitoba aux centres d'approvisionnement au sud (figure 2).

Bien que l'étendue du réseau ferroviaire au Canada ait diminué au cours des dernières années, les Prairies ont résisté à cette tendance. En 2012, le réseau régional avait conservé 94 % de son étendue de 2008 (Association des chemins de fer du Canada, 2015). En 2013 :

- l'Alberta avait 6 679 km de voie utilisés par le CN, CP, Great Sandhills Railway, Alberta Prairie Railway Excursions, Great Canadian Railtour Company et VIA;
- la Saskatchewan avait 8 181 km de voie utilisés par le CN, CP, Carlton Trail, Great Western, Great Sandhills Railway, et VIA;
- le Manitoba avait 4 448 km utilisés par le CN, CP, BNSF, Central Manitoba, Hudson Bay et VIA.

Dans les trois provinces, le fret correspondait à environ 98 % de l'utilisation des voies ferrées (en fonction de la consommation de carburant), et le transport des passagers comptait pour le reste. En 2009, 39 millions de tonnes de fret ferroviaire provenaient de l'Alberta, 27 millions de tonnes de la Saskatchewan et 10,6 millions de tonnes du Manitoba (Association des chemins de fer du Canada, 2015).

En 2013, trois des dix principaux postes frontaliers de fret ferroviaire du Canada étaient situés dans les Prairies : Warroad, au MinnesotaSprague, au Manitoba; Portal, au Dakota du NordNorth Portal, en Saskatchewan; et Pembina, au Dakota du NordEmerson, au Manitoba (Transports Canada, 2013).

2.3 TRANSPORT AÉRIEN

Le transport aérien est également un mode de transport important dans les Prairies. La région compte cinq aéroports du Réseau national d'aéroports (dans les villes de Calgary, Edmonton, Saskatoon, Regina et Winnipeg), qui représentent 22 % (28,7 millions) du total des passagers embarqués et débarqués en 2014 au Canada (Transports Canada, 2015). Les embarquements et débarquements dans ces aéroports comptent pour 78 % des déplacements de passagers dans la région en 2014.

Le fret aérien est souvent choisi pour le fret de valeur plus élevée; par conséquent, le fret aérien a tendance à représenter une part plus importante du fret en termes de valeur qu'en termes de poids par rapport aux autres modes. En comptabilisant tous les envois entrants et sortants en 2014

³ Il s'agit des compagnies de chemin de fer dont les revenus dépassent 250 millions de dollars (Association des chemins de fer du Canada, 2015).

(nationaux et internationaux), le Manitoba a transporté 65 873 tonnes, la Saskatchewan 12 077 tonnes et l'Alberta 113 933 tonnes (Statistique Canada, 2014b). Les principaux aéroports du Manitoba sont présentés à la figure 2.

2.4 TRANSPORT MARITIME

Un examen du transport maritime dans les Prairies est essentiellement un examen du port de Churchill au Manitoba (le seul accès des Prairies aux eaux marines). Ouvert en 1931, le port est une artère du nord du Manitoba et de la région du centre de l'Arctique (Government of Manitoba, 2015a). En 2016, la société OmniTRAX, le propriétaire privé du port de Churcill en a annoncé la fermeture pour le transport des céréales en raison de la réduction du volume de céréales transitant par le port. À l'heure actuelle, Le port demeure ouvert et maintient ses activités visant le réapprovisionnement du Nunavut.

Churchill est capable d'accueillir des navires de type Panamax avec quatre postes d'amarrage totalisant plus de 900 m de longueur, bien que ces installations soient modestes par rapport aux autres ports canadiens. Le port de Churchill est exploité durant une saison de navigation de 14 semaines (environ) à partir de la mi-juillet jusqu'à la fin d'octobre ou au début de novembre. On prévoit que la saison de navigation s'allongera de deux à trois semaines au cours du XXI^e siècle, conjugué à un raccourcissement de la saison des glaces de mer dans le détroit d'Hudson (Hochheim et Barber, 2014), offrant de nouvelles possibilités pour le transport de ressources et de réapprovisionnement (Lackenbauer et Lajeunesse, 2014). La durée saisonnière de la glace de mer dans cette région a diminué depuis le début de la collecte de données dans les années 70 (Tivy et coll., 2007; Hochheim et Barber, 2014).

3.0 PROFIL CLIMATIQUE

Les Prairies sont généralement caractérisées par des différences extrêmes dans les températures saisonnières (une plage annuelle excédant 70 °C) et une grande variabilité d'année en année dans les précipitations (causant des inondations fréquentes et des sécheresses récurrentes). En raison de l'emplacement à moyenne latitude de la région à l'ombre pluviométrique des montagnes Rocheuses, le climat est généralement froid et subhumide (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). La zone centrale sud de la région présente un climat subhumide qui devient semiaride en périodes de sécheresse (Lemmen et coll., 1998). L'équilibre hydrique augmente à l'ouest, au nord et à l'est de cette zone centrale. La neige est une forme importante de stockage de l'eau saisonnière dans toute la région. Le chinook, qui peut augmenter la température de l'air de plus de 20 °C et faire disparaître rapidement le manteau neigeux, est un phénomène hivernal commun dans les contreforts et les prairies du sudouest. De violentes tempêtes estivales et la foudre, souvent associées à des chutes de grêle causant des dommages (Kovacs et Thistlethwaite, 2014) et, parfois, des tornades (Environnement Canada, 2015a), sont des risques climatiques importants dans les Prairies.

Dans le contexte des changements climatiques, la raréfaction de l'eau représente un risque pour la région. En outre, les Prairies sont susceptibles de perdre les avantages associés aux hivers froids, notamment en ce qui a trait aux routes d'hiver (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008).

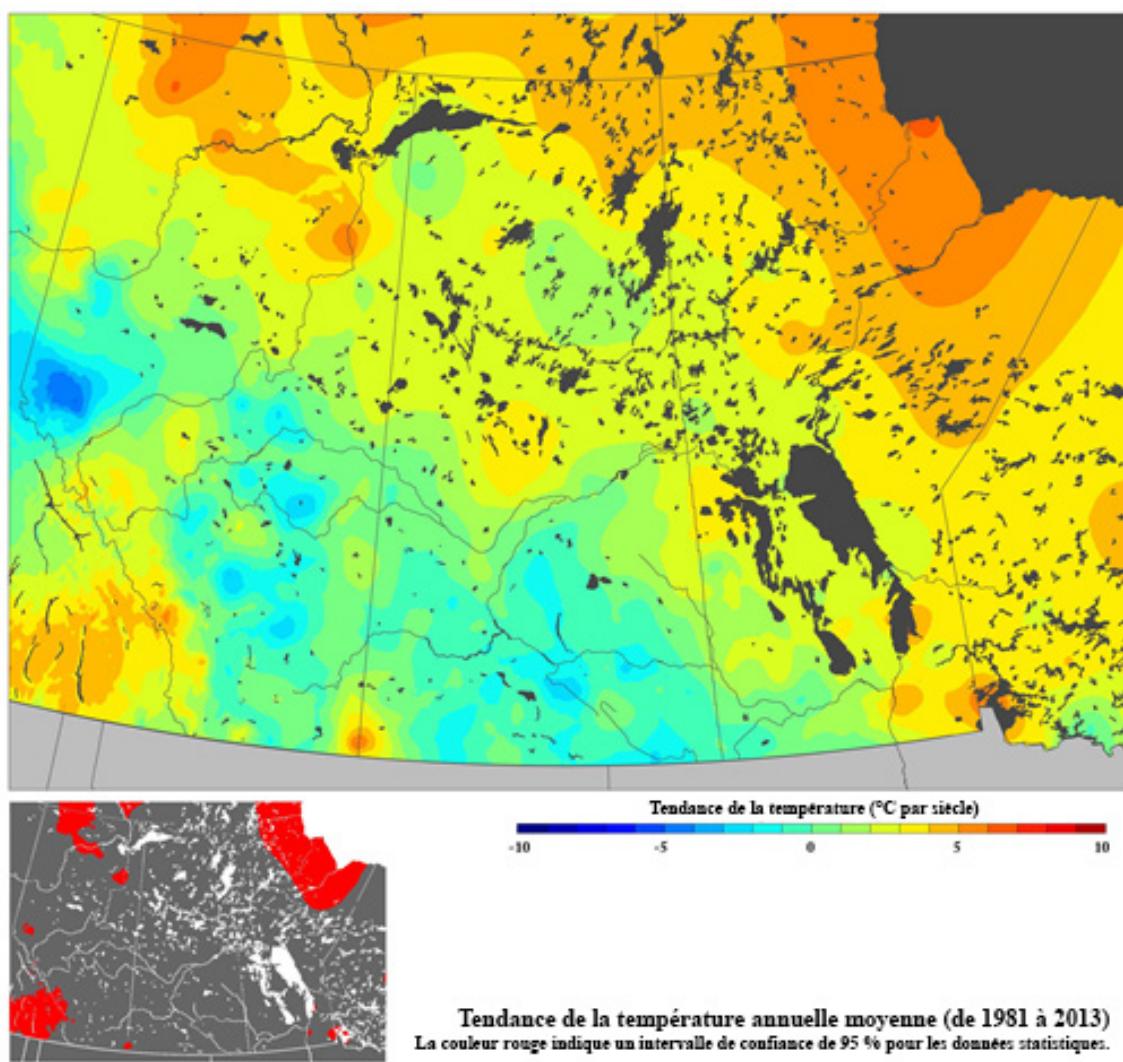
3.1 TENDANCES PASSÉES

Les relevés climatiques instrumentaux pour les Prairies remontent à plus de 120 ans. Malgré une importante variabilité d'une année à l'autre, les relevés à long terme démontrent une augmentation des températures moyennes annuelles, allant de 0,9 °C à Calgary, en Alberta, à 2,7 °C à Swift Current, en Saskatchewan pour la période de 1895 à 2005 (Sauchyn, 2010). Pour la période de 1948 à 2014, la tendance au réchauffement dans le sud des Prairies était de 1,5 °C, les régions du Nord connaissant

un réchauffement plus prononcé (environ 1,8 °C) (Environnement Canada, 2015b). Ce réchauffement correspond à l'augmentation moyenne pour l'ensemble du Canada (1,6 °C) (Environnement Canada, 2015b) et représente environ deux fois l'augmentation de la température moyenne du globe pour la même période (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2013). Le réchauffement est plus évident en hiver et au printemps, alors que le moins se produit à l'automne (Vincent et coll., 2012).

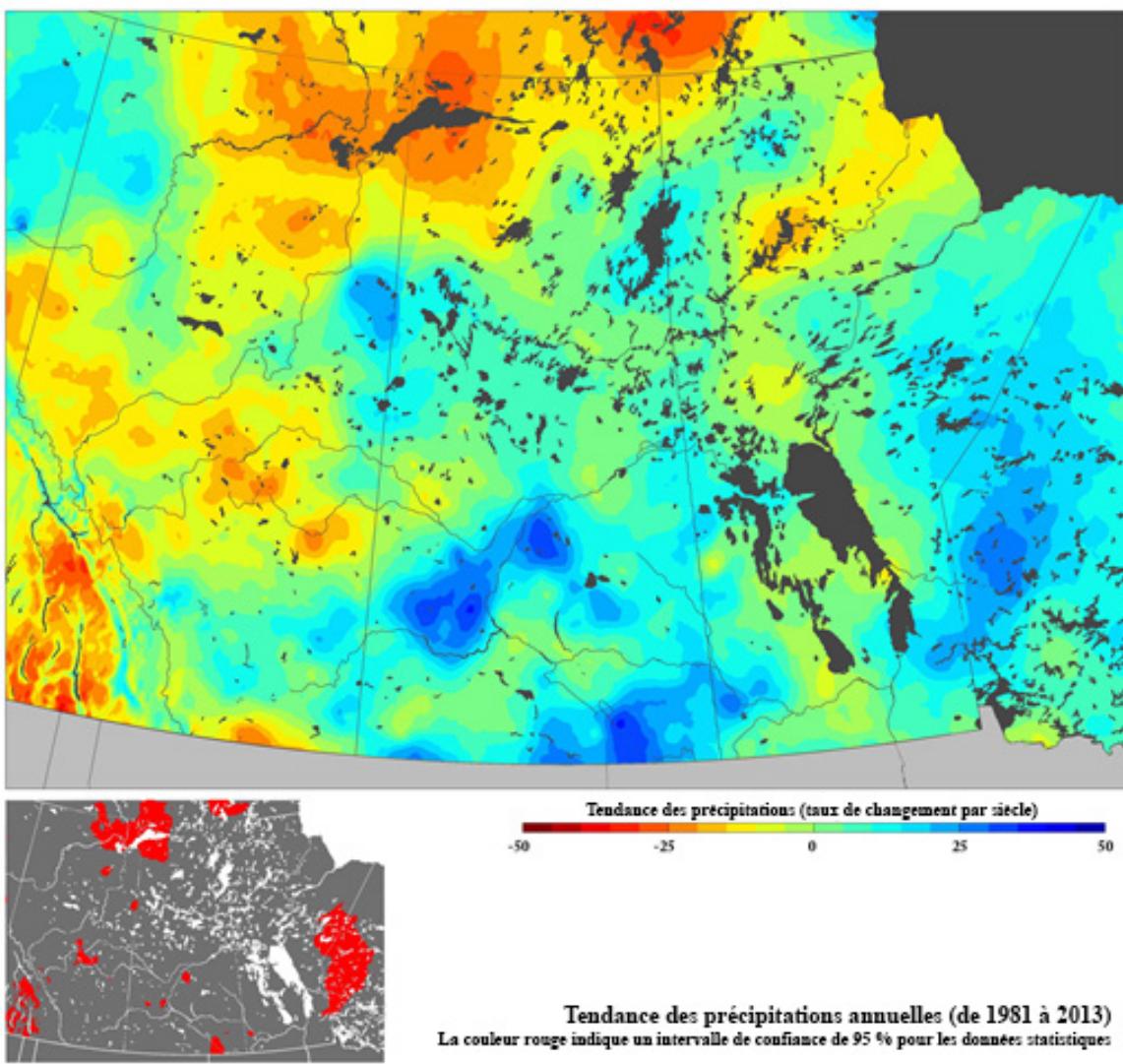
En plus de la variabilité importante entre et parmi les années, il existe également une importante variabilité spatiale dans la région. En examinant les tendances de températures moyennes annuelles, la recherche (Danny Blair et Ryan Smith, Université de Winnipeg, communications personnelles, 2015) montre que la majeure partie de la région n'a connu aucun changement statistiquement significatif (à un niveau statistique de confiance de 95 %) pour la période de 32 ans de 1981 à 2013 (figure 4). Toutefois, cela montre l'importance des relevés à long terme pour définir les tendances climatiques. Pour la période de 60 ans de 1950 à 2010, Vincent et coll. constate des augmentations statistiquement significatives de la température moyenne annuelle pour presque tous les sites dans les Prairies, et aucun site dans la région ne montre une tendance au refroidissement (Vincent et coll., 2012; Bush et coll., 2014).

Figure 4 : Tendances de la température moyenne annuelle pour les provinces des Prairies pour la période de 1981 à 2013. Seules les zones en rouge sur la carte en encart montrent des changements significatifs statistiquement. L'échelle graphique indique les tendances par siècle. (Source : Danny Blair)



Les tendances des précipitations moyennes annuelles pour les Prairies sont beaucoup plus faibles que les tendances dans la température moyenne annuelle. Cela reflète, en partie, les grandes différences dans les précipitations annuelles alors que les régions les plus sèches connaissent une plus grande variabilité interannuelle parmi toutes les régions à l'étude au Canada (Sauchyn, 2010). Encore une fois, la variabilité spatiale est importante (figure 5). Les données sur une période de 60 ans (de 1950 à 2010) montrent d'importants changements statistiques pour quelques sites seulement dans les Prairies, soit des augmentations des précipitations dans certains cas et des diminutions dans d'autres (Bush et coll., 2014).

Figure 5 : Tendances de la température moyenne annuelle pour les provinces des Prairies pour la période de 1981 à 2013. Seules les zones en rouge sur la carte en encart montrent des changements significatifs statistiquement. L'échelle graphique représente les tendances par siècle. (Source : Danny Blair)



Alors que les tendances dans les précipitations totales demeurent mal définies, le nombre annuel de jours de précipitation a augmenté. Aucune tendance forte n'est constatée dans les événements de précipitations abondantes, alors que les sites ont connu des augmentations et des diminutions dans le nombre de jours de précipitations abondantes pour la période de 1950 à 2010 (Bush et coll., 2014). À l'instar d'autres sites dans le sud du Canada, les Prairies connaissent une baisse du ratio neigepluie (Mekis et Vincent, 2011). Bien qu'aucune tendance évidente ne soit constatée dans la fréquence et la gravité des épisodes de sécheresse dans les Prairies au cours du XX^e siècle (Bonsal et coll., 2011), l'analyse globale indique une tendance vers des conditions de sécheresse plus sévères dans l'Ouest canadien au cours de la seconde moitié du XX^e siècle (Dai, 2011; Seneviratne et coll., 2012).

Les tendances dans les conditions météorologiques extrêmes dans les Prairies sont également importantes. La recherche suggère que les précipitations pour les mois de mai et juin dans le sud-est des Prairies ont considérablement augmenté depuis les années 90, ce qui pourrait expliquer les changements observés du régime de l'écoulement et les récents événements de crues extrêmes (p. ex. 2011 et 2014) (Szeto et coll., 2015).

3.2 PROJECTIONS

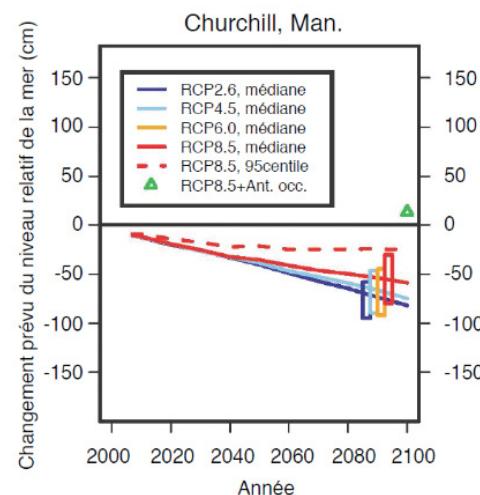
Tous les scénarios climatiques indiquent que les températures dans les Prairies devraient augmenter et les changements dans l'évapotranspiration donneraient lieu à une aridité accrue dans de nombreuses régions (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). Dans un scénario de faible croissance des émissions, le réchauffement devrait augmenter seulement légèrement par rapport aux tendances historiques; cependant, dans un scénario de forte croissance des émissions, on pourrait observer des augmentations dépassant 6 °C au cours du siècle (Bush et coll., 2014). Le réchauffement le plus important continuera de se produire en hiver, alors que le moins important aura lieu durant l'été.

Les projections sur les changements du régime des précipitations montrent une augmentation dans les précipitations totales dans le nord des Prairies et des changements relativement mineurs pour les régions du sud (Bush et coll., 2014). Encore ici, les changements sont plus importants dans les scénarios de forte croissance des émissions. Dans le sudouest des Prairies, les scénarios de forte croissance des émissions projettent une diminution des précipitations durant l'été. Bien que le sud des Prairies soit une région qui présente un risque accru de subir des épisodes de sécheresse plus fréquents à l'avenir (Bonsal et coll., 2013), les projections des différents modèles climatiques ne concordent pas toutes de façon marquée (Bush et coll., 2014). Les événements de précipitations extrêmes pourraient augmenter avec la hausse des températures, tandis que les événements de pluie verglaçante pourraient augmenter alors que le manteau neigeux diminue au cours du XXI^e siècle (Kharin et Zwiers, 2000; Bush et coll., 2014).

Les variations du niveau de la mer sont importantes pour le port de Churchill. Actuellement, la terre à Churchill s'élève à un taux de 9,3 mm/an en raison de l'ajustement isostatique glaciaire causé par la réponse de la

Figure 6 : Changements projetés dans le niveau de la mer pour Churchill, au Manitoba.

Dans presque tous les scénarios, le niveau de la mer devrait diminuer en raison des ajustements isostatiques glaciaires, et ce, en dépit du fait que le niveau de la mer à l'échelle mondiale va continuer à augmenter. Voir Atkinson et coll. (2016) pour obtenir une description des scénarios, et James et coll. (2014) pour les changements projetés dans le niveau de la mer par décennie. (Source : Ressources naturelles Canada)



croûte terrestre à la fonte des calottes glaciaires il y a plus de 10 000 ans (Atkinson et coll., 2016). Ce soulèvement vertical important signifie que le niveau de la mer à Churchill continuera de baisser au cours du siècle actuel, en dépit de la hausse du niveau de la mer à l'échelle mondiale. La fourchette projetée de la baisse du niveau de la mer à Churchill est d'environ 35 cm à 40 cm d'ici 2050, et de 60 cm à 80 cm d'ici 2100, et ce, même si une diminution de plus de 1 m est possible d'ici 2100 (James et coll., 2014) (figure 6). Même dans un scénario de hausse très importante du niveau de la mer à l'échelle mondiale, le niveau de la mer à Churchill n'augmenterait probablement pas plus que de quelques centimètres.

3.3 CLIMAT, CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET TRANSPORT DANS LES PRAIRIES

L'évolution des conditions climatiques et météorologiques aura des répercussions sur tous les modes de transport dans les Prairies. Voici quelques exemples de ces répercussions :

- dégradation des routes, des chemins de fer et d'autres structures causée par les inondations, l'érosion et les glissements de terrain;
- augmentation de la fréquence des cycles de gel et de dégel à court terme, causant la dégradation des routes, des chemins de fer et des pistes d'atterrissement;
- fragilisation des substrats gelés de routes d'hiver;
- augmentation de l'orniérage de la chaussée chauffée (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008).

Les Prairies pourraient également profiter d'avantages associés aux hivers plus chauds, y compris qui suit :

- réductions des coûts associés aux infrastructures autres que les chemins de glace;
- réduction de la durée et de la gravité de la saison de gel, entraînant des économies à long terme potentielles liées aux coûts de réparation et d'entretien;
- réduction de la dégradation des voies ferroviaires causée par le temps froid (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008).

Chaque mode de transport répondra différemment aux risques associés au climat. Les sections 4, 5, 6, et 7 abordent séparément les impacts climatiques constatés dans le passé, les risques futurs et les pratiques d'adaptation pour le transport routier, ferroviaire, aérien et maritime.

4.0 TRANSPORT ROUTIER

4.1 IMPACTS SUR LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

Les événements de précipitations extrêmes créent des problèmes pour le drainage de la chaussée. Les camionneurs dans les Prairies font état d'une augmentation de la fréquence des inondations de la chaussée lors d'événements de précipitations extrêmes qui peuvent être en partie attribuées aux capacités insuffisantes des ponceaux (Kim Graybiel, ministère de l'Environnement de la Saskatchewan, communication personnelle, 2015). Des emportements et l'affouillement de ponts peuvent également survenir à la suite de précipitations extrêmes (Transportation Research Board, 2008).

Une plus grande variabilité dans les températures contribue à la détérioration accélérée de l'infrastructure routière. Les Prairies devraient connaître une augmentation de la fréquence des cycles de gel et de dégel d'ici le milieu du siècle (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008), ce qui entraînera

une augmentation des stress subis par les chaussées et les ponts ainsi qu'une hausse des coûts de renouvellement et de remplacement (Amiro et coll., 2014). La chaleur extrême provoque l'orniérage et le ressage de la chaussée asphaltée (Transportation Research Board, 2008).

La sécheresse a également eu des impacts négatifs sur l'infrastructure routière dans les Prairies. Le Grand Edmonton a connu des conditions de sécheresse de 2014 à 2015 qui ont occasionné une importante fissuration des routes à la suite de la dessiccation des sous-sols argileux; cela s'explique en partie par l'élimination de l'eau par la végétation (Kelm et Wylie, 2008) – les dommages étaient particulièrement importants dans les quartiers comportant des peuplements d'arbres matures. En règle générale, les feux de forêt qui surviennent pendant des périodes de sécheresse ne nuisent pas sérieusement à l'infrastructure routière, compte tenu de l'inflammabilité du revêtement et de la durée relativement courte de ces événements.

4.2 IMPACTS SUR LES ACTIVITÉS DE CAMIONNAGE

Les précipitations posent des problèmes à longueur d'année pour les opérateurs de camions, et l'eau stagnante sur les routes est une préoccupation particulière au printemps (exploitants du transport routier par camion établis en Alberta et au Manitoba; représentants de l'Alberta Motor Transport Association, communications personnelles, 2015). L'augmentation des événements de pluie verglaçante et de précipitations extrêmes à long terme augmente la probabilité d'accidents et réduit la vitesse de déplacement (Transportation Research Board, 2008; Andrey et Mills, 2003).

Le vent est également une source de préoccupation. L'augmentation de la fréquence des événements de vent de forte intensité au cours des dernières années a généré des défis en matière de planification et augmenté les problèmes de sécurité pour les exploitants de transport routier par camion, en particulier pour les trains routiers circulant sur les autoroutes (exploitants du transport routier par camion établis en Alberta et au Manitoba; communication personnelle, 2015).

Alors que les changements des températures euxmêmes ne touchent pas de manière significative les opérations de camionnage, l'augmentation des températures à long terme peut avoir une incidence positive sur l'efficacité du transport routier dans les Prairies. Dans une certaine mesure, les températures ambiantes plus élevées améliorent l'efficacité du carburant diesel (LohseBusch et coll., 2013; Ressources naturelles Canada, 2016).

De plus, les feux de forêt (résultant de conditions persistantes de sécheresse) continuent de causer des perturbations dans le transport routier de façon saisonnière dans toute la région, les fermetures de routes et d'autoroutes se produisent souvent en raison des feux de forêt et de la présence de fumée (CBC News, 2015a).

4.3 MESURES D'ADAPTATION POUR L'INFRASTRUCTURE ROUTIÈRE

Les gouvernements provinciaux ont été actifs dans la mise en œuvre de stratégies d'adaptation. Par exemple, le Manitoba a lancé un programme visant à rendre les routes à l'épreuve des inondations en se concentrant sur les principales routes commerciales, telles que la route provinciale à grande circulation (PTH) 75 vers les États-Unis et les routes vers l'ouest. Cette stratégie d'adaptation comprend l'élévation des routes, l'augmentation de la capacité des ponceaux, la réorientation de l'écoulement des eaux et le pavage des routes de gravier afin de réduire les risques d'emportement (Groupe de travail sur les transports et l'environnement, 2014).

D'autres mesures d'adaptation de l'infrastructure prévoient l'utilisation d'une réglementation souple. Par exemple, le programme Spring Road Restrictions du Manitoba imposait auparavant des dates fixes de début et de fin pour sa saison de restriction de la charge par essieu (personnel d'Infrastructure et transports Manitoba, communication personnelle, 2015). Ces restrictions réduisent la dégradation des routes causée par les poids lourds pendant le dégel printanier lorsque les plateformes

sont relativement molles. En réponse aux variations accrues des conditions de température et météorologiques, le programme a été modifié pour permettre des dates de début et de fin variables (Government of Manitoba, 2015b). La politique Winter Weight Premium complémentaire a été modifiée de la même façon (personnel d'Infrastructure et transports Manitoba, communication personnelle, 2015). L'ajustement de ces programmes coûte très peu par rapport à leurs avantages.

Le gouvernement du Manitoba examine également son approche au contrôle de l'eau sur les routes pour maintenir la fluidité de la circulation lors des épisodes de précipitations extrêmes. Les stratégies d'adaptation à l'étude comprennent ce qui suit :

- utilisation de drains et de ponceaux plus imposants pour augmenter la capacité d'écoulement de l'eau;
- ponts plus imposants, capables de résister aux fortes précipitations;
- utilisation de mécanismes de contrôle de l'érosion plus appropriés tels que des enrochements et des digues;
- installation de dispositifs de surveillance en temps réel de l'affouillement de pont lors de crues importantes.

Par ailleurs, la province évalue les normes de conception des ponts et des ponceaux provinciaux pour déterminer si des mises à jour doivent être apportées pour tenir compte des changements climatiques, de l'utilisation des terres, du drainage des eaux de surface et de la vulnérabilité aux inondations (Government of Manitoba, 2015c). De graves inondations survenues en 2011 et en 2014 ont catalysé un bon nombre de ces efforts.

En ce qui concerne d'éventuelles températures extrêmes, Infrastructure et transports Manitoba exige maintenant que les matériaux de construction de ponts et de grands ponceaux soient conçus pour résister à des températures variant de 80 °C (entre 40 °C et 40 °C). Pour atténuer les impacts des cycles de gel et de dégel, l'utilisation de mélanges de béton très durables et imperméables est exigée pour les tabliers, les bordures ou les barrières de ponts, ce qui réduit l'infiltration d'humidité et l'expansion (Government of Manitoba, 2015c).

Le gouvernement de l'Alberta a entrepris des évaluations des risques climatiques pour l'infrastructure routière. En juin 2012, le ministère des Transports de l'Alberta a publié le rapport « Climate Change Risk Assessment and Adaptation Report for the Ministry of Transportation », une évaluation de haut niveau des risques posés par les changements climatiques pour le secteur des transports de la province. Le rapport propose également certaines mesures d'adaptation possibles, élaborées conformément à ISO 31000, Management du risque – Principes et lignes directrices. Lors des processus de gestion des risques organisationnels et de planification stratégique du ministère, les risques à long terme (établis selon les scénarios climatiques pour les 50 prochaines années) ont été pris en compte de même que les risques à court terme (de 2 à 10 ans). En outre, des plans prévoient revoir les risques climatiques à la lumière des nouveaux scénarios de changements climatiques et des scénarios mis à jour disponibles, et établir les options possibles pour atténuer l'ampleur des impacts (ICF Marbek, 2012).

En juin 2013, le sud de l'Alberta a connu de fortes pluies suivies par les inondations catastrophiques : cinq personnes ont perdu la vie, plus de 100 000 ont été déplacées, et les dégâts ont dépassé 5 milliards de dollars (voir le chapitre 9). En termes de dommages assurables, il s'agit de la catastrophe la plus coûteuse dans l'histoire du Canada (Environnement Canada, 2014). En guide réponse, l'Alberta a annoncé plusieurs mesures d'atténuation des risques. En novembre 2013, le gouvernement provincial a annoncé 110 millions de dollars (2014-2016) pour un programme d'atténuation des inondations fournissant des fonds pour la mise à niveau, la modernisation ou le remplacement des infrastructures routières et des ponts sur des sites à risque élevé avant leur remplacement prévu à la fin du cycle de vie. Il avait été projeté que les réparations et les mises à niveau particulières des sites endommagés allaient représenter 40 millions de dollars et que le solde

de 70 millions de dollars serait consacré à des sites hautement prioritaires sensibles aux dommages causés par les inondations (Government of Alberta, 2013). D'autres mesures d'adaptation entreprises sont décrites dans les études de cas 1 et 2.

En plus de ces initiatives de planification à long terme, les représentants du gouvernement de l'Alberta indiquent qu'une approche d'adaptation de l'infrastructure au cas par cas est prise dans la province. On mentionne souvent les inondations de 2013 à Calgary comme source de motivation pour les efforts visant à réduire les risques météorologiques extrêmes; pourtant, la plupart des dommages ont eu lieu dans des plaines inondables connues. Bien que des facteurs liés aux changements climatiques aient pu contribuer aux niveaux élevés des eaux, l'aménagement dans des zones vulnérables a été un facteur contribuant à l'ampleur et aux coûts des dommages (personnel du gouvernement de l'Alberta, communication personnelle, 2015).

Le gouvernement provincial de la Saskatchewan tente d'incorporer les risques climatiques dans les processus de gestion des actifs, bien que les réalités budgétaires aient souvent préséance dans la décision finale (Kim Graybiel, ministère de l'Environnement de la Saskatchewan, communication personnelle, 2015). En réponse aux événements météorologiques extrêmes, le programme de ponceaux de la Saskatchewan modifie les exigences de conception pour l'infrastructure du réseau routier national et fait passer les seuils de protection contre les crues à récurrence de 25 ans à 50 ans. Pour les collectivités vulnérables, les normes sont en cours de modification afin de faire passer le seuil de protection contre les événements à récurrence de 50 ans à 100 ans (Groupe de travail sur les transports et l'environnement, 2014). L'objectif de cette stratégie est de favoriser une circulation plus efficace de l'eau par voie terrestre afin de réduire les cas de rétention de l'eau par les plateformes routières ou les assiettes des rails au point de produire des affouillements.

ÉTUDE DE CAS 1

ÉTUDE DE CAS 1 : EFFORTS DÉPLOYÉS EN ADAPTATION PAR ALBERTA TRANSPORTATION POUR LE SECTEUR ROUTIER

Alberta Transportation a élaboré un certain nombre d'initiatives qui tiennent compte des conditions climatiques et météorologiques extrêmes dans les processus de conception des routes et des ponts. Voici quelquesuns des points saillants :

Ponts : Suite à l'inondation de juin 2013, Alberta Transportation a modifié ses normes relatives à la taille, à la configuration et à la protection des ouvertures de pont. Le ministère a conclu que les normes actuelles étaient appropriées et aucun changement n'a été proposé, la plupart des dommages avaient eu lieu aux traversées plus âgées qui n'avaient pas été conçues selon les normes actuelles. Les risques aux traversées de cours d'eau liés à la fréquence et à l'ampleur accrues des événements de tempête ont également fait l'objet d'une évaluation et ont été jugés faibles pour les raisons suivantes :

- Les traversées de cours d'eau sont dimensionnées pour correspondre à la capacité du chenal du cours d'eau. Il faut des décennies (ou plus) pour que les chenaux naturels changent de façon permanente en raison des changements climatiques. Par conséquent, le risque de changement soudain des exigences relatives à la capacité des ouvertures de pont est faible.
- Le dimensionnement des ouvertures de pont n'est pas trop sensible aux petites variations dans le régime de l'écoulement (p. ex. < 20 %).
- La fréquence des tempêtes de plus longue durée provoquant des inondations dans les grands bassins naturels n'est pas considérée comme susceptible de changer par rapport à la fréquence des tempêtes de forte intensité, de courte durée à aire limitée. Cela concorde avec l'absence de tendances significatives observées dans la fréquence ou l'intensité des tempêtes dans les données historiques de la province remontant à 150 ans.

...

...

Les exigences relatives à la conception des dispositifs d'écoulement des tabliers de pont ont également été évaluées, en se concentrant sur les sites où des blocages des dispositifs d'écoulement ont eu lieu et où des travaux d'entretien sont couramment nécessaires. Les événements météorologiques localisés à haute intensité sont difficiles à prévoir en termes de survenance ou d'ampleur, et sont plus fréquents que les importantes inondations régionales. En conséquence, la méthode la plus rentable pour résoudre les problèmes de blocage des ponceaux consiste à concevoir l'infrastructure de manière à faciliter l'entretien nécessaire, une politique prise en compte dans les lignes directrices de conceptualisation pour les ponts de la province. Par exemple, une structure de ponceau à Malcolm Creek (construite à la fin des années 90) se remplissait de débris presque chaque année (pour des raisons autres que les tempêtes) et les coûts pour dégager l'ouverture étaient considérables. Le ponceau a été récemment remplacé par un pont dont la configuration facilite l'entretien (la relocalisation n'était pas possible). De même, les dalots en béton à Cougar Creek étaient sujets à bloquer et sont maintenant conçus pour être débloqués par des machines. Enfin, le pont de Drystone Creek a été conçu en tenant compte du fait qu'une partie importante de l'ouverture serait bloquée périodiquement.

Ingénierie de surface : Les températures observées sont prises en compte dans deux procédures de conception liées à l'ingénierie du revêtement. La première procédure concerne l'épaisseur conceptuelle de la chaussée – les températures quotidiennes ambiantes fournissent les données de base pour la modélisation chaussée-réponse sous différents volumes de trafic. La seconde concerne le choix des mélanges d'asphalte : les volumes de trafic et les températures estivales sont les principales données d'entrées pour la sélection des liants et des types de mélanges d'asphalte (l'ornierage est la principale préoccupation). Dans tous les cas, Alberta Transportation considère les changements dans les facteurs climatiques comme mineurs par rapport aux changements dans d'autres des facteurs tels que les volumes de trafic et les changements de combinaisons d'essieux ou de tailles de pneus admissibles; cependant, les deux procédures peuvent être ajustées afin de refléter les projections relatives aux températures et aux précipitations. On remarque que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes n'est pas actuellement prise en compte dans ces procédures.

Géotechnique : En moyenne, l'Alberta connaît une « inondation de débris » (qui diffère des crues hydrauliques par la quantité et le type de sédiments transportés) par an. Ces événements sont fréquents en terrain montagneux lorsque les accumulations de précipitations d'une durée de trois jours dépassent 300 mm. Lors des précipitations extrêmes de l'été 2013, plus de 70 ont été enregistrées sur une période de deux jours, bloquant des routes et des ponceaux. Alberta Transportation conçoit des ponts et des ponceaux sur les ruisseaux à flanc de montagne afin de gérer les inondations hydrauliques. Toutefois, les événements de 2013 ont donné l'occasion de réévaluer les critères relatifs au dimensionnement hydraulique conventionnel afin de tenir compte des inondations de débris qui n'étaient pas considérées auparavant dans le cadre de gestion des risques. Les ruisseaux à flanc de montagne se comportent de manière moins prévisible que les rivières des Prairies, et nécessitent des critères de conception différents. Alberta Transportation est en train de déterminer si les options d'atténuation des risques sont nécessaires, réalisables et économiquement viables pour faire face aux futurs événements de coulées de débris. Un des impacts moins compris est l'augmentation considérable des forces de traction et d'érosion dans les inondations de débris et l'action de ces forces sur les lits et les bords de ruisseaux à flanc de montagne. Il est difficile de prédire de quelle manière les tracés des cours d'eau changeront tout comme déterminer la résilience des routes de l'Alberta aux futures inondations de débris.

L'augmentation de la fréquence des épisodes de fortes précipitations augmente également le risque de ruptures de talus. Les petites ruptures peuvent n'avoir aucun impact immédiat sur la chaussée, mais au fil du temps, elles pourraient causer le blocage du système de drainage de fossé (si situé sur le talus arrière) ou éventuellement atteindre la chaussée (si situé sur le talus avant). Alberta Transportation n'a pas changé les critères de conception relatifs aux talus afin de respecter ces conditions de conception, car le coût pour rendre tous les talus plus résistants à la pluie serait prohibitif. Les normes de conception sont élaborées afin de permettre au personnel de réparer les ruptures de talus à un coût minime.

Rédigé avec la collaboration de Peter Dzikowski et du personnel de Transports Alberta.

ÉTUDE DE CAS 2 : ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ CLIMATIQUE POUR LE PONT QUESNELL, À EDMONTON

Le Protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP), dirigé par Ingénieurs Canada, est un processus en cinq étapes mis sur pied pour analyser la vulnérabilité de l'ingénierie des systèmes d'infrastructure individuels en fonction du climat actuel et des projections climatiques. L'un des premiers projets d'évaluation du CVIIP au Canada visait le pont Quesnell à Edmonton, en Alberta. Cette évaluation était unique en ce que le pont avait atteint la fin de son cycle de vie et devait être remis à neuf; par conséquent, de nombreux composants ont été réexaminés à la lumière des recommandations du protocole. D'après les résultats de l'étude, bien que « généralement robuste », le pont fait face à un certain nombre de vulnérabilités futures en raison des augmentations probables de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes, dont les suivants :

- la dégradation de la chaussée du tablier et des membranes d'étanchéité exposées;
- la surcharge des systèmes de drainage du tablier et du bassin de rétention.

L'évaluation du CVIIP a recensé des risques relatifs aux opérations et à l'entretien (p. ex. le déneigement) ainsi qu'à la fonctionnalité et à la sécurité en raison des combinaisons et séquences des événements extrêmes futurs (inondations et glace sur la chaussée). En conséquence, l'étude a recommandé la mise à jour des critères de conception du pont pour tenir compte de l'évolution des charges climatiques annuelles et des événements météorologiques extrêmes dans le cadre de scénarios de changements climatiques; dans certains cas, les données climatiques utilisées pour l'élaboration de composants d'infrastructure réhabilités (chaussée et drainage) dataient des années 60 (Ville d'Edmonton, 2008).

La reconstruction du pont a été achevée en 2011. L'évaluation du CVIIP a guidé les travaux d'imperméabilisation et de revêtement du côté ouest du pont, la création de nouvelles installations de gestion des eaux pluviales et l'ajout de deux voies de circulation générales et d'une voie de circulation prioritaire (Ville d'Edmonton, 2011).

Rédigé avec la collaboration de Hugh Donovan (Ville d'Edmonton)

4.4 MESURES D'ADAPTATION POUR LES EXPLOITANTS DU CAMIONNAGE

Les entreprises de camionnage dans les Prairies adaptent leurs activités de différentes manières. Par exemple, les entreprises de camionnage s'adaptent à la fréquence accrue de forts vents en utilisant plus souvent une seule remorque plutôt que deux afin de réduire le risque de renversement par le vent (personnel de Bison Transport, communication personnelle, 2015). En raison de vents violents et du mauvais temps, les tracteurs routiers tirant des deux remorques doivent parfois laisser la remorque arrière à un point de jalonnement le long de leur trajet, en particulier si la deuxième remorque est particulièrement légère ou vide (personnel de Bison Transport, communication personnelle, 2015).

Les entreprises de camionnage adoptent également des technologies visant à améliorer la résilience opérationnelle à l'évolution des variables climatiques, bien que cela tende à être un avantage secondaire. Par exemple, les adaptations aérodynamiques telles que les carénages et les jupes de remorque ont tendance à être utilisées pour non seulement économiser du carburant, mais aussi pour améliorer la stabilité lors d'épisodes de vents. Les générateurs auxiliaires de bord (APU) utilisés par les entreprises de camionnage font l'objet de raffinements et d'améliorations pour répondre à la fréquence accrue des vagues de froid ou des vagues de chaleur, et réduisent la consommation de carburant au régime ralenti. Les APU alimentent les systèmes de bord sans recourir au régime ralenti pendant un « temps d'arrêt » du camion sur le côté de la route ou dans les aires de repos. Les nouvelles conceptions des APU conviennent mieux à un éventail plus large de conditions environnementales, bien que cette adaptation représente une dépense importante pour les entreprises de camionnage. Les réseaux commerciaux de répartition pour le camionnage et d'autres

fournisseurs tiers de données de « tableaux de bord » ont également été proactifs dans la transmission d'informations sur les conditions routières aux flottes de tracteurs routiers.

Les entreprises de camionnage ont également consacré plus de ressources pour la surveillance des conditions météorologiques, créant dans certains cas des postes à temps plein pour la surveillance en temps réel des événements météorologiques dans l'ensemble du réseau de l'entreprise. Selon certaines estimations, le personnel consacre cinq fois plus de temps à la surveillance météorologique et entretien des liens en temps réel avec les bureaux de répartition. Cela améliore la capacité des entreprises de camionnage à rapidement rediriger le trafic en réponse aux entraves à la circulation (personnel de Bison Transport, communication personnelle, 2015).

Les gouvernements provinciaux fournissent également des services de surveillance pour faciliter la circulation. En Saskatchewan, la ligne « Road Conditions Highway Hotline » est régulièrement mise à jour à l'aide d'informations récentes fournies par les usagers et le personnel du gouvernement, et est disponible par le biais de multiples systèmes de livraison (Internet à faible et à haute bande passante, flux RSS, texte brut) (Government of Saskatchewan, sd). De même, le gouvernement du Manitoba exploite un réseau de stations météo-route (SMR) qui utilise des caméras et des capteurs routiers comme complément aux inspections réalisées par le personnel. Cette technologie se concentre principalement sur les événements extrêmes tels que les tempêtes de neige, les inondations et les retards causés par la construction sur les routes achalandées, bien que certaines routes moins achalandées et les routes d'hiver fassent partie de la portée des rapports. Les voyageurs peuvent surveiller les conditions routières par l'entremise de sites Web, de mises à jour par courriel et des médias sociaux (Government of Manitoba, 2015d). En Alberta, l'information routière (y compris les conditions météorologiques et les retards de circulation) est également disponible en ligne.

4.5 ROUTES D'HIVER

Les routes d'hiver sont confrontées à un certain nombre de défis uniques liés à la hausse des températures. Bien que la durée des saisons d'ouverture varie d'une route à l'autre, la plupart des routes de glace dans les Prairies sont ouvertes pendant environ huit semaines à partir de la mi-janvier à la mi-mars. D'après les résultats des recherches, les hivers plus doux ont un impact négatif sur les coûts de construction et d'entretien des routes d'hiver, et réduisent la fiabilité et la durée de la saison d'exploitation (Sous-groupe de travail fédéral/provincial/territorial sur les transports du Nord, 2015). Cependant, des données récentes suggèrent que ces résultats ne sont pas cohérents dans l'ensemble des provinces des Prairies. En Alberta, la route de Fort Chipewyan a connu des saisons d'exploitation légèrement plus longues au cours des dernières années (Sous-groupe de travail fédéral/provincial/territorial sur les transports du Nord, 2015). En Saskatchewan, même si les dates d'ouverture de la route Cumberland House ont légèrement été plus tardives au cours des dernières années, les dates de fermeture ont également été repoussées (Sous-groupe de travail fédéral/provincial/territorial sur les transports du Nord, 2015). Le Manitoba est également confronté à des irrégularités au cours de la saison des routes d'hiver (voir étude de cas 3).

La durée réduite des saisons d'exploitation des routes d'hiver peut avoir des impacts sociaux et économiques importants. Les gouvernements et les entreprises utilisent ces routes pour transporter d'importantes marchandises telles que des produits chimiques, du carburant et d'autres produits essentiels à usage quotidien pour les résidents, les entreprises et les services publics (CBC News, 2012a). Les résidents utilisent les routes de glace pour accéder à des zones urbaines et acheter des matières consommables en vrac, ce qui réduit l'impact sur les ménages des coûts de la vie élevés dans les collectivités éloignées du Nord. Si la glace n'est pas assez épaisse pour permettre la circulation à la mi-janvier, un transfert modal du camionnage au transport aérien pour les biens essentiels est nécessaire, à grands frais pour tous les utilisateurs (Taylor et Parry, 2014). Lorsque les routes de glace sont ouvertes lors d'hiver plus doux, des restrictions de charge peuvent être appliquées (CBC News, 2012b). L'étude de cas 3 se penche sur les récentes expériences relatives aux routes d'hiver au Manitoba.

ÉTUDE DE CAS 3 : ROUTES D'HIVER AU MANITOBA

Le Manitoba abrite la majorité des routes d'hiver des Prairies (78 % des kilomètres des routes d'hiver) desservant 30 000 personnes dans 28 collectivités éloignées (Taylor et Parry, 2014). Dans le nord du Manitoba, les saisons d'exploitation durant les hivers de 1998 à 2003 et de 2009 à 2012 étaient d'une durée inférieure à la moyenne pour la plupart des routes (Taylor et Parry, 2014; tableau 1). Entre 2007 et 2011, le coût moyen pour le réseau de routes d'hiver est passé à 13 millions de dollars par année, et le financement des routes d'hiver a triplé depuis 1998 (Rabson, 2012; Manitoba Infrastructure and Transportation, 2011). En 2012, le réseau de 2 500 km de la province a ouvert plusieurs semaines plus tard que la normale, incitant les chefs du Nord à déclarer l'état d'urgence (CBC News, 2012b).

Malgré une baisse dans la durée des saisons d'exploitation de 2009 à 2012, les données sur les routes au Manitoba (tableau 1) suggèrent que les fenêtres d'exploitation se sont en partie rétablies au cours des dernières années. Les saisons de 2013 à 2015 ont légèrement dépassé la moyenne de 12 saisons de 2003 à 2015 (48 jours d'activité). Au cours de cette période, l'ITM a consigné les dates d'ouverture et de fermeture pour jusqu'à 50 tronçons de route distincts exploités dans la grande région de la rive Est du lac Winnipeg. Les trajets ont fréquemment changé, souvent pour orienter les routes aménagées sur des cours d'eau recouverts de glace vers des routes terrestres (Taylor et Parry, 2014). Les changements de trajets ont présenté quelques défis dans les efforts visant à quantifier les jours d'exploitation des routes d'hiver, mais ces changements ont possiblement prolongé les saisons d'exploitation pour de nombreuses routes. L'utilisation accrue de routes terrestres a également offert une plus grande sécurité lors de la construction, de l'entretien et de l'utilisation (Taylor et Parry, 2014). Cependant, les jours d'exploitation ne sont pas la seule variable pertinente, de nombreux facteurs jouent un rôle dans la détermination du succès relatif des différentes saisons d'exploitation des routes d'hiver pour le transport de marchandises vers des régions éloignées au cours des dernières années. Parmi ces derniers, on trouve les changements de trajets, le changement du vortex polaire de 2013-2014, les variations des restrictions de charges, la profondeur du gel, le manteau neigeux et autres.

Selon les projections, le nombre moyen de jours d'exploitation des routes de glace pour la province devrait être réduit de huit jours d'ici les années 2020, de 15 jours d'ici au milieu du siècle et de 21 jours d'ici les années 2080 (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). À la lumière de ces impacts projetés, des mesures d'adaptation plus draconiennes – au-delà du réacheminement des routes des cours d'eau vers la terre – sont adoptées afin d'améliorer la fiabilité, en particulier pour les collectivités éloignées. Par exemple, le Manitoba a entrepris un programme d'infrastructure à grande échelle (3 milliards de dollars sur 30 ans) pour construire des routes permanentes ouvertes en toutes saisons dans la région de la rive est du lac Winnipeg afin de desservir les collectivités éloignées qui, ensemble, abritent environ 36 000 personnes (Manitoba East Side Road Authority, sd). Le tracé proposé de ce réseau se rapproche étroitement du réseau de routes d'hiver actuel. Même si la raison de cet engagement comporte de multiples facettes, la Commission manitobaine de la route a formulé la déclaration positive suivante : « ... au fil des ans, la fiabilité des routes d'hiver et la durée de la saison d'exploitation diminuent, ce qui cause des préjudices aux résidents locaux » (Manitoba East Side Road Authority, sd).

D'autres mesures d'adaptation potentielles envisagées comprennent le transfert à des modes moins coûteux que le transport aérien classique, comme l'amélioration des services ferroviaires et maritimes (personnel d'Infrastructure et transports Manitoba, communication personnelle, 2015). Infrastructure et transports Manitoba exploite actuellement quatre services de traversier pendant la saison des eaux libres. Ces traversiers desservent les collectivités éloignées qui dépendent des routes d'hiver, dans les régions de South Indian Lake, Split Lake, York Landing, Bloodvein et Norway House (Taylor et Parry, 2014). D'autres ont proposé l'utilisation de dirigeables comme solution de rechange aux routes de glace et au transport aérien classique (CBC News, 2015b).

...

...

Tableau 1 : Nombre de jours d'exploitation saisonnière des routes d'hiver de la région de la rive est du lac Winnipeg, au Manitoba, calculés en combinant les données sur des tronçons de route d'hiver recueillies par Infrastructure et transports Manitoba pour la période de 2003 à 2015. Le nombre de jours d'exploitation moyen au cours de cette période d'analyse pour toutes les routes examinées est de 48. Les cellules comportant la mention s.o. indiquent que les données ne sont pas disponibles.

Routes d'hiver de la région de la rive Est du lac Winnipeg, au Manitoba, nombre de jours d'exploitation, de 2003 à 2015													
Emplacement et collectivités desservies	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	Moyenne pour la route
Bloodvein, Berens River et Poplar River	59	64	46	56	69	66	50	59	50	74	76	66	61,25
Pauingassiet et Little Grand Rapids	50	30	16	40	49	61	30	41	37	53	57	32	41,33
Bloodvein ou Little Grand Rapids à la région d'Island Lake	53	38	26	N/A	42	48	35	36	29	25	S.O.	S.O.	36,88
Accès à l'ouest de la région d'Island, Oxford et God's Lake	S.O.	34	59	71	71	58,75							
St. Theresa Point, Wasagamack et Garden Hill (interne)	47	34	33	N/A	46	57	27	40	31	42	55	56	42,55
Moyenne saisonnière (toutes les routes)	52,25	41,5	30,25	48	51,5	58	35,5	44	36,2	50,6	64,75	56,25	48,15

Rédigé par Will Towns et Al Phillips

Moyenne sur 12 ans, toutes les routes

5.0 TRANSPORT FERROVIAIRE

5.1 IMPACTS CONSTATÉS DANS LE PASSÉ ET RISQUES FUTURS

Précipitations extrêmes

Les ingénieurs géotechniques des compagnies ferroviaires font état de défis relatifs à l'eau de surface et au drainage causés par les précipitations extrêmes, y compris l'enrassement du ballast des voies ferrées et l'augmentation des risques d'affouillement. L'enrassement limite la capacité d'évacuation de l'eau du ballast loin de la voie ferrée (Michael Hendry, Canadian Rail Research Laboratory, Université de l'Alberta, communication personnelle, 2015) et réduit la résistance de l'infrastructure ferroviaire au soulèvement par le gel (déplacement du sol ou de la roche dans des conditions de gel) (Nurmikolu et Silvast, 2013).

Fait intéressant, l'eau stagnante est un problème croissant. Un expert en géotechnique régional de longue date a indiqué avoir observé de l'eau en contre-pente en Saskatchewan à des endroits où il n'en avait jamais vu en 30 ans d'expérience (Tom Edwards, CN, communication personnelle, 2015). La situation est particulièrement problématique si les ponceaux gèlent au printemps. Le blocage des ponceaux par la glace nuit à l'écoulement de l'eau, ce qui augmente le risque d'affouillement de même que la probabilité et la gravité des dommages causés aux voies ferrées (figure 7) (Michael Hendry, Canadian Rail Research Laboratory, Université de l'Alberta, communication personnelle, 2015).

Ces conséquences ont une incidence sur la fiabilité et l'efficacité ainsi que sur la rentabilité du transport ferroviaire, car les entreprises ferroviaires sont généralement propriétaires des infrastructures et assument les coûts qui doivent être engagés pour faire en sorte que les voies respectent les normes fédérales.

Figure 7 : Affaissement des remblais et déraillement d'un train causé par un ponceau obstrué de glace à Togo, en Saskatchewan, en 2013. (Source : Bureau de la sécurité des transports du Canada)



Températures extrêmes

La fourchette idéale de températures pour le transport ferroviaire de marchandises est de -25 °C à +25 °C (Miller, 2014). Alors que l'expansion thermique du rail (gauchissement attribuable à la chaleur) est rarement mentionnée comme un problème dans les Prairies, le froid extrême est une préoccupation majeure pour les activités ferroviaires en hiver (Boyle et coll., 2013). Dans les températures froides, les pistes en acier (longs rails soudés) et les roues deviennent plus fragiles et sujettes aux bris, et les freins à air comprimé deviennent plus sujets aux fuites et à la congélation. Un examen des rapports d'accidents ferroviaires du Bureau de la sécurité des transports du Canada suggère que les ruptures de rail causées par le temps froid ont contribué à certains déraillements dans les Prairies (Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2013). Les températures froides créent également des problèmes opérationnels en limitant la longueur sécuritaire des trains. Selon l'Association des chemins de fer du Canada, la longueur maximale sécuritaire d'un train intermodal avec puissance de traction répartie diminue de 15 % lorsque la température est en dessous de 25 °C, et de 39 % lorsqu'elle tombe en dessous de -35 °C. L'utilisation de trains plus courts sur un réseau fonctionnant presque au maximum de sa capacité avec des temps de cycle relativement longs entraîne des effets en cascade dans l'ensemble du système ferroviaire. La congestion accrue dans les terminaux limite l'efficacité, tandis qu'une plus grande densité de trains dans un secteur donné fait en sorte que plus de trains se rencontrent, augmentant l'utilisation des voies d'évitement et réduisant davantage la vitesse moyenne (Miller, 2014). Les températures froides extrêmes ont été un important facteur contribuant à des retards dans la gestion des céréales au cours de l'hiver 2013-2014 (étude de cas 4).

Bien que les cas de froid extrême doivent diminuer dans les Prairies, ces périodes continueront de se produire à des intervalles imprévisibles (Bush et coll., 2014). Lors des périodes de chaleur extrême au cours du XXI^e siècle, les risques de gauchissement des rails devraient également augmenter (Transportation Research Board, 2008). Ces impacts illustrent les risques actuels et les risques futurs posés par les températures extrêmes pour le transport ferroviaire de marchandises.

ÉTUDE DE CAS 4

ÉTUDE DE CAS 4 : TRANSPORT FERROVIAIRE DES MARCHANDISES EN HIVER 2013-2014

On a décrit le transport par chemin de fer des céréales vers le port dans les Prairies à l'hiver 2013-2014 comme une « tempête parfaite » de problèmes (Cash, 2014). La manutention des céréales dans la région est un processus complexe auquel participent de nombreux acteurs. Cette année en particulier, une série d'événements et de conditions ont compliqué le processus, y compris ce qui suit :

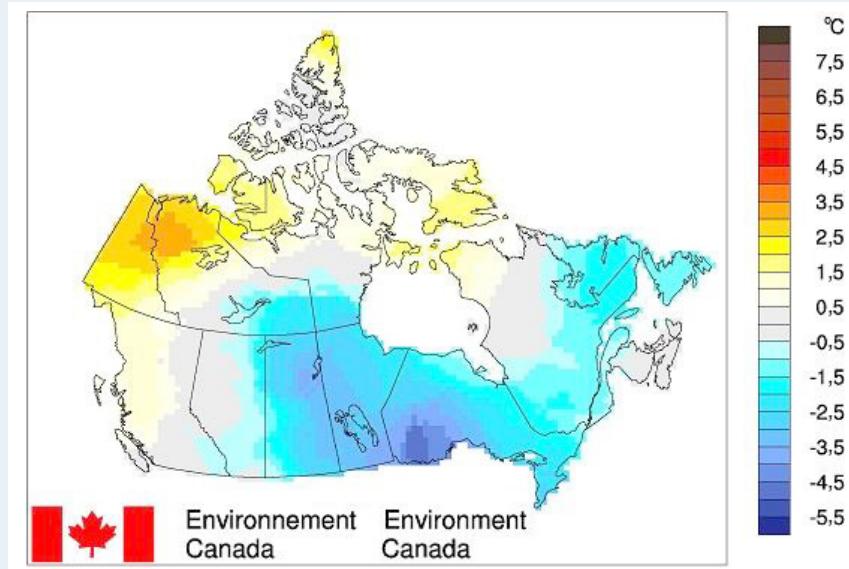
- un rendement des cultures supérieur à la moyenne des Prairies;
- le retrait du mécanisme de commercialisation à comptoir unique de la Commission canadienne du blé (CCB);
- une augmentation des commandes pour le placement de wagons par les compagnies céréalier qui souhaitent déplacer leurs produits;
- un retard dans les commandes initiales pour le placement de wagons;
- un hiver extrêmement froid dans la prairie (Miller, 2014; Atkins 2014).

Comme le montre la figure 8, la plupart des provinces des Prairies ont connu des températures inférieures à la moyenne au cours de l'hiver 2013-2014, jusqu'à 4,5 °C dans certaines régions. La discussion qui suit est basée essentiellement sur les informations concernant les activités du CN au cours de cette période.

...

...

Figure 8 : Écarts de température par rapport à la moyenne de 1961 à 1990 au Canada au cours de l'hiver 2013-2014. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



Au cours de l'hiver 2013-2014, les trains ont circulé dans des températures sous le seuil de -25 °C plus souvent qu'à la normale (Miller, 2014). Les compagnies de chemin de fer ont connu plusieurs difficultés, y compris des fuites des boyaux d'air des freins (compromettant la capacité de freinage), des ruptures plus fréquentes des rails (200 % de plus que les normes pour les saisons autres que l'hiver) et des bris plus fréquents des roues en acier.

En réponse à ces conditions, les compagnies de chemin de fer ont réduit la vitesse et la longueur des trains. Selon les rapports, la longueur moyenne des trains céréaliers était de 70 % de ce qu'elle aurait pu être dans des conditions de température idéales. Cela a provoqué un effet en cascade, principalement en raison de l'augmentation de la congestion du réseau.

La vitesse moyenne des trains a également été réduite au cours de cette période. En hiver, les trains roulent normalement à des vitesses d'environ 8 % inférieures que durant les autres saisons. La vitesse moyenne des trains a également été réduite au cours de cette période. En hiver, les trains roulent normalement à des vitesses d'environ 8 % inférieures que durant les autres saisons. En 2013-2014, cette réduction de la vitesse était d'environ 13 %. En raison de l'utilisation de trains plus courts et plus lents, le taux d'exécution des commandes de wagons (le ratio des commandes remplies dans les temps par rapport aux commandes passées) a diminué de plus de 30 % par rapport aux saisons autres que l'hiver, par rapport à la norme de 15 % pour l'hiver.

La figure 9a présente les temps de transit hebdomadaires pour les trains en provenance des ports de la Colombie-Britannique vers Toronto. Deux pointes prononcées dans le temps de transit sont apparentes. La première pointe correspond à une grève dans le transport ferroviaire en 2012, tandis que la seconde correspond aux conditions de froid extrême de l'hiver 2013-2014.

La figure 9b présente une importante mesure liée à la réduction de la vitesse des trains, à l'augmentation des temps d'arrêt et à la hausse des remplacements des équipes — le nombre de défaillances de la « commande centralisée de la circulation » (CCC). Ces défaillances signifient que les systèmes de répartition centralisés sont en pannes, ce qui résulte en un ralentissement du mouvement et du positionnement des trains jusqu'au rétablissement des systèmes. Le graphique à barres montre une augmentation considérable des défaillances de la CCC en 2013-2014, créant une vulnérabilité systémique.

...

...

Figure 9a : Temps de transit hebdomadaire pour les trains en provenance des ports de la C.-B. vers Toronto.

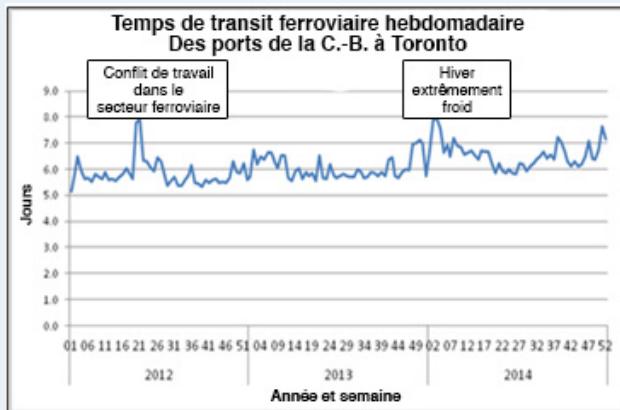
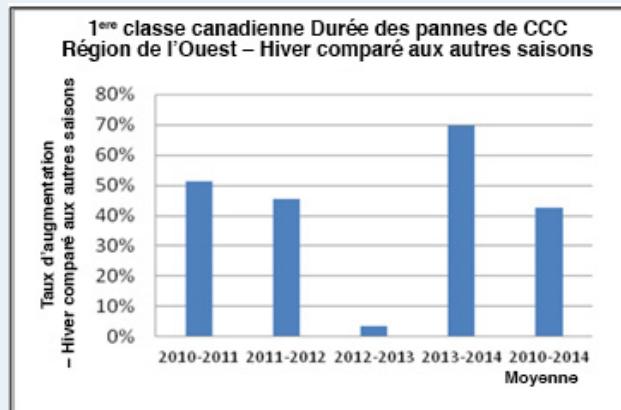


Figure 9b : Défaillances de la CCC – pourcentage d'augmentation en hiver par rapport aux autres saisons. (Source : Association des chemins de fer du Canada)



Rédigé par Al Phillips

Autres risques climatiques

L'augmentation des cycles de gel et de dégel (une tendance qui devrait se poursuivre) génère des éboulements plus fréquents, affectant les activités ferroviaires dans les régions montagneuses (Middleton, 2000). Les cycles de gel et de dégel créent également des problèmes relatifs à la stabilité de la voie, en particulier dans les étendues au nord de la région (Middleton, 2000).

Les événements extrêmes de neige et de vent peuvent retarder les services ferroviaires, en particulier lorsqu'ils surviennent simultanément. On s'attend à ce que les vents forts présentent des défis en matière de planification à l'avenir, obligeant les trains à réduire leur vitesse ou à emprunter les voies d'évitement (Miller, 2014).

De façon singulière, la compagnie Hudson Bay Railway est affectée par le dégel du pergélisol. Cette ligne est essentielle aux activités au port de Churchill et aussi pour les résidents locaux, les déraillements de wagons céréaliers ont donné lieu à des annulations de services aux voyageurs en raison de l'absence de routes alternatives (Wang et coll., 2016). La fiabilité peut devenir de plus en plus difficile à maintenir si des adaptations ne sont pas apportées (Étude de cas 5).

ÉTUDE DE CAS 5 : TRANSPORT FERROVIAIRE DANS LES BASSES TERRES DE LA BAIE D'HUDSON : DES CIRCONSTANCES PARTICULIÈRES

La voie ferroviaire la plus au nord du Manitoba (prenant fin à Churchill) fait face à des défis liés au dégel du pergélisol et du muskeg (Tweed, 2015). Le muskeg offre une base de mauvaise qualité pour les chemins de fer, principalement en raison de sa faible compressibilité (Lautala et coll., 2008). Le déplacement, l'affaissement ou même le soulèvement des rails augmentent en raison des périodes de gel dans ces régions. Le programme de réhabilitation du Hudson Bay Railway, une initiative financée conjointement par les gouvernements du Manitoba et du Canada en partenariat avec l'exploitant de la ligne, OmniTRAX, est un programme échelonné sur 10 ans qui a été élaboré spécialement pour réduire les impacts de la dégradation du pergélisol et de la hausse des températures sur le service ferroviaire, en particulier entre The Pas et Churchill. Cette initiative comprend la stabilisation de l'assiette des rails – à ce jour, environ 50 millions de dollars ont été dépensés dans la réhabilitation de la ligne Bay depuis le début du programme en 2008 (Wang et coll., 2016).

Cependant, la réhabilitation des lignes de chemin de fer n'a pas eu le succès espéré initialement en raison des défis liés aux zones de pergélisol et de muskeg discontinues. La ligne de chemin de fer (et son ballast d'origine) a été installée au cours de l'hiver 1928-1929 sur du muskeg gelé durant la période de l'année où la stabilité de la piste est la plus grande. En raison du réchauffement des températures, le ballast s'enfonce dans le muskeg, exigeant des mesures correctives plus fréquentes. Par exemple, en juin et juillet 2014, OmniTRAX a ajouté 40 000 tonnes de ballast sur le tronçon de la ligne de chemin de fer située entre Gillam et Churchill (Tweed, 2015) en plus des mesures correctives de l'année précédente lors desquelles 15 000 tonnes de ballast avaient été ajoutées. La compagnie considère maintenant le remblayage à titre de coût opérationnel plutôt que de coût en capital. Des recherches récentes (Addison et coll., 2015) confirment que les mesures de stabilisation ne sont pas efficaces et que la détérioration s'accélère.

Compte tenu des prévisions à long terme de réchauffement dans les basses terres de la baie d'Hudson, il deviendra de plus en plus difficile de maintenir la stabilité de l'assiette des rails. Les ingénieurs géotechniques établissent donc actuellement des stratégies d'adaptation.

À mesure que le pergélisol dégèle, certains travaux techniques visant à stabiliser la voie ferroviaire entraîneront une augmentation des coûts et des difficultés (Wang et coll., 2016), mais d'autres travaux pourraient devenir plus faciles à réaliser. Une des mesures proposées comprend le soulèvement de la voie et l'ajout d'une couche de gravier pour isoler le pergélisol (et ainsi améliorer la stabilité), bien que l'entretien constant qui serait nécessaire rende cette solution difficile à mettre en œuvre (Wang et coll., 2016). Une autre approche possible pour stabiliser le muskeg dans l'assiette des rails consiste à mélanger du ciment avec le tapis végétal (pourvu que le mouvement du muskeg puisse être contrôlé). Toutefois, cette option nécessite d'autres examens et évaluations étant donné que le substrat gelé rend difficile le mélange du ciment avec le muskeg (Eddie Choi, CP, communication personnelle, 2015). Le dégel du pergélisol pourrait améliorer la viabilité de cette technique de stabilisation, et ce, même si l'efficacité à long terme demeure incertaine.

Rédigé par Al Phillips et Will Towns

5.2 MESURES D'ADAPTATION POUR LES RAILS

Une adaptation commune aux événements de pluie extrêmes dans les Prairies est d'accroître les capacités des ponceaux. Par exemple, la Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada (CN) prévoit d'installer des ponceaux sur lignes principales capables de protéger contre des événements de pluie à récurrence de 100 ans et d'améliorer la capacité de protection des ponceaux des lignes secondaires contre des événements de pluie à récurrence de 50 ans. Certaines municipalités favorisent un seuil de 1 par 500 ans lors de la négociation des mises à niveau des ponceaux de chemins de fer (Mario Ruel, CN, communication personnelle, 2015). Les ingénieurs géotechniques indiquent que bien que les décisions soient prises au cas par cas en utilisant le meilleur jugement professionnel de l'ingénieur du projet, un changement est en cours dans les perspectives. Alors que les événements de 1 par 100 ans étaient la norme dans le passé, le critère de 1 par 200 ans est un point de référence de plus en plus commun (Tom Edwards, Services géotechniques, CN, communication personnelle, 2015).

Dans certaines régions des Prairies, les rails et les ponts ferroviaires sont également élevés à des niveaux supérieurs en réponse aux risques d'inondation saisonniers (représentants de la Commission manitobaine de la route située du côté est et représentants de la Commission du canal de dérivation du Manitoba, communication personnelle, 2015). Par exemple, le long du canal de dérivation de la rivière Rouge de Winnipeg, les ponts ferroviaires (et routiers) ont été élevés à un seuil de protection contre les événements à récurrence de 700 ans (voir l'étude de cas 6).

En réponse à la fréquence croissante des événements de vents violents (à la fois observés et projetés), des capteurs éoliens sont installés sur certains ponts ferroviaires dans les Prairies, en particulier sur les plus hautes structures (Mario Ruel, CN, communication personnelle, 2015). Avec un avertissement de vent de forte intensité, les exploitants ferroviaires peuvent retarder le passage sur les ponts ferroviaires ou ajuster la vitesse en conséquence.

La compagnie BNSF fait état d'une plus grande utilisation de clôtures contre la neige sur son réseau (Amiro et coll., 2014). Ces clôtures aident à maintenir les pistes libres d'accumulations de neige en hiver.

ÉTUDE DE CAS 6 : CONSIDÉRATIONS RELATIVES AUX RÉSEAUX ROUTIERS ET FERROVIAIRES DANS LE PROJET D'AGRANDISSEMENT DU CANAL DE DÉRIVATION DE LA RIVIÈRE ROUGE

Le canal de dérivation est conçu pour protéger la ville de Winnipeg, y compris son infrastructure de transport, contre les inondations causées par l'écoulement printanier le long de la rivière Rouge, bien qu'il puisse être utilisé à d'autres moments en réponse à des événements de précipitations extrêmes dans le bassin hydrographique. Depuis 1968, il est estimé que le canal de dérivation artificielle a empêché plus de 40 milliards de dollars (en dollars de 2011) de dommages causés par les inondations à Winnipeg. Les structures et les systèmes associés au canal de dérivation sont collectivement reconnus comme un lieu historique national en génie civil et on considère qu'il est l'une des seize merveilles d'ingénierie du monde (Government of Manitoba, 2011).

Bien que le canal de dérivation fonctionne bien depuis son achèvement en 1968, les récents événements d'inondations importantes ont incité les planificateurs à examiner la fréquence attendue des possibilités de catastrophes causées par les crues. La structure a été conçue pour traiter 60 000 pieds cubes par seconde (pi^3/s) d'eau, ce qui est considéré comme suffisant pour protéger Winnipeg contre un événement à récurrence de 90 ans. Des améliorations ultérieures ont augmenté la capacité du canal à 90 000 pi^3/s . Une inondation majeure survenue en 1997 a renforcé les préoccupations relatives à la fréquence future des crues extrêmes, et les planificateurs ont commencé à penser que les événements qui étaient auparavant

...

...

considérés comme étant à récurrence de 200 ans pourraient devenir des événements à récurrence de 20 ans. En réponse, la capacité du canal de dérivation a été augmentée davantage à 140 000 pi³/s pour fournir une protection contre les événements à récurrence 700 ans, une capacité au-delà de la plus grande crue de la rivière jamais enregistrée (qui a eu lieu en 1826).

Bien que les changements attendus dans les conditions climatiques et météorologiques extrêmes aient été les principaux facteurs pour l'expansion du canal de dérivation de la rivière Rouge, ces modifications ont également été apportées pour des raisons économiques. En l'absence d'améliorations apportées aux ponts routiers et ferroviaires sur le canal de dérivation, la circulation routière et ferroviaire d'est en ouest et l'accès au Corridor du centre du continent pourraient être interrompus ou sérieusement entravés lors d'une inondation. Cela aurait également des conséquences économiques graves à l'extérieur du Manitoba. Un pourcentage considérable du commerce de l'Alberta, de la Saskatchewan et (dans une moindre mesure) de l'Ontario destinés aux marchés américains est acheminé via le portail I75/I29.

Les mesures d'adaptation des routes et des chemins de fer représentaient une partie importante de l'expansion. Les ponts ont été soulevés et les jetées modifiées pour faire en sorte que le trafic routier et ferroviaire puisse circuler sans entrave sur le réseau routier traversant le canal de dérivation maintenant élargi. Voici quelques exemples :

- Ponts sur la PTH 59 sud : Deux ponts routiers existants sur les voies en direction nord et en direction du sud ont été remplacés. Les nouvelles structures de pont sont plus élevées de 4 m et plus longues de 50 m que les structures précédentes.
- Pont sur la Transcanadienne : Le pont d'origine a été remplacé par deux nouvelles structures de pont plus élevées de 3,9 m et plus longues de 96,6 m que le pont d'origine.
- Pont sur la PTH 15 : Le pont sur la PTH 15 a été remplacé par une nouvelle structure environ plus élevée de 1,9 m que le pont précédent et des modifications supplémentaires ont également été apportées.
- Pont sur la PTH 44 : Le pont sur la PTH 44 a été remplacé par une nouvelle structure plus élevée de 0,9 m et plus longue de 16 m que la structure précédente, et des améliorations ont été apportées aux intersections.
- Pont ferroviaire du CN à Sprague : Le pont ferroviaire à Sprague sur lequel passe la ligne du CN a été remplacé par un nouveau pont plus long d'environ 77 m et plus élevé de 2,7 m que la structure précédente.
- Pont ferroviaire du CN à Redditt : Le nouveau pont ferroviaire du CN à Redditt est plus long d'environ 34 m et plus élevé de 2,3 m que la structure précédente.
- Pont ferroviaire du CP à Keewatin : Le nouveau pont ferroviaire du CP à Keewatin est plus long d'environ 37 m et plus élevé de 1,3 m que la structure précédente.

Bien qu'elle ne fasse pas spécifiquement partie de l'expansion du canal de dérivation de la rivière Rouge, des plans sont en cours pour éléver le niveau de la PTH 75 Sud jusqu'à la frontière des États-Unis en harmonie avec le niveau de l'Interstate-29 au sud de la frontière canado-américaine. Ces mesures, en conjonction avec l'expansion du canal de dérivation de la rivière Rouge, permettront d'améliorer la fiabilité du transport routier le long du Corridor du centre du continent et des liens est-ouest qui relient l'Alberta, la Saskatchewan et le Manitoba aux marchés du centre des États-Unis.

Rédigé par Al Phillips

6.0 TRANSPORT AÉRIEN

6.1 IMPACTS CONSTATÉS DANS LE PASSÉ ET RISQUES FUTURS

Les exploitants d'aéronefs dans les Prairies signalent plusieurs défis opérationnels liés aux changements climatiques et à l'évolution des conditions météorologiques extrêmes, y compris ce qui suit :

- exigences accrues en matière de dégivrage;
- des retards de vols plus fréquents en raison de la fermeture de l'aéroport de destination;
- des événements de vent ayant une incidence sur l'horaire des approches;
- restrictions relatives à la masse de fret en raison des pistes meubles.

La plus grande fréquence et intensité des événements météorologiques extrêmes (les précipitations en particulier) est une préoccupation majeure pour l'aviation dans les Prairies. Certains transporteurs aériens opérant dans les provinces des Prairies ont fait état de la fréquence accrue des retards ou des annulations de vols, principalement en raison des précipitations et du brouillard. Les représentants des aéroports et les administrateurs provinciaux d'aéroports et d'aérodromes n'appartenant pas au Réseau national d'aéroports ont eux aussi exprimé des inquiétudes relatives à la fréquence accrue de ces événements.

Les exploitants aériens dans le nord des Prairies ont observé des changements plus importants que les opérateurs dans le sud, et les praticiens suggèrent que les coûts de la variabilité du climat ont été particulièrement difficiles à assumer par les petits exploitants. La résilience (ou la capacité d'adaptation) des aéroports du sud est généralement plus élevée que celle des aéroports du Nord en raison de la plus grande disponibilité de l'équipement au sol et de la redondance des systèmes (représentants de Calm Air, communication personnelle, 2015).

Les petits aéroports dans le nord des Prairies ont connu des difficultés qui leur sont propres en raison de l'eau stagnante sur les pistes. Particulièrement au printemps, les précipitations s'infiltrent dans la base de la piste et ramollissent la surface. Lorsque des avions atterrissent sur ces pistes meubles, des dépressions sont formées, permettant à l'eau stagnante de s'accumuler plus facilement. Dans un effort pour réduire au minimum la formation de dépressions, les transporteurs réduisent leurs charges utiles (représentants de Calm Air, communication personnelle, 2015).

Un transporteur a indiqué qu'au cours des dernières années, il avait connu une augmentation significative des retards attribuables à la variabilité du climat, en particulier dans le nord des Prairies. Cela a contribué en partie à un besoin accru pour le dégivrage des avions. La variabilité accrue des températures a entraîné une plus grande fréquence des conditions idéales favorisant la formation de glace sur les surfaces de contrôle des aéronefs (représentants de Calm Air, communication personnelle, 2015). Les stations de dégivrage sont rares dans les collectivités du nord des Prairies, ce qui entraîne souvent des retards prolongés pour les envolées.

Le froid extrême a également une incidence sur les activités aériennes. Tous les avions ont une fourchette de températures pour laquelle ils sont homologués. Cette fourchette de température varie en fonction de l'aéronef et des variantes rattachées à un type de cellule. Un aéronef peut être retenu au sol et ne pas être autorisé à faire son vol de retour si les températures chutent rapidement en cours de vol. Dans les Prairies, les faibles températures posent actuellement un risque opérationnel supérieur aux températures élevées. Par exemple, en raison des faibles températures de l'hiver 2013/2014, des vols réguliers de certains transporteurs américains vers l'ouest du Canada ont été annulés parce que l'avion était seulement homologué à 30 °C. On rapporte que ces perturbations des horaires surviennent avec une plus grande fréquence en raison de l'évolution rapide des températures, ce à quoi la région des Prairies est sujette.

6.2 PRATIQUES D'ADAPTATION

Infrastructure

Des modifications ont été apportées dans les aéroports des Prairies afin d'améliorer la capacité des pistes à repousser l'eau des précipitations (représentants de Perimeter Aviation, communication personnelle, 2015). Par exemple, certains types de produits d'étanchéité sont utilisés sur des pistes de gravier. Cela consiste en l'application d'une couche épaisse de $\frac{3}{4}$ po à 1 po d'un matériau hydrofuge, même si la piste est toujours classée comme une piste d'atterrissement en gravier traité. Ces produits d'étanchéité sont utilisés sur certaines pistes en Saskatchewan et en Alberta, mais ne sont pas encore utilisés sur les pistes de gravier au Manitoba. Le produit d'étanchéité contribue à réduire l'infiltration de l'humidité dans le matériau de fondation de la piste et les cas de l'eau stagnante, réduisant ainsi les problèmes de traction pour les avions qui tentent d'atterrir sur des pistes plus courtes (Organisation de l'aviation civile internationale, 2010).

Activités d'exploitation

Les transporteurs aériens qui œuvrent dans les Prairies rapportent certains changements apportés aux activités et à l'équipement afin de mieux gérer les difficultés posées par les conditions météorologiques et les changements climatiques. Comme mesure d'adaptation aux perturbations des horaires dans les collectivités éloignées du Nord, les transporteurs ont agrandi leurs installations au sol (entreposage) de sorte que les avions de fret qui sont retardés puissent procéder au déchargement en dehors des heures normales d'ouverture de la collectivité et continuer leur route. Les services de transport terrestre peuvent ensuite recueillir et distribuer les marchandises pendant les heures ouvrables. Les transporteurs dans les collectivités du Nord où il manque de stations de dégivrage utilisent également des systèmes de dégivrage portables en réponse à la hausse des cas de givrage.

Pour s'adapter aux événements de brouillard plus fréquents, un transporteur en Saskatchewan rapporte avoir apporté des changements à l'horaire afin de permettre au brouillard de se dissiper, reportant les départs prévus tôt le matin à tard le matin dans certaines collectivités (Lloyd Epp, West Wind Aviation, communication personnelle, 2015).

Une adaptation potentielle aux perturbations liées à l'homologation relative à la température est de réduire le nombre de types d'avions différents ou de configurations différentes dans une flotte donnée. Bien qu'il existe d'autres raisons opérationnelles pour réduire au minimum le nombre de types d'aéronefs dans une flotte (à savoir, la simplification des exigences d'entretien), la cohérence dans la l'homologation relative à la température de l'air est un facteur dans les Prairies.

7.0 TRANSPORT MARITIME

La présente section recense les risques encourus par les navires et les ports dans le contexte des changements climatiques et des régimes météorologiques extrêmes, et décrit les efforts d'adaptation déployés en réponse à ces impacts. Comme seul point d'accès de la région des Prairies aux eaux marines, la discussion suivante se concentre spécifiquement sur Churchill et sur sa situation unique.

7.1 IMPACTS CLIMATIQUES ET POSSIBILITÉS FUTURES

Les effets de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale ne seront pas ressentis de manière uniforme partout sur la planète. Certaines régions aux latitudes plus élevées dans le Nord, y compris la baie d'Hudson (et Churchill, au Manitoba), sont susceptibles de connaître une baisse du niveau de la mer tout au long du XXI^e siècle en raison de l'ajustement isostatique (soulèvement postglaciaire) (Bush et coll., 2014). Par conséquent, Churchill pourrait être l'un des quelques ports au Canada qui

ne sera pas touché par l'élévation du niveau de la mer et par des ondes de tempêtes plus violentes. À l'heure actuelle, les marées à Churchill ont une amplitude de trois mètres. L'augmentation des températures moyennes est susceptible d'entraîner une réduction de la saison des glaces marines et, de ce fait, une prolongation de la saison de navigation à Churchill (actuellement d'une durée d'environ 14 semaines). Toutefois, la baisse du niveau de la mer le long de la côte ouest de la baie d'Hudson pourrait donner lieu à une augmentation des problèmes de navigation pour les grands navires qui tentent de tirer parti de la saison prolongée.

7.2 MESURES D'ADAPTATION DE L'INFRASTRUCTURE ET DES ACTIVITÉS MARITIMES

Des mesures de transition ont été mises en place pour aider le port à se préparer à la fin du transport du grain en 2012. Ces fonds pour les améliorations immobilières visent à encourager la diversification des activités portuaires, à élargir la capacité des ports au-delà de son orientation traditionnelle de manutention pour l'expédition de céréales en vrac pour inclure d'autres systèmes de transport, y compris des activités intermodales (Groupe de travail sur les transports et l'environnement, 2014). Bien que ces améliorations soient peu susceptibles d'être explicitement liées à des mesures d'adaptation aux changements climatiques, un changement dans la capacité de transport maritime à courte distance peut avoir des implications sur le prolongement de la saison de réapprovisionnement maritime. Le propriétaire et l'exploitant du port de Churchill rapporte que les niveaux d'eau aux quais affichent une tendance à la baisse, ce qui laisse croire que la seule mesure d'adaptation nécessaire serait le dragage du port (Jeff McEachern, Omnitrax Canada, communication personnelle, 2015).

La capacité de chargement des navires du port de Churchill a été inactive pendant une grande partie de chaque année, la saison d'expédition se déroulant normalement sur 14 semaines environ à partir de la mi-juillet à la fin octobre. Si la saison sans glace est prolongée, plus d'activités pourraient être soutenues sans que des améliorations importantes soient apportées aux infrastructures. Des défis subsistent en ce qui concerne le port de Churchill, bien que ceux-ci concernent principalement l'arrière-pays et touchent à l'accès en surface vers le port à partir des points de distribution des livraisons au sud (décrits dans l'étude de cas 5).

L'étude de cas 7 décrit les résultats et les recommandations d'une récente évaluation du CVIIP effectuée sur les infrastructures de transport reliant le Manitoba et le Nunavut, y compris les composants maritimes de Churchill.

ÉTUDE DE CAS 7 : VULNÉRABILITÉ AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT DU MANITOBA-NUNAVUT

Une étude récente (Duguid et al., 2015) a examiné les principales infrastructures soutenant la fourniture de biens et de services entre le nord du Manitoba et de la région de Kivalliq au Nunavut. Le projet visait à relever les vulnérabilités potentielles associées aux changements climatiques, au développement économique du Nord et à la croissance démographique. Les changements climatiques sont susceptibles d'imposer un stress physique direct sur cette infrastructure d'approvisionnement dans le Nord tout en augmentant la demande et les attentes en matière de rendement. Les recommandations de l'étude comprenaient ce qui suit :

1. Développement et utilisation d'un **modèle de chaîne d'approvisionnement intégrée** qui appuie une **compréhension systématique** de la façon dont les décisions peuvent affecter la chaîne d'approvisionnement dans son ensemble.
2. Une **gouvernance intégrée** pour les infrastructures de transport soutenant le Nord.

...

...

3. Une **stratégie de planification intégrée et d'investissement stratégique** pour une infrastructure de transport pour le Nord.

L'étude a analysé la vulnérabilité de l'ingénierie du Port de Churchill, du centre de services de fret Thompson et de l'aéroport de Rankin Inlet aux conditions actuelles et futures par l'entremise du Protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP). L'évaluation a déterminé qu'aucun des actifs n'était à risque élevé d'impact, bien que tous les trois soient confrontés à de nombreux risques modérés. On a recommandé que les risques de niveau moyen soient étroitement surveillés et reconnu que la plupart de ces risques auraient une incidence sur les activités, alors que très peu toucheraient l'infrastructure. Alors que certains risques peuvent être gérés en augmentant les matériaux, les effectifs et les coûts, d'autres ne peuvent pas être contrôlés et, dans ces cas, la préparation en vue d'interruptions et de retards et l'entretien régulier des infrastructures ont été recommandés.

Cependant, malgré la robustesse individuelle relative des moyens de transport eux-mêmes, l'ensemble du système pourrait demeurer vulnérable. L'infrastructure — construite en fonction des niveaux historiques des tendances relatives à la demande et au climat — a été améliorée de façon ponctuelle et en fonction des besoins locaux, souvent sans tenir compte des impacts sur l'ensemble du système et les collectivités qu'elle soutient.

Voici des exemples de vulnérabilités de l'infrastructure (risques moyens) qui pourraient avoir des répercussions importantes sur la chaîne d'approvisionnement :

- la voie ferroviaire entre Thompson et Churchill, qui a été fortement et à plusieurs reprises touchée par la dégradation du pergélisol et qui est vulnérable à des retards et des perturbations;
- l'autoroute 6 vers Thompson, qui peut être vulnérable à des fermetures en raison de feux de forêt ou d'inondations.

En résumé, ces recommandations soulignent l'importance d'une approche intégrée pour réduire le risque futur.

Rédigé avec la collaboration de Naomi Happychuk (*Initiative pour une prospérité durable dans le Nord, Université de Winnipeg*)

8.0 LACUNES DANS LES RENSEIGNEMENTS ET CONCLUSIONS

Le présent chapitre résume l'état des connaissances sur les impacts climatiques, les risques et les pratiques d'adaptation pour les systèmes de transport dans les Prairies à la lumière de la littérature et de l'expérience des praticiens disponibles. Plusieurs écarts ont été recensés au cours de la recherche.

Il y a un manque de renseignements étayés au moyen de documents sur des pratiques d'adaptation et des impacts sur le climat propres au transport dans les Prairies, ce qui laisse croire que peu de chercheurs se sont penchés sur ce sujet dans la région.

Des lacunes existent dans les données climatiques qui sont importantes pour les exploitants de services de transport. Les projections climatiques à long terme (température et précipitations) peuvent être utiles pour la planification des infrastructures à long terme, mais des renseignements supplémentaires sur les changements projetés en matière de fréquence et de gravité des événements météorologiques extrêmes pourraient être utiles. Les gouvernements et les exploitants des Prairies ont investi dans la surveillance météorologique et dans la communication pour réduire les risques liés aux événements météorologiques extrêmes, mais des prévisions plus précises de l'emplacement et du moment de ces événements seraient utiles pour la planification opérationnelle à court et à moyen terme.

Il y a des lacunes dans les données sur le transport, ce qui rend difficile l'analyse des tendances, en particulier pour les modes spécifiques au niveau provincial et régional. Par exemple, comme il n'existe pas de données connues sur la fréquence des avions redirigés vers d'autres aéroports ou des avions qui doivent « remettre les gaz » (c.-à-d. des atterrissages avortés), il est difficile de déterminer s'il y a eu variation des répercussions des événements météorologiques extrêmes sur les indicateurs opérationnels dans les aéroports.

En dépit de ces lacunes dans les renseignements, les gouvernements et les opérateurs dans les Prairies ont déployé des efforts pour réduire les risques climatiques futurs pour l'infrastructure et les activités opérationnelles, en particulier ceux qui sont associés aux précipitations. Les stratégies de contrôle des inondations, visant à réduire les risques liés aux affouillements éventuels, sont des stratégies d'adaptation clés dans les trois provinces des Prairies.

Simultanément, les exploitants du transport dans les Prairies ont tendance à adopter une approche réactive et au cas par cas en ce qui concerne les mesures d'adaptation aux conditions climatiques et météorologiques. Grâce à l'amélioration des renseignements et des connaissances sur les risques climatiques à plus long terme, les décideurs dans le secteur du transport dans les Prairies pourront prendre des mesures d'adaptation plus proactives.

RÉFÉRENCES

- Addison, P., Oommen, T., et Lautala, P. (2015). A review of past geotechnical performance of the Hudson Bay Railway embankment and its comparison to the current condition. *Proceedings of the 2015 Joint Rail Conference*.
- Amiro, B., Rawluck, C., et Wittenburg, K. (2014). *Moving toward prairie agriculture 2050 (Green paper)*. Alberta Institute of Agrologists Conference Proceedings, p. 35. Repéré à http://www.albertaagrologists.ca/site/page_404?url=http://www.albertaagrologists.ca/files/conferences/2014%20aia%20conference/conference%20handouts/2014%20green%20paper%20final%20pdf%20for%20web.pdf
- Andrey, J. et Mills, B. (2003). Climate change and the Canadian transportation system : Vulnerabilities and adaptations. Dans J. Andrey et C. Knapper (Éds.), *Weather and transportation in Canada* (pp. 235-279.). Publication series number 55, Department of Geography, University of Waterloo.
- Association des chemins de fer du Canada (2015). *Chemins de fer Canadiens : Tendances ferroviaires 2014*. Repéré à <http://www.railcan.ca/fr/publications/trends>
- Atkins, E. (2014, 9 novembre). After harsh winter, North American railways brace for repeat performance. *The Globe and Mail*. Repéré à <http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/despite-rosy-forecast-north-american-railways-brace-for-harsh-winter/article21514708/>
- 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.
- Babaian, S. (1985). *The coal mining industry in the Crow's Nest Pass*. Edmonton, AB : Alberta Culture.
- Beaudoin, A., Lemmen, D., et Vance, R. (1997). *Paleoenvironmental records of postglacial climate change in the Prairie ecozone*. Repéré à http://www.scirpus.ca/eman/eman_page1.htm
- Bonsal, B., Aider, R., Gachon, P., et Lapp, S. (2013). An assessment of Canadian prairie drought : Past, present, and future. *Climate Dynamics*, 41(2), 501-516.
- Bonsal, B., Wheaton, E., Chipanshi, A., Lin, G., Sauchyn, D., et Wen, L. (2011). Drought research in Canada : A review. *Atmosphere-Ocean*, 49(4), 303-319.
- 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
- Bureau de la sécurité des transports du Canada (2013). *Rapports d'enquête ferroviaire*. Repéré à <http://www.bst-tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/index.asp>
- Bush, E.J., Loder, J.W., James, T.S., Mortsch, L.D. et Cohen, S.J. (2014). Un aperçu des changements climatiques au Canada. 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. 23-64). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Cash, M. (2014, 10 avril). Embattled railway boss fires back. *Winnipeg Free Press*. Repéré à <http://www.winnipegfreepress.com/business/embattled-railway-boss-fires-back-254675851.html>
- CBC News. (2012a). Manitoba ice roads threatened by mild weather. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/manitoba/manitoba-ice-roads-threatened-by-mild-weather-1.1291472>
- CBC News. (2012b). Manitoba's winter roads finally open. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/manitoba/manitoba-s-winter-roads-finally-open-1.1274617>
- CBC News. (2015a). Wildfires in Saskatchewan forcing evacuations, road closures. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/saskatchewan/wildfires-in-saskatchewan-forcing-evacuations-road-closures-1.3131340>
- CBC News. (2015b). Airship made in Manitoba almost ready for test flight. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/manitoba/airship-made-in-manitoba-almost-ready-for-test-flight-1.3271827>
- Dai, A. (2011). Drought under global warming : A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews*, 2(1), 45-65.
- Duguid, T., Happichuk, N., Rempel, R., Swanson, D., et Gerrard, P. (2015). *Climate risk assessment of transportation infrastructure requirements supporting the MB-NU supply chain*. Gouvernements du Manitoba et du Nunavut.
- Ebert, R. (2000). Understanding the impact of transportation on economic development. *Transportation in the new millennium : State of the art and future directions (Perspectives from Transportation Research Board standing committees)*. Washington, DC: National Research Council of the National Academies.
- Environnement Canada (2014). Les dix événements marquants au Canada en 2013. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=5BA5EAFC-1&offset=2&toc=hide>
- Environnement Canada. (2015a). Risques de printemps et d'été. Repéré à <https://ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=6C5D4990-1>
- Environnement Canada. (2015b). Bulletins des tendances et des variations climatiques – Résumé de l'année 2014. Repéré à <https://www.ec.gc.ca/sc-cs/default.asp?lang=Fr&n=60AC2030-1>
- Government of Alberta. (2013). *Alberta protects roads, bridges against future flood damage*. Repéré à <http://alberta.ca/release.cfm?xID=35441D7B4B5CB-CC92-86D4-DF91A48CA0C5B1FC>

- Government of Manitoba. (2011). Red river floodway. Repéré à <http://www.gov.mb.ca/flooding/fighting/floodway.html>
- Government of Manitoba. (2015a). *Transportation : Seaport at Churchill, Manitoba*. Repéré à <http://www.gov.mb.ca/iec/invest/busfacts/transport/port.html>
- Government of Manitoba. (2015b). *Infrastructure and transportation : 2015 Manitoba spring road restrictions (SRR) Program*. Repéré à <http://www.gov.mb.ca/mit/srr/>
- Government of Manitoba. (2015c). *Infrastructure and transportation : Water management and structures*. Repéré à <http://www.gov.mb.ca/mit/wcs/index.html>
- Government of Manitoba. (2015d). *Manitoba 511 – Road and traveler information*. Repéré à <http://www.gov.mb.ca/mit/roadinfo/>
- Government of Saskatchewan. (s.d.). *Road conditions – Highway hotline*. Repéré à <http://www.saskatchewan.ca/live/transportation/highway-hotline>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2013). *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Repéré à https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf
- Groupe de travail fédéral-provincial sur l'avenir de Churchill. (Janvier 2013). Rapport final. Gouvernement du Canada et gouvernement du Manitoba. Repéré à https://www.gov.mb.ca/mit/transpolicy/tpsd/pdf/future_churchill.pdf
- Groupe de travail sur les transports et l'environnement. (2014). *Les transports et l'environnement : Rapport du Groupe de travail*. Ottawa, ON : Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière. Repéré à <http://www.comt.ca/reports/transportandenvirn-1014-f.pdf> et annexe A <http://www.comt.ca/reports/transportandenvirn-app-1014.pdf>
- Hochheim, K. et Barber, D. (2014). An update on the ice climatology of the Hudson Bay system. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(1), 66-83.
- ICF Marbek. (2012). *Climate change risk assessment and adaptation report : Ministry of Transportation*. Submitted to Alberta Department of Environment and Sustainable Resource Development, Climate Change Secretariat. Repéré à http://www.transportation.alberta.ca/Content/docType29/Production/Climate_Change_Risk_Assessment.pdf
- James, T., Henton, J., Leonard, L., Darlington, A., Forbes, D., et Craymer, M. (2014). *Relative sea level projections in Canada and the adjacent mainland United States*. Ottawa, ON : Commission géologique du Canada. Ressources naturelles Canada. Dossier public 7737. Repéré à http://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/geott/ess_pubs/295/295574/of_7737.pdf
- Kelm, R. et Wylie, N. (2008). *Which way is it moving? Guidelines for diagnosing heave, subsidence and settlement*. Houston, TX : Forensic Engineers Inc. Repéré à http://www.foundationperformance.org/pastpresentations/Kelm_Pres-Doc-9Apr08.pdf
- Kharin, V. et Zwiers, F. (2000). Changes in extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *Journal of Climate* (13) 21, 3760-3788.
- Kovacs, P. et Thistlethwaite, J. (2014). Industrie. 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. 135-158). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Lackenbauer, W. et Lajeunesse, A. (2014). *On uncertain ice : The future of Arctic shipping and the Northwest Passage*. Calgary, AB : Canadian Defence and Foreign Affairs Institute. Repéré à <http://www.policyschool.ucalgary.ca/sites/default/files/research/uncertain-ice-lackenbauer-lajeunesse.pdf>
- Lautala, P., Ahlborn, T., et Harris, D. (2008). *Synthesis of railroad engineering best practices in areas of deep seasonal frost and permafrost*. Michigan Tech Technology Transfer Outreach Publication, prepared for the University of Alaska – Fairbanks, p. 49.
- Lemmen, D.S., Vance, R.E., Campbell, I.A., David, P.P., Pennock, D.J., Sauchyn, D.J., et Wolfe, S.A. (1998). *Geomorphic systems of the Palliser Triangle, southern Canadian Prairies : Description and response to changing climate*. Ottawa, ON : Geological Survey of Canada Bulletin 521. 72 p.
- Lohse-Busch, H., Duoba, M., Rask, E., Stutenburg, K., Gowri, V., Slezak, L., et Anderson, D. (2013). *Ambient temperature (20°F, 72°F and 95°F) impact on fuel and energy consumption for several conventional vehicles, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles and battery electric vehicle*. SAE Technical Paper 2013-01-1462.
- Manitoba East Side Road Authority. (n.d.). *The East Side transportation initiative*. Repéré à <http://www.eastsideroadauthority.mb.ca/questions-and-answers.html>
- Manitoba Infrastructure and Transportation. (2011). *Winter roads in Manitoba*. Repéré à <http://www.gov.mb.ca/mit/winter/index.html>
- Mekis, E. et Vincent, L. (2011). An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 2, 163-177.
- Middleton, W. (2000). *Yet there isn't a train I wouldn't take : Railway journeys*. Bloomington, IN : Indiana University Press.
- Miller, P. (2014). *Winter's impact on railroad operations – Fact and fantasy*. Présentation à RAC Rail Day, Ottawa, ON, 2 dec, 2014.
- Nurmikolu, A., et Silvast, M. (2013). Cause, effects, and control of seasonal frost action in railways. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 5(4), 363-367.
- Organisation de l'aviation civile internationale. (2010). *ICAO environmental report : Aviation and adaptation to climate change*. Repéré à http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentReport-2010/ICAO_EnvReport10-Ch6_en.pdf
- Port of Churchill. (s.d.). *About*. Repéré à <http://www.portofchurchill.ca/about>

- Rabson, M. (2012, 6 janvier). Winter road delays threaten water supply. Repéré à <http://www.winnipegfreepress.com/local/winter-road-delays-threaten-water-supply-fix-13679688.html>
- Ressources naturelles Canada. (2016). *Les faits : Incidence du temps froid sur le rendement du carburant*. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/transport/voitures-camions-legers/achats/16749>
- Sauchyn, D. (2010). Prairie climate trends and variability. Dans D. Sauchyn, H. Diaz et S. Kulshreshtha (Éds.), *The new normal : the changing Prairies in a changing climate* (pp. 32-40). Regina, SK : Canadian Plains Research Centre.
- Sauchyn, D., et S. Kulshreshtha. (2008). Prairies. Dans D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (Éds.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (pp. 275-328). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada, Ottawa, ON.
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., et Zhang, X. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. Dans C. Field, V. Barros, T. Stocker, D. Qin, D. Dokken, K. Ebi, M. Mastrandrea, K. Mach, G. Plattner, S. Allen, M. Tignor, et P. Midgley (Éds.), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation* (pp. 109-230). Un rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Cambridge, UK, and New York, NY : Cambridge University Press.
- Sous-groupe de travail fédérale/provinciale/territoriale sur les transports du Nord. (2015, mars). *Report on winter roads*. Ottawa, ON : Transports Canada.
- Statistique Canada. (2005). *Superficie en terre et en eau douce, par province et territoire*. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/phys01-fra.htm>
- Statistique Canada (2011). *Chiffres de population et des logements - Faits saillants en tableaux*, Recensement de 2011. Repéré à <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/hlt-fst/pd-pl/Table-tableau.cfm?Lang=fra&T=101&S=50&O=A>
- Statistique Canada. (2013). *Transport maritime au Canada en 2011*. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/pub/54-205-x/2011000/part-partie1-fra.htm>
- Statistique Canada. (2014a). *Produit intérieur brut, en termes de dépenses, provinciaux et territoriaux*. Repéré à <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?id=3840038&retrLang=fra&lang=fra>
- Statistique Canada. (2014b). *CANSIM tableau 401-0045 : Trafic aérien des marchandises et vols*. CANSIM base de données. Repéré à <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?id=4010045&retrLang=fra&lang=fra>
- Szeto, K., Brimelow, J., Gysbers P., et Stewart, R. (2015). The 2014 extreme flood over the southeastern Canadian Prairies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 20-25.
- Taylor, S. and Parry, J. (2014). *Enhancing the resilience of Manitoba's winter roads system*. International Institute for Sustainable Development. Repéré à https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/winter_roads.pdf
- Tivy, A., Alt, B., Howell, S., Wilson, K., et Yackel, J. (2007). Long-range prediction of the shipping season in Hudson Bay : A statistical approach. *Weather and Forecasting*, 22, 1063-1075.
- 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>
- 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.
- Tweed, M. (2015). OmniTRAX Canada. [Présentation]. *Warming of the North 2015*. Ottawa, ON. Repéré à <http://umanitoba.ca/faculties/management/ti/warming-of-the-north-2015-speakers.html>
- Ville d'Edmonton. (2008). *Climate change vulnerability assessment for Quesnell Bridge*. Repéré à http://www.pievc.ca/e/casedocs/edmonton-quesnell/Quesnell%20Bridge_City%20of%20Edmonton_Refurbishment_Alberta_Final%20Report.pdf
- Ville d'Edmonton. (2011). *Quesnell Bridge and Whitemud Dr. widening – Now fully open*. Repéré à http://www.edmonton.ca/transportation/road_projects/quesnell-bridge-and-whitemud-drive-widening-rehabilitation-project.aspx
- Vincent, L., Wang, X., Milewska, E., Wan, H., Yang, F. et Swail, V. (2012). A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis. *Journal of Geophysical Research*, 117, D18110, doi : 10.1029/2012JD017859.
- Wang, T., Samsom, S., Ng, A.K.Y., et Earl, P. (2016). Climate change and the adaptation planning of inland port and rail infrastructures in the province of Manitoba in Canada. Dans A.K.Y. Ng, A. Becker, S. Cahoon, S.L. Chen, P. Earl, and Z. Yang. (Éds.), *Climate change and adaptation planning for ports* (pp. 59-73). Abingdon, UK : Routledge.



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 (pointe Pelée) 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).

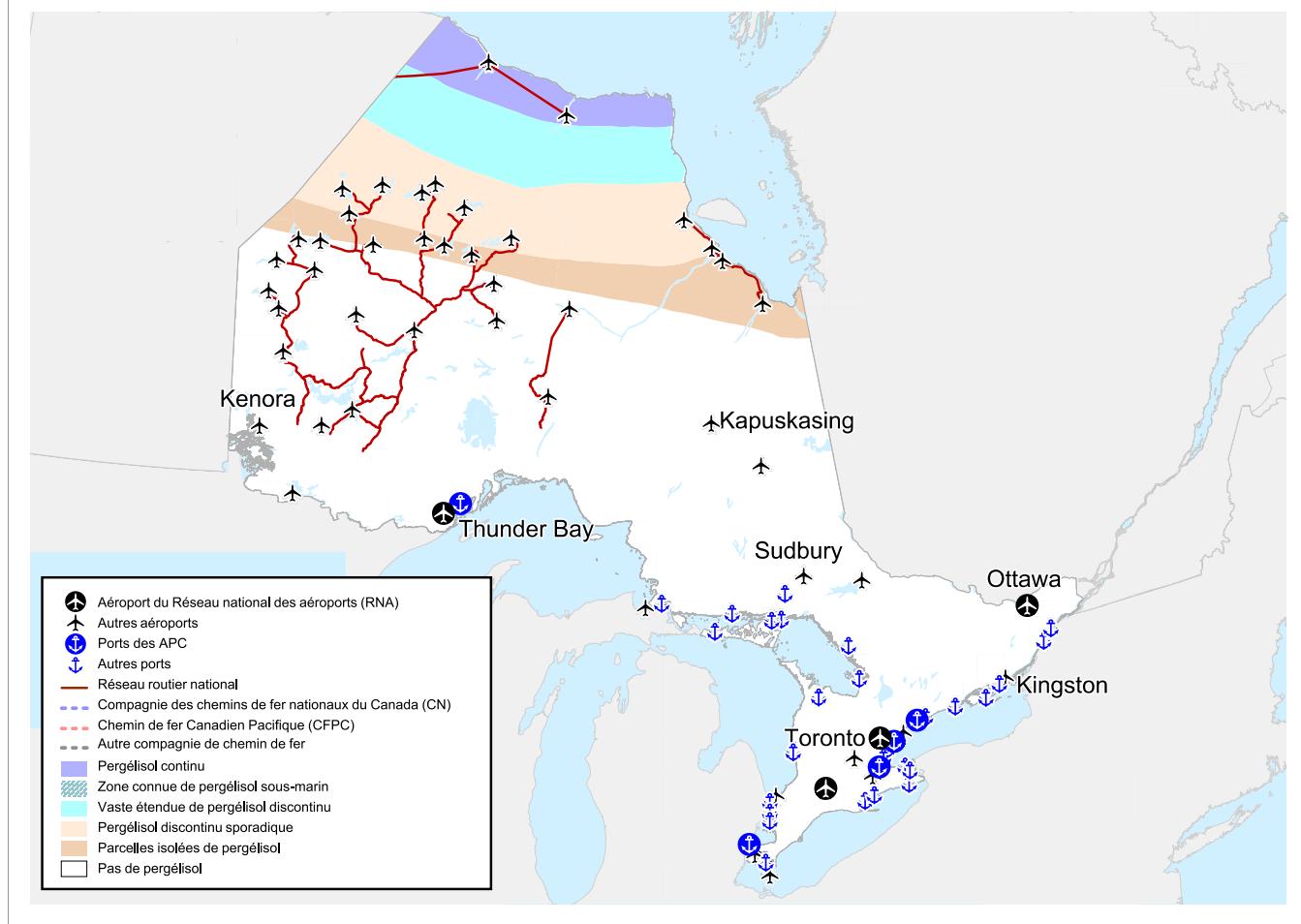
Contrairement aux deux autres sousrégions, l'économie du Sud de l'Ontario est entraînée principalement par les secteurs des services et manufacturier (Hutton, 2010). Essentiellement urbaine (mais comptant de nombreuses collectivités rurales et agricoles dans les banlieues urbaines), l'économie est influencée 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

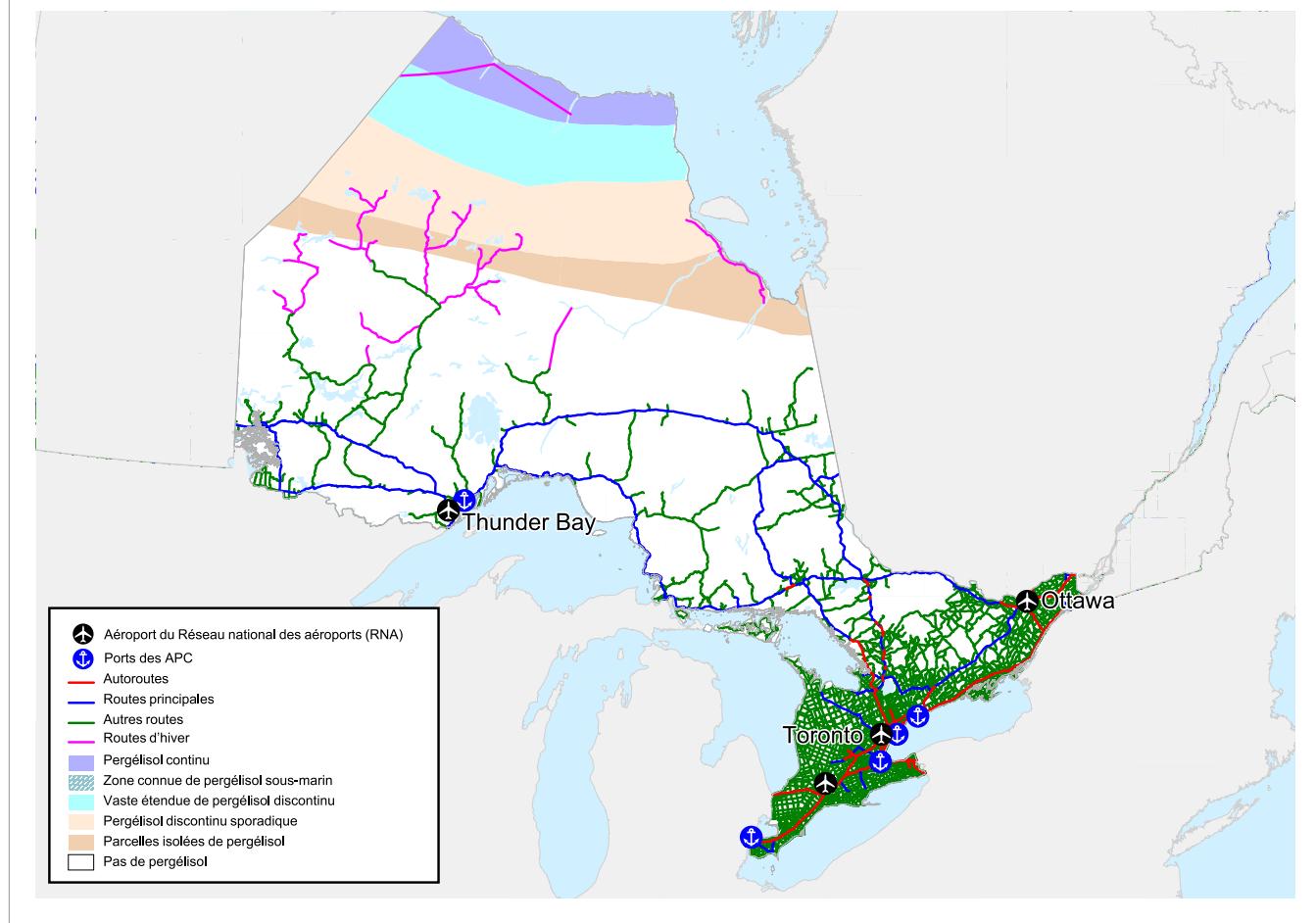
Le réseau routier de l'Ontario comprend plus de 16 600 km de routes gérées par la province, 2 756 ponts, plus de 1 800 km de route Transcanadienne, et un vaste réseau routier régional et municipal (Ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario, 2012). La base d'utilisateurs de ce réseau, 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 Etats-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.banqueduquebec.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 Québec-Windsor, 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 Kitchener-Waterloo 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'Union Pearson 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 États-Unis, 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

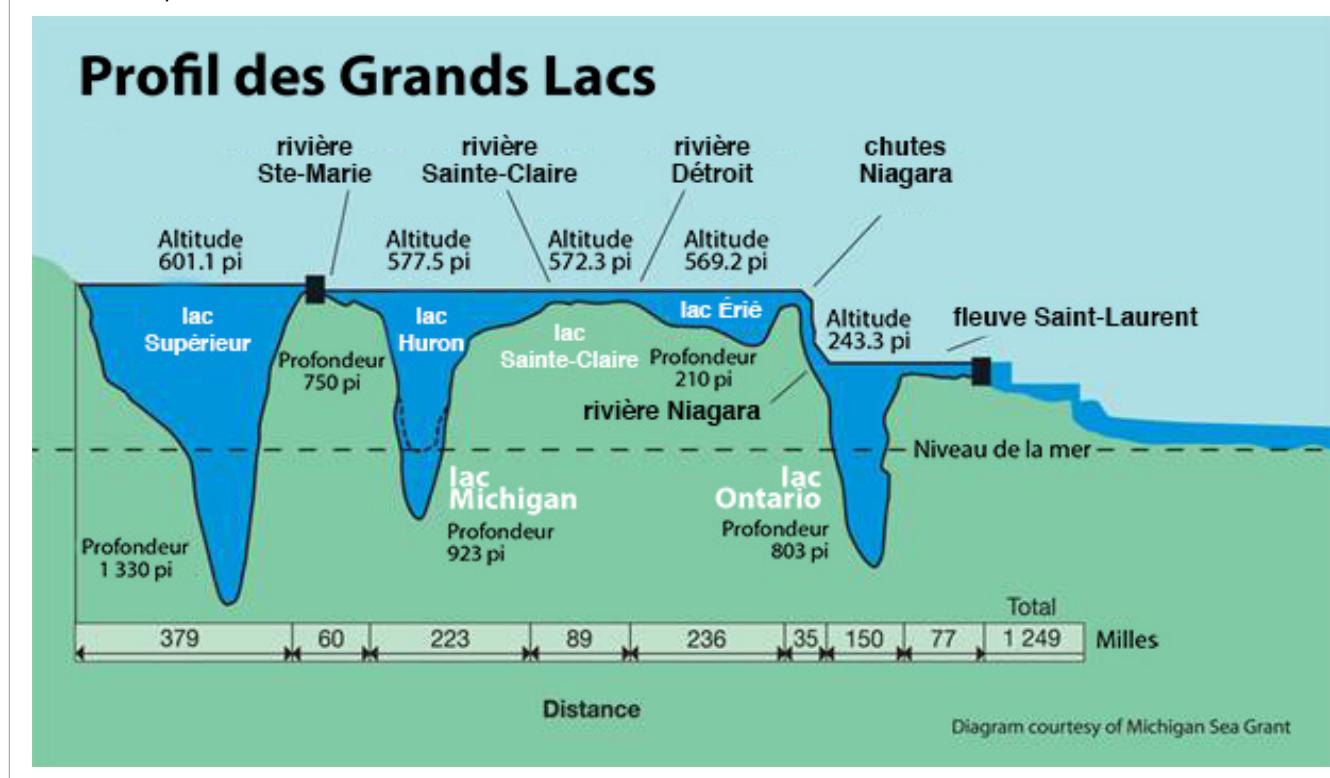
Dans l'ensemble de l'Ontario, les températures moyennes annuelles de l'air à la surface ont augmenté d'environ 1,0 °C à 1,5 °C de 1948 à 2012, alors que les régions du Centre et du Sud ont connu des hausses légèrement plus élevées (Vincent et coll., 2015). Le réchauffement le plus important a été observé 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 (Shlozman 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 (2016-2035)	2050 (2046-2065)	2080 (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)
	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)
PREC 4.5 (Scénario de croissance moyenne des émissions)	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)
	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)

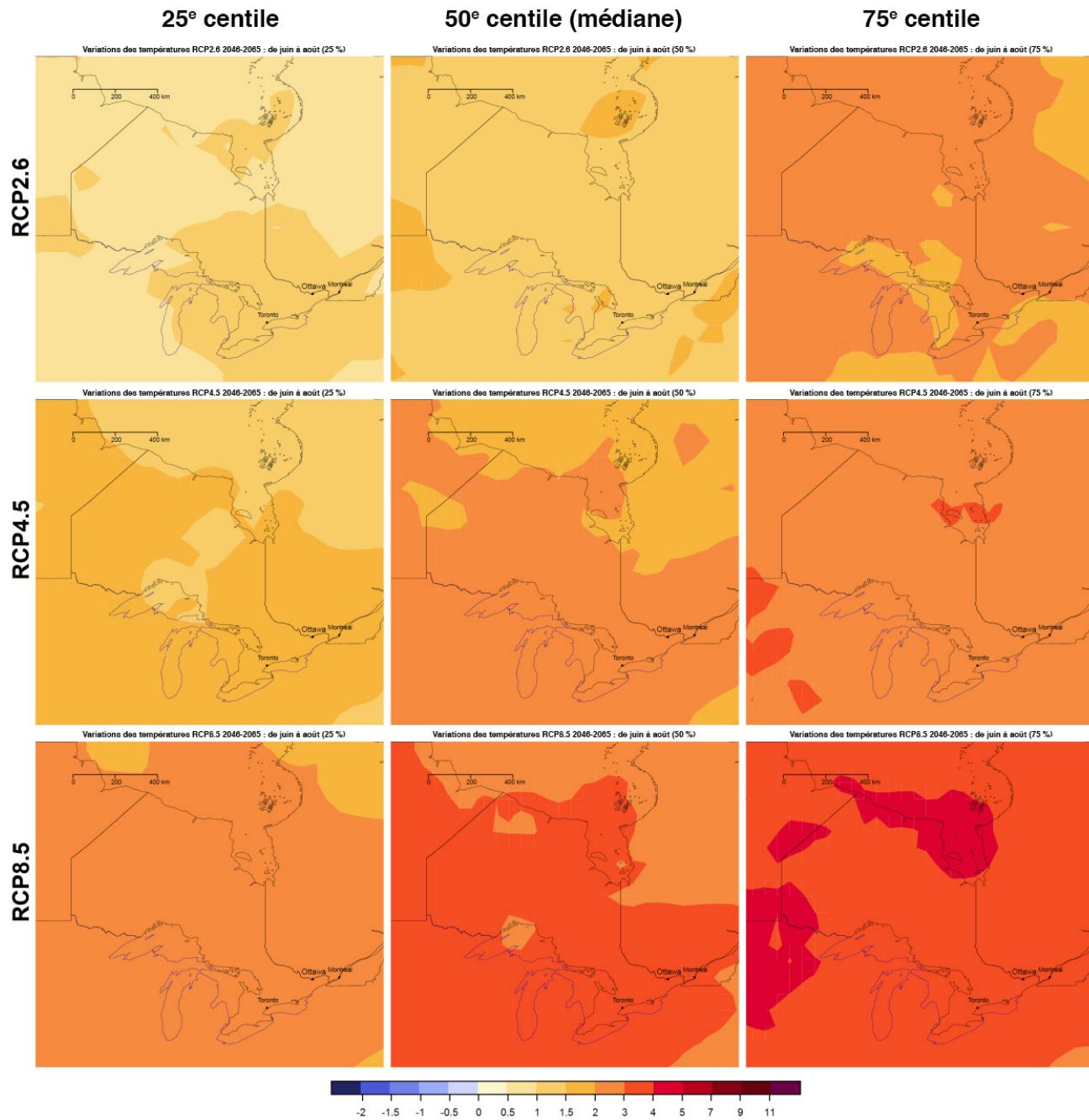
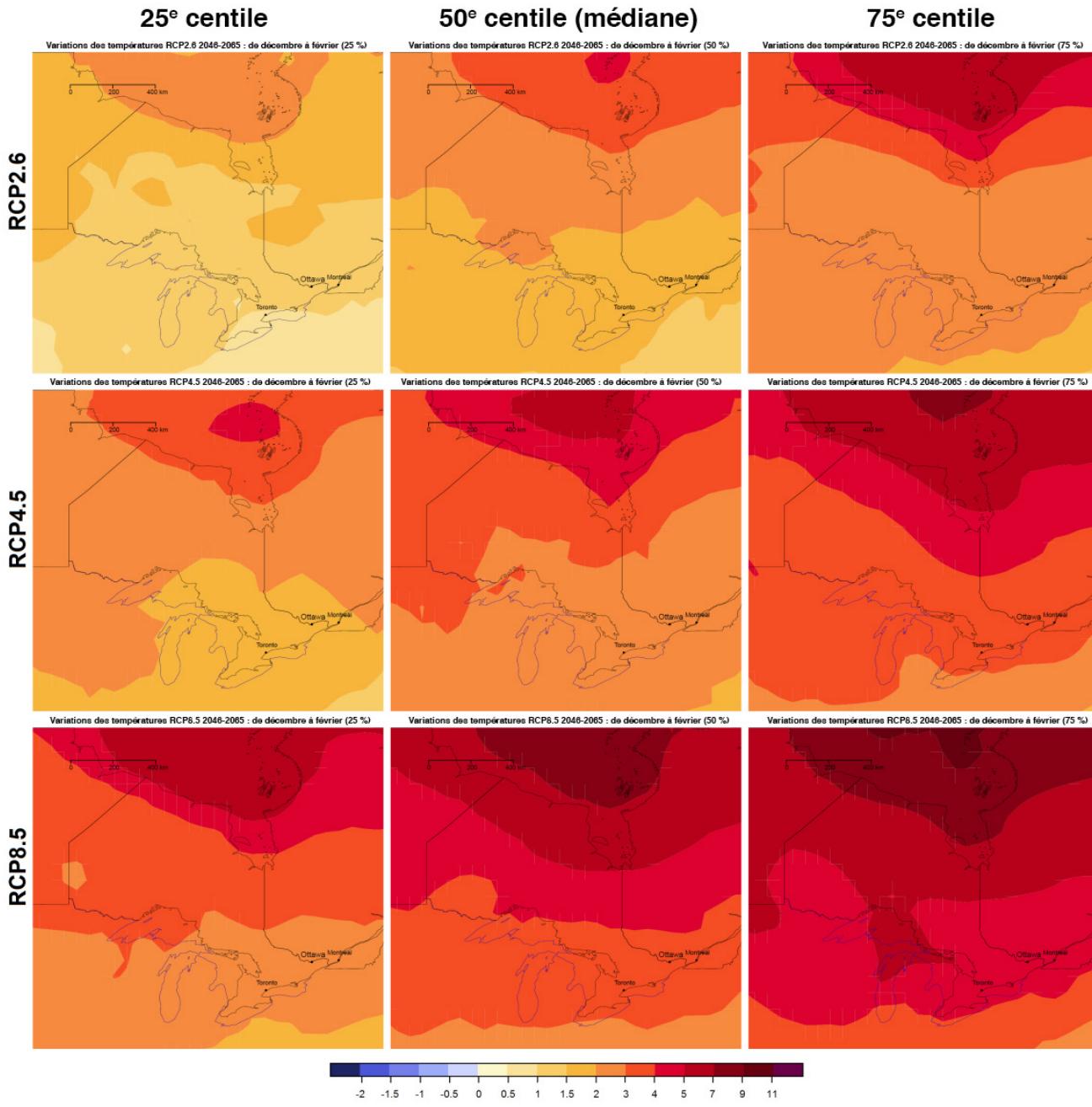


Figure 5b : Variations de température pour la période d'hiver en Ontario (décembre, janvier et février) selon le scénario RCP 2.5 (scénario de faible croissance des émissions), RCP 4.5 (scénario de croissance moyenne des émissions) et RCP 8.5 (scénario de croissance élevée des émissions) pour la période 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 précédent, la vitesse moyenne quotidienne du vent devrait augmenter dans toute la province (Cheng et coll., 2012b).

Dans la 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)

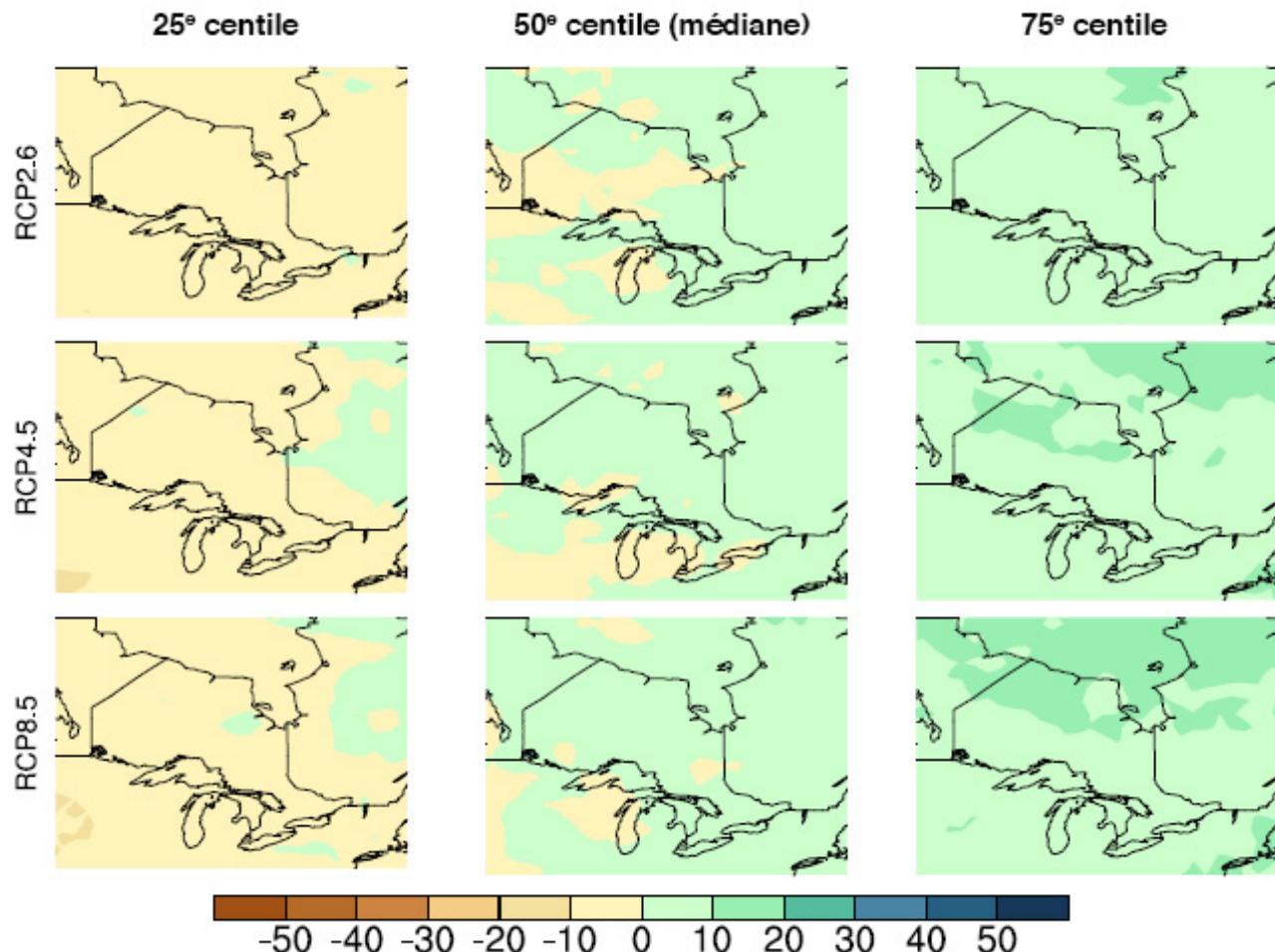
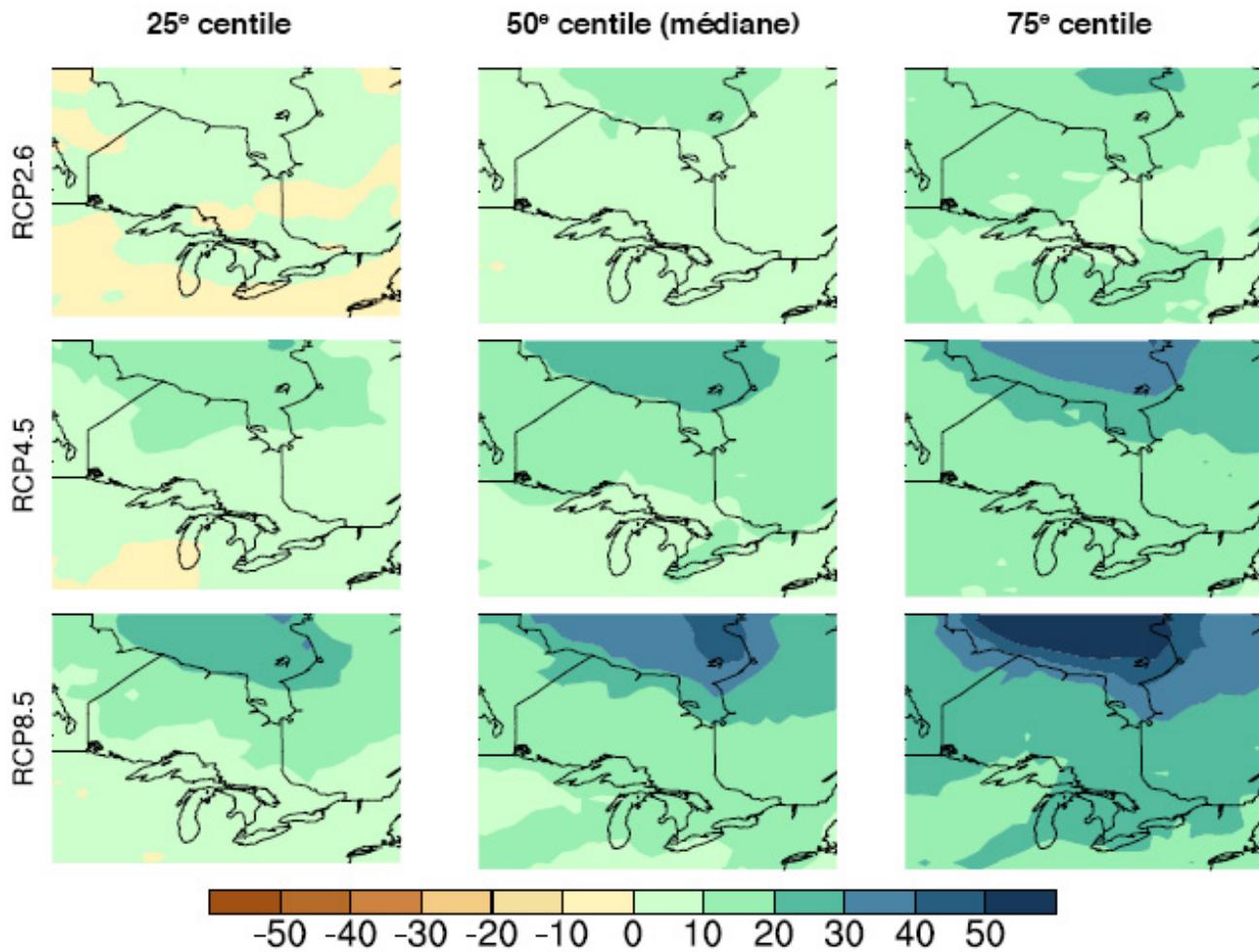


Figure 6b : Variations des précipitations pour la période d'hiver en Ontario (de décembre à février) selon le scénario RCP 2.5 (scénario de faible croissance des émissions), RCP 4.5 (scénario de croissance moyenne des émissions) et RCP 8.5 (scénario de croissance élevée des émissions) pour la période 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 SaintLaurent 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 SaintLaurent étaient de 20 cm au-dessous des moyennes mensuelles historiques (Conseil international de contrôle du fleuve SaintLaurent, 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 influer 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 NordOuest 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 ressusage 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 poudrerie 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 déglaçage (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 poudrerie 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
Augmentation des températures de l'air (été et hiver; variabilité accrue)	<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 ressusage 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 déglaçage (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
Précipitations (changements dans les configurations saisonnières causant l'augmentation de la fréquence et des événements extrêmes)	<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 accrus de précipitation Applications de STI, avertissements aux automobilistes des conditions dangereuses; SIMR, pour signer les activités d'entretien Sélection de matériaux de revêtement plus résistants Utilisation accrue de produits de déglaçage (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 en 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 INTENSITÉDURÉFRÉQUENCE (IDF) POUR L'ONTARIO

Ce projet visait à mettre à jour les courbes intensitéduréfréquence (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.àd. 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.àd. 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 (Koatse 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 (Koatse 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'atterrissement durant l'été 2013 au coût de 360 000 \$. L'ajout de rainures minimise les possibilités d'aquaplanage à l'atterrissement 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 surviennent 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
Dégénération 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 SaintLaurent 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 navireterre 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 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 SaintLaurent, 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 sousrégions 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 SaintLaurent (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 coûtsavantages des solutions de régulation du débit pour certaines parties de la Voie maritime du SaintLaurent, 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 SainteClaire qui réduirait la vitesse d'écoulement de la rivière. Cette mesure générera 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 navireterre 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 SaintLaurent (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 SainteClaire et Détroit, et la rivière St. Mary's.

La gestion de la possibilité d'inondations résultant d'embâcles au cours des premiers dégels 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 de 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 (Shlozman 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'ancre sûres jusqu'à ce que les conditions redéviennent 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'eau⁶ 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 ci-dessus.

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.mscs.jus.gov.on.ca/french/publications/MSCS_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., Klaasen, 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 SaintLaurent. (2015). *Le rapport d'étape semestriel couvrant la période du 24 septembre 2014 au 28 février 2015*. Repéré à <http://ijc.org/fr/isrlbc/publications>
- Corporation de gestion de la Voie maritime du SaintLaurent. (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/I01/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/I02/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/I02/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). *Trafic 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/backgroundfile-65676.pdf>

Ville de Toronto. (2015). *Climate change adaptation : Towards a resilient city*. Repéré à <http://www1.toronto.ca/wps/portal/contentonly?vgnextoid=78cfa84c9f6e1410VgnVC-M10000071d60f89RCRD>

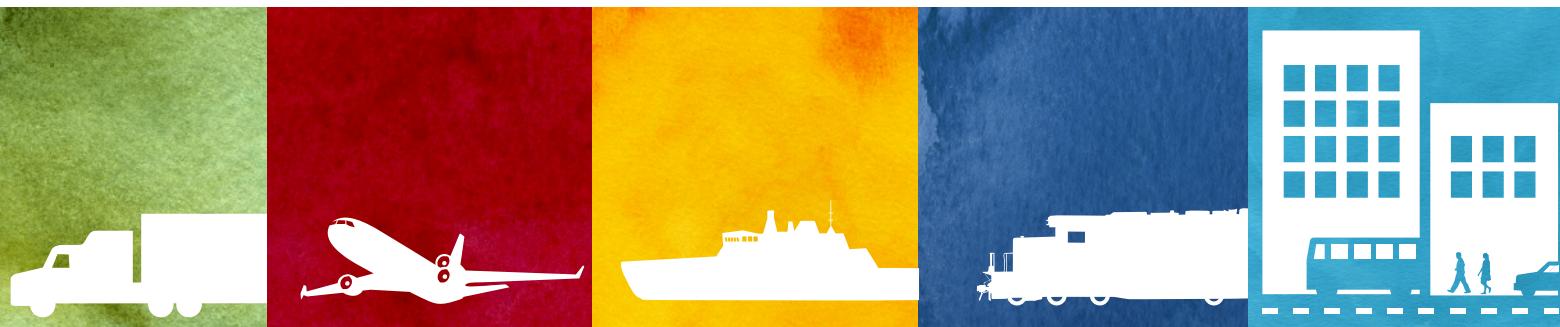
Vincent, L., Zhang, X., Brown, R., Feng, Y., Mekis, E., Milewska, E., Wan, H., et Wang, X. (2015). Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes. *Journal of Climate*, 28, 4545-4560.

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.



7 · Québec

CHAPITRE 7 :

Québec

AUTEURS PRINCIPAUX :

MARIE-PIER BRETON¹
GENEVIEÈVE CLOUTIER²
E.O.D. WAYGOOD³

ÉDITÉ PAR :

CAROLINE LARRIVÉE, OURANOS

REMERCIEMENTS :

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports de ses apports et commentaires apportés aux versions préliminaires du chapitre

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Breton, M.-P., Cloutier, G., et Waygood, E.O.D. (2017). Québec. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 199-238). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional, Université Laval, Québec (QC)

² École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional, Université Laval, Québec (QC)

³ École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional, Université Laval, Québec (QC)

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions.....	201
1.0 Introduction.....	202
1.1 Portrait du Québec	202
2.0 Organisation du transport au Québec.....	203
2.1 Transport routier	206
2.2 Transport maritime	208
2.3 Transport ferroviaire	209
2.4 Transport aérien	209
3.0 Un climat en évolution.....	210
3.1 Des températures qui se réchauffent	210
3.2 Des précipitations plus intenses	213
3.3 Des incertitudes concernant les vents.....	215
3.4 Des variations des débits moyens des rivières.....	215
3.5 Le niveau relatif de la mer	216
3.6 Une perte progressive du couvert de glace.....	216
3.7 Le pergélisol affecté	217
4.0 Vulnérabilités des transports face aux changements climatiques au Québec	218
4.1 Transport terrestre	218
4.1.1 Les vulnérabilités du transport routier dans le sud du Québec et le long du Saint-Laurent	218
4.1.2 Les vulnérabilités du transport terrestre au Nunavik.....	220
4.1.3 Les événements météorologiques extrêmes et le transport routier	221
4.2 Transport maritime	223
4.2.1 Le transport maritime dans le corridor du Saint-Laurent.....	223
4.2.2 Le transport maritime au Nunavik	224
4.3 Transport ferroviaire	224
4.3.1 Le transport ferroviaire dans le corridor du Saint-Laurent.....	225
4.4 Transport aérien	225
4.5 Réseaux de distribution et de télécommunications	226
5.0 Mesures d'adaptation.....	226
5.1 Mesures d'adaptation planifiées et mises en œuvre par le gouvernement du Québec	227
5.2 Mesures d'adaptation à l'échelle régionale et locale	228
6.0 Conclusions et besoins futurs de recherche	231
Références	232

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- **Les changements climatiques vont modifier l'environnement naturel dans toutes les régions du territoire québécois et pourraient endommager ou causer des interruptions de services dans les systèmes de transport.** Le Nunavik subit et continuera de subir les plus importants changements climatiques et de composer avec le dégel du pergélisol sur lequel sont bâties les infrastructures de transport. Dans l'est du Québec, la hausse du niveau marin relatif, la perte du couvert de glace, les cycles de gel et de dégel ainsi que les changements aux régimes de tempêtes contribueront à accentuer l'érosion des berges. La gestion des eaux de ruissellement constitue un enjeu pour toutes les régions du Québec.
- **La vulnérabilité des systèmes de transport face aux changements climatiques varie selon les caractéristiques régionales, le type d'infrastructure et sa vocation.** L'état des infrastructures et les pratiques d'entretien, l'usage réel des systèmes de transport ou encore l'existence d'alternatives en cas d'interruption de service sont des facteurs qui influencent l'ampleur des impacts des changements climatiques sur les systèmes de transport.
- **Les événements météorologiques extrêmes constituent un des plus grands risques pour le secteur des transports, et ce, pour toutes les régions du Québec.** Les épisodes de pluie intense, les inondations, l'érosion des berges et les glissements de terrain affecteront à la fois les infrastructures de transport, ainsi que la mobilité des personnes et des marchandises. L'isolement des collectivités qui dépendent plus fortement d'un mode de transport en particulier pourrait être accentué par des événements météorologiques extrêmes.
- **Bien que, à l'instar des territoires du Nord canadien, l'impact le plus important des changements climatiques se fasse sentir sur le dégel du pergélisol, la hausse des températures affecte aussi les communautés du Nord du Québec et réduit la mobilité hivernale en raison notamment d'une période de gel plus courte.** La saison hivernale plus courte et la perte du couvert de glace rendent l'accès au territoire et aux ressources plus difficile pour les individus qui en dépendent pour leur subsistance.
- **Les enjeux associés à l'adaptation aux changements climatiques représentent des défis importants sur le plan social, institutionnel, environnemental et économique.** Les histoires à succès en la matière sont le résultat d'initiatives multisectorielles impliquant des acteurs des secteurs publics, privés et de la société civile et qui se sont intégrées aux efforts de planification existants.
- **L'acquisition de données pour suivre l'état des infrastructures et les efforts de recherche de solutions performantes pour les systèmes de transport sont importants pour s'adapter aux changements inévitables.** Les options d'adaptation toucheront autant la conception que les pratiques de gestion pour opérer et entretenir les infrastructures. L'analyse de la performance de ces options dépend d'une bonne connaissance des systèmes de transport et de l'environnement dans lequel ils évoluent.

1.0 INTRODUCTION

Au Québec, le transport joue un rôle majeur pour appuyer la vitalité des régions, la distribution des biens et services et l'exploitation des ressources naturelles. La plupart des infrastructures de transport (routier, ferroviaire, maritime et aérien) ont été conçues en prévision d'un climat stable. Or, le climat change, affectant du même coup la durée de vie et l'état des infrastructures. L'étendue du territoire, le caractère isolé de certaines communautés québécoises et la faible redondance du système de transport⁴ dans les régions parmi les plus affectées par les changements climatiques sont autant de facteurs qui accentuent leur vulnérabilité.

Depuis près de vingt ans, le gouvernement du Québec, les associations de transporteurs, les tables d'expertise et les entreprises déploient des efforts de plus en plus importants pour adapter les différentes filières modales aux changements climatiques et ainsi renforcer la résilience du système de transport. Ces efforts ont permis de développer une connaissance des impacts et des solutions potentielles pour améliorer la gestion des infrastructures de transport.

Ce chapitre décrit l'organisation du transport au Québec, par mode et par région, et dresse la liste, sur la base de la littérature et des études existantes, des principales vulnérabilités face aux changements climatiques. Le chapitre traite aussi des pratiques d'adaptation pour faire face à ces enjeux.

1.1 PORTRAIT DU QUÉBEC

Démographie et contexte socio-économique

Le Québec couvre plus de 1,6 M km² (Institut de la statistique du Québec, 2014), et compte environ 8 263 600 personnes (Institut de la statistique du Québec, 2015; voir figure 1) faisant de cette province la deuxième plus peuplée du pays. Plus de la moitié (60 %) de la population du Québec est concentrée dans un axe de 10 km de largeur de part et d'autre des rives du Saint-Laurent (Institut de la statistique du Québec, 2014).

Plus précisément, la population québécoise se concentre dans les quelques grandes zones urbaines du sud de la province (Montréal, Québec, Gatineau, Sherbrooke, Trois-Rivières). Dans les autres régions, les agglomérations sont plus dispersées. À titre d'exemple, le Nunavik couvre un peu moins du tiers du territoire et compte environ 12 700 habitants, distribués dans 14 villages nordiques et la communauté Cri de Whapmagoostui.

Une croissance de la population est attendue dans 13 des 17 régions administratives du Québec pour l'horizon 2061 (Girard et coll., 2014). Les régions qui bénéficieront de cette croissance sont celles qui sont favorisées par les migrations internationales (Montréal et Laval), les migrations interrégionales (Outaouais), les migrations internes (Laval, Lanaudière) et un accroissement de la fécondité (Nunavik).

Comme l'indique le tableau 1, les régions urbaines de la Capitale-Nationale⁵, de Montréal, de la Montérégie, de Laval et de l'Outaouais se démarquent des autres régions par leur grande diversité industrielle et comptent pour 67,4 % du PIB. Ces régions combinent plusieurs avantages liés à leur localisation, dont l'accès à la voie navigable et à des infrastructures de transport international indispensables à leur rayonnement. Quant aux autres régions, elles dépendent davantage des activités d'extraction ou de transformation des matières premières ou encore d'activités touristiques. La zone de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent est le milieu de vie de près de 5 % de la population québécoise et elle compte pour l'équivalent du poids économique de la province (Beaulieu, 2014).

⁴ La redondance d'un système de transport correspond aux alternatives que compte ce système, lui assurant des voies et services additionnels si la première option venait à être perturbée. Un système à faible redondance compte peu d'options.

⁵ Région de la Ville de Québec

Tableau 1 : La distribution de la population et de l'intensité des activités économiques par région.
(Source : Soucy, 2015)

Région administrative	Population (2014)	Poids démo- graphique	Superficie terrestre	Densité	Poids économique
	Habitants	%	KM ²	hab./KM ²	%
01 Bas-Saint-Laurent	200 292	2,4	22 154	9,0	2,0
02 Saguenay-Lac-Saint- Jean	277 786	3,4	95 870	2,9	3,2
03 Capitale-Nationale	731 838	8,9	18 663	39,3	10,0
04 Mauricie	266 794	3,2	35 531	7,5	2,5
05 Estrie	320 008	3,9	10 193	31,4	3,2
06 Montréal	1 988 243	24,2	500	3 992,5	34,6
07 Outaouais	383 182	4,7	30 331	12,6	3,6
08 Abitibi-Témiscamingue	147 868	1,8	57 550	2,6	2,1
09 Côté-Nord	94 906	1,2	235 582	0,4	2,3
10 Nord-du-Québec	44 256	0,5	697 152	0,1	0,9
11 Gaspésie-Îles-de-la- Madeleine	92 472	1,1	20 327	4,6	0,8
12 Chaudières-Appalaches	419 755	5,1	15 001	27,8	4,2
13 Laval	420 870	5,1	246	1 710,9	4,1
14 Lanaudière	492 234	6,0	12 299	40,0	3,6
15 Laurentides	586 051	7,1	20 490	28,5	5,4
16 Montérégie	1 508 127	18,4	11 141	135,7	15,1
17 Centre-du-Québec	239 990	2,9	6 899	34,7	2,6
Ensemble du Québec	8 214 672	100	1 300 815	6,3	100

2.0 ORGANISATION DU TRANSPORT AU QUÉBEC

Le transport de marchandises est, tout comme le transport des voyageurs, multimodal et interconnecté (CPCS, 2013). Si le camionnage constitue le mode privilégié pour le transport des marchandises, les liens ferroviaires et la Voie maritime, qui relie le Saint-Laurent aux Grands Lacs, se partagent aussi le transport d'une part significative des marchandises. Le transport aérien, quant à lui, transporte un volume moindre de marchandises, mais demeure un mode stratégique lorsque la livraison doit se faire rapidement et que le poids des marchandises n'est pas un enjeu (CPCS, 2013 : 2-29).

Au Canada, le Saint-Laurent constitue une porte d'entrée continentale en importance. Cet axe de transport multimodal est stratégique pour l'espace économique, démographique et géographique du pays et fait du Québec une plaque tournante du transport des marchandises vers les autres provinces, mais aussi vers les États-Unis. Le corridor Québec-Windsor concentre environ 80% des activités de VIA Rail Canada (2014).

Les autres régions du Québec sont reliées au sud de la province par des corridors stratégiques permettant l'exploitation de ressources naturelles comme la forêt, l'hydro-électricité et les minéraux. Ces régions dépendent principalement du transport routier pour le déplacement des marchandises et des personnes. Des liaisons aériennes sont d'ailleurs développées pour chacune de ces régions. L'étendue du territoire et la dispersion des populations engendrent des défis de taille en matière de planification et la gestion des réseaux de transport (Ministère des Transports du Québec, 2013a).

Enfin, les 14 communautés inuites et la communauté Cri de Whapmagoostui au Nunavik ne sont accessibles que par voies aériennes ou maritimes à partir du sud de la province tout comme les îles-de-la-Madeleine et certaines communautés dans l'extrême est de la région de la Basse-Côte-Nord.

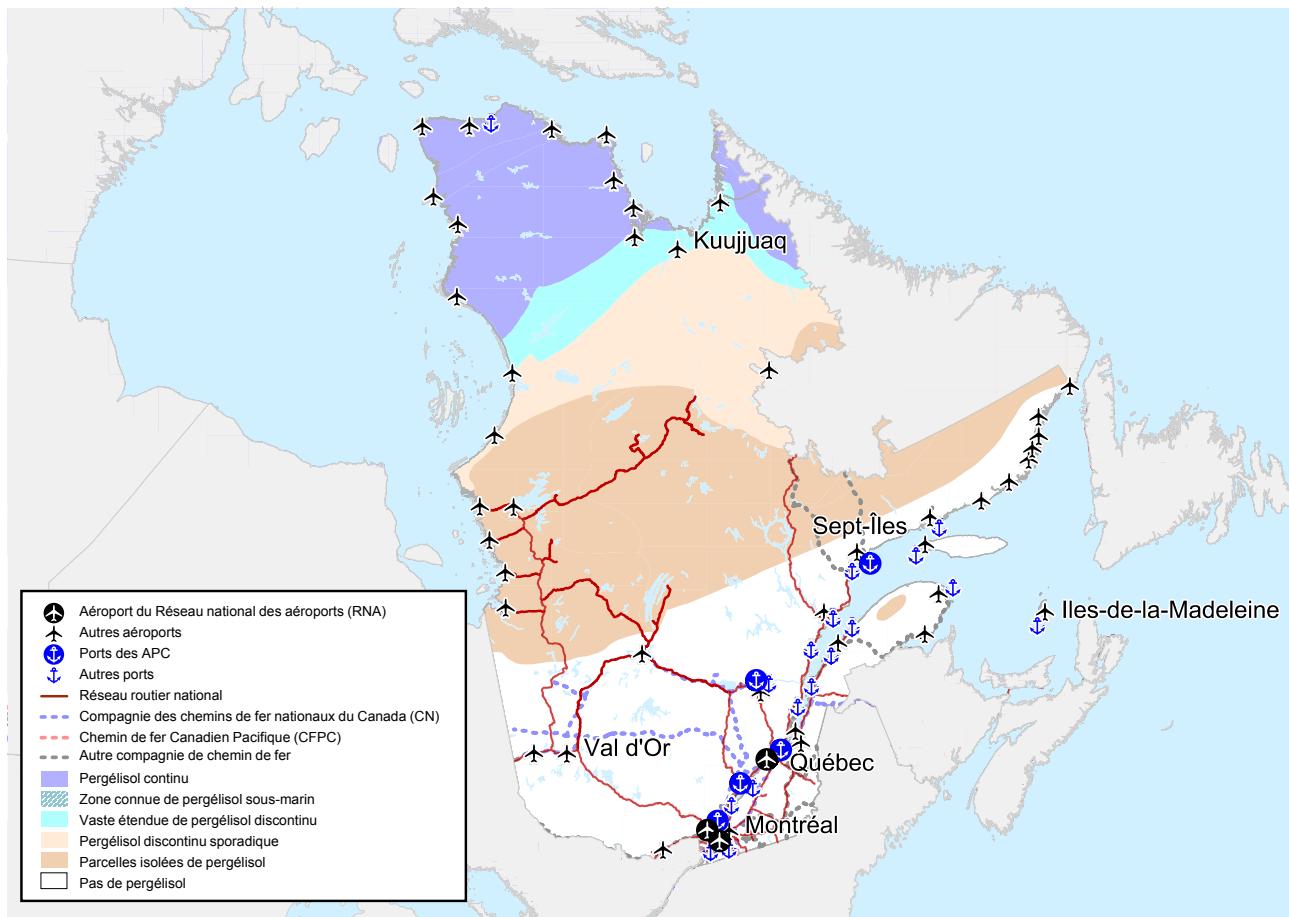
Sur le territoire québécois, la planification, la conception ainsi que les travaux de construction, de réfection et d'entretien en plus de la gestion des infrastructures de transport sont l'affaire de plusieurs partenaires institutionnels et privés. Y participent à divers degrés différents ministères du gouvernement du Québec, organismes publics de transport, sociétés de transport en commun, ministères et organismes relevant du gouvernement fédéral, associations de transporteurs, conseils intermunicipaux et organismes municipaux de transport, municipalités locales, municipalités régionales de comté, communautés métropolitaines, communautés autochtones, etc.

Dans cette structure de gestion et de partage des responsabilités des infrastructures de transport, le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) joue un rôle central. Les autoroutes - routes nationales, régionales, collectrices - et certaines routes d'accès aux ressources et aux localités isolées relèvent de la compétence du gouvernement du Québec (Ministère des Transports du Québec, 2015b). Le MTMDET partage la gestion de ces réseaux avec les transporteurs et exploitants privés ainsi qu'avec certaines administrations locales et régionales⁶. Les principaux réseaux de chemin de fer sont principalement sous compétence fédérale, mais aussi provinciale (les chemins de fer d'intérêt local - CFIL) de même que sous la responsabilité d'une douzaine d'organisations privées, ou grands chemins de fer comme le Canadian National (CN) ou le Canadian Pacifique (CP). Les ports et aéroports du Québec sont la propriété d'une multitude d'acteurs publics et privés et ce sont eux qui les gèrent.

En outre, le MTMDET produit des manuels et des guides pour orienter la conception, la gestion et l'entretien des ouvrages et des systèmes de transport. Ces manuels sont utilisés comme référence principale par les municipalités québécoises pour les routes sous leur responsabilité.

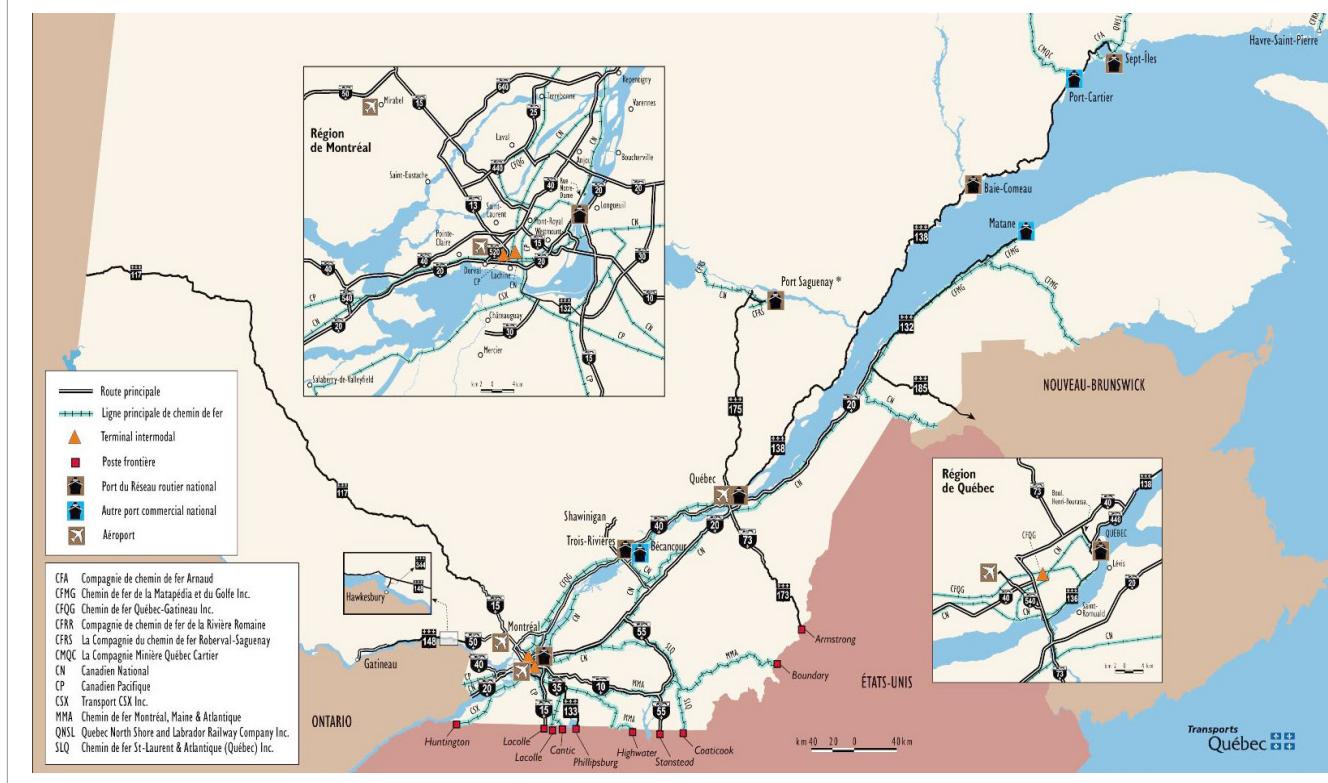
La figure 1 présente les infrastructures de transport du Québec et montre la diversité des principales infrastructures présentes sur le territoire québécois ainsi que la pluralité des intervenants qui s'en partagent la gestion.

⁶ La Société de développement de la Baie-James (SDBJ) pour le réseau routier de la Baie-James appartenant à Hydro-Québec et l'Administration régionale Kativik pour les aéroports du Nunavik.

Figure 1 : Carte des principales infrastructures de transport au Québec

La démarche intitulée Porte continentale et Corridor de commerce Ontario-Québec a été entreprise conjointement par les gouvernements du Québec, de l'Ontario et du Canada en 2007. Elle visait à mettre en place un système de transport multimodal intégré, sûr, durable et compétitif pour soutenir le commerce international. En ce sens, la vallée du Saint-Laurent peut être vue comme le principal corridor du réseau d'infrastructures de transport sur le territoire du Québec qui permet une grande part des échanges entre le Québec et ses principaux partenaires économiques. On y trouve les principaux pôles urbains de Montréal et Québec. La figure 2 illustre cette intermodalité à l'échelle du Québec.

Figure 2 : Pôles intermodaux sur le territoire québécois. (Source : Gouvernement du Québec, ministère des Transports, 2013 (données de 2010))



2.1 TRANSPORT ROUTIER

Le transport routier des marchandises constitue l'un des modes les plus souples et accessibles et s'avère être le mode privilégié pour le transport des marchandises et des personnes. Cela vaut pour les déplacements de proximité autant que pour les déplacements interrégionaux et interprovinciaux (Ministère des transports du Québec, 2013b). En plus d'assurer l'accès à une grande partie du territoire québécois, les infrastructures routières favorisent les connexions intermodales avec les terminaux ferroviaires, les ports et les aéroports (CPCS, 2013).

On recense environ 319 000 km de routes sur le territoire québécois, incluant les autoroutes, les routes nationales, les routes collectrices, les rues, les ponts et viaducs, les chemins d'accès et les chemins locaux (Ministère des Transports du Québec, 2015b; voir figure 3). On compte également plus de 300 000 kilomètres de chemins multi-usages en milieu forestier.

Le vieillissement des infrastructures accentue à la fois leur vulnérabilité et les coûts d'entretien. L'âge moyen des infrastructures offre une manière d'évaluer l'état du réseau et la nécessité des investissements qui sont faits pour en assurer l'entretien. Le réinvestissement dans ce domaine, depuis le début des années 2000, a fait passer l'âge moyen des routes au Québec de 18 ans en 2000 à 13 ans en 2009 (Gagné et Haarman, 2011).

Certaines régions sont fortement dépendantes d'un lien routier unique pour leurs besoins régulier d'approvisionnement et de mobilité. L'accessibilité à ces régions pourrait être considérablement compromise après un événement météorologique majeur (inondation, glissement de terrain, érosion) causant des dommages importants à ce lien routier.

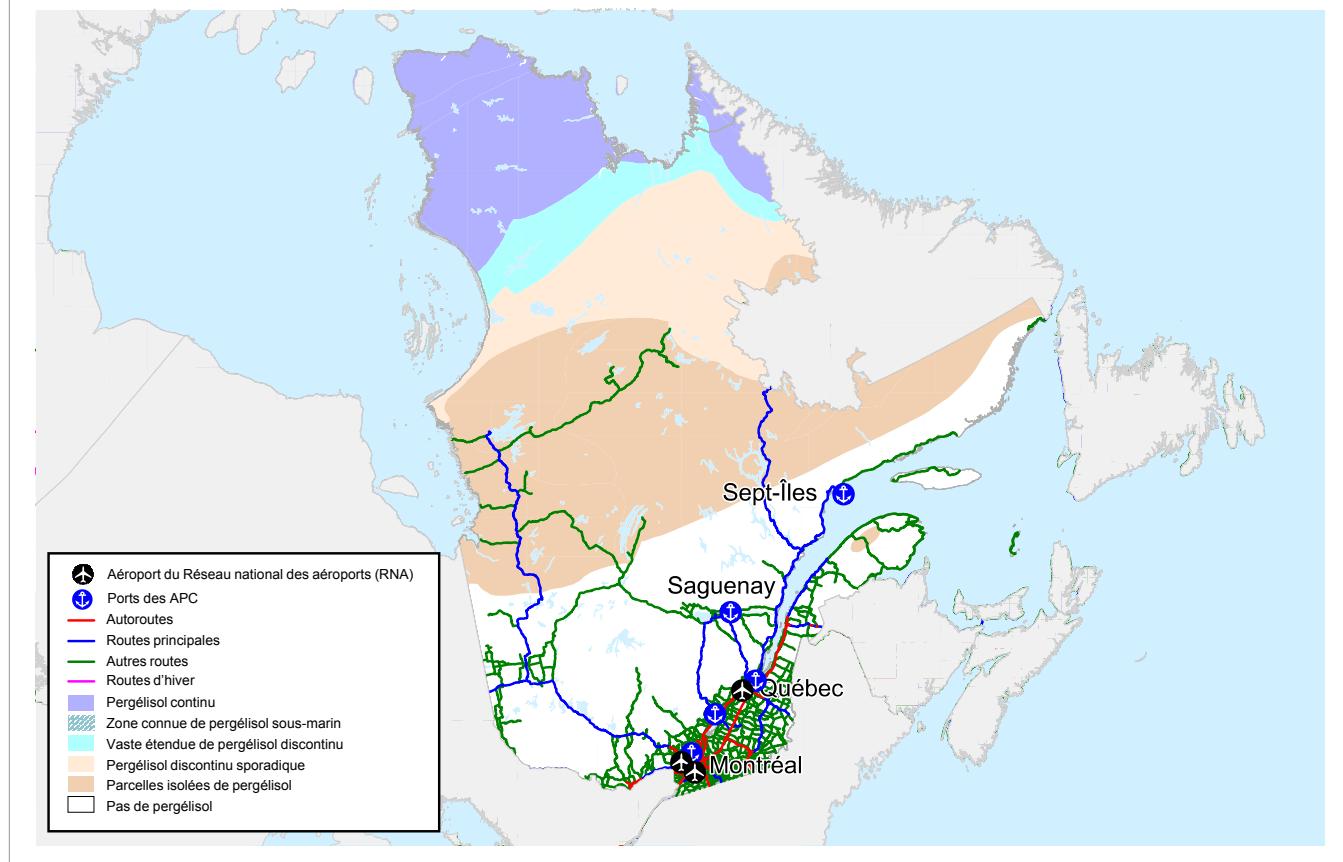
Bien que les comportements des usagers soient souvent en cause dans les accidents, la contribution des conditions météorologiques doit également être prise en compte dans la gestion de la sécurité

routière (Andrey, 2010). En outre, le nombre de collisions augmente lors de précipitations (Andrey et Mills, 2002). Toutefois, le nombre d'accidents de la route est en baisse depuis 2007, au Québec comme ailleurs au Canada.

Certaines régions touristiques comme la Gaspésie, les îles-de-la-Madeleine, la Côte-Nord et le Bas-Saint-Laurent ont développé des équipements et des activités pour mettre en valeur la région et attirer des visiteurs. Des routes thématiques⁷, comme la Route des Baleines ou la Route des Navigateurs, et des parcs nationaux s'appuyant sur leur rapport au fleuve (par exemple, le parc Marin du Saguenay et le parc du Bic) constituent des piliers du développement touristique de ces régions. La perte d'accès à ces parcs, causée par l'érosion des routes en bordure du fleuve aurait un impact sur le développement économique et social. Il en est de même pour les routes bleues, une autre route thématique, et les infrastructures associées, qui sont également tributaires des changements observés le long du Saint-Laurent (érosion des berges, baisse des niveaux d'eau, etc.).

Enfin, certaines portions du réseau routier québécois sont fortement congestionnées par le trafic général, en particulier dans les deux régions métropolitaines de Québec et de Montréal (Ministère des Transports du Québec, 2013a). La réduction de la vitesse causée par la congestion augmente le temps de transit, le coût du transport routier et elle diminue la fiabilité ou la perception de fiabilité de ce mode de transport. La congestion routière combinée avec la hausse anticipée des températures en été et de la fréquence, de la durée et de l'intensité des canicules, pourraient aussi avoir d'importantes implications sur le système de gestion des marchandises transportées par route au cours des prochaines années, notamment en ce qui concerne les nouveaux critères de réfrigération, les choix des matériaux pour les chaussées et ainsi de suite (Goodwin, 2004; James et James, 2010).

Figure 3 : Carte du transport routier au Québec



⁷ Pour plus de précisions, consulter <http://www.sentiermaritime.ca/index.asp?id=522>.

2.2 TRANSPORT MARITIME

Le transport maritime est étroitement lié à différents secteurs clés de l'économie québécoise. Le long du corridor du Saint-Laurent, il joue un rôle majeur quant à la mobilité des marchandises. Les activités de transport maritime, incluant les services maritimes, portuaires et le tourisme de croisières, sont à la hausse au Québec depuis 2000. En 2011, ces activités représentaient un chiffre d'affaires de plus de 2,3 milliards de dollars.

Les ports se trouvant sur le long du Saint-Laurent servent principalement à déplacer des minéraux, des produits forestiers, des produits agricoles et alimentaires, des biens manufacturés, des carburants et des produits chimiques de même que de la machinerie (Société de développement économique du Saint-Laurent, 2015), en plus de permettre l'approvisionnement des industries et des communautés (voir figure 2).

Le Nunavik, les communautés côtières de la région Eeyou-Istchee Baie-James ainsi que plusieurs municipalités le long de la Côte-Nord sont aussi équipés avec des infrastructures maritimes, constituées de brise-lames, rampes d'accès, balises ou pontons flottants, qui desservent les populations locales. Ces infrastructures sont, dans la grande majorité des cas, le principal lien d'approvisionnement des communautés éloignées. Quelques infrastructures maritimes de plus grande taille desservent des activités industrielles dans ces mêmes régions. Par exemple, un quai privé en eau profonde à la Baie Déception au Nunavik dessert une activité minière, et d'autres projets de quais privés industriels pourraient voir le jour dans la région avec l'intensification des activités minières.

Les principaux ports commerciaux au Québec incluent les ports sous la responsabilité des administrations canadiennes des ports de Montréal, Trois-Rivières, Québec, Saguenay et Sept-Îles. Les autres ports et infrastructures maritimes jouent un rôle important pour soutenir les activités récréotouristiques et d'autres besoins locaux.

En 2011, le réseau portuaire québécois a manutentionné 130,4 millions de tonnes de marchandises, dont les trois quarts étaient des marchandises internationales (Statistique Canada, 2011). Le port de Montréal est le plus important port de conteneurs de l'est du Canada (Port de Montréal, 2015), recevant annuellement plus d'un million de conteneurs équivalent vingt pieds. Jouant un rôle de pivot du transport des marchandises, il est directement relié aux réseaux ferroviaire et routier. Chaque semaine, 80 convois de trains transitent par le port et le nombre quotidien d'entrées et de sorties de camions s'élèvent à 5 000 (Port de Montréal, 2015). Les ports de Sept-Îles-Pointe-Noire, de Port-Cartier, de Baie-Comeau et de Havre-Saint-Pierre, sur la Côte-Nord, sont parmi les dix ports québécois les plus importants en matière de tonnage de marchandises manutentionnées (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2011). Le port en eau profonde de Québec avec une vocation de transbordement agit comme véritable plaque tournante du commerce sur le corridor Grands Lacs — Fleuve Saint-Laurent. Le port de Sept-Îles est même le troisième plus important au Canada pour le tonnage de vrac manutentionné.

Les traversiers gérés par la Société des traversiers du Québec sont articulés avec le système de transport terrestre pour renforcer la mobilité des personnes. Dans certains milieux urbains, les connexions offertes avec les réseaux de transports publics facilitent aussi les déplacements intrarégionaux et interrégionaux. L'activité des traversiers est toutefois tributaire des fluctuations de l'économie (ROCHE-Deluc, 2010). Les traversiers sont également exposés aux conditions météorologiques et aux impacts des changements climatiques. Sur le Saint-Laurent, 18 traversiers opèrent à longueur d'année et assurent une desserte pour plus de 5 millions de passagers et plus de 2 millions de véhicules (Société des traversiers du Québec, 2014).

2.3 TRANSPORT FERROVIAIRE

Le réseau ferroviaire québécois suit principalement la vallée du Saint-Laurent et s'étend vers le nord de la province vers les régions de l'Abitibi-Témiscamingue, du Saguenay-Lac-Saint-Jean et Chibougamau, de la Côte-Nord et du Labrador (voir figure 2). Il assure notamment le transport de conteneurs intermodaux des produits forestiers, des produits miniers et de l'aluminium. Un grand nombre de wagons circulent dans la région de Montréal et de Québec, à destination des autres provinces canadiennes et des États-Unis (Ministère des Transports du Québec, 2008).

Plusieurs compagnies de transport ferroviaire de marchandises desservent le territoire québécois. Les plus grandes sont le Canadian National (CN), le Canadian Pacifique (CP) et Transport CSX, qui représentent à elles seules près de 58 % du réseau présent au Québec. Quelques compagnies manufacturières ou extractrices de ressources, comme Arcelor Mittal ou Rio Tinto Alcan, exploitent également certaines voies ferrées de la province. Sauf exception, les chemins de fer dont les voies s'étendent hors du Québec sont de compétence fédérale, tandis que tous les autres sont de compétence provinciale. Le transport des personnes est principalement assuré par VIA Rail Canada Inc., mais aussi par Québec North Shore and Labrador Railway, par la Société Amtrak pour les tronçons les plus au sud de la province qui mènent aux États-Unis, et par les trains de banlieue et les trains touristiques.

La demande en services ferroviaires connaît une certaine croissance depuis 2001, tant pour le transport des marchandises que pour celui des voyageurs (Réseau des chemins de fer du Québec, 2011). Le réseau de rails sous la compétence provinciale a crû depuis vingt ans, passant de 564 kilomètres de voies ferrées en 1993, à plus de 1 700 km en 2015 (Ministère des Transports du Québec, 2015a).

2.4 TRANSPORT AÉRIEN

Le secteur aérien assure le transport des personnes, de fret et aussi plusieurs autres activités, dont les évacuations aéromédicales, les patrouilles de glaces, l'épandage de produits, et plus encore. En matière de fret, près de 146 000 tonnes, équivalent à 3,7 milliards de dollars, ont été transportées par les 380 établissements du transport aérien en 2010 au Québec (MTQ 2013a).

Le Québec compte sur son territoire deux aéroports internationaux (Montréal et Québec) et divers aéroports régionaux, dont 26 sont la propriété du ministère des Transports (voir figure 2). On dénombre également près de 150 aérodromes, une cinquantaine d'hydro-aérodromes et une cinquantaine d'héliports.

Le trafic aérien de passagers a augmenté de 4 % sur le territoire québécois, entre 2013 et 2014, pour atteindre 16,5 millions de passagers (Statistique Canada, 2014). Le trafic aérien de passagers est à la hausse et devrait le demeurer selon les scénarios 2012-2022.

3.0 UN CLIMAT EN ÉVOLUTION⁸

Les risques climatiques pour les infrastructures et services de transport varient en fonction de leur localisation et des saisons. Ces considérations sont importantes pour mieux saisir les impacts potentiels des changements à venir, car ils pourraient contribuer à accentuer la vulnérabilité du secteur des transports.

L'étendue du territoire québécois et sa topographie (jusqu'à 1 652m d'altitude) contribuent à créer différents climats (Ouranos, 2015), d'un climat continental froid et humide au sud et dans l'est de la province, à un climat continental subpolaire plus au centre et un climat polaire de toundra au nord en passant par un climat maritime vers les zones côtières du golfe Saint-Laurent.

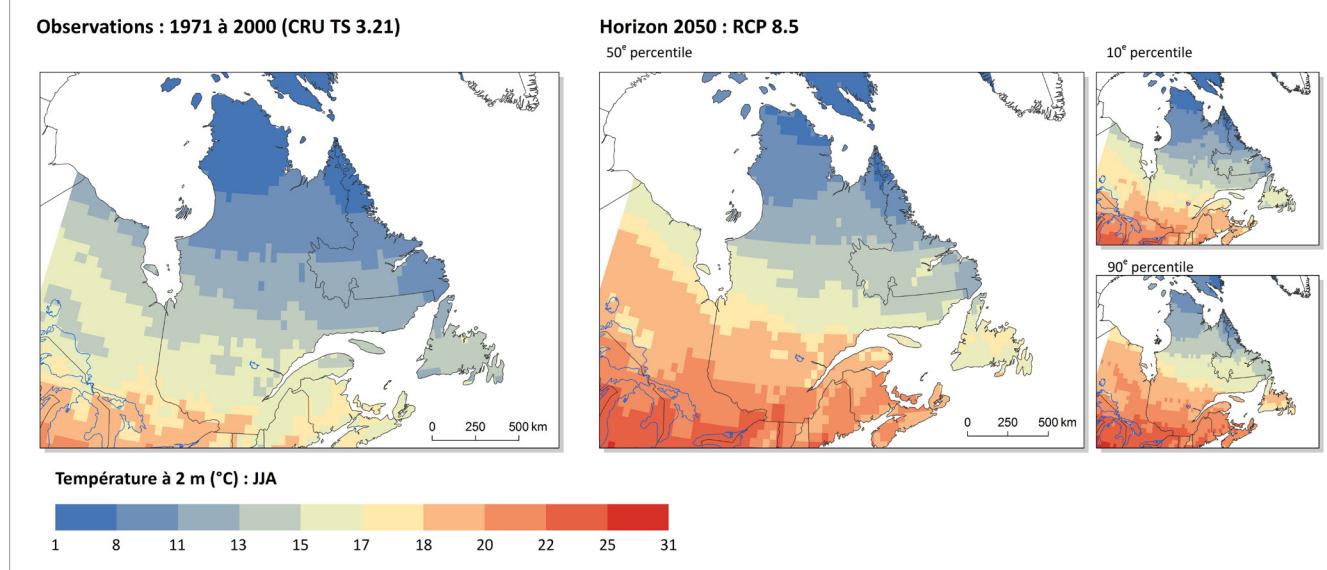
L'ensemble du Québec est affecté par les changements climatiques et certaines tendances générales sont déjà observables.

3.1 DES TEMPÉRATURES QUI SE RÉCHAUFFENT

Depuis 1950, la tendance des températures est à la hausse dans pratiquement toutes les régions du Québec, tant pour les températures moyennes que les températures plus extrêmes. De fait, ce sont les extrêmes froids qui ont subi les changements les plus manifestes. Ainsi, on note une réduction du nombre de nuits et jours frais, de même que pour la durée des vagues de froid pour la période 1951-2010 (Donat et coll., 2013). Durant la même période, on a aussi observé une augmentation significative du nombre de nuits et de jours chauds ainsi que de la durée des vagues de chaleur.

Les projections suggèrent que ces tendances vont se poursuivre, et de manière plus prononcée vers les latitudes plus au nord. De surcroît, les tendances au réchauffement seront plus marquées pour les températures extrêmes minimales et maximales que pour les températures moyennes. La figure 4 montre la moyenne des températures observées et projetées en été et en hiver pour tout le Québec.

Figure 4a: Températures estivales moyennes observées et prévues pour l'ensemble du Québec.
(Source : Ouranos)



⁸ Ce chapitre présente les conditions pour le climat actuel et les projections futures pour le Québec pour les variables les plus susceptibles d'affecter le secteur des transports. À moins d'indication contraire, les informations proviennent du document de référence « Vers l'adaptation » (Ouranos, 2015), un état des connaissances publié par Ouranos en 2015. Pour plus de précisions, le lecteur est invité à consulter le chapitre 1 de ce document.

Figure 4b : Températures hivernales moyennes observées et prévues pour l'ensemble du Québec.
(Source : Ouranos)

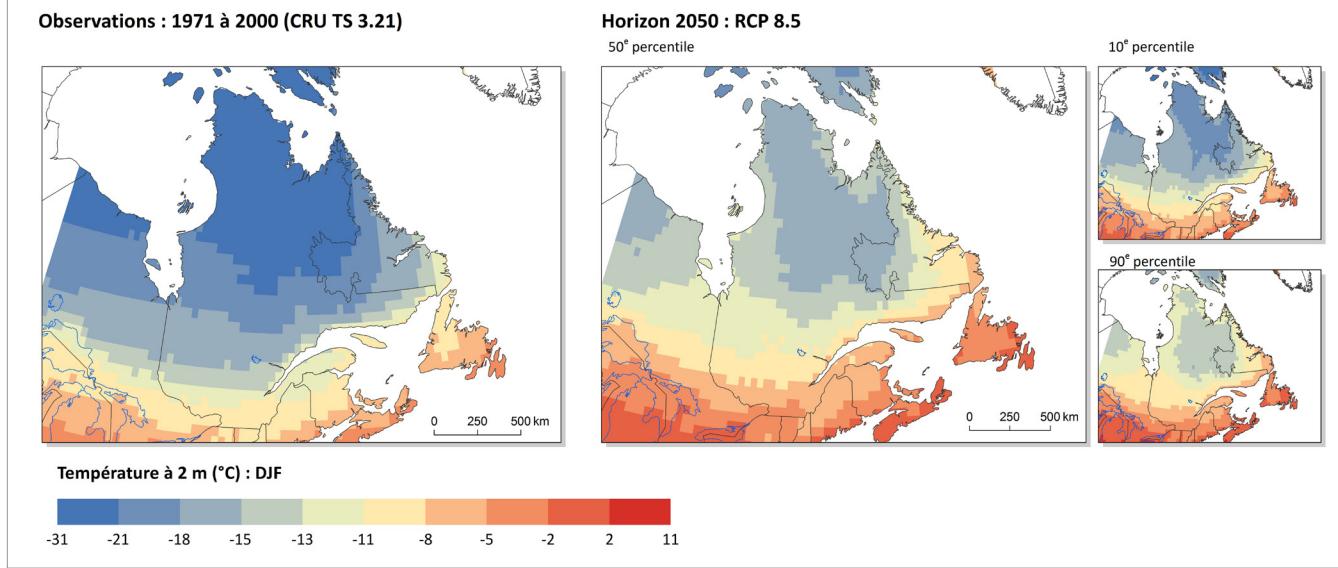
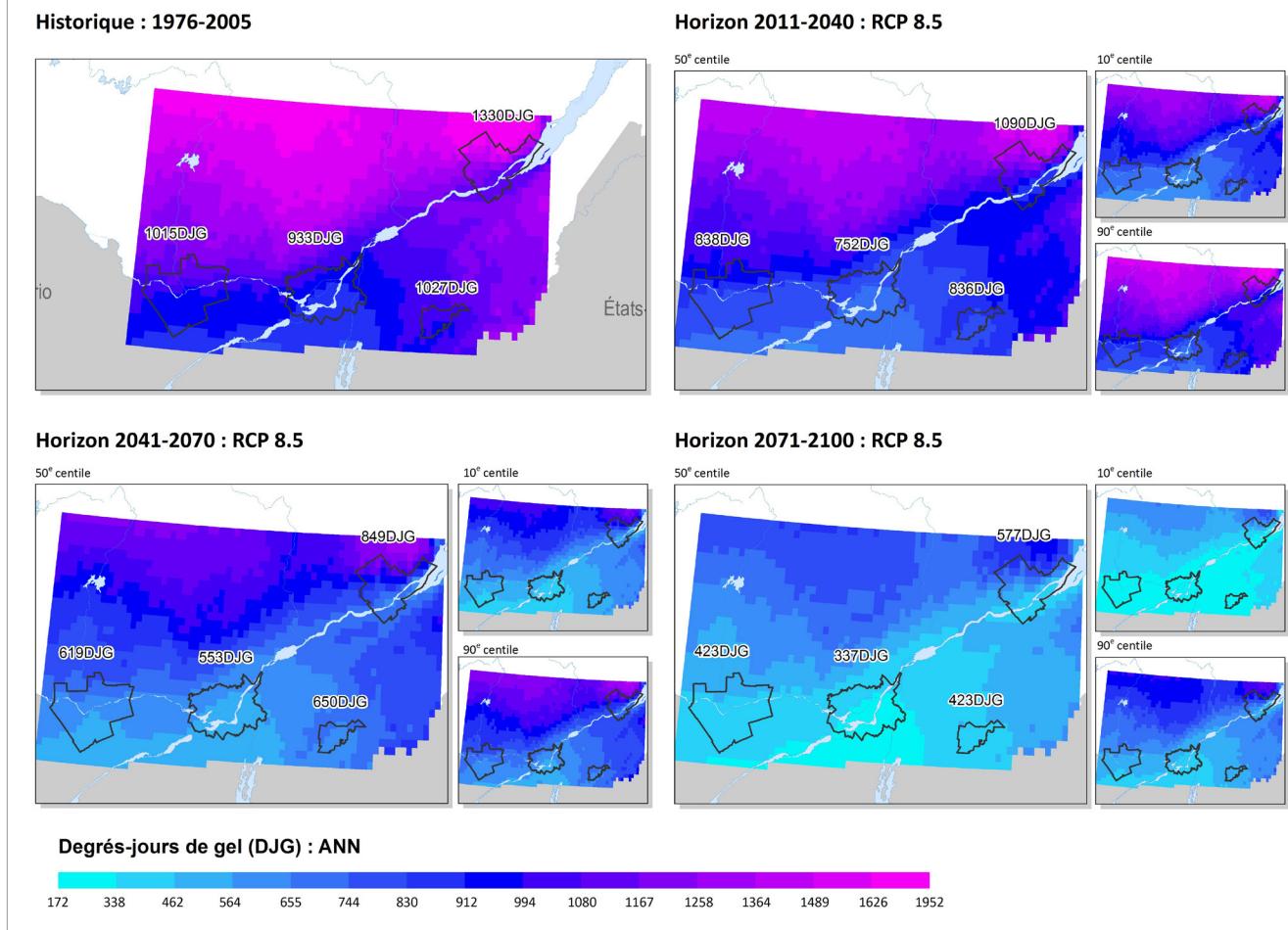


Figure 4 : Températures moyennes observées d'été (JJA : juin, juillet et août) (Figure 4a) et d'hiver (DJF : décembre, janvier, février) (Figure 4b) pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projetées (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données CRU TS 3.21 (climatique recherche unité série chronologique, 3.21 est le nom du communiqué). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble (c'est-à-dire, la médiane de toutes les projections disponibles) ainsi que les 10e et 90e percentiles (c'est-à-dire, les limites inférieures et supérieures) de 29 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (RCP8.5). (Source : Ouranos)

Ce réchauffement amènera aussi des changements au niveau des indicateurs qui affectent le secteur du transport. Par exemple, un début plus tardif et une fin plus hâtive pourraient faire diminuer la longueur de la saison de gel de près d'un mois pour le Sud du Québec à l'horizon 2050 (Logan et coll., 2016, sous presse). La figure 5 montre les projections des degrés-jours de gel.

Figure 5 : Conditions historiques et futures projetées des degrés-jours de gel (annuel), calculées à partir de l'ensemble des scénarios climatiques RCP 8.5 (n=11). Le panneau historique représente la médiane des scénarios climatiques⁹. Pour les horizons futurs, les panneaux gauches représentent la médiane (c'est-à-dire, la médiane de toutes les projections disponibles) tandis que les panneaux droits représentent les 10e et 90e centiles (c'est-à-dire, les limites inférieures et supérieures), respectivement. La moyenne régionale est indiquée au-dessus du contour de quatre régions urbaines (Gatineau/Ottawa, la Communauté métropolitaine de Montréal, Sherbrooke et la Communauté métropolitaine de Québec). (Source : Ouranos)



Les observations du passé récent montrent une augmentation des cycles gel-dégel au cours des années plus chaudes (Chaumont et Brown, 2010). Toutefois, les projections laissent entrevoir une diminution du nombre de cycles gel-dégel. En effet, d'ici 2050, il est probable que la saison de gel aura à ce point raccourci qu'il sera difficile d'atteindre le nombre de cycles gel-dégel qui prévaut actuellement dans une saison.

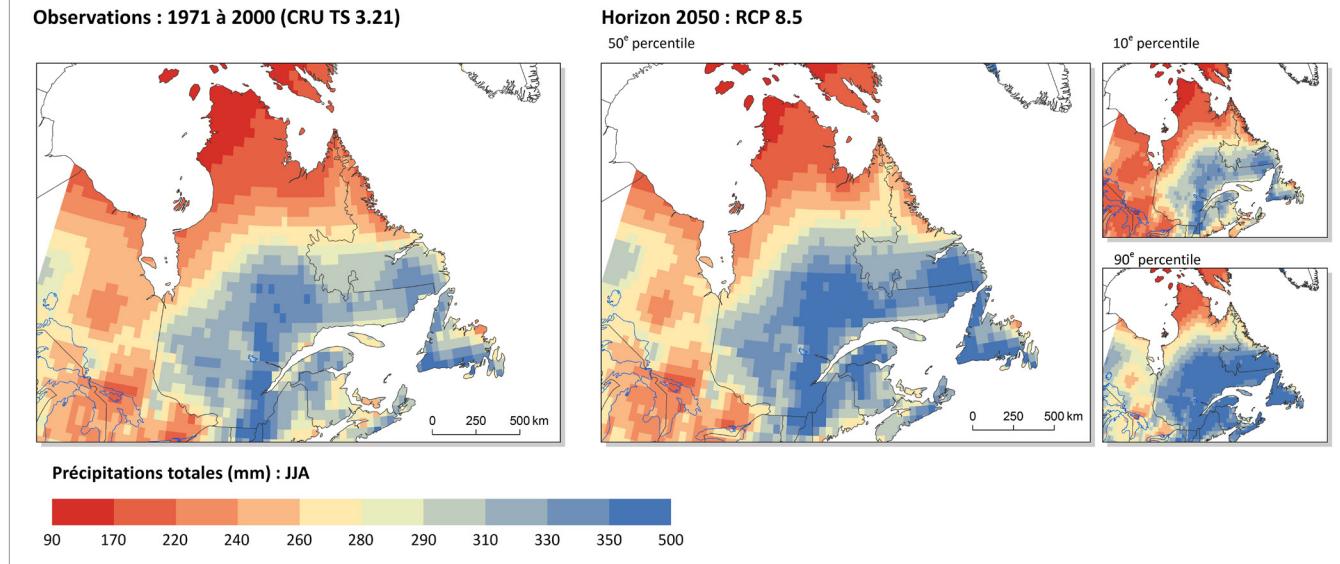
⁹ Notez que dans ce cas, la normale climatique historique n'est pas calculée à partir de données observées, mais à partir des valeurs simulées par les modèles corrigées par rapport aux observations par une méthode de post-traitement

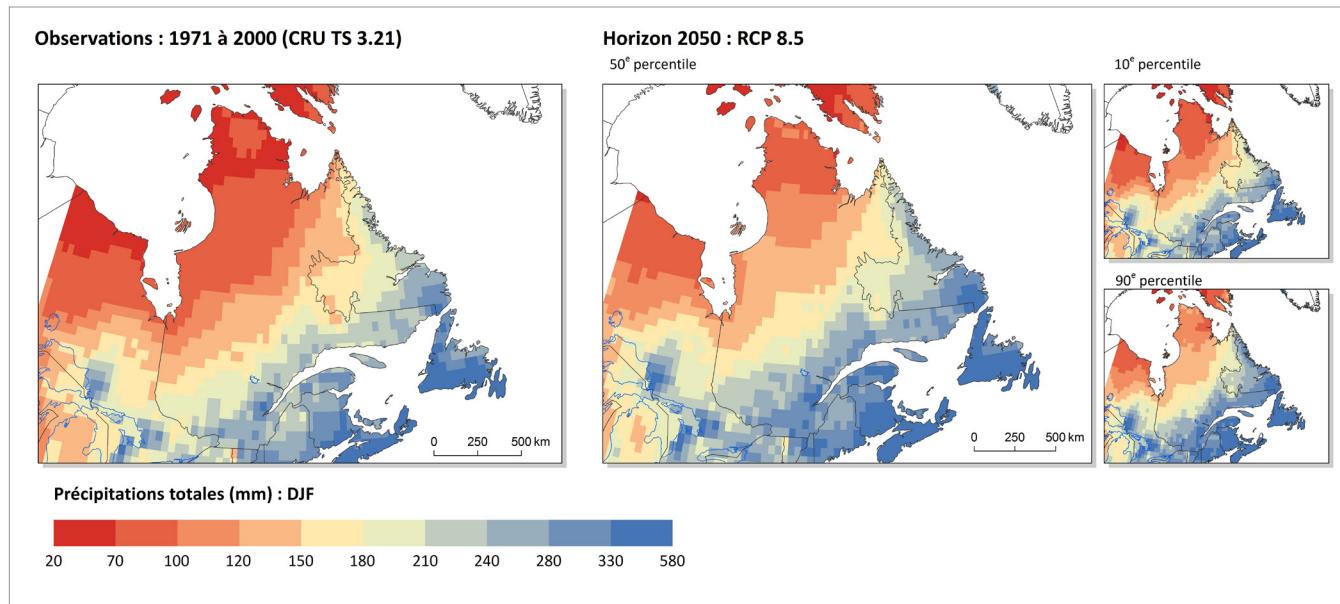
3.2 DES PRÉCIPITATIONS PLUS INTENSES

La tendance historique pour le cumul annuel des précipitations est significativement à la hausse pour plusieurs stations météorologiques situées surtout dans le Sud du Québec. Pour certaines de ces stations, ces tendances s'expliquent par des hausses printanières et automnales des précipitations.

On s'attend à des augmentations des hausses de précipitations en hiver et au printemps pour tout le Québec. Dans le Nord et le Centre, ce serait également le cas en été et en automne. Comme pour les températures, les hausses devraient être plus importantes pour les précipitations extrêmes que pour les moyennes. D'ailleurs, les modèles climatiques s'accordent sur des tendances futures à la hausse pour tous les indices de précipitations abondantes ou extrêmes partout au Québec, bien que les augmentations soient plus substantielles dans le Nord. Ce sera le cas de la quantité maximale annuelle de précipitations, et pour toutes les durées et toutes les récurrences. À titre d'exemple, un maximum annuel dont la période de retour est de 20 ans sur l'horizon 1986-2005 pourrait survenir plus fréquemment vers 2046-2065 avec une période de retour autour de 7 à 10 ans, et ce, pour l'ensemble du Québec. Des études préliminaires laissent croire que le climat futur sera plus favorable aux orages qui devraient laisser de plus importantes quantités de précipitations. Il n'est cependant pas encore possible d'établir le degré de robustesse de cette projection.

Figure 6 : Précipitations totales observées d'été (JJA : juin, juillet et août) et d'hiver (DJF : décembre, janvier et février) pour la période 1971-2000 (panneau gauche) et projetées (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données CRU TS 3.21 (climatique recherche unité série chronologique, 3.21 est le nom du communiqué). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble (c'est-à-dire, la médiane de toutes les projections disponibles) ainsi que les 10e et 90e percentiles de 29 scénarios climatiques futurs (c'est-à-dire, les limites inférieures et supérieures). Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (RCP8.5). (Source : Ouranos)





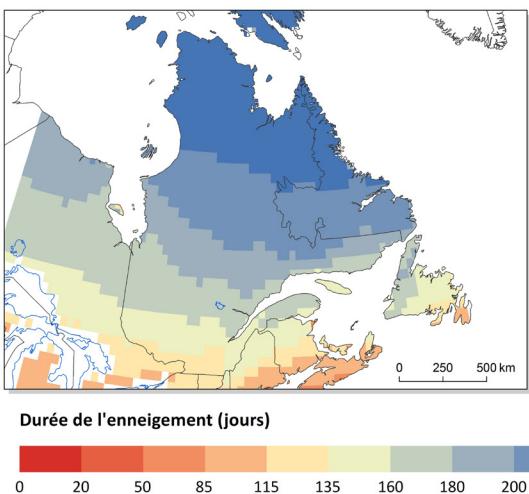
Du côté des précipitations hivernales, les contributions respectives de la neige et de la pluie au cumul total sont évidemment fonction de la température. Compte tenu du réchauffement déjà observé au cours de l'hiver, on remarque une tendance à la baisse des précipitations sous forme de neige pour le Sud du Québec. D'ailleurs, selon une analyse de plusieurs sources de données, la durée de l'enneigement a diminué d'environ 2 jours par décennie pour le Sud du Québec au cours de la période 1948-2005.

Bien que le nombre de chutes de neige devrait diminuer, en lien notamment avec une saison de gel plus courte, les événements de pluie en hiver devraient augmenter (voir figure 6). La façon dont le couvert de neige réagira aux tendances variera selon les régions, en fonction de l'altitude, du régime climatique, du type de surface et de la végétation. Par rapport à la moyenne de 1970-1999, la durée de l'enneigement pour la période 2041-2070 pourrait diminuer jusqu'à 25 jours dans le Nord du Québec, de 25 à 45 jours dans le Centre, de 45 à 75 jours pour le golfe du Saint-Laurent et de 45 à 65 jours pour le Sud du Québec.

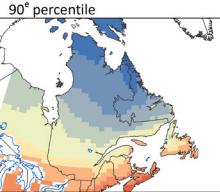
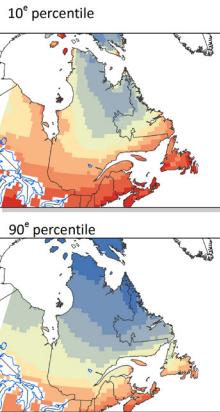
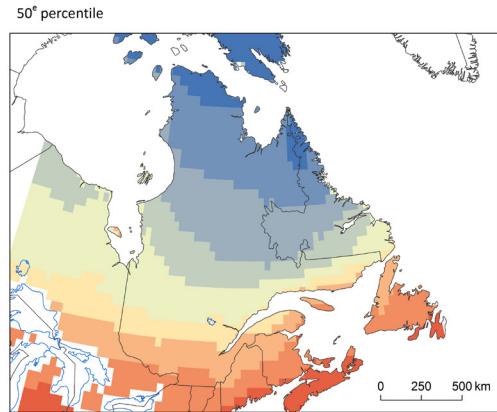
Quant au verglas, qui touche particulièrement la vallée du Saint-Laurent en raison de sa morphologie et de son orientation (Ressler et coll., 2012), la compréhension des conditions météorologiques propices à la formation de ce phénomène a beaucoup progressé, mais il demeure incertain si le nombre, la durée et l'intensité des épisodes de verglas changeront au Québec dans les décennies à venir.

Figure 7 : Durée de l'enneigement observée pour la période 1999-2010 (panneau gauche) et projetée (panneaux droits) pour l'horizon 2050 (2041-2070). La moyenne observée est calculée à partir des données IMS 24 (IMS Ice mapping System 24 km resolution) (National Ice Centre, 2008). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble (c'est-à-dire, la médiane de toutes les projections disponibles) ainsi que les 10e et 90e percentiles (c'est-à-dire, les limites inférieures et supérieures) de 19 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits selon la méthode « delta » appliquée aux observations (Charron, 2014), utilisant des simulations CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase) (RCP8.5). (Source : Ouranos)

Observations : 1999 à 2010 (IMS)



Horizon 2050 : RCP 8.5



3.3 DES INCERTITUDES CONCERNANT LES VENTS

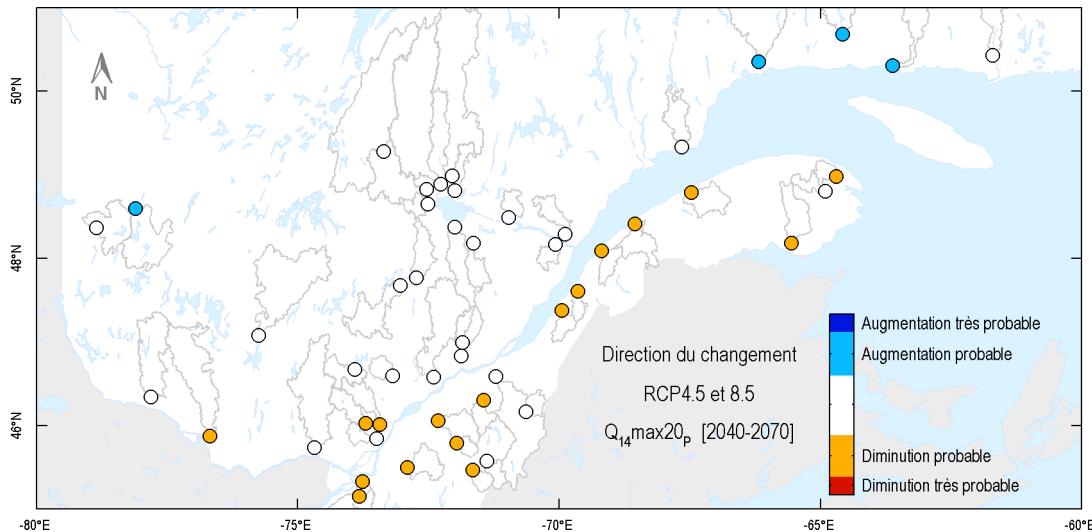
La vitesse moyenne des vents observés pour la grande majorité des stations varie très peu d'une saison à l'autre. À l'exception de quelques stations qui présentent de faibles tendances à l'augmentation, la majorité des stations québécoises présentent plutôt une tendance à la diminution de la vitesse moyenne des vents tout au long de l'année entre 1953 et 2006.

Les projections futures des vents demeurent incertaines, car peu d'études sur ce sujet existent. Des analyses supplémentaires basées sur un plus grand nombre de simulations climatiques à de plus fines résolutions seraient requises.

3.4 DES VARIATIONS DES DÉBITS MOYENS DES RIVIÈRES

Une tendance à la hausse est attendue pour le débit moyen des rivières en hiver pour l'ensemble du Québec pour l'horizon 2041-2070. À l'inverse, pour le même horizon dans le Sud du Québec, des baisses de débits moyens sont attendues en été, au printemps et à l'automne bien que le consensus entre les modèles soit moins élevé. La figure 8 montre les changements attendus quant aux volumes des crues printanières, lorsque la fonte de la glace et de la neige augmente le débit d'eau dans les rivières. Le lecteur est invité à consulter l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (Centre d'expertise hydrique du Québec, 2015) pour de plus amples informations.

Figure 8 : Pointe des crues printanières, débit journalier, récurrence 20 ans. (Source : Centre d'expertise hydrique du Québec) L'indicateur hydrologique Q_{14}^{max20p} donne une indication du volume des crues de récurrence de 20 ans au printemps.



3.5 LE NIVEAU RELATIF DE LA MER

Les fluctuations du niveau relatif de la mer varient à des échelles plus régionales en fonction de plusieurs facteurs dont les courants marins, la circulation atmosphérique, la densité de l'eau de mer (qui est elle-même fonction des températures en surface, mais aussi de l'apport d'eau douce par des cours d'eau ou la fonte de glace), la proximité des calottes et glaciers (effets gravitationnels) ou d'autres phénomènes géophysiques (effets rotationnels). Certains phénomènes se combinent en s'annulant ou bien fluctuent dans le temps à des échelles interannuelles et parfois décennales, faisant en sorte qu'il est plus difficile de détecter des tendances significatives. Ainsi, la hausse du niveau relatif de la mer affectera l'estuaire marin et le golfe du Saint-Laurent. Dans la baie d'Hudson, on s'attend plutôt à une baisse du niveau relatif de la mer, car le fort ajustement isostatique postglaciaire dans ce secteur atténue la hausse du niveau de la mer. Le lecteur est invité à se référer aux chapitres 3 et 8 pour plus de précisions à ce sujet.

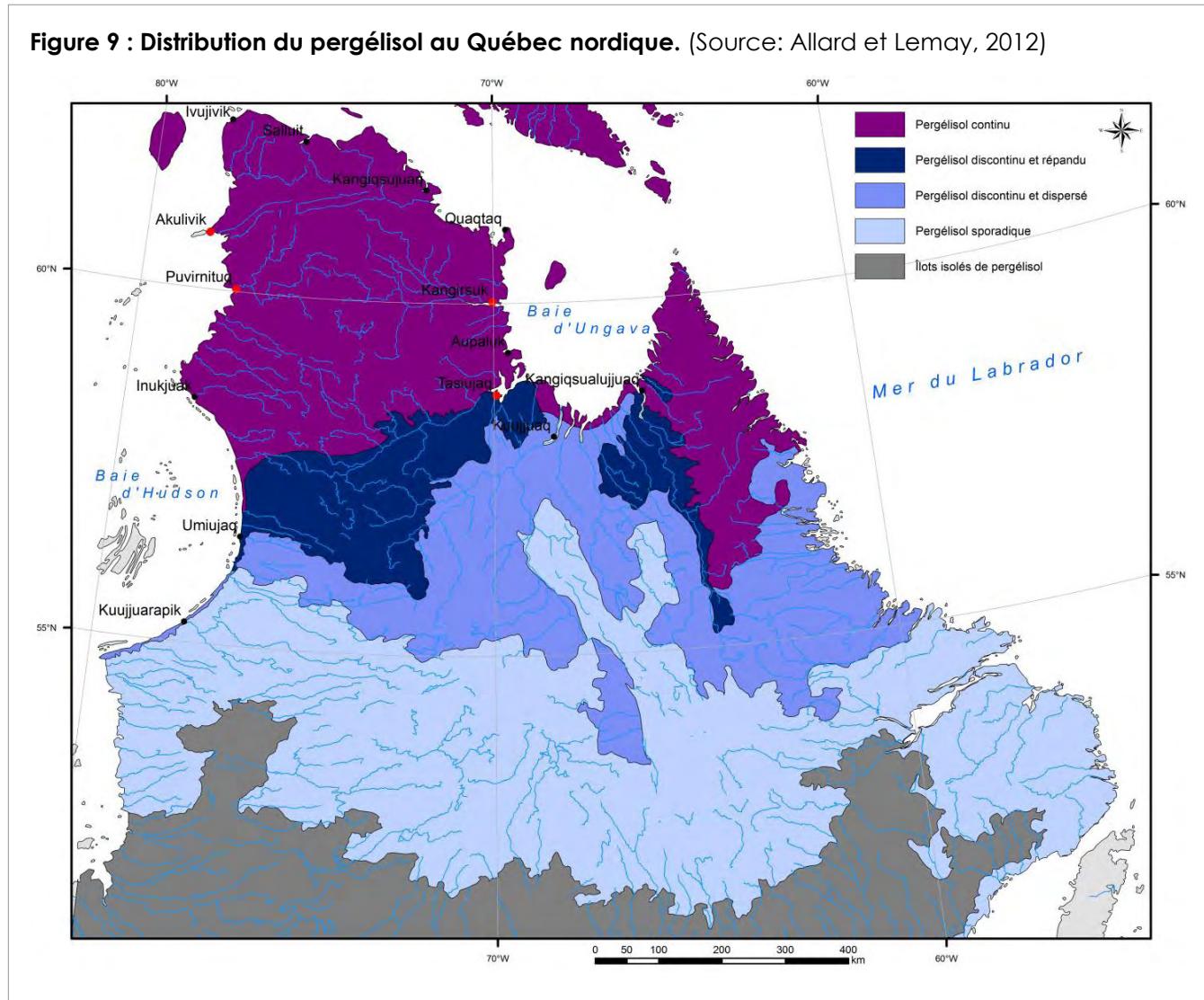
3.6 UNE PERTE PROGRESSIVE DU COUVERT DE GLACE

Le réchauffement des températures aura aussi un effet sur le couvert de glace (voir chapitre 3). Plus spécifiquement pour le Québec, une étude sur l'estuaire marin et le golfe du Saint-Laurent montre que l'englacement a diminué entre 1998 et 2012. Malgré le fait que la variabilité interannuelle est très grande, la saison des glaces est plus courte que par le passé (Senneville et coll., 2014). Cette même étude révèle aussi que le pourcentage d'englacement maximum dans cette région a aussi diminué, passant d'environ 47 % (1968-1998) à 36 % (1998-2013).

Ces tendances sont appelées à se poursuivre et les projections indiquent un englacement qui arriverait environ 10 à 20 jours plus tard tandis que la fonte pourrait être devancée de 20 à 30 jours pour l'horizon 2041-2070 par rapport à la période 1982-2011 dans la région du golfe Saint-Laurent. Quant à la Baie d'Hudson, la période libre de glace pourrait s'allonger de plus de deux mois vers l'horizon 2041-2070. Les autres régions du Québec seront aussi affectées, mais les études existantes ne permettent pas de déterminer l'ampleur des changements attendus.

3.7 LE PERGÉLISOL AFFECTÉ

Le Nord de la province a la particularité d'être situé en zone de pergélisol tel qu'indiqué à la figure 9. Le pergélisol est très sensible au réchauffement des températures et aux modifications du régime des précipitations (voir chapitre 3).



Ces conditions affectent le secteur des transports à différents niveaux. La section suivant décrit plus en détail les principales vulnérabilités pour les différents modes de transport au travers du territoire québécois.

4.0 VULNÉRABILITÉS DES TRANSPORTS FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU QUÉBEC

Si l'aperçu du climat projeté permet de constater que toutes les régions du Québec peuvent s'attendre à une hausse des températures et à des événements de précipitations plus sévères, les conséquences affecteront différemment l'ensemble des activités économiques, y compris le secteur des transports, tant les infrastructures elles-mêmes que la mobilité. Les événements météorologiques extrêmes constituent vraisemblablement un des plus grands risques pour toutes les régions du Québec. De plus, au Québec, le cadre bâti est vieillissant et certaines infrastructures de transport atteignent la fin de leur vie utile ou nécessitent des travaux de réhabilitation considérables (Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes, 2012). Elles peuvent ainsi être plus vulnérables aux impacts des changements climatiques.

Les sections suivantes présentent les principales vulnérabilités climatiques recensées en ce qui concerne les transports routier, maritime, ferroviaire et aérien au Québec. Une section concerne aussi les réseaux de télécommunications dont tous ces modes de transport dépendent. Les vulnérabilités décrites sont celles des infrastructures, mais aussi des opérations et de la gestion des services de transport plus généralement. Il existe davantage d'informations sur le transport routier, ce qui signifie à la fois l'importance de ce mode de transport du point de vue de la part modale, mais aussi les efforts de recherche et développement consentis.

4.1 TRANSPORT TERRESTRE

4.1.1 Les vulnérabilités du transport routier dans le sud du Québec et le long du Saint-Laurent

Sur le territoire qui s'étend à l'est de Québec jusqu'à la Basse-Côte-Nord (couvre le Bas-Saint-Laurent, la Gaspésie et les îles-de-la-Madeleine), les routes et les villages sont implantés le long de la côte. Un tiers de la population de cette région et près de 60 % des routes nationales de ce secteur sont situés à moins de 500 mètres du rivage (Drejza et coll., 2014; Boyer-Villemaire et coll., 2014). Certaines portions de la route 132 longeant toute la rive sud du Saint-Laurent, de la frontière américaine à l'ouest de Montréal jusqu'à Gaspé, se situent à une distance de la berge qui varie entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres (McHugh et coll., 2006).

Au 20^e siècle, cette proximité du fleuve était perçue comme favorable tant pour le transport, l'approvisionnement en ressources naturelles, et les activités d'exploitation de la mer. Cependant, l'implantation des routes et des équipements en bordure du Saint-Laurent se présente aujourd'hui comme un facteur aggravant leur vulnérabilité (Drejza et coll., 2015). Le réchauffement des températures moyennes annuelles et, surtout, la hausse des températures hivernales relevées depuis les années 1980 (Bernatchez et coll., 2008; Bernatchez, 2015; Savard et coll., 2008) entraînent diverses conséquences telles une réduction du couvert de glace, une hausse du niveau marin relatif et une accélération des processus cryogéniques, qui contribuent à l'érosion (Bernatchez et coll., 2011; Bernatchez, 2014; Bernatchez et coll., 2015; Boyer-Villemaire et coll., 2014). Plus de la moitié des côtes de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sont sensibles à l'érosion (Drejza et coll., 2015). Le long de la zone côtière de l'estuaire et du golfe, 294 kilomètres de routes sont considérés à risque pour l'horizon 2065 (Bernatchez et coll., 2015). L'accroissement du cadre bâti le long de l'estuaire du Saint-Laurent augmente l'ampleur des impacts (Bernatchez et Fraser, 2011; Bernatchez et coll. 2015; Ouranos, 2015).

En effet, les impacts des changements climatiques se font déjà sentir sur les infrastructures routières (Drejza et coll., 2014). Plusieurs études révèlent que les problèmes d'érosion ont requis des investissements considérables pour déplacer des routes ou construire des ouvrages de protection (Ouranos, 2015; Bernatchez et coll., 2015; Da Silva, 2016).

Les cycles gel-dégel sont aussi à l'origine de l'érosion de plusieurs falaises rocheuses de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, dans le Québec méridional (Bernatchez et coll., 2014) (voir encadré érosion littorale îles-de-la-Madeleine), surtout en plein cœur de la saison froide (janvier et février) en

contribuant à l'expansion de l'eau contenue dans le sol, dans les falaises ou dans les revêtements des routes, qui peut provoquer des fissures, de la fragmentation, le détachement de falaises ou des coulées boueuses (Boucher-Brossard et Bernatchez, 2013; Drejza et coll., 2015). Si les revêtements sont habituellement conçus pour résister au gel pendant environ quatre mois et pour recevoir d'importantes quantités de neige et de fondants, une fonte rapide de la neige et de la glace rend ces revêtements plus vulnérables. De plus, les épisodes de redoux, dont l'incidence devrait augmenter (Ouranos, 2015), accélèrent et accentuent la déformation de la chaussée (Chaumont et Brown, 2010; Doré et coll., 2014). Les chaussées voient actuellement leur durée de vie utile réduite en raison notamment du phénomène de fissuration qui laisse pénétrer les eaux de pluie et augmente, conséquemment, le niveau de saturation des sols et des matériaux de chaussée (Masseck, 2014).

L'élévation du niveau relatif de la mer d'une quarantaine de centimètres depuis le début du 20^e siècle expose plusieurs portions¹⁰ du réseau routier québécois, notamment le long de l'autoroute 20 et de la route 132 (Frejza et coll., 2015; Bernatchez et Fraser, 2011). L'élévation du niveau relatif de la mer, entre autres, diminue la stabilité des sols où sont établis les bâtiments, les infrastructures et les routes du Québec (Bernatchez, Boucher-Brossard, G. et Sigoin-Cantin, 2012). Du même coup, elle a un impact sur les infrastructures de transport et, conséquemment, sur le système d'approvisionnement et de la mobilité. L'accélération de ce phénomène est également susceptible d'accroître les risques de submersion des routes par les ondes de tempêtes dans le corridor du Saint-Laurent (Savard et coll., 2016; Lemmen et coll., 2008 ; Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2013). Le problème d'attaque des vagues et des ondes de tempêtes sur les côtes québécoises le long du golfe et jusqu'à l'estuaire moyen sera aussi aggravé par le fait que les côtes seront de moins en moins protégées par un couvert de glace qui diminuera de façon importante. En plus, les épisodes de submersion pourraient devenir de plus en plus fréquents et intenses et toucher des espaces qui étaient jusqu'ici peu affectés. Sans mesure d'adaptation qui respecte la géomorphologie de la côte, l'érosion continuera d'affecter le système naturel, l'intégrité de l'environnement bâti et la qualité de vie de la plupart des collectivités vivant en zone côtière (Bernatchez, 2015; Ouranos, 2015).

L'enrochement¹¹, comme les murs de protection, les épis, etc. sont des mesures de protection qui renforcent le sentiment de sécurité de la population (Cooper et Pile, 2014; Friesinger et Bernatchez, 2010; Linham et Nicholls, 2010). Cela dit, ces méthodes sont coûteuses et peuvent constituer un facteur de dégradation de certains talus naturels et de certaines plages (abaissement, rétrécissement, etc.), surtout si elles sont utilisées pour protéger les talus en zone meuble (Bernatchez et coll., 2008 ; Bernatchez, 2015). Là où les matériaux sont meubles, l'enrochement réduit la capacité d'absorption de l'énergie des vagues de tempêtes que possèdent naturellement les plages. Il est alors susceptible d'accentuer l'érosion (Drejza et coll., 2014; Bernatchez et coll., 2011; Bernatchez et Fraser, 2011) et les enrochements et autres structures artificielles linéaires provoquent aussi des effets de bouts à leurs extrémités. La turbulence occasionnée par l'arrivée d'eau aux extrémités d'un ouvrage gruge le sol des propriétés voisines non protégées (Bernatchez et Fraser, 2011). Dans les régions de Sept-Îles et de Percé, la largeur des plages a connu une réduction de 85 % et de 44 % respectivement là où les lignes de rivage ont été artificialisées par une structure rigide de protection (Bernatchez et Fraser, 2011).

D'autres effets des changements climatiques pour les infrastructures terrestres sont liées à la hausse de l'intensité des précipitations pluvieuses en hiver qui peut générer des impacts négatifs, notamment pour la gestion des eaux de ruissellement (Groleau et coll., 2007). Par exemple, sur le territoire du littoral, les systèmes actuels d'évacuation des eaux de drainage des routes peuvent parfois contribuer à former des ravins au sein desquels se concentrent les eaux (Ministère de la Sécurité publique du Québec, 2012) et ce qui peut déclencher des glissements de terrain et accélérer l'érosion. En revanche, dans le sud de la province, autour de la vallée du Saint-Laurent, la hausse des températures moyennes et la modification du régime des précipitations pourraient avoir comme impact positif de réduire l'enneigement des routes et se traduire par une modification à la baisse des coûts associés au déneigement et au déglacement des routes (Webster et coll., 2008).

¹⁰ Une portion de route correspond à un itinéraire routier. Elle peut être régionale ou locale.

¹¹ L'enrochement est une mesure d'adaptation consistant à placer des pierres de tailles différentes sur une pente douce, afin d'absorber et de dissiper l'action des vagues avant que celles-ci n'atteignent le rivage (Circé et cie, 2016).

D'autres effets des changements climatiques pour les infrastructures terrestres sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Synthèse de certains effets des changements climatiques sur les chaussées. Adapté de Thiam (2014)

Causes	Possibles effets sur les chaussées
Augmentation de la température dans les régions froides et augmentation du nombre de redoux hivernaux	Diminution de l'indice de gel en hiver, diminution de la profondeur du gel qui résulte en moins de détérioration des chaussées due au soulèvement et diminution de la fissuration thermique
	Possible augmentation des dommages dus au dégel partiel des fondations (ornierage et fissuration et affaiblissement des chaussées)
Augmentations des températures chaudes extrêmes	Augmentation des ornières de fluge
Augmentation de la disponibilité de l'eau durant les saisons estivales	Augmentation du niveau de la saturation de l'eau dans le sol provoquant un affaiblissement des couches structurales et diminution de la durée de vie Augmentation des orniéragés (Korkiala-Tantuu et Dawson, 2007)
Augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies extrêmes	Augmentation de la teneur en eau dans les sols de chaussées immédiatement après les pluies Augmentation de la teneur en eau dans les chaussées et réduction de leur rigidité

4.1.2 Les vulnérabilités du transport terrestre au Nunavik

Les infrastructures de transport dans les villages nordiques sont construites sur du pergélisol continu, discontinu ou sporadique (voir figure 10 au chapitre 3). Le dégel du pergélisol, attribuable surtout au réchauffement de la température, mais aussi à la gestion de la neige et au drainage, contribue à la perte de l'intégrité structurelle des routes (Doré et coll., 2014; Ouranos, 2015). Les tassements différentiels associés au dégel du pergélisol et leurs conséquences structurelles sur les remblais, notamment, affectent les réseaux de drainage et modifient leur intégrité (Beaulac, 2006; Dumais et Doré, 2013) en provoquant des fissures ou des tassements qui nécessitent des travaux d'entretien plus fréquents, comme c'est le cas pour les routes d'accès à l'aéroport d'Umiujaq (figure 10) et de Salluit.

Le réchauffement climatique affecte aussi la mobilité des populations locales du Nunavik. Les lacs et cours d'eau gelés offrent, durant l'hiver, diverses possibilités de déplacements en véhicule tout terrain, en motoneige et en traîneau à chiens. La période de gel devenant plus courte, ces possibilités sont réduites (Tremblay et coll., 2006; Nickels et coll., 2005; Bernier et coll., 2014). La modification des conditions de glaces et la diminution de la période de présence de glace complexifient l'accès aux ressources naturelles et aux sites d'activités de subsistance (Clerc et coll., 2011; Tremblay et coll., 2006). L'accès aux territoires de chasse, cueillette et pêche est essentiel pour les communautés nordiques et pour l'économie locale. Des sentiers alternatifs peuvent être empruntés, mais cette modification de l'utilisation traditionnelle du territoire réduit, pour la population, la possibilité d'exploiter des ressources nutritionnelles de qualité (Barrett, 2013). Au surplus, l'expérience et le savoir local ne permettent plus d'anticiper avec autant de fiabilité l'état de la glace ou de la neige pour prévoir et organiser les déplacements (Nickels et coll., 2005 ; Samson et coll., 2013). Ces conséquences sont susceptibles d'affecter l'identité culturelle et la santé des populations nordiques, en plus d'affecter le développement économique.

Figure 10 : Tassements importants sur la route d'accès, Umiujaq. (Source : Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D. et coll., 2007)



4.1.3 Les événements météorologiques extrêmes et le transport routier

Les événements météorologiques extrêmes affecteront également le transport routier dans l'ensemble des régions. Des événements tels les précipitations intenses, les tempêtes et les écarts de température (les cycles de gels-dégels), provoquent l'usure accélérée des infrastructures routières (Auld et MacIver, 2005; Case, 2008; Larrivée, 2010). Par ailleurs, lorsque la durée de vie utile de ces infrastructures est avancée, celles-ci deviennent plus vulnérables aux événements météorologiques extrêmes (Ouranos, 2015). Les besoins d'entretien des routes pourraient augmenter. L'intégrité et la performance des ponceaux et des ponts peuvent aussi être affectées.

Au Nunavik, l'augmentation de l'occurrence d'événements météorologiques extrêmes entraînera des impacts au niveau des transports. Certains événements (blizzard, vent, enneigement) ont pour conséquence de réduire la visibilité, affectant la conduite et la sécurité des déplacements terrestres, occasionnant des délais et isolant les communautés des services essentiels.

Les événements météorologiques extrêmes peuvent également isoler les collectivités, en particulier celles qui dépendent d'un seul mode de transport. L'absence d'alternatives de transport contribue à la vulnérabilité de la population de ces régions. À titre d'exemple, les fortes vagues et les surcotes produites par les vents violents qui ont touché les rives du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie, des îles-de-la-Madeleine et de la Côte-Nord les 5 et 6 décembre 2010 ont généré, à Rimouski, un niveau de la marée de 5,54 mètres par rapport au zéro des cartes, soit une ampleur exceptionnelle (Quintin et coll., 2013). La tempête a inondé plusieurs routes, dont les routes 132, 199, 299, 198, et les a rendues impraticables à la circulation. L'assaut des vagues et les fortes pluies ont détérioré la chaussée, certains murs de soutènement, les approches des murs et des ponceaux (voir la figure 11). Sur la base d'un calcul des coûts de remplacement par kilomètre et tenant compte de la situation géographique et des protections côtières existantes (Bernatchez et coll., 2015), les dommages ont été estimés à plusieurs millions de dollars et plusieurs centaines de personnes ont dû être évacuées (St-Amour, 2011). Cette tempête hivernale témoigne des effets possibles de la combinaison de facteurs comme la diminution du couvert de glace, l'élévation du niveau relatif de la mer, la direction des vents et des tempêtes sur l'environnement naturel et le milieu bâti.

Figure 11 : Détérioration majeure de la chaussée de la route 132, en Gaspésie, en décembre 2010.

(Source : Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec)



Les surcotes de tempête correspondent au rehaussement de la mer au-dessus de la marée astronomique lors des fortes tempêtes. L'effet de surcotes plus fréquentes pourra accentuer les phénomènes de submersion marine et l'érosion des environnements naturels comme les plages et les cordons dunaires. Les tempêtes peuvent également entraîner la rupture de digues, de barrages et autres ouvrages hydrauliques (Bernatchez et coll., 2012).

Les forts vents auxquels sont exposées les plages sablonneuses durant de longues périodes, au printemps et à l'automne, transportent le sable et contribuent au déplacement des dunes. Cela affecte l'entretien de la route aux îles-de-la-Madeleine.

En ce qui concerne les feux de forêt, la température, la vitesse et la direction du vent, l'humidité relative, les précipitations et la stabilité atmosphérique sont les principaux facteurs météorologiques pouvant les affecter (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, 2009). Ces facteurs varient dans l'espace et dans le temps : ils porteront vraisemblablement plus fortement atteinte au nord-ouest de la province (Boulanger et coll., 2013). La partie du réseau routier qui se situe sous la limite attribuable de la forêt commerciale dessert essentiellement les industries exploitantes. Les feux provoqués par la foudre peuvent avoir des impacts majeurs sur l'accès routier aux ressources et, du même coup, sur la vitalité des activités de ces industries et des communautés qui en dépendent.

En 2013, ce sont plus de 84 feux qui ont été combattus par la Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) (2014). Durant l'été de cette même année, d'importants feux à la limite nord des forêts attribuables ont nécessité la protection des communautés d'Eastmain et de Baie-Johan-Beetz. Dans la région de la Baie-James, la seule route reliant Matagami et Radisson fut fermée sur plus de 300 kilomètres, nécessitant l'évacuation de plusieurs centaines de travailleurs et laissant des communautés isolées par les flammes (Gouvernement du Québec, 2013; voir figure 12).

D'autres types de perturbations au transport routier sont associés aux événements météorologiques extrêmes. Le déracinement d'arbres peut perturber l'accès à la route

Figure 12 : Feu de forêt à Chibougamau en 2005. (Source : Société de protection des forêts contre le feu)



par la présence de débris. Également, la planification des transports et de l'entretien des routes pourrait être perturbée en raison de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, celles-ci pouvant exposer les travailleurs à des maladies et des lésions professionnelles (comme par exemple, des coups ou des crampes de chaleur, de l'épuisement) (National Institute for Occupational Safety and Health, 2016). Les mesures recommandées pour réduire le stress dû à la chaleur en milieu de travail comprennent des contrôles d'ingénierie (par exemple, l'utilisation de panneaux ou de barrières réfléchissants ou absorbants la chaleur) et de bonnes pratiques de travail (formation, hydratation, périodes d'acclimatation, et des pauses de repos) (National Institute for Occupational Safety and Health, 2016); Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, 2016).

4.2 TRANSPORT MARITIME

Certaines infrastructures maritimes datent de plusieurs décennies, à l'exception des infrastructures nordiques qui ont été mises en place au tournant des années 2000 par les gouvernements provincial et fédéral et les administrations locales (Clerc et coll., 2011; Ministère des Transports du Québec, 2011). Le vieillissement des infrastructures, combiné au réchauffement des températures, à la diminution du couvert de glace et à la fréquence et l'intensité accrue des événements météorologiques extrêmes, pourrait augmenter la vulnérabilité du transport maritime.

4.2.1 Le transport maritime dans le corridor du Saint-Laurent

Les études scientifiques divergent quant à l'effet précis des changements climatiques sur la fluctuation des débits et niveaux d'eau entre le lac Ontario et le Saint-Laurent. En raison, notamment, des nombreuses interventions humaines (bâtiments, régulation des niveaux d'eau, etc.), il est difficile d'établir l'ampleur attendu des fluctuations des débits et les niveaux associés (Bouchard et Cantin, 2015). Cela dit, les simulations de l'effet des températures plus élevées sur l'évaporation des Grands Lacs convergent vers une baisse possible des niveaux et des débits dans la partie fluviale du Saint-Laurent (Bouchard et Cantin, 2015). À l'inverse, dans la partie aval du Saint-Laurent, soit dans l'estuaire et le golfe, le réchauffement climatique entraînerait plutôt une hausse des niveaux d'eau.

Dans le secteur de Montréal, où passent en moyenne 2 200 bateaux chaque année et où transitent annuellement plus d'un million de conteneurs équivalent vingt pieds (EVP) (Port de Montréal, 2015), cette baisse pourrait être de l'ordre de 0,5 à 1,0 mètre (Croley, 2003; Fagherazzi et coll., 2004; Lefavire, 2005; Roy et Boyer, 2011). Ces baisses pourraient avoir comme conséquence d'entraîner une diminution du nombre de navires de type porte-conteneurs faisant escale au Port de Montréal (Slack et Comtois, 2016).

Les changements attendus quant aux débits et niveaux d'eau affecteront le trafic maritime, mais aussi l'ensemble du système intermodal de transport des marchandises qui s'organise autour du Port de Montréal. D'un autre côté, la hausse des températures peut également être considérée comme une occasion d'affaires pour le Port de Montréal, qui pourrait bénéficier du prolongement de la saison de navigation commerciale en amont qui s'étend actuellement de la fin du mois de mars à la fin du mois de décembre.

Les mouvements de marées et le déplacement des glaces associés à la hausse des températures ont une incidence sur le transport sédimentaire et l'ensablement et pourraient exiger des ajustements dans la gestion et l'entretien des voies navigables et des infrastructures maritimes. Ce transport des sédiments est susceptible d'affecter la navigation dans tout le corridor du Saint-Laurent. À certains endroits stratégiques, l'accumulation des sédiments peut réduire le niveau d'eau et former un obstacle à la navigation, ce qui pourrait augmenter le besoin de dragage des chenaux et autour des infrastructures maritimes (Slack et Comtois, 2016).

Les projections climatiques indiquent aussi qu'à l'horizon 2040-2070 (par rapport à la période 1982-2011), l'englacement sera plus tardif de 10 à 20 jours dans l'estuaire et dans le golfe, en plus d'une fonte plus hâtive de 20 à 30 jours (Senneville et coll., 2014). Par conséquent, la période où les

glaces recouvrent traditionnellement le Saint-Laurent (les mois de janvier, février et mars) pourrait être considérablement réduite. Les glaces protègent les côtes contre l'érosion des vagues et des tempêtes. Si une réduction de la période d'englacement peut bénéficier à la navigation, l'absence ou la réduction du couvert de glace fera en sorte que l'impact des vagues et des tempêtes agira sur les côtes, même en hiver (Bernatchez et coll., 2015; Bernatchez et coll., 2010; Savard et coll., 2008). Aussi, l'empilement des glaces le long des infrastructures maritimes, causé par les forts vents et les courants marins, pourrait contribuer à accélérer la dégradation de ces installations.

La circulation des traversiers est elle aussi contrainte par la formation des glaces. Quand celles-ci se forment rapidement, les services de déglaçage de la garde côtière canadienne peuvent être requise, ou encore les services pour certaines communautés doivent être assurés par des transports aériens (Société des traversiers du Québec, 2014). Voir notamment le chapitre 6, l'étude de cas 4 : « Niveaux d'eau, retrait de la glace et gestion adaptative à la Corporation de Gestion de la Voie Maritime du Saint-Laurent ».

4.2.2 Le transport maritime au Nunavik

Les changements climatiques affecteront le régime des tempêtes et le couvert de glace dans la baie d'Hudson et, par conséquent, le régime des vagues, les niveaux d'eau extrêmes et le régime hydrique des bassins versants côtiers (Clerc et coll., 2012; Savard et coll. 2016). La principale cause des dommages aux infrastructures maritimes est l'arrivée de fortes vagues associées au passage des tempêtes. Les dommages se produisent souvent lors de conditions extrêmes qui sont rares, mais très intenses et qui résultent de la combinaison de plusieurs phénomènes (p. ex., fortes vagues et niveaux d'eau extrêmes causés par la superposition de marées de vives eaux et d'une onde de crue de tempête) (Ouranos, 2015). Des études sont présentement en cours pour quantifier précisément la vulnérabilité des infrastructures maritimes du Nunavik face aux changements climatiques.

4.3 TRANSPORT FERROVIAIRE

De façon générale, il y a peu de documentation sur les vulnérabilités du transport ferroviaire au Québec face aux changements climatiques. Le système de gestion du réseau ferroviaire, qui fait interagir des acteurs privés avec des représentants de différents niveaux de gouvernement (local, provincial et fédéral) au sein de cadres institutionnels internationaux (Canada et États-Unis), contribue à complexifier la découverte de vulnérabilités propres aux infrastructures québécoises. Néanmoins, il est clair que tout impact sur le système ferroviaire a des répercussions énormes sur toute la logistique de transport de marchandises au Canada (QGI Consulting, 2009). Voir le chapitre 5 pour plus d'information sur ces enjeux.

La gestion des eaux de ruissellement en bordure des voies ferrées est une préoccupation majeure (AREMA, 2003). Les événements météorologiques extrêmes et les épisodes de forte pluie peuvent causer des problèmes de drainage et d'érosion. Ils augmentent les risques de bris du système par rupture des communications. Par exemple, un épisode de fortes pluies en 2010 est venu éroder la terre sous les rails d'un tronçon de la voie du chemin de fer de l'entreprise Arcelor Mittal. En plus d'empêcher les trains de circuler, l'érosion a causé une rupture des fils optiques assurant la communication sur le système. Ces événements météorologiques extrêmes peuvent également augmenter les risques d'obstruction des voies par des débris. Les événements météorologiques extrêmes et la pluie intense seront plus fréquents et/ou plus intenses avec le réchauffement du climat (Ouranos, 2015), ce qui augmentera la vulnérabilité du transport ferroviaire au Québec.

Des tests de frein sont aussi fréquemment effectués lors d'intempéries. En outre, dans certains secteurs, au centre de la province particulièrement, le personnel doit demeurer sur place et dans les camps d'accueil du personnel, lors de tempêtes violentes. Les opérations d'entretiens sont alors suspendues. Des retards, associés au temps requis pour faire les inspections, et des coûts d'entretien supplémentaires sont à prévoir en fonction de la hausse de la fréquence de tels événements (Gouvernement du Québec, 2015).

Les facteurs climatiques qui contribuent à déclencher des glissements de terrain (pluies abondantes, fonte rapide des neiges et autres phénomènes appelés à augmenter au fur et à mesure que le climat se réchauffe) ont tendance à accroître la vulnérabilité du système ferroviaire. Ceci serait particulièrement important dans les zones sensibles aux glissements de terrain, comme les zones argileuses de la vallée du Saint-Laurent où les caractéristiques du sol interagissent avec l'utilisation du territoire et accentuent la vulnérabilité du système de transport ferroviaire.

Tout comme le transport routier, le transport ferroviaire subit les impacts des feux de forêt provoqués par la foudre. Les impacts économiques des feux sont particulièrement importants pour le réseau au centre de la province qui est peu redondant. En 2013, la compagnie Arcelor Mittal Mines Canada, qui exploite des voies ferrées au Québec et qui compte trois camps d'accueil du personnel, a vu ses activités contraintes pendant plusieurs jours à proximité de Manic-Cinq en raison des feux et de la fumée. L'accès aux sites industriels, tout comme aux opérations d'entretien général, a été restreint en raison des conditions de visibilité quasiment nulle. En effet, la diminution de la visibilité engendrée par les intempéries (feux, fortes pluies, etc.) rend la conduite de locomotive complexe et dangereuse.

Les modifications des cycles de gel et de dégel affectent aussi l'intégrité des rails et contribuent à réduire la durée de vie de ces infrastructures. Elles participent également au déclenchement d'éboulements, particulièrement problématique sur les rails où le dégagement est minime.

Les rails subissent une certaine expansion durant les épisodes de chaleur extrême et une certaine rétraction lors de vagues de grands froids, mais réagissent relativement bien à ces écarts de températures. Tout de même, en contexte de forte variation thermique, le phénomène de dilatation peut endommager les rails.

4.3.1 Le transport ferroviaire dans le corridor du Saint-Laurent

L'érosion des berges et les problèmes d'inondation et de submersion, phénomènes accentués par les changements climatiques, affectent les chemins de fer situés sur le littoral comme le Chemin de fer de Charlevoix Inc. et la Société du chemin de fer de la Gaspésie ou encore le long de cours d'eau, comme la Compagnie de chemin de fer de l'Outaouais et le Chemin de fer Québec Central. L'érosion engendre une perte de l'intégrité structurelle du réseau, voire l'interruption complète des activités dans la région touchée. Le glissement de terrain de Gascons en Gaspésie suggère de telles vulnérabilités pour les réseaux ferroviaires dans cette région (Locat et coll., 2013). Aussi, dans les régions de Charlevoix et de la Côte-Nord (autour de SeptÎles notamment), certains tronçons de voie ferrée sont affectés par des enjeux de stabilité des pentes, de géotechnique ou d'éboulis (Leroueil et coll., 2001).

4.4 TRANSPORT AÉRIEN

Les conditions météorologiques, y compris des événements localisés tels les vents violents, les orages et les fortes précipitations, influencent les conditions de vol sur l'ensemble du territoire québécois. Certaines combinaisons de plusieurs événements – pluie verglaçante, suivie de vents forts – rendent les décollages et les atterrissages plus compliqués.

Dans le sud du Québec, le transport aérien effectue de multiples liaisons nationales et internationales, de passagers et de marchandises. Un raccourcissement de la saison de gel ou du nombre d'épisodes de gel et de dégel est attendu pour le sud du Québec, ce qui pourrait réduire les besoins d'organisation et les frais associés à l'entretien des pistes et des avions (Mills, 2004) et avoir un impact positif pour le transport aérien dans la région.

Les villages du Nunavik, ceux des îles-de-la-Madeleine et dans l'extrême est de la Côte-Nord sont particulièrement vulnérables aux perturbations du transport aérien étant donné qu'ils s'appuient principalement sur ce mode afin d'assurer le transport interrégional.

Les infrastructures aéroportuaires au Nunavik ont été conçues entre 1984 et 1991, en fonction d'un climat stable et sans mesure de protection particulière contre le dégel du pergélisol (Guimond et coll., 2010). Or, le réchauffement des températures et, dans certains cas l'augmentation des précipitations et du ruissellement, contribuent à accélérer le dégel du pergélisol, provoquant des tassements différentiels du sol et endommageant ainsi prématurément certaines infrastructures. L'accumulation de neige en bordure des pistes, comme le long des remblais, agit comme un isolant et réchauffe le sol, contribuant aussi au dégel (Savard, 2006; Guimond et Boucher, 2013). Ainsi, certaines infrastructures montrent des signes de dégradation attribuable au dégel du pergélisol (Guimond et coll., 2010). Les chemins d'accès et les pistes d'atterrissement de cette région pourraient voir leur durée de vie diminuer et, conséquemment, compromettre la sécurité civile et la desserte, en plus de nécessiter des travaux d'entretien supplémentaires. En ce qui concerne les pistes d'atterrissement dans cette région, les épisodes de gel et de dégel compliquent le déglaçage et augmentent les coûts d'entretiens.

Les événements météorologiques extrêmes contribuent également à la vulnérabilité des transports aériens au Nunavik. Si peu d'études portent sur les vents, les Quaqtaqmiut notent tout de même « [...] une recrudescence des vents forts et des tempêtes ces dernières années » (Clerc et coll., 2011). En plus, la durée de vol et, conséquemment, la consommation d'essence fluctuent en fonction des vents (Morris, 2011).

Enfin, le Centre-du-Québec est régulièrement survolé par la Société de protection de la forêt ainsi que par d'autres entreprises de transport aériens qui ont de vols de connexion entre le sud et le nord de la province. Le transport aérien est sensible aux événements météorologiques extrêmes. L'augmentation projetée de l'occurrence de ces événements devrait hausser les besoins d'entretien des pistes et, conséquemment, les coûts associés à la main-d'œuvre, à la machinerie et aux substances pour y faire face. En plus, les feux de forêt et les panaches de fumée dégagés diminuent considérablement la visibilité des avions qui doivent adapter leurs modes de conduite afin d'assurer une certaine sécurité (Transports Canada, 2015, p. 211).

4.5 RÉSEAUX DE DISTRIBUTION ET DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

Le transport et la mobilité s'appuient grandement sur les technologies de l'information et les systèmes de communication. Le réseau d'information et de télécommunication peut être touché par les vents violents, les orages, la foudre, le verglas. Même s'il est difficile de savoir comment les changements climatiques feront évoluer la fréquence ou l'intensité de ces conditions spécifiques, les bris et ruptures encourus par ces événements sont susceptibles d'avoir des conséquences sur l'ensemble du système de transport. L'épisode de verglas que le sud du Québec a connu en 1998 constitue un bon exemple de la manière par laquelle une perturbation par des événements météorologiques extrêmes affecte en cascade les différents réseaux (de télécommunications, de services, d'électricité, etc.) et, conséquemment, tout le système de transport (Dupigny-Giroux, 2000).

5.0 MESURES D'ADAPTATION

Les impacts des changements climatiques touchent l'ensemble du territoire québécois, sans égard aux limites administratives ou au partage des compétences. L'adaptation aux changements climatiques repose sur la collaboration des différents ordres de gouvernements et de la société civile québécoise (Ouranos, 2015).

Les changements climatiques auront des effets positifs et des effets négatifs qui affecteront à la fois les coûts de construction et la durée de vie des infrastructures terrestres (Doré et coll., 2014). Plusieurs solutions peuvent contribuer à rendre les infrastructures plus résilientes. Il est surtout important de considérer un ensemble de mesures complémentaires. La modification de la conception peut améliorer (ou maintenir) la performance de la structure. Toutefois, l'intensification de l'entretien

et des méthodes de détection précoce des défaillances peuvent aider à diminuer de manière significative la vulnérabilité des structures. Il demeure important de poursuivre les travaux pour évaluer la performance technique, économique et environnementale des mesures d'adaptation possibles (Doré et coll., 2014; Ouranos, 2015).

Cette section revient sur les plans et projets mis en œuvre au cours des dernières années par le gouvernement du Québec, par les organisations et les administrations régionales et locales et par les entreprises du transport. Il y a relativement peu de documentation sur les actions planifiées et mises en œuvre par le secteur privé pour adapter les infrastructures et les systèmes de gestion et de planification du transport aux changements climatiques.

5.1 MESURES D'ADAPTATION PLANIFIÉES ET MISES EN ŒUVRE PAR LE GOUVERNEMENT DU QUÉBEC

Le gouvernement du Québec s'est doté en 1996 d'un premier Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) qui a permis aux instances gouvernementales de commencer à s'outiller pour mieux comprendre les risques climatiques au Québec. Le PACC élaboré pour l'horizon 2006-2012 (99\$ million) visait à donner les moyens à l'ensemble des acteurs gouvernementaux, à la communauté scientifique et aux organisations non gouvernementales de mettre en œuvre des actions pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et de s'adapter aux changements climatiques (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2015). Parmi les 26 mesures de ce plan d'action, la mesure 23 concernait spécifiquement le transport et confiait au MTMDET le mandat d'évaluer et de réaliser les recherches permettant de mieux comprendre les phénomènes pouvant avoir des impacts sur le système de transport québécois. Les études réalisées au cours de cette période ont permis d'améliorer la compréhension de l'environnement côtier et son évolution possible sous l'effet des changements climatiques, puis de considérer les enjeux d'érosion et de submersion dans la gestion à long terme des infrastructures exposées. D'autres études ont permis de mieux cerner les problématiques de dégel du pergélisol puis d'intégrer des stratégies appropriées pour la conception, la réfection et la gestion des infrastructures.

En 2012, le gouvernement du Québec s'est doté d'une Stratégie gouvernementale sur l'adaptation aux changements climatiques 2013-2020 (Gouvernement du Québec, 2012a). La Stratégie vise la sensibilisation de la population aux changements climatiques et la mobilisation de plusieurs ministères et collaborateurs, dont le MTMDET, en ce qui a trait à la pérennité et à l'adaptation des infrastructures de transport. Pour améliorer les services offerts à la population et adapter les transports aux changements climatiques, le plan stratégique 2013-2015 de ce ministère soutient des transports. La prise en compte des changements climatiques y occupe une place significative (MTQ, 2013a).

L'importance de la dimension transport est aussi accrue dans l'actuel plan d'action sur les changements climatiques intitulé « Le Québec en action vert 2020 » (Gouvernement du Québec, 2012a). Ce plan, qui s'appuie sur la Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques (Gouvernement du Québec, 2012a), soutient des actions transversales ainsi que des actions spécifiques à la santé, à l'économie, aux infrastructures et à l'environnement naturel. L'aménagement du territoire y est considéré comme une composante clé, permettant de renforcer la résilience des collectivités. La densification urbaine est citée comme un outil permettant de réduire les besoins en infrastructures supplémentaires, comme les routes (Gouvernement du Québec 2012a; Gouvernement du Québec, 2012b). La communication entre la population et les acteurs publics et privés est également vue comme une action transversale en soutien à l'adaptation aux changements climatiques. Le plan prévoit d'ailleurs à ce sujet des « formations spécifiques, des outils de sensibilisation, de transfert des connaissances et d'aide à la décision et de l'assistance technique [...] pour des clientèles cibles » (Gouvernement du Québec, 2012a). Des efforts en ce sens ont d'ailleurs déjà été entamés, notamment auprès des employés du gouvernement.

5.2 MESURES D'ADAPTATION À L'ÉCHELLE RÉGIONALE ET LOCALE

Les connaissances locales et l'implication des communautés sont aussi importantes. Les connaissances et les récits sur les changements dans les modes de déplacement et dans les routes traditionnellement empruntées survenus au fil du temps permettent d'expliquer l'évolution climatique, qui est autrement plus difficile à étayer au moyen de documents (Grimwood et coll., 2012; Samson et coll., 2013).

Des avancées importantes (recherche-action, sensibilisation) ont été réalisées depuis les dix dernières années pour favoriser l'adaptation préventive (Cuerrier et coll., 2015; Bernatchez et coll., 2012; Plante et coll., 2015). Au nord du Québec, par exemple, des mesures d'adaptation ont été mises en œuvre pour faire suite aux premiers signes de dégradation observés sur les infrastructures de transport, avant que les impacts climatiques ne soient trop importants (Guimond et Boucher, 2013).

Depuis 2003, le MTMDET assure le suivi et a instauré un programme de suivi thermique pour les infrastructures aéroportuaires du Nunavik construites sur des terrains sensibles au dégel sous sa compétence (Guimond et Boucher, 2013). Pour appuyer la planification de l'aménagement du territoire, la cartographie des zones de pergélisol des communautés nordiques s'est développée dans la dernière décennie (L'Héault et coll., 2013). Par le traitement de données provenant d'investigations géotechniques, la cartographie permet de déterminer les zones à éviter, celles qui demandent plus d'informations ou encore des techniques de construction adaptées lorsqu'une zone problématique est inévitable. Une meilleure compréhension des contraintes permet ainsi de prioriser les interventions sur le territoire sur la base des connaissances existantes (L'Héault et coll., 2013; voir aussi étude de cas 2).

En 2007, 12 communautés ont fait l'objet de caractérisation des sols par le Centre d'études nordiques et d'autres études plus détaillées sont en cours (Allard, Calmels, et coll., 2007; L'Héault et coll., 2013). Plus spécifiquement, l'impact du réchauffement climatique sur la stabilité des pistes d'atterrissement au Nunavik a fait l'objet de plusieurs études depuis le début des années 2000 (Allard, Fortier, et coll., 2007; Doré et coll., 2014; Allard et coll., 2013). Les chercheurs suggèrent des moyens d'intervention pour maintenir les opérations aériennes. Parmi ceux-ci, notons les travaux d'entretien plus fréquents et l'amélioration de dispositifs de drainage (L'Héault et coll., 2013).

La collaboration entre le MTMDET et le Centre d'études nordiques a récemment mené au développement d'une stratégie d'adaptation pour l'ensemble de ses infrastructures aéroportuaires vulnérables au dégel du pergélisol (Guimond et coll., 2010). Le suivi en temps réel de l'état des pistes se fait par l'implantation de dispositifs de suivi des températures sur 13 infrastructures aéroportuaires au Nunavik. Des techniques d'adaptation ont été expérimentées sur deux sites problématiques (voir étude de cas 1). La piste d'atterrissement de Kuujjuaq a fait l'objet d'une étude de Transports Canada alors que, plus globalement, un suivi régulier est assuré pour vérifier l'état des équipements de transport (aéroports, routes d'accès et infrastructures maritimes).

De plus, chaque municipalité développe un plan directeur d'aménagement et y répertorie les zones constructibles pour assurer la pérennité des infrastructures de transport et des opérations (L'Héault et coll., 2013). Par ailleurs, des outils de sensibilisation et des guides de bonnes pratiques ont aussi été développés par les administrations municipales afin d'informer les employés et de suggérer des moyens d'actions concrètes pour réduire les impacts des changements climatiques pour les infrastructures (par exemple, le drainage et la gestion des neiges sur les infrastructures terrestres).

ÉTUDE DE CAS 1 : SUIVI DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA ROUTE D'ACCÈS À L'AÉROPORT DE SALLUIT ET EXPÉRIMENTATION D'UNE MÉTHODE DE DÉTECTION DE LA DÉGRADATION DU PERGÉLISOL EN BORDURE DES STRUCTURES LINÉAIRES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Une section de la route d'accès à l'aéroport de Salluit au Nunavik est construite sur un pergélisol constitué de dépôts marins riches en glace. Depuis le début des années 2000, on observe sur cette section des dégradations importantes liées au dégel du pergélisol. En 2012, le MTMDÉT a procédé à la reconstruction de ce tronçon de route afin de maintenir cet accès terrestre sécuritaire et pérenne dans un contexte de changements climatiques. La conception du remblai a été adaptée en y intégrant de nouveaux critères de conception qui visent à favoriser une remontée du plafond du pergélisol. Dans le cadre de ce projet, deux innovations technologiques sont expérimentées, soit l'utilisation d'un câble à fibre optique permettant de détecter des secteurs à risque de dégradation le long de la route et la mise en place d'un remblai muni d'un drain thermique à grande échelle comme solution d'adaptation. Ce projet est réalisé par le MTMDÉT en collaboration avec le Centre d'études nordiques et le Groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/bilan-2012-2013/adaptation.htm>

Le suivi de l'état de l'environnement et des infrastructures est important et plusieurs mesures de gestion (enlever la neige aux abords des routes; nettoyer plus fréquemment les ponceaux; trouver des routes alternatives) et de conception (adoucir la pente des remblais; remplacer les ponceaux) peuvent être mises en œuvre pour diminuer les impacts des risques climatiques (Association des transports du Canada, 2010). Voir le chapitre Territoires nordiques pour des informations additionnelles sur les pratiques d'entretien, de suivi et de construction visant à maintenir l'intégrité des infrastructures construites sur pergélisol.

ÉTUDE DE CAS 2 : BRIS DE BARRAGE ET DÉLUGE DU SAGUENAY

En 1996, des pluies diluviennes s'abattent au Québec et atteignent plus particulièrement la région du Saguenay. Une série d'inondations forcent l'évacuation de 16 000 personnes et détruisent plusieurs routes et ponts, isolant des populations.

À la suite de ces événements, le Centre de géomatique du Québec et le ministère de la Sécurité publique ont implanté un outil de cartographie interactive en ligne (portail GéoRISC) afin de guider les gestionnaires des ouvrages de retenue et limiter les conséquences des bris de barrage et des inondations dans la région. Ce système de gestion (SCORE) est en ligne depuis 2008, donnant ainsi accès en continu aux données descriptives concernant les barrages du Saguenay-Lac-Saint-Jean. La modélisation associée à ces données permet, entre autres, d'envisager les conséquences en cas de rupture des barrages, de reconnaître les impacts des précipitations sur le réseau routier et de planifier les routes alternatives.

En 2013, une chaire de recherche en ingénierie côtière et fluviale a été créée (Gouvernement

du Québec, 2012b). Cette chaire créée au sein de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), avec la collaboration du MTMDT et du MSP, a dirigé diverses recherches sur l'adaptation des critères de conception des ouvrages de protection côtière (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2014). De plus, des études sur la vulnérabilité des infrastructures routières de l'est du Québec ont été menées par la Chaire en géosciences côtières de l'Université du Québec à Rimouski (Drejza et coll., 2014; Drejza et coll., 2015).

Des efforts en cours pour modéliser l'hydrologie des bassins versants du Saint-Laurent contribuent à anticiper les impacts des changements climatiques sur le régime hydrique influençant le transport maritime (Bouchard et Cantin, 2015). Les administrations portuaires et les représentants de l'industrie maritime semblent cependant moins outillés pour anticiper les événements météorologiques extrêmes, tels les tempêtes, les ouragans, etc., qui affecteront leurs activités de façon accrue dans les prochaines années (Slack et Comtois, 2016).

À la suite d'une étude réalisée par l'INRS (Mailhot et coll., 2014), le MTMDT applique depuis 2015 un nouveau facteur de majoration des débits pour les bassins versants de 25 km² de 18 ou 20 % selon les régions du Québec afin de tenir compte des changements climatiques (MTMDT, 2015). Ce facteur de majoration était jusqu'à récemment de 10%. L'utilisation du portail GéoRISC aura aussi contribué à la gestion des ouvrages de retenue (encadré sur étude de cas 2).

Plus localement, sur la base de plusieurs études (voir synthèse dans Savard et coll., 2008) menées conjointement avec le ministère de la Sécurité publique du Québec, l'UQAR, Ouranos et la Ville de Sept-Îles, on a pu mieux comprendre les causes et les facteurs liés à l'érosion des côtes. La municipalité de Sept-Îles a par la suite procédé à un zonage de son territoire pour mieux contrôler les usages en bord de mer et a effectué une analyse coûts/avantages de différentes solutions pour des structures déjà menacées par la perte de terrain côtier. La Ville de Sept-Îles, dont les routes sont sérieusement affectées par l'érosion des berges, a mis en œuvre une stratégie de recharge en sable de ses plages les plus menacées par l'érosion. Elle a également interdit l'enrochement à plusieurs endroits sur son territoire.

De fait, l'enrochement, bien qu'il fasse partie de la liste des ouvrages de protection des routes contre l'érosion, peut se révéler moins avantageux aux plans économique et structurel que des options de protection alternatives selon le type de côte (Bernatchez et Fraser, 2011). Dans le même sens, bien au fait que la recharge en sable, l'enrochement et le surdimensionnement des ouvrages ne peuvent assurer à eux seuls la résilience du milieu côtier à l'accentuation du phénomène d'érosion et à l'augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes, la Ville de Sept-Îles travaille avec la MRC des Sept-Rivières et le gouvernement du Québec à se douter d'un plan d'intervention sur le littoral (Ressources naturelles Canada, 2015). Ce plan servira à déterminer les secteurs les plus à risque et à envisager divers scénarios pour le transfert des équipements et des infrastructures.

Le plan d'intervention des Îles-de-la-Madeleine en sécurité civile, quant à lui, dresse la liste des bâtiments et des routes à risques d'érosion. Il présente quelques scénarios d'intervention et de transfert des infrastructures et des équipements et il détermine les partenaires potentiels, incluant le MTMDT. Le plan souligne également la volonté municipale d'intégrer au plan d'urbanisme une « réglementation d'urbanisme appropriée » (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2010).

En ce qui concerne les feux et leur interférence sur les routes, une étude sur la foudre a été réalisée au Québec par le Service canadien des forêts (Morissette, 2009). Elle a permis de localiser les événements et de déterminer que la densité des éclairs est plus élevée dans les parties sud et ouest de la province. En 2005, une sécheresse a donné lieu à de nombreux incendies de forêt, forçant l'évacuation d'urgence de près de 1000 résidents de la ville de Chibougamau (Gouvernement du Québec, 2005). Le MTMDT a collaboré avec la SOPFEU et les municipalités du Centre-du-Québec pour améliorer les connaissances quant aux aléas climatiques, incluant les feux de forêt, et aux vulnérabilités des transports associées afin de développer des outils d'aide à la décision et à élaborer des plans d'aménagements visant à assurer la pérennité des infrastructures de transport et des services offerts.

6.0 CONCLUSIONS ET BESOINS FUTURS DE RECHERCHE

Les réseaux de transport jouent un rôle critique pour soutenir la compétitivité économique et la qualité de vie. La forte interdépendance entre ces systèmes rend cependant plus complexes les enjeux associés aux changements climatiques (Ouranos, 2015).

Les changements climatiques vont modifier l'environnement naturel de l'ensemble du territoire québécois. La plupart des zones côtières québécoises vont subir une accentuation de l'érosion, en plus de voir submergés des espaces qui étaient jusqu'ici peu affectés.

Au Nunavik, le dégel du pergélisol contribue à l'affaissement et à la fissuration des routes et des infrastructures aéroportuaires, qui sont essentielles à la desserte des communautés (Transports Canada, 2015). Les techniques d'entretien et de remise en état, de même que les fréquences d'interventions, doivent être modifiées entraînant des coûts important et des défis additionnels pour leur planification. Dans cette région du Québec, les modifications au couvert de glace et les changements aux régimes de tempêtes affectent aussi de manière importante la mobilité hivernale. La gestion des eaux de ruissellement et le drainage sont aussi affectés par les changements climatiques. Une cartographie caractérisant les zones de pergélisol qui aide à mieux planifier le développement est un outil important pour protéger les infrastructures dans cette région. De nombreux défis subsistent dans le domaine de l'adaptation des infrastructures nordiques, notamment au chapitre du transfert des connaissances, de l'acquisition de données à long terme, de l'utilisation de nouvelles technologies pour optimiser l'acquisition de données et les interventions (Transports Canada, 2015).

En milieu urbain, des pluies fréquentes et plus intenses provoquent des inondations localisées et auront tendance à s'accroître avec les changements climatiques. Une combinaison de mesures pourrait permettre de mieux gérer les enjeux de ruissellement.

Les événements météorologiques extrêmes semblent constituer le plus grand risque pour l'ensemble des infrastructures et des réseaux de transport, et ce, en toutes saisons. La conception, mais aussi tous les aspects d'opération, d'entretien, de gestion et de réhabilitation, sont et seront affectés par les changements climatiques.

L'adaptation est un enjeu social et institutionnel, qui gagne à être traité de façon intégrée. En effet, les impacts des changements climatiques sur les infrastructures ne peuvent pas être examinés isolément des autres facteurs (sociaux, politiques, culturels, environnementaux et économiques) qui influencent l'utilisation et la gestion des infrastructures. La reconnaissance des vulnérabilités locales et globales du système québécois de transport est nécessaire pour développer des outils et des mesures d'adaptation pertinentes qui contribuent à maintenir l'état des infrastructures et les opérations de transport.

Le gouvernement du Québec a dédié des efforts considérables au cours des deux dernières décennies pour mieux comprendre les impacts des changements climatiques, à la fois pour l'environnement naturel, les infrastructures de transport et la mobilité. Les enjeux de gestion des eaux pluviales, d'érosion des berges et de dégel du pergélisol sont particulièrement bien expliqués dans la documentation et les stratégies pour composer avec ces problèmes sont de mieux en mieux compris. Sur la base de ces travaux, il a commencé à mettre en place des actions concrètes pour augmenter sa résilience. Néanmoins, l'adaptation du transport continue de s'avérer un sujet de recherche à développer.

Les risques climatiques pour les organisations, les entreprises et les systèmes d'opérations restent à être mieux expliqués au moyen de documents. Plus d'études permettraient de mieux comprendre l'interaction entre les modifications de l'environnement naturel entraînées par les changements climatiques et les modes de conception, d'organisation et de gestion des systèmes de transport.

En matière de transport routier, les sujets de recherche à développer comprennent l'analyse de la coordination entre les différentes parties prenantes et l'évaluation des impacts des changements climatiques sur la signalisation routière et sur les équipements périphériques, ainsi que l'utilisation et le développement des routes et des corridors informels dans le Nord.

En ce qui concerne le transport ferroviaire, peu d'études ont été identifiées à ce jour. Ainsi, est-il encore difficile de déterminer les enjeux spécifiques pour le Québec.

Dans le domaine du transport maritime, il faut approfondir et rédiger davantage de documentation sur les connaissances liées à la vulnérabilité des infrastructures et du transport maritimes face aux changements climatiques, surtout dans le sud du Québec. Plusieurs thèmes seraient à creuser dont : l'évaluation de l'endommagement prématué des infrastructures avec l'effet des changements climatiques; et, l'étude de l'impact de la navigation accrue conjugué aux changements climatiques en ce qui concerne les espèces envahissantes marines.

En matière de transport et de distribution de l'électricité, l'évaluation des seuils et des niveaux de tolérance des équipements et des infrastructures par rapport aux conditions dites hostiles (vents violents, foudres, verglas, etc.) restent à préciser.

Finalement, le suivi de l'état des infrastructures par rapport à un état de référence bien expliqué dans la documentation permet de mieux comprendre les vulnérabilités potentielles, d'évaluer la performance des mesures mises en place et d'intervenir de manière plus précoce et plus stratégique aux endroits qui présentent des problèmes. Ainsi, l'acquisition de données à long terme est importante, tant pour continuer de documenter l'impact des changements climatiques que pour préciser les critères de conception et les bonnes pratiques d'entretien et de gestion. Une meilleure connaissance permet aussi l'échange de bonnes pratiques en matière de conception, de construction et d'entretien des infrastructures.

RÉFÉRENCES

- Allard, M., Calmels, F., Fortier, D., Laurent, C., L'Héault, E., et Vinet, F. (2007). *Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique* [Rapport scientifique final pour Ouranos]. Montréal, QC. 49 p.
- Allard, M., Fortier, R., Calmels, F., Savard, C., Guimont, A., et Tuarussov, A. (2007). *L'évaluation de l'impact du réchauffement climatiques sur la stabilité des pistes d'atterrissement au Nunavik : première étape vers une stratégie d'entretien*. Exposé présentée au Congrès annuel de 2007 de l'Association des transports du Canada, Saskatoon, SK.
- Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Héreault, E., Sarrazin, D., et al (2012). *Le pergélisol et les changements climatiques au Nunavik et Nunatsiavut : importance en matière d'infrastructures municipales et de transports*. Dans M. Allard et M. Lemay (Éds.), *Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation*. ArcticNet Inc., Ville de Québec, Canada, pp 171-197
- Andrey, J. (2010). Long-term trends in weather-related crash risks. *Journal of Transport Geography*, 18, 247-258.
- Andrey, J., et Mills, B. (2002). Climate change and transportation : potential interactions and impacts. Dans *The potential impact of climate change on transportation : Summary and discussion papers* (pp. 77-88). DOT Center for Climate Change and Environmental Forecasting, Federal Research Partnership Workshop, 1-2 octobre, 2002. Repéré à <http://climate.dot.gov/documents/workshop1002/mills.pdf>
- AREMA (Éd.) (2003). *Practical guide to railway engineering* (2nd Edition). Lanham, MD : The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). 569 p.
- Association des transports du Canada (2010). *Dossier d'information sur le développement et la gestion des infrastructures de transport dans les régions du pergélisol*, Association des transports du Canada (ATC), 9 p.
- Auld, H., et MacIver, D. (2005). Cities and communities : The changing climate and increasing vulnerability of infrastructure. Dans D. MacIver et L. Erda, *Climate change: Building the adaptive capacity* (pp. 254 - 288). Repéré à http://projects.upei.ca/climate/files/2012/10/Book-5_Paper-19.pdf
- Barrett, M. (2013). *Les changements climatiques au Nunavik* [Vidéo en ligne]. Repéré à <http://monclimatetmoi.ca/videos/les-changements-climatiques-au-nunavik/>

- Beaulac, I. (2006). *Impacts de la fonte du pergélisol et adaptations des infrastructures de transport routier et aérien au Nunavik (mémoire de maîtrise)*. Québec, QC : Université Laval. 276 p.
- Beaulieu, P. (2014). *Portrait économique des régions du Québec* (édition 2015). Québec, QC : Ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations. Repéré à http://www.economie.gouv.qc.ca/fileadmin/contenu/documents_soutien/regions/portraits_regionaux/portrait_socio_econo.pdf
- Bernatchez, P. (2015, février). *Bilan des connaissances sur l'érosion et la submersion côtière au Québec : enjeux, causes et perspectives*. Présentation au 15e Colloque sur la Sécurité civile et incendie, Québec. Repéré à http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/colloques/2015/presentations/bernatchez2015.pdf
- Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Corriveau, M., et Jolivet, Y. (2014). *Impacts des changements climatiques sur l'érosion des falaises de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent* [Rapport scientifique final pour le ministère de la Sécurité publique du Québec et Ouranos]. Rimouski, QC : Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières. 166 p.
- Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., et Sigouin-Cantin, M. (2012). *Contribution des archives à l'étude des événements météorologiques et géomorphologiques causant des dommages aux côtes du Québec maritime et analyse des tendances, des fréquences et des temps de retour des conditions météo-marines extrêmes* [Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec]. Rimouski, QC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 140 p.
- Bernatchez, P., Dugas, S., Fraser, C., et Da Silva, L. (2015). *Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques* [Rapport scientifique pour Ouranos]. Québec, QC : Université du Québec à Rimouski. 45 p.+ annexes. Repéré à https://ouranos.ca/wp-content/uploads/2016/03/RapportBernatchez2015_FR.pdf
- Bernatchez, P., et Fraser, C. (2011). Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada. *Journal of coastal research*, 28(6), 1550-1566.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S., et Morissette, A. (2008). *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques* [Rapport scientifique pour Ouranos et FACC]. Rimouski, QC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 256 p. Repéré à https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/2016/03/RapportBernatchez2008_FR.pdf
- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavire, D., et Dugas, S. (2011). Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Ocean and Coastal Management*, 54 (8), 621-632.
- Bernatchez, P., Toubal, T., Van-Wiertz, S., Drejza, S., et Friesinger, S. (2010). *Caractérisation géomorphologique et sédimentologique des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups, route 199, îles-de-la-Madeleine*. Université du Québec à Rimouski. [Rapport final remis au ministère des Transports du Québec]. Rimouski, QC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 177 p.
- Bernier, M., Gignac, C., Gauthier, Y., et Poulin, J. (2014). *Projet ICEPAC - Atlas interactif sur la probabilité de l'aléa glace à l'échelle des infrastructures maritimes et côtières dans un contexte de changements climatiques*. [Rapport d'étape 2013-2014 pour Ouranos et Ressources naturelles Canada]. Montréal, QC : Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau-Terre-Environnement. 50 p. Repéré à <http://espace.inrs.ca/2694/1/R001577.pdf>
- Bouchard, A., et Cantin, J.-F. (2015). *Évolution des niveaux et débits du fleuve Saint-Laurent, Suivi de l'état du Saint-Laurent, Plan d'action Saint-Laurent*. Repéré à http://planstlaurent.ac.ca/fileadmin/publications/fiches_indicateurs/Fiche-debits_niveaux_eau_F_final.pdf
- Boucher-Brossard, G., et Bernatchez, P. (2013). *Analyse historique et récente de l'érosion du talus côtier, secteur des Cayes, municipalité de Rivière-Saint-Jean, Côte-Nord* [Rapport de recherche remis au ministère des Transports du Québec, Direction de la Côte-Nord]. Rimouski, QC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 37 p.
- Boulanger, Y., Gauthier, S., Gray, D.R., Le Goff, H., Lefort, P., et Morissette, J. (2013). Fire regime zonation under current and future climate over eastern Canada, *Ecological Applications*, 23(4), 904-923 p.
- Boyer-Villemaire, U., Marie, G., et Bernatchez, P. (2014). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Analyse des stratégies internationales et recommandations en matière de réduction de la vulnérabilité des infrastructures de transport face aux risques naturels côtiers* [Rapport de recherche remis au ministère des Transports du Québec]. Rimouski, QC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 165 p. + annexes.
- Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes (BRIC). (2012). *Routes et systèmes d'eau potable, d'eaux usées et d'eaux pluviales municipaux*. Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes, Volume 1 : 2012. 75 p. Repéré à http://www.canadainfrastructure.ca/downloads/Canadian_Infrastructure_Report_Card_FR.pdf
- Case, T. (2008). Climate change and infrastructure issues. *Drinking Water Research* (Édition spéciale), 18 (2), 15-17.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). (2015). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional: Impacts des changements climatiques sur les régimes de crue, détiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*. Québec, QC : Centre d'expertise hydrique du Québec (CEH). 81 p.

- Charron, I. (2014). *Guide sur les scenarios climatiques: Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation*. Montréal, QC : Ouranos. Repéré à https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/2016/03/GuideCharron2014_FR.pdf
- Chaumont, D., et Brown, R. (2010). Analyse de simulations régionales du climat et d'indices climatiques associés au transport routier dans le sud du Québec. *Routes/Roads*, (345), 78-79.
- Circé, M., Da Silva, L., Mercier, X., Boyer-Villemaire, U., Desjarlais, C. and Morneau, F. (2016) Cost-benefit analysis of coastal adaptation options in Percé. Ouranos, Montréal. 150 pages and appendices Retrieved from <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/Report-CBA-Perce.pdf>
- Clerc, C., Gagnon, M., Breton-Honeyman, K., Tremblay, M., Bleau, S., Gauthier, Y., Aloupa, S., Kasulduak, A., Furgal, C., Bernier, M., et Barrett, M. (2011). *Changements climatiques et infrastructures marines au Nunavik - Connaissances locales et point de vue des communautés des Quaqtaq, Uniujaq et Kuujjuuaq* [Rapport de recherche No R-1273f présenté au ministère des Affaires Indiennes et du Nord Canada]. Québec, QC : Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau-Terre-Environnement. 123 p. + annexes
- Clerc, C., Poulin, J., Gauthier, Y., Bernier, M., Bleau, S., Gignac, C., Bédard, J.-S., et Duhamel-Beaudry, É. (2012). *Descripteurs et indicateurs de la couverture glacielle au Nunavik : Quaqtaq, Umiujaq et Kuujjuuaq: changements climatiques et infrastructures marines au Nunavik : Impacts et adaptations* [Rapport de recherche no. R1389 remis au Ministère des transports du Québec, Consortium Ouranos du Québec et Ministère des Affaires Autochtones et Développement du Nord Canada]. Québec, QC : Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau-Terre-Environnement. 188 p.
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2016). Coup de chaleur : Comment prévenir les coups de chaleur. Québec, QC. Repéré à http://www.csst.qc.ca/prevention/theme/coup_chaleur/Pages/comment-prevenir.aspx
- Cooper, J.A.G., et Pile, J. (2014). The adaptation-resistance spectrum: A classification of contemporary adaptation approaches to climate-related coastal change. *Ocean & Coastal Management*, 94, 90-98.
- CPCS. (2013). *Étude multimodale de transport des marchandises au Québec en appui aux plans territoriaux de mobilité durable, Bloc 3 : Caractérisation du transport des marchandises à l'échelle du Québec, des grands corridors de transport et des territoires de PTMD, vol. 1 : Introduction, méthodologies et portrait provincial* [Rapport préparé pour le ministère des Transports du Québec]. Montréal, QC : CPCS. 396 p.
- Croley, T.E. (2003). *Great Lakes climate change hydrologic impact assessment: IJC Lake Ontario-St. Lawrence River regulation study* [NOAA Technical Memorandum GLERL-126]. Ann Arbor, MI : US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Great Lakes Environmental Research Laboratory. 77 p. Repéré à https://www.glerl.noaa.gov/pubs/tech_reports/glerl-126/fm-126.pdf
- Cuerrier, A., Brunet, N.D., Gérin-Lajoie, J., Downing, A., et Lévesque, E. (2015). The study of Inuit knowledge of climate change in Nunavik, Quebec : A mixed methods approach. *Human Ecology*, 43(3), 379-394.
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., Willett, K.M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A.M.G., Krueger, A.C., Marengo, J., Peterson, T.C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., Salinger, J., Elrayah, A.S., Sekele, S.S., Srivastava, A.K., Trewin, B., Villarroel, C., Vincent, L.A., Zhai, P., Zhang, X., et Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century : The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118(5), 2098-2118.
- Doré, G., Bilodeau, J.-P., Masseck Thiam, P., et Perron Drolet, F. (2014). *Impact des changements climatiques sur les chaussées des réseaux routiers québécois* [Rapport scientifique final pour Ouranos]. Québec, QC : Université Laval. 63 p.
- Drejza, S., Friesinger, S., et Bernatchez, P. (2014). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydro-sédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec. Volume I (Projet X008.1)* [Rapport pour le ministère des Transports du Québec]. Rimouski, QC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 226 p. + annexes.
- Drejza, S., Friesinger, S., et Bernatchez, P. (2015). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques. Volume 3 : Développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques sur 9 sites témoins (Projet X008.1)* [Rapport pour le ministère des Transports du Québec]. Rimouski, QC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 308 p. + annexes. Repéré à http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1166760/03_Volume_3.pdf
- Dumais, S., et Doré, G. (2013). Utilisation de surfaces à albédo élevé afin de contrer la dégradation du pergélisol sous les infrastructures de transport *Via Bitume*, 8(3), 26-27. Repéré à <http://www.viabitume.com/include/pdf/via-octobre-2013.pdf>
- Dupigny-Giroux, L.-A. (2000). Impacts and consequences of the ice storm of 1998 for the North American north-east. *Weather*, 55(1), 7-15.
- Fagherazzi, L., Guay, R., et Sassi, T. (2004). *Analysis of Climate Change Impacts on the Ottawa River System* [Rapport préliminaire à la Commission mixte internationale - Lake Ontario-St.Lawrence River Study on discharge regulation]. 72 p.
- Friesinger, S., et Bernatchez, P. (2010). Perceptions of Gulf of St. Lawrence coastal communities confronting environmental change : Hazards and adaptation, Québec, Canada, *Ocean and Coastal Management*, 53(11), 669-678.

- Gagné, R., et Haarman, A. (2011). *Les infrastructures publiques au Québec : Évolution des investissements et impact sur la croissance de la productivité*. Montréal, QC : Centre sur la productivité et la prospérité de HEC Montréal. 34 p. Repéré à http://cpp.hec.ca/cms/assets/documents/recherches_publiees/PP-2010-03_Infrastructures.pdf
- Girard, C., Binette Charbonneau, A., et Payeur, F. (2014). *Le bilan démographique du Québec. Édition 2014*. Québec, QC : Institut de la statistiques du Québec. 162 p. Repéré à <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/bilan2014.pdf>
- Goodwin, P. (2004). *The economic costs of road traffic congestion*. University College London, The Rail Freight Group.
- Gouvernement du Québec. (2005, 7 juin). *Les feux de forêts de Chibougamau* [Communiqué de presse]. Repéré à http://www.premier-ministre.gouv.qc.ca/actualites/communiques/2005/juin/2005-06-07_en.asp
- Gouvernement du Québec. (2012a). *Le Québec en action vert 2020. Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques, phase 1*. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf
- Gouvernement du Québec. (2012b). *Stratégie gouvernementale sur l'adaptation aux changements climatiques*. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/plan_action/stategie-adaptation2013-2020.pdf
- Gouvernement du Québec. (2013, 8 juillet). *Incendies de forêt dans le nord du Québec. La première ministre fait le point sur l'évolution de la situation* [Communiqué de presse]. Repéré à <https://www.premier-ministre.gouv.qc.ca/actualites/communiques/details.asp?idCommunique=2171>
- Gouvernement du Québec, ministère des Transports. (2013). *Portrait québécois du transport des marchandises de la Porte continentale et du Corridor de commerce Ontario-Québec*.
- Gouvernement du Québec. (2015). *Loi sur la sécurité du transport terrestre guidé. Règlement sur la sécurité ferroviaire*.
- Grimwood, B., Cuerrier, A., et Doubleday, N. (2012). Arctic community engagement during the 2007-2008 International Polar Year. *Polar Geography*, 35 (3-4), 189-193.
- Groleau, A., Mailhot, A., et Talbot, G. (2007). Trend analysis of winter rainfall over southern Québec and New Brunswick (Canada). *Atmosphere-Ocean*, 45(3), 153-162. doi : 10.3137/ao.450303.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2013). *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, IPCC AR5 Working Group 1. Repéré à https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf
- Guimond, A., et Boucher, M. (2013). L'adaptation aux changements climatiques des infrastructures de transport du Ministère des Transports au Nunavik : de la recherche à l'application, *Routes et Transports* (revue de l'AQTR), 42(4), 26-29.
- Guimond, A., Grondin, G., et Boucher, M. (2010). Nouvelle approche de planification et de gestion des infrastructures aéroportuaires du ministère des Transports du Québec au Nunavik dans un contexte de changements climatiques : Vers une stratégie d'adaptation. Exposé présenté au Congrès annuel de 2010 de l'Association des transports du Canada à Halifax, Nouvelle-Écosse, 16 p. Repéré à <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2010/docs/r1/anick.pdf>
- Institut de la statistique du Québec (ISQ). (2014). *Territoire*. Repéré à http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/quebec_statistique/ter_ter/ter_ter_4.htm
- Institut de la statistique du Québec (ISQ). (2015). *Population du Québec, 1971-2015*. Repéré à http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/qc_1971-20xx.htm
- James, S. J., & James, C. (2010). The food cold-chain and climate change. *Food Research International*, 43(7), 1944-1956.
- Korkiala-Tanttu, L., et Dawson, A. (2007). Relating full-scale pavement rutting to laboratory permanent deformation testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(1), 19-28.
- Larrivée, C. (2010). *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques*. Guide destiné au milieu municipal Québécois. Montréal, QC : Ouranos, 48 p.
- Lefavre, D. (2005). *Effet des changements climatiques sur les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Québec. Projections pour les années, 2050* [Rapport pour le Comité de concertation Navigation Plan d'Action Saint-Laurent - Phase 4, Institut Maurice-Lamontagne, Direction des Sciences océaniques]. 34 p.
- Lemmen, D.S., Warren, F.J. Lacroix, J., et Bush, E. (Éds.) (2008). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*. Ottawa, ON: Gouvernement du Canada. 448 p.
- Leroueil, S., Locat, J., Sève, G., Picarelli, L., et Faure, R.M. (2001). *Slopes and movements*. Dans K. Rowe (Éd.), *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook* (pp. 397-428). New York, NY : Kluwer Academic Publishers.
- L'Héroult, E., Allard, M., Fortier, D., Carboneau, A.-S., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M.-P., Ducharme, M.-A., Larrivée, K., Grandmont, K., et Lemieux, C. (2013). *Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik* [Rapport scientifique final pour Ouranos, Ressources Naturelles Canada et les Fonds vert]. Québec, QC : Centre d'études nordiques, Université Laval. 84 p.
- Linham, M., et Nicholls, R. J. (2010). *Technologies for climate change adaptation*. Dans X. Zhu (Éd.) *Coastal Erosion and Flooding*. New Delhi, India : Magnum Custom Publishing. 150 p. Repéré à http://www.unep.org/pdf/TNAhandbook_CoastalErosionFlooding.pdf

Locat, J., Cloutier, C., Turmel, D., et Charbonneau, F. (2013). *Développement d'outils de gestion du risque de mouvements de terrain dans le secteur Gascons de la société du Chemin de fer de la Gaspésie* [Rapport final, Rapport LERN-GASCONS-13-01]. Québec, QC : Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN), Département de géologie et de génie géologique, Université Laval. 236 p. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1163242.pdf>

Logan, T., Bilodeau, J.-P., et Henry, K. (2016, sous presse). *Frost action and climate change*.

Mailhot, A.; Panthou, G., Talbot, G. (2014). *Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) aux horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec PHASE II. Rapport de recherche (R1515)*. Québec, QC : INRS, Centre Eau Terre Environnement.

McHugh, R., Bilodeau, F., Rivest, S., Bédard, Y., et Michaud, M. (2006, octobre). Analyse du potentiel d'une application SOLAP pour une gestion efficace de l'érosion des berges en Gaspésie Iles-de-la-Madeleine. Communication présenté à la conférence Géomatique 2006, Montréal, QC.

Mills, B. (2004). Le transports. Dans D. Lemmen et F. Warren (Éds.), *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques: perspective canadienne* (chapitre 8). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada. Repéré à http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/perspective/pdf/report_f.pdf

Ministère du Développement Durable de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). (2014). *Plans d'action sur les changements climatiques. Bilan 2012-2013*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/bilan-2012-2013/bilan-PACC-2012-2013.pdf>

Ministère du Développement Durable de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). (2015). *Bilan des plans d'action sur les changements climatiques*. (MDDELCC).

Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN). (2011). *Plan nord - Infrastructures d'accès au territoire*. Repéré à <ftp://ftp.mern.gouv.qc.ca/Public/BiblioInter/Mono/2011/12/1084145.pdf>.

Ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP). (2012). *L'érosion des berges* [page web]. Repéré à <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/surveillance-territoriale/erosion-berges.html>

Ministère des Transports du Québec (MTQ). (2008). *Transport des marchandises - ferroviaire*. Repéré à <http://transports.atlas.gouv.qc.ca/Marchandises/MarchandisesFerroviaire.asp>

Ministère des Transports du Québec (MTQ). (2011). *Projet de recherche visant à évaluer l'impact des changements climatiques sur les infrastructures maritimes du Nunavik et à déterminer les solutions d'adaptation* [Programme de travail]. Québec, QC : ministère des transports du Québec. 24 p.

Ministère des Transports du Québec (MTQ). (2013a). *Plan stratégique 2013-2015*. Québec, QC : Gouvernement du Québec. 58 p. Repéré à https://www.transports.gouv.qc.ca/tr/ministere/acces-information-renseignements-personnels/documents-reglement-diffusion/Documents/plan-strategique/Plan-Strategique_2013-2015.pdf

Ministère des Transports du Québec (MTQ) (2013b). *Portrait québécois du transport des marchandises de la Porte continentale et du Corridor de commerce Ontario-Québec*. Québec, QC : Direction des communications du ministère des Transports du Québec. 133 p. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1129600.pdf>

Ministère des Transports du Québec. (MTQ). (2015a). *Sécurité ferroviaire*. Repéré à <https://http://www.mtq.gouv.qc.ca/partenairesprivés/transportferroviairemaritimeaerien/Pages/securite-ferroviaire.aspx>

Ministère des Transports du Québec (MTQ). (2015b). *Rapport annuel de gestion 2014-2015*. Québec : Gouvernement du Québec. Repéré à https://www.ceic.gouv.qc.ca/fileadmin/Fichiers_client/centre_documentaire/CEIC-R-3554_02.pdf

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports (MTMDT). (2015, janvier). *Normes sur les ouvrages routiers, Tome III - Ouvrages d'art, chapitre 2*, pp. 3 et 4.

Morris, D. (2011). Aux commandes - la rotation de la Terre a-t-elle un effet sur la durée d'un vol? Air Canada - En Route. Repéré à <http://gofar.aircanada.com/fr/go-far-answers/question/does-the-earth%20%99s-rotation-affect-the-duration-of-flight/>

Morissette, J. (2009). *Étude de la foudre au Québec. Les brèves du service canadien des forêts*. Centre de foresterie des Laurentides (18)

Municipalité des îles-de-la-Madeleine. (2010). *Plan directeur d'intervention des îles-de-la-Madeleine*. 104 p.

National Ice Center. (2008). *IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 4 km and 24 km resolution [1999-2010]*. Updated daily. Boulder, CO : National Snow and Ice Data Center. Repéré à <http://dx.doi.org/10.7265/N52R3PMC>

National Institute for Occupational Safety and Health. (2016). *Heat stress recommendations*. National Institute for Occupational Safety and Health Education and Information Division. Repéré à <https://www.cdc.gov/niosh/topics/heatstress/recommendations.html>

Nickels, S., Furgal, C., Buell, M., et Moquin, H. (2005). *Unikkaaqatigiit—putting the human face on climate change: Perspectives from Inuit in Canada*. Ottawa, ON : Joint publication of the Inuit Tapiriit Kanatami, Nasivvik Centre for Inuit Health and Changing Environments of Laval University and the Ajuungniniq Centre of the National Aboriginal Health Organization. 123 p. Repéré à <https://www.itk.ca/canadian-inuit-perspectives-climate-change-unikkaaqatigiit/>

Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. (2009). *Manuel de foresterie*. Québec, QC : Éditions Multimondes.

Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation : Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec*. Édition 2015. Montréal, QC : Ouranos. 79 p.

Plante, S., Vasseur, L., et Da Cunha, C. (2015). *Adaptation to climate change and participatory action research (PAR) : Lessons from municipalities in Quebec, Canada*. Dans J. Baztan, O. Chouinard, B. Jorgensen, P. Tett, J.-P. Vanderlinden et L. Vasseur (Éds.), *Coastal Zones : 21st Century Challenges* (pp. 319-334). Amsterdam, Netherlands : Elsevier.

Port de Montréal. (2015). *Marché des conteneurs* [Brochure]. Repéré à http://www.port-montreal.com/files/PDF/publications/2015-05_brochure-conteneur-FR.pdf

QGI Consulting. (2009). *Description du système logistique ferroviaire canadien de marchandises* [Rapport préparé pour Revue du service de marchandises ferroviaires]. Edmonton, AB : QGI Consulting, 135 p. Repéré à http://www.qgiconsulting.ca/railway_freight_reports_f.htm

Quintin, C., Bernatchez, P., et Jolivet, Y. (2013). *Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs* [Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec]. Rimouski, QC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, Université du Québec à Rimouski. Volume I : 48p. + Volume II : 170 p.

Réseau des chemins de fer du Québec. (2011). *Mémoire présenté par le Réseau des chemins de fer du Québec à la Commission de l'aménagement du territoire sur l'avant-projet de loi sur l'aménagement durable du territoire et l'urbanisme*. Québec, QC : Réseau des chemins de fer du Québec. 27 p. Repéré à http://www.assnat.qc.ca/Media/Process.aspx?MediaId=ANQ_Vigie_BII.DocumentGenerique_46339&process=Default&token=ZyMoxNwUn8ikQ+TRKYwPCjWrKwg+vlv9rjjj7p3xLGTZDmLVSmJLoqe/vG7/YWzz

Ressler, G. M., Milrad, S. M., Atallah, E. H., et Gyakum, J. R. (2012). *Synoptic-scale analysis of freezing rain events in Montreal, Quebec, Canada*. *Weather and Forecasting*, 27(2), 362-378. doi:10.1175/WAF-D-11-00071.1

Ressources naturelles Canada. (2015). *Problématique de l'érosion littorale pour la Ville de Sept-Île*. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/environnement/ressources/publications/impacts-adaptation/etudes-cas/16308>

Roche-Deluc. (2010). *Prévisions d'achalandage 2010-2025* [Rapport final pour la Société des Traversiers du Québec]. Québec, QC : Roche Itée / Roche-Deluc. 104 p. Repéré à https://www.traversiers.com/fileadmin/fichiers_client/Documentation/previsions_achalandage_2010_2025.pdf

Roy, A., et Boyer, C. (2011, mars). *Impacts des changements environnementaux sur les tributaires du Saint-Laurent*. Présentation au Colloque en agroclimatologie du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Montréal.

Samson, G., Gérin-Lajoie, J., Lévesque, E., Gagnon, F., Gauthier, Y. et Cuerrier, A. (2013). *Les savoirs traditionnels au service des savoirs scientifiques: limites et défis - Le rôle des Inuits aînés du nord québécois*. *Esprit Critique*, 17, 94-109.

Savard, C. (2006). *Imagerie Électrique de la sous-fondation pergélisolée des pistes d'atterrissement au Nunavik*. (Mémoire de maîtrise). Université Laval, Québec. Repéré à <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/23595/23595.html>

Savard, J.-P., Bernatchez, P., Morneau, F., Saucier, F., Gachon, P., Senneville, S., Fraser, C. et Jolivet, Y. (2008). *Étude de la sensibilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatique*. Synthèses des résultats. Montréal, QC : Ouranos. 48 p. Repéré à https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/2016/03/RapportSavard2008_FR.pdf

Savard, J.-P., van Proosdij, D. et O'Carroll, S. (2016). *Perspectives relatives à la région de la côte Est du Canada*. 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. 99-152). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.

Senneville, S., St-Onge-Drouin, S., Dumont, D., Bihani-Poudec, A.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S. et Villeneuve, R. (2014). *Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques* [Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec]. Rimouski, QC : ISMER-UQAR. 384 p. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1147874.pdf>

Slack, B. et Comtois, C. (2016). *Climate change and adaptation strategies of Canadian ports and shipping : the case of the St-Lawrence-Great Lakes system*. Dans A.K.Y. Ng., A. Becker, S. Cahoon, S.-L. Chen, P. Earl, et Z. Yang (Éds.), *Climate change and adaptation planning for ports*. (pp. 45-48). New York, NY : Routledge.

Société de développement économique du Saint-Laurent. (2015). *L'industrie maritime : Un atout essentiel au développement du Québec* [brochure]. Repéré à http://www.st-laurent.org/wp-content/uploads/2015/05/9147_Brochure_IndusMaritime_fr_LR.pdf

Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) (2014). *Rapport annuel 2013*. Québec, QC : SOPFEU. 13 p. Repéré à <http://www.sopfeu.qc.ca/fr/sopfeu/publications/rapports-annuels>

Société des traversiers du Québec. (2014). *Rapport annuel de gestion 2013-2014*. Québec, QC : Gouvernement du Québec. Repéré à https://www.traversiers.com/fileadmin/fichiers_client/Diffusion_info/RAG_STQ_2014.pdf

Soucy, A. (2015). *Le Québec chiffres en mains*. Édition 2015. Québec, QC : Institut de la statistique du Québec. Repéré à http://www.stat.gouv.qc.ca/quebec-chiffre-main/pdf/qcm2015_fr.pdf

St-Amour, J. (2011). *Bas-Saint-Laurent et Gaspésie-Iles-de-la-Madelaine. Le réseau routier du MTQ endommagé*. Inter-Action, 2(1). Repéré à <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/publications-et-statistiques/inter-actionexpress/archives/hiver-printemps-2011/decembre-2010-dans-l'est-du-quebec/reseau-routier-endommage.html?MP=18526-18550>

Statistique Canada (2011). *Le transport maritime au Canada 2011* (no 54-205-X au catalogue). Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/pub/54-205-x/54-205-x2011000-fra.htm>

Statistique Canada (2014) *Trafic des transporteurs aériens aux aéroports canadiens (no 51-203-X au catalogue)*. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/pub/51-203-x/51-203-x2014000-fra.pdf>

Thiam, Papa Masseck. (2014). *Effets des futurs changements climatiques sur la performance à long terme des chaussées souples au Québec* [Mémoire de maîtrise]. Université Laval, QC. Repéré à http://i3c.gci.ulaval.ca/fileadmin/i3c/documents/Ajouts_Octobre_2013/Memoire_Papa_Masseck_Thiam_taille_reduite.pdf

Transports Canada. (2015). *Compendium d'articles sélectionnés - le réseau d'expertise sur la recherche de l'infrastructure du transport du Nord.*

Tremblay, M., Furgal, C., Lafortune, V., Larrivée, C., Savard, J.-P., Barrett, M., Annanack, T., Enish, N., Tookalook, P. et Etidloie, B. (2006). Communities and ice: Linking traditional and scientific knowledge. Dans R. Riewe et J. Oakes (Éds.), *Climate change: Linking traditional and scientific knowledge* (p. 123-138). Winnipeg, MB : University of Manitoba Aboriginal Issues Press.

VIA Rail Canada (2014) *Rapport annuel 2014*. Repéré à https://www.viarail.ca/sites/all/files/media/pdfs/About_VIA/our-company/annual-reports/2014/VIA%20Rail_2014%20Annual%20Report_FR.pdf

Webster, A., Gagnon-Lebrun, F., Desjarlais, C., Nolet, J., Sauvé, C., et Uhde, S. (2008). *L'évaluation des avantages et des coûts de l'adaptation aux changements climatiques* [Rapport d'information générale rédigé sous la direction d'Ouranos avec l'aide d'Éco-Ressources consultants]. Repéré à http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/observatoire_municipal/etudes donnees statistiques/evaluation_avantages_couts_adaptation.pdf



8 · Canada Atlantique

CHAPITRE 8 :

CANADA ATLANTIQUE

AUTEURS PRINCIPAUX :

ERIC RAPAPORT¹
SIDNEY STARKMAN²
WILL TOWNS³

COLLABORATEURS :

NORM CATTO (UNIVERSITÉ MÉMORIAL DE TERRE-NEUVE),
SABINE DIETZ (GOUVERNEMENT DU NOUVEAU-BRUNSWICK),
KEN FORREST (VILLE DE FREDERICTON),
CHRIS HALL (PORT DE SAINT JOHN),
JEFF HOYT (GOUVERNEMENT DU NOUVEAU-BRUNSWICK),
DON LEMMEN (RESSOURCES NATURELLES CANADA),
SHAWN MACDONALD (GOUVERNEMENT DE LA NOUVELLE-ÉCOSSE),
TYLER O'ROURKE (PORT DE SAINT JOHN),
BOB PETT (SERVICE INTERNES, NOUVELLE-ÉCOSSE),
YURI YEVDOKIMOV (UNIVERSITÉ DU NOUVEAU-BRUNSWICK)

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Rapaport, E., Starkman, S., et Towns, W. (2017). Canada Atlantique. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 240-287). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ École de planification, Dalhousie University, Halifax (N.-É)

² École de planification, Dalhousie University, Halifax (N.-É)

³ École de planification, Université de Waterloo, Waterloo (ON) et Transports Canada, Ottawa (ON)

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions.....	242
1.0 Introduction	243
1.1 Caractéristiques environnementales	243
1.2 Caractéristiques démographiques	243
1.3 Caractéristiques économiques	244
2.0 Profil du climat régional.....	245
2.1 Tendances climatiques observées	245
2.2 Projections climatiques	246
3.0 Système de transport au Canada atlantique	248
3.1 Transports routier et ferroviaire	249
3.2 Transport maritime	251
3.3 Transport aérien	252
4.0 Transport routier : Impacts et adaptations	253
4.1 Impacts constatés dans le passé et risques futurs	253
4.2 Pratiques d'adaptation	256
5.0 Transport ferroviaire : Impacts et adaptations.....	260
5.1 Impacts constatés dans le passé et risques futurs	260
5.2 Pratiques d'adaptation	263
6.0 Transport maritime.....	265
6.1 Impacts constatés dans le passé et risques futurs	265
6.2 Pratiques d'adaptation	267
7.0 Transport aérien.....	270
7.1 Impacts constatés dans le passé et risques futurs	270
7.2 Pratiques d'adaptation	271
8.0 Évaluations des risques et analyses coûts-avantages pour le transport multimodal	272
8.1 Évaluations des risques	272
8.2 Analyse coûts-avantages	272
9.0 Lacunes et conclusions	276
10.0 Annexe	277
Références	283

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- **Les événements météorologiques extrêmes et les ondes de tempête sont les risques climatiques les plus préoccupants pour les exploitants du secteur du transport, les gouvernements provinciaux et les municipalités du Canada atlantique.** Les ouragans, les vents violents, les précipitations abondantes et les chutes de neige extrêmes ont entraîné des dommages coûteux et des perturbations du transport dans les ports maritimes, retardé des vols et emporté des routes et des voies ferrées. Puisque la fréquence et l'intensité des tempêtes augmenteront, ces impacts continueront probablement d'être importants.
- **Alors que la plupart des mesures visant à améliorer la résilience climatique des systèmes de transport ont été prises en réponse aux données historiques sur les conditions météorologiques extrêmes, les risques climatiques projetés (tels que la hausse du niveau de la mer) font l'objet de plus en plus de planification et d'investissements.** Les initiatives et les partenariats coordonnés indiquent que les provinces de l'Atlantique participent activement à des activités de planification d'adaptation. Les évaluations des risques et les analyses coûts-avantages régionales, dont la portée comprend les systèmes de transport, aideront à orienter les décisions qui seront prises à l'avenir.
- **Les praticiens du transport tiennent compte des changements climatiques projetés dans la planification et l'exploitation de certaines routes, ponts, chemins de fer et ports maritimes dans les provinces du Canada atlantique, mais les mesures visant les aéroports sont toutefois moins bien documentées.** Bien que cette situation soit le reflet de la prédominance du transport routier et maritime dans la région, il existe des lacunes importantes dans la recherche sur les stratégies d'adaptation portant sur tous les modes de transport.
- **Un certain nombre de stratégies sont utilisées pour améliorer la résilience des infrastructures de transport aux risques d'inondation en particulier.** Au nombre de ces stratégies, on trouve la construction de barrières physiques (murs de protection, brise-lames, digues), l'amélioration de la gestion des eaux pluviales (mise à jour des débits conceptuels, agrandissement des ponceaux) et le déplacement ou l'élévation de l'infrastructure.
- **Les technologies de surveillance des conditions climatiques et météorologiques au niveau régional aident les exploitants du transport à recenser les risques climatiques dans le Canada atlantique et à s'y adapter.** Par exemple, les bouées de surveillance SmartAtlantic servent à se préparer en cas d'événements météorologiques extrêmes et à mieux comprendre les changements climatiques dans l'océan, et l'outil CLIVE (Coastal Impact Visualisation Environnement) permet aux utilisateurs de visualiser les changements dans les lignes côtières sur l'Île-du-Prince-Édouard. Ces technologies aident à l'évaluation des risques et permettent aux praticiens de communiquer l'ampleur des impacts à court et à long terme aux décideurs.

1.0 INTRODUCTION

Le Canada atlantique est composé des provinces du Nouveau-Brunswick, de la Nouvelle-Écosse, de l'Île-du-Prince-Édouard et de Terre-Neuve-et-Labrador. Bien que chaque province atlantique possède ses propres caractéristiques géographiques et culturelles, elles partagent de nombreuses vulnérabilités climatiques liées aux systèmes de transport en raison de leur proximité commune à l'océan Atlantique et des côtes qu'elles partagent (plus de 40 000 km) (Environnement Canada, 2012). Ces vulnérabilités comprennent les risques associés aux événements météorologiques extrêmes (par exemple les inondations, les tempêtes saisonnières), ainsi que les changements climatiques graduels à long terme (par exemple, la hausse du niveau de la mer, les changements dans les configurations des températures et des précipitations). Les gouvernements et le secteur privé ont reconnu le besoin de mettre en œuvre des mesures d'adaptation reconnues pour réduire les pertes, éviter les coûts futurs et tirer parti des possibilités éventuelles.

Le présent chapitre examine les risques et possibilités pour le secteur des transports dans le Canada atlantique ainsi que les pratiques visant à accroître la résilience au changement climatique. Le chapitre aborde les quatre principaux modes de transport (routier, ferroviaire, maritime et aérien).

La littérature examinant les impacts du climat sur les systèmes de transport au Canada atlantique est assez limitée. Par conséquent, le présent chapitre s'appuie en grande partie sur d'autres sources d'information, y compris sur des entrevues réalisées avec des professionnels du transport. Cette recherche vient compléter d'autres évaluations des impacts climatiques et des mesures d'adaptation connexes au Canada atlantique dans son ensemble (Vasseur et Catto, 2008) et sur la côte atlantique plus précisément (Savard et coll., 2016).

1.1 CARACTÉRISTIQUES ENVIRONNEMENTALES

Le Canada atlantique présente une diversité de paysages terrestres, y compris cinq écozones terrestres distinctes (Environnement Canada et Agriculture et Agroalimentaire Canada, 1999). Les topographies proéminentes incluent des montagnes escarpées (p. ex., les monts Torngat, au Labrador), des vallées fertiles (p. ex., la vallée de la rivière Saint-Jean, au Nouveau-Brunswick et la vallée de l'Annapolis, en Nouvelle-Écosse), et de longues côtes. Les régions intérieures du Nouveau-Brunswick, de la Nouvelle-Écosse et de Terre-Neuve-et-Labrador sont dominées par de hautes terres ondulées et accidentées beaucoup moins peuplées que les côtes.

Les régions climatiques varient de la toundra continentale fraîche et humide à la toundra continentale soumise à l'influence du Gulf Stream chaud dans le Sud auquel se substitue le courant froid du Labrador dans le Nord. Les conditions saisonnières sont le reflet des influences tropicales et polaires, et continentales et maritimes qui marquent la région. Les côtes de l'Atlantique sont frappées par toute l'étendue des systèmes de tempêtes tropicales et extratropicales fréquemment associées à de forts vents, à des précipitations abondantes et à des ondes de tempête.

1.2 CARACTÉRISTIQUES DÉMOGRAPHIQUES

Le Canada atlantique abrite environ 2,4 millions de personnes. La région a connu une croissance démographique modeste de 2006 à 2011 (une moyenne provinciale de 2,2 %), soit un taux inférieur à la moyenne nationale (5,9 %) (Statistique Canada, 2011). Les déplacements de population dans la région témoignent d'une migration importante des zones rurales vers les centres urbains, alors que croissance démographique dans les grandes villes est beaucoup plus importante (tableau 1).

Tableau 1 : Population et changements démographiques dans les provinces de l'Atlantique et les régions métropolitaines de recensement (RMR). (Source : Statistique Canada, 2011)

Endroit	Aire (km ²)	Population en 2011	Population en 2006	Croissance démographique 2006-2011
Nouveau-Brunswick	73 440	751 171	729 997	2,9 %
Terre-Neuve-et-Labrador	405 720	514 536	505 469	1,8 %
Nouvelle-Écosse	55 490	921 727	913 462	0,9 %
Île-du-Prince-Édouard	5 590	140 204	135 851	3,2 %
RMR d'Halifax	5 490,28	390 328	372 858	4,7 %
RMR de St. John's	804,65	196 966	181 113	8,8 %
RMR de Moncton	2 406,31	138 644	126 424	9,7 %
RMR de Fredericton	4 886,40	94 268	86 226	9,3 %
RMR de Saint John	3 362,95	127 761	122 389	4,4 %
RMR de Charlottetown	798,54	64 487	59 325	8,7 %

1.3 CARACTÉRISTIQUES ÉCONOMIQUES

Flux des échanges commerciaux

La majorité du commerce au Canada atlantique se fait avec des partenaires à l'extérieur de la région – principalement avec les États-Unis et les autres provinces, bien que les marchés internationaux soient de plus en plus importants.

Près de la moitié de tout le trafic des marchandises en provenance du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse est destiné à d'autres provinces, alors que moins de 25 % du commerce est intraprovincial (Gauthier, 2014). Le modèle de trafic des marchandises de l'Île-du-Prince-Édouard est semblable alors que la majorité des exportations sont distribuées à travers le Canada. Terre-Neuve-et-Labrador est plus étroitement lié aux chaînes d'approvisionnement mondiales que les autres provinces de l'Atlantique, alors qu'environ un tiers du trafic des marchandises est destiné aux États-Unis, et un tiers vers le reste du monde (Lambert-Racine, 2013).

La région de l'Atlantique étant le point d'accès en Amérique du Nord le plus près de l'Europe, les principaux ports du Nouveau-Brunswick, de la Nouvelle-Écosse et de Terre-Neuve-et-Labrador jouent un rôle important (Porte canadienne de l'Atlantique, 2010). L'économie régionale est positionnée pour poursuivre sa croissance dans le commerce mondial, y compris pour une augmentation croissante des connexions avec les marchés émergents asiatiques à travers le canal de Suez. Ces tendances sont déjà en cours – par exemple, la valeur des exportations en provenance de Terre-Neuve-et-Labrador vers la Chine, le Royaume-Uni, les Pays-Bas et la France a augmenté de plus de 400 % de 2010 à 2013 (Newfoundland and Labrador Statistics Agency, 2015). Avec la croissance de l'activité commerciale le long de nombreuses routes régionales et externes, les exploitants du transport s'emploient à fournir la capacité pour répondre à la demande.

Parmi les principales exportations de la région de l'Atlantique, on trouve le pétrole brut et les produits énergétiques raffinés, les poissons, les crustacés, les minéraux, le bois d'œuvre et les pâtes et papiers, les pommes de terre et d'autres légumes. Les principales importations comprennent un grand nombre de ces mêmes produits de même que la machinerie et les pièces mécaniques (Agence de promotion économique du Canada atlantique, 2012).

2.0 PROFIL DU CLIMAT RÉGIONAL

2.1 TENDANCES CLIMATIQUES OBSERVÉES

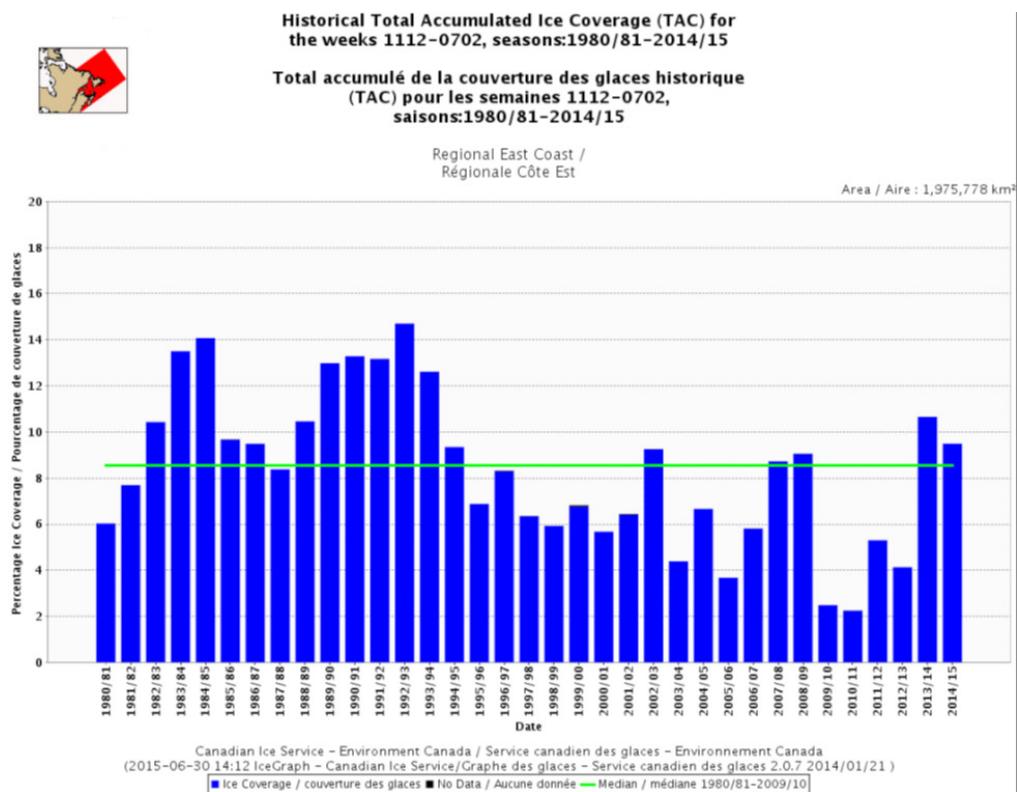
L'historique climatique du Canada atlantique se caractérise par une grande variabilité d'une année à l'autre, ainsi que par une variabilité dans les tendances à long terme (sur plusieurs décennies) relatives à plusieurs paramètres climatiques clés. Durant la période de 1948 à 2014, la température moyenne annuelle dans la région climatique de l'Atlantique⁴ a augmenté de 0,7 °C à l'instar de la moyenne mondiale pour la même période, ce qui constitue le réchauffement le moins important parmi toutes les régions du Canada (Environnement Canada, 2015a). Par ailleurs, une augmentation des températures de surface et de l'acidité des océans a été observée (Loder et coll., 2013). Aucune tendance claire n'a été relevée pour les précipitations annuelles moyennes dans la région, bien qu'une augmentation des précipitations ait été observée durant l'été et l'automne (Mekis et Vincent, 2011).

Les changements de configuration des conditions météorologiques extrêmes comme les précipitations abondantes et les tempêtes saisonnières touchent le système de transport du Canada atlantique plus particulièrement. Ces événements augmentent les risques d'inondation (à l'intérieur et sur les côtes) et accentuent les problèmes dans les zones sujettes à l'érosion. En raison de la rareté des événements météorologiques extrêmes, il est difficile de relever des tendances dans les données historiques, en particulier à l'échelle régionale. Par exemple, de 1950 à 2010, on observe une augmentation statistiquement significative des occurrences de précipitations abondantes à certains endroits du Canada atlantique, mais une diminution dans d'autres régions (Bush et coll., 2014). Bien que les données historiques n'aient pas recensé les changements dans la direction et la vitesse moyennes des vents, l'analyse de la densité des centres de tempêtes intenses pour la période de 1961 à 2000 indique que le Canada atlantique l'une des régions subissant le plus de tempêtes en Amérique du Nord (Savard et coll., 2016). Bien que la fréquence des ouragans dans l'Atlantique Nord ne montre aucun changement significatif à long terme (United States Environmental Protection Agency, 2015), le cinquième rapport d'évaluation des changements climatiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2013) et l'United States Global Change Research Program (2014) notent que l'intensité des ouragans dans la région de l'Atlantique s'est accrue depuis les années 1980.

Les changements dans les champs de glace de mer et dans les niveaux de la mer ont une incidence sur l'infrastructure de transport maritime et côtier. La couverture des glaces de mer a diminué de manière considérable au cours des dernières décennies bien que la variabilité interannuelle reste élevée (figure 1). En raison de la réduction des champs de glace de mer réduite, les côtes sont plus vulnérables à l'érosion par les vagues lors de tempêtes hivernales. Les tendances du niveau relatif de la mer pour la plus grande partie du Canada atlantique, à l'exclusion du Labrador, montrent une hausse lente et régulière du niveau de la mer. Cette augmentation est principalement due à l'ajustement isostatique glaciaire dans les provinces de l'Atlantique, à savoir un lent mouvement vertical de la terre ou à un « relèvement » de la terre qui était enfoncée de centaines de mètres sous les nappes de glace au cours de la plus récente ère glaciaire (James et coll., 2014). La hausse du niveau de la mer a une incidence sur les vagues et les ondes de tempête frappant les sites côtiers plus élevés qui n'étaient pas à risque auparavant (Atkinson et coll., 2016).

⁴ Y compris le Nouveau-Brunswick, la Nouvelle-Écosse, l'Île-du-Prince-Édouard et l'Île de Terre-Neuve à l'exclusion du Labrador.

Figure 1 : Couverture totale historique des glaces accumulées pour les semaines du 11 décembre au 7 février de 1980 à 2015 au Canada atlantique et dans l'estuaire du Saint-Laurent (voir la carte dans l'encadré). (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



2.2 PROJECTIONS CLIMATIQUES

Les changements climatiques projetés au Canada atlantique pour le 21^e siècle comprennent le réchauffement des températures de l'air et de l'eau ainsi que des précipitations accrues. Selon une récente analyse réalisée dans le cadre d'un projet global de comparaison des modèles climatiques⁵, une augmentation de la température annuelle moyenne de 1 °C à court terme (2016-2035) à environ 3 °C d'ici la fin du siècle devrait avoir lieu. Le réchauffement le plus important devrait se produire en hiver. Les précipitations annuelles moyennes devraient augmenter d'environ 3 % à court terme et de près de 10 % d'ici la fin du siècle dans la région, les plus grandes augmentations se produiront en hiver et au printemps. Les chutes de neige pourraient représenter une proportion réduite des précipitations totales; la durée saisonnière de la couverture de neige devrait raccourcir (Swanson et coll., 2004); et les épisodes de pluie verglaçante devrait augmenter pendant l'hiver (Cheng et coll., 2011). Les tableaux A1 à A4 (dans l'annexe au présent chapitre) présentent des projections des températures et des précipitations par provinces de la région de l'Atlantique jusqu'en 2100 selon trois horizons temporels. Les périodes saisonnières comprennent 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 « Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 » (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.

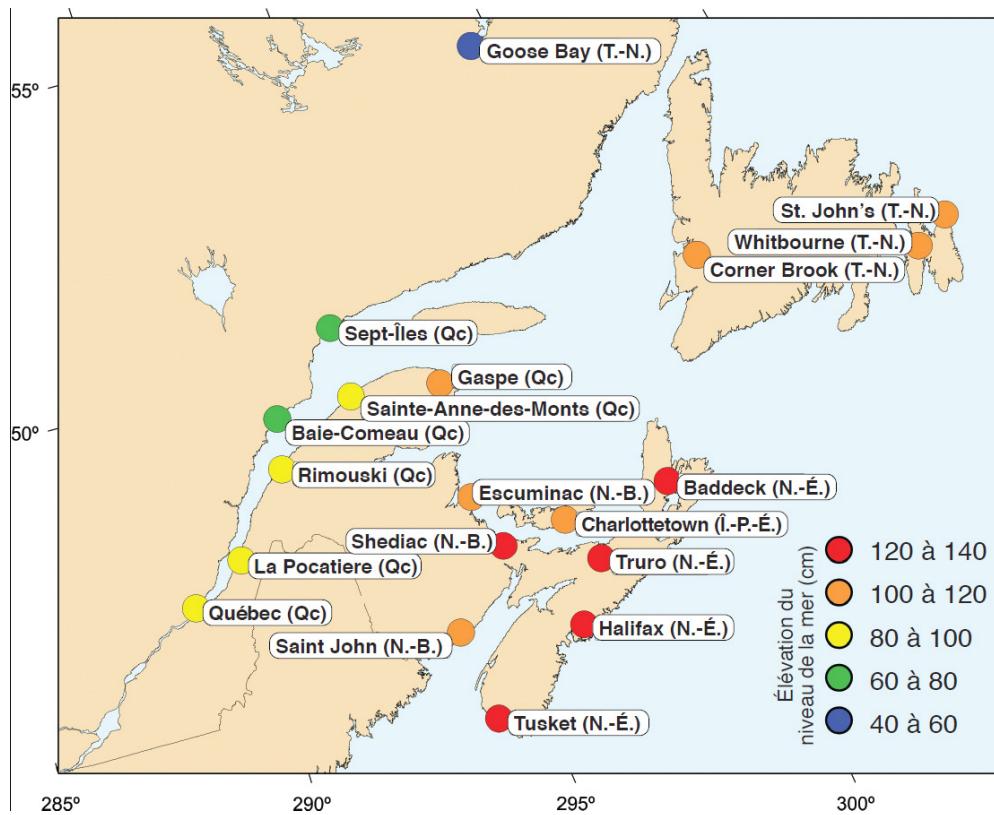
⁵ CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (Taylor et coll., 2012).

Selon les projections globales, une augmentation de la fréquence des événements de chaleur extrême de même qu'une diminution de la fréquence des événements de froid extrême devraient être observées au Canada atlantique (Williams et Daigle, 2011). De plus, les événements de précipitation extrême sont susceptibles de devenir plus fréquents (Swansburg et coll., 2004). Bien que des changements importants dans les vitesses des vents ne soient pas prévus, un déplacement vers le Nord des trajectoires de tempêtes devrait se produire au cours du siècle actuel causant une fréquence accrue des tempêtes au Canada atlantique (Loder et coll., 2013).

La glace de mer continuera à diminuer en étendue, en épaisseur, en concentration et en durée, les modèles prévoyant qu'elle sera presque complètement absente du golfe du Saint-Laurent d'ici 2100 (Senneville et coll., 2013).

Dans les régions du Canada atlantique qui connaissent actuellement une hausse du niveau de la mer, le taux de changement s'accélérera tout au long du siècle actuel. Dans les régions comme Nain, au Labrador, où le niveau de la mer est actuellement en baisse en raison du relèvement isostatique glaciaire, le niveau devrait soit continuer à baisser à un rythme plus lent ou pourrait commencer à augmenter en fonction de l'ampleur des changements dans le niveau moyen de la mer (James et coll., 2014). Selon les projections résultant d'un scénario de croissance élevée d'émissions pour le Canada atlantique, le niveau de la mer pourrait augmenter de 100 cm à certains endroits d'ici 2100 (figure 2) et des hausses plus importantes ne sont pas exclues (Savard et coll., 2016; Atkinson et coll., 2016). Le niveau moyen mondial de la mer va continuer à augmenter au cours des siècles après 2100. L'ampleur des changements futurs variera en fonction des succès des efforts globaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2013).

Figure 2 : Projections de la hausse relative du niveau de la mer pour l'année 2100 basées sur les valeurs médianes du scénario de croissance élevée des émissions (profil 8.5, d'après James et coll., 2014.). Voir Atkinson et coll. (2016) pour obtenir des renseignements supplémentaires sur les projections relatives au niveau de la mer, et Savard et coll. (2016) pour obtenir des détails supplémentaires sur les sites du Canada atlantique. (Source : Ressources naturelles Canada)



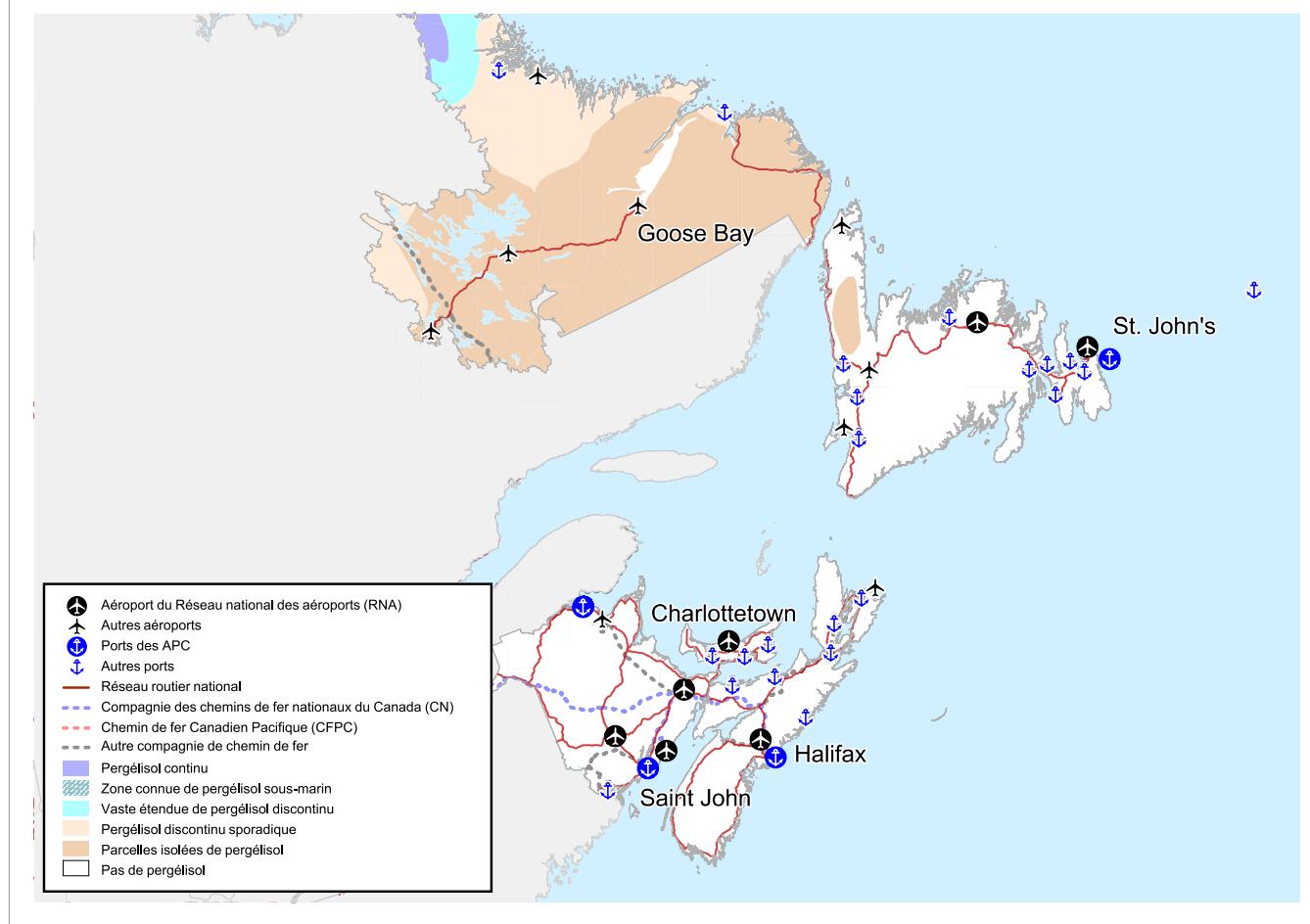
Une conséquence importante de la hausse du niveau de la mer est les niveaux d'eau extrêmes associés à la montée de vagues (la hauteur au-dessus du niveau de l'eau de la mer calme) et aux ondes de tempête (la différence entre le niveau d'eau observé et la marée astronomique projetée, résultant des variations de la pression atmosphérique et du vent). La hausse du niveau de la mer entraînera à la fois plus d'inondations sévères dues aux ondes de tempête et une fréquence accrue des événements qui contribuent aux inondations côtières et à l'érosion. Par exemple, l'analyse du port d'Halifax indique qu'une hausse du niveau de la mer de 40 cm d'ici 2050 provoquera des changements profonds dans les niveaux d'eau extrêmes – d'ici le milieu du siècle, les ondes de tempête, dont la période de récurrence est actuellement d'une fois tous les 50 ans, sont susceptibles de se produire (en moyenne) plus d'une fois tous les cinq ans (Forbes et coll., 2009).

3.0 SYSTÈME DE TRANSPORT AU CANADA ATLANTIQUE

Les sections qui suivent traitent des actifs physiques et des opérations pour chaque mode de transport au Canada atlantique, accompagnés d'une synthèse dans le tableau 2 et d'une illustration des principaux réseaux à la figure 3.

Tableau 2 : Actifs de transport dans chaque province de l'Atlantique. (Source : Association des chemins de fer du Canada, 2015; Ministère des Transports de l'Infrastructure du Nouveau-Brunswick, 2014; Newfoundland and Labrador Department of Transportation and Works, 2014; Nova Scotia Department of Transportation and Infrastructure Renewal, 2015a; Prince Edward Island Department of Transportation and Infrastructure Renewal, 2012; Province of Nova Scotia, 2009a; Transports Canada, 2014)

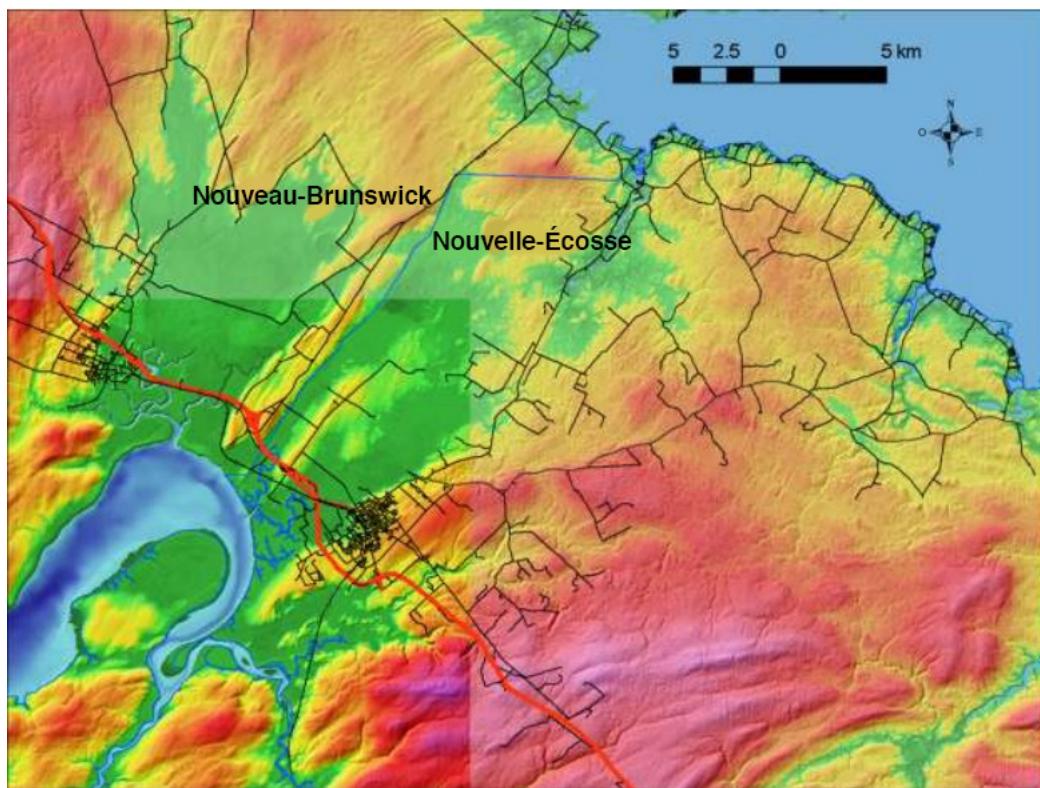
Actifs de transport	Nouveau-Brunswick	Terre-Neuve-et-Labrador	Nouvelle-Écosse	Île-du-Prince-Édouard
Autoroutes et routes provinciales (km)	18 785	9 759	23 000	3 849 pavées 1 521 non pavées
Ponts	3 212	1 327	4 100	257
Administrations portuaires canadiennes	Saint John et Belledune	St. John's	Halifax	s.o.
			7 provinciaux	
Ports de terminal et de transbordeurs	10 transbordeurs 18 ports de terminal	18 transbordeurs 40 ports de terminal	2 municipaux 5 privés	2 transbordeurs 2 ports de terminal
			39 ports de terminal	
Voies ferrées (km)	1 159	261	674	Pas de chemins de fer
Aéroports	3 aéroports RNA (Fredericton, Moncton, Saint John) 3 régionaux et locaux (Charlo, Chatham, St. Leonard)	2 aéroports RNA (Gander, St. John's) 6 régionaux et locaux (Churchill Falls, Deer Lake, Goose Bay, Stephenville, St. Anthony, Wabush)	1 aéroport RNA (Halifax) 2 régionaux et locaux (Sydney, Yarmouth)	1 aéroport RNA (Charlottetown)

Figure 3 : Principaux réseaux de transport au Canada atlantique.

3.1 TRANSPORTS ROUTIER ET FERROVIAIRE

La vaste infrastructure de transport de surface du Canada atlantique (routier et ferroviaire) témoigne de son importance régionale pour le déplacement des personnes et des marchandises. Alors que toutes les provinces de l'Atlantique dépendent des routes, le transport ferroviaire joue un rôle économique très important en Nouvelle-Écosse et au Nouveau-Brunswick en raison du réseau ferroviaire du CN qui traverse l'isthme de Chignecto. Environ 19,5 milliards de dollars de marchandises commerciales transitent par l'isthme par train, ce qui représente environ 45 % des marchandises qui circulent dans le Canada atlantique annuellement (Webster et coll, 2012; Marlin, 2013). Le corridor est le seul passage terrestre entre la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick et il est très vulnérable aux ondes de tempête et à la hausse du niveau de la mer (Figure 4, voir l'étude de cas 5). Un système de digues, qui comporte un remblai ferroviaire à certains emplacements, construit à l'origine par les Acadiens pour créer des terres agricoles, protège actuellement les terres, le chemin de fer, la route et d'autres infrastructures dans l'isthme (Webster et coll, 2012).

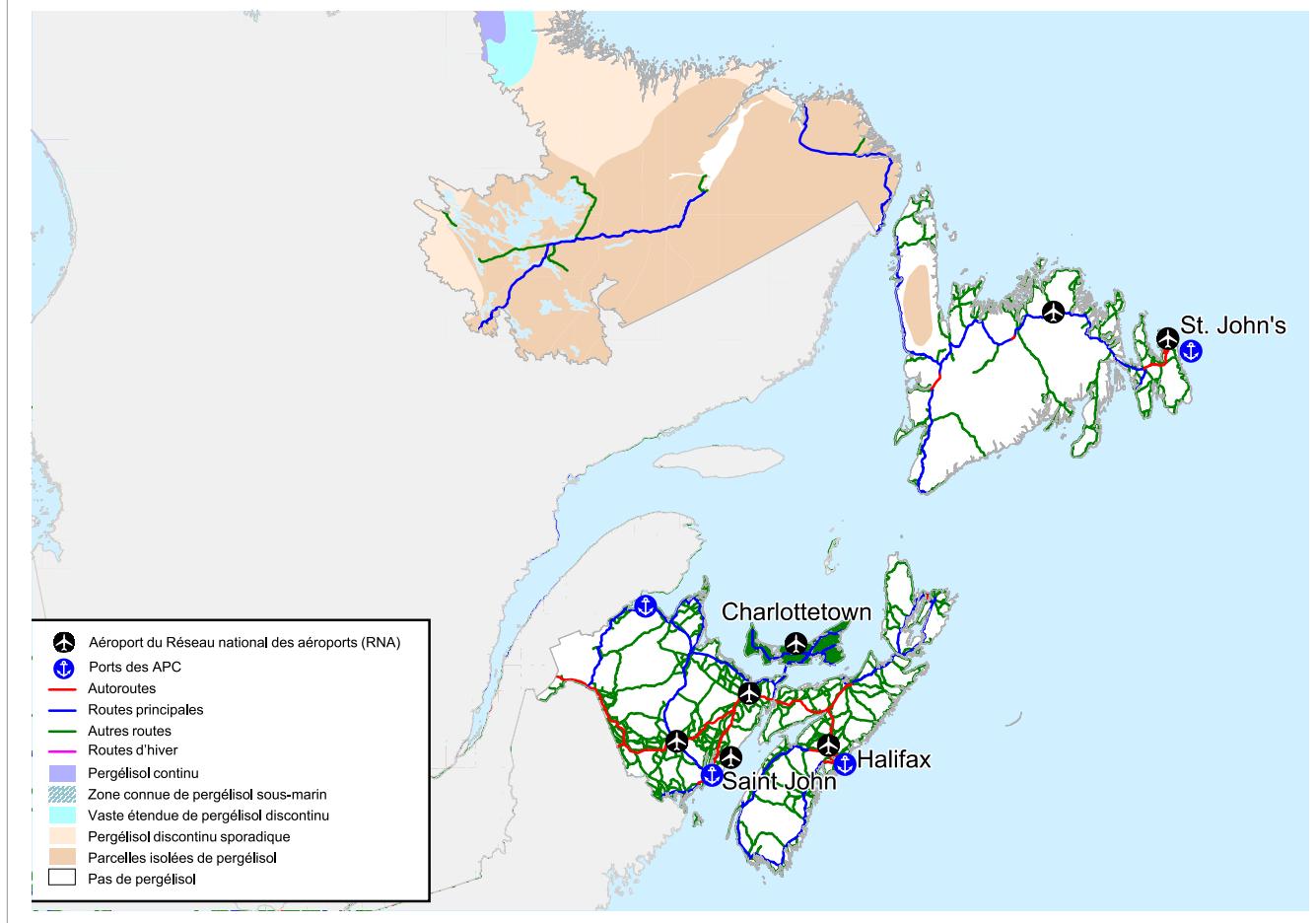
Figure 4 : Modèle numérique du relief ombré en couleur de l'isthme de Chignecto à la frontière du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse. Le vert représente les zones de faible élévation en particulier. L'isthme sépare la baie de Fundy au sud-ouest du détroit de Northumberland (golfe du Saint-Laurent) au nord-est. (Source : Groupe de recherche de la géométrie appliquée, Collège communautaire de la Nouvelle-Écosse)



Une deuxième importante liaison ferroviaire au Canada atlantique se trouve au Labrador qui accueille un court segment de rail qui se connecte au réseau du Chemin de fer Quebec North Shore and Labrador (QNS & L). L'expédition de minerai de fer du Labrador via le réseau de QNS & L représente la composante la plus importante du tonnage ferroviaire commercial total en provenance du Canada atlantique (Stassinu-Stantec Limited Partnership, 2011). L'Île-du-Prince-Édouard et l'Île de Terre-Neuve n'ont pas de lignes de chemin de fer opérationnelles, toutefois, quelques réseaux indépendants de taille plus modeste existent au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse.

De plus, de grands volumes de marchandises sont transportés par camion au Canada atlantique. Bien que la majorité de ces marchandises soient destinées à d'autres provinces canadiennes, une partie importante est expédiée vers les États-Unis (en traversant principalement à Woodstock et à St. Stephen (Transports Canada, 2014). Les principales autoroutes et routes de liaison relient également les villes, les villages et les provinces du Canada atlantique (voir la figure 5).

St. John's, à Terre-Neuve, est le point le plus à l'est de la Transcanadienne et est reliée au Canada continental par traversier, tandis qu'une route dans le nord du Québec relie le Labrador au reste du pays. L'Île-du-Prince-Édouard est liée au Nouveau-Brunswick par le pont de la Confédération. Achevé en 1997, le tronçon de 12,9 km représente le plus long pont du monde enjambant de l'eau couverte de glace saisonnière (Strait Crossing Bridge Ltd., 2015) et facilite le transport des personnes et des marchandises entre le continent et l'île à longueur d'année. La Transcanadienne relie le Nouveau-Brunswick au Québec et aux régions à l'ouest par le point à l'extrême nord-ouest de la province et à la Nouvelle-Écosse en traversant l'isthme de Chignecto. Environ 500 millions de dollars de marchandises transitent par l'isthme par camion chaque année (Webster et coll, 2012; Marlin, 2013).

Figure 5 : Réseau routier du Canada atlantique.

3.2 TRANSPORT MARITIME

Chaque province de l'Atlantique est dotée d'une infrastructure de transport maritime spécialisée. Le port d'Halifax est le plus important centre maritime en Nouvelle-Écosse, et le troisième port à conteneurs au Canada. Son havre profond libre de glace fournit des services à la fois pour le transport maritime international et sur courtes distances, et sa contribution à l'économie de l'Atlantique en 2013 s'élève à 1,6 milliard de dollars (Port of Halifax, 2015; Cirtwill et coll., 2001). Le Port dispose également d'une importante infrastructure intermodale permettant le transfert des marchandises vers les wagons et les camions à destination du Nord-Est et du Midwest des États-Unis, du Québec et de l'Ontario (Porte canadienne de l'Atlantique, 2010). Des travaux d'expansion de 35 millions de dollars ont récemment été réalisés dans le Port afin d'accueillir des porte-conteneurs postpanamax⁶ plus larges (Power, 2012).

Les ports de Saint John, au Nouveau-Brunswick, et de la baie de Placentia, à Terre-Neuve, ont également accueilli des volumes importants de marchandises et géré plus de pétrole brut et de produits pétroliers raffinés que le port d'Halifax (Porte canadienne de l'Atlantique, 2010). Ces produits constituent la majorité du fret maritime du Canada atlantique, dont une grande partie en provenance de Terre-Neuve. Les transbordeurs jouent également un rôle important pour le transport

⁶ On entend par postpanamax les navires qui ne font pas partie de la catégorie de navires dont les dimensions permettent d'emprunter le canal de Panama les exploitants du canal de Panama construisent actuellement un nouveau système d'écluses conçu pour prendre en charge les navires postpanamax.

de marchandises (et des personnes). Marine Atlantique, une société d'État offrant des services de transbordeur, déplace environ 50 % de toutes les marchandises transportées entre la partie continentale du Canada et Terre-Neuve via les liaisons entre Port aux Basques ou Argentia et North Sydney (Marine Atlantique, 2015).

Le tourisme maritime est un autre contributeur important à l'économie de la région, fonctionnant au maximum de sa capacité en été. L'industrie des croisières est en pleine croissance au Canada atlantique, ce qui représente 31 % du total du transport maritime de passagers du Canada en 2012 (Cruise Lines International Association, 2013; Transports Canada, 2014). La Charlottetown Harbour Authority indique une augmentation du trafic de navires de croisière d'environ 400 % entre 2007 et 2015 (Corryn Morrissey, Administration portuaire de Charlottetown, communication personnelle, 2016). Les routes des transbordeurs soutiennent le tourisme et assurent la connectivité régionale. À Terre-Neuve-et-Labrador, un certain nombre de routes de transbordeurs de ferry assurent la liaison entre le Labrador et l'île de Terre-Neuve, y compris St. Barbe-Blanc Sablon et Goose Bay-Cartwright-Lewisporte. Les transbordeurs relient North Sydney, en Nouvelle-Écosse et Terre-Neuve, tandis que la Nouvelle-Écosse et l'Île-du-Prince-Édouard sont reliées par le transbordeur Caribou-Wood Islands. Parmi les autres routes importantes, on trouve la route Nouvelle-Écosse Nouveau-Brunswick via Digby à Saint John, et la route entre l'Île-du-Prince-Édouard et les îles de la Madeleine, au Québec (de Souris à Cap-aux-Meules) (Traversier CTMA, 2015).

3.3 TRANSPORT AÉRIEN

Les aéroports du Canada atlantique accueillent plus de 7,8 millions de personnes chaque année, un chiffre qui correspond à plus de trois fois la taille de la population de la région (Association des aéroports du Canada Atlantique, 2012). Le système aéroportuaire comprend sept réseaux nationaux d'aéroports (RNA)⁷ (ci-dessous) en plus de nombreux petits aéroports communautaires :

- L'aéroport international de Fredericton, l'aéroport international du Grand Moncton, et l'aéroport de Saint John (Nouveau-Brunswick);
- L'aéroport international de Gander et l'aéroport International de St. John (Terre-Neuve-et-Labrador);
- L'aéroport international Stanfield d'Halifax (Nouvelle-Écosse);
- L'aéroport de Charlottetown (Île-du-Prince-Édouard).

Moins de marchandises sont transportées par transport aérien que par les autres modes dans la région de l'Atlantique – il s'agit habituellement seulement de marchandises périssables ou de produits spécialisés. Cependant, les volumes de marchandises demeurent importants, alors que plus de 60 000 tonnes métriques sont transportées annuellement (Association des aéroports du Canada Atlantique, 2012).

⁷ La désignation RNA est attribuée aux aéroports situés dans les capitales provinciales ainsi qu'aux autres aéroports dont le nombre de passagers transportés dépasse 200 000 (Transport Canada, 2010).

4.0 TRANSPORT ROUTIER : IMPACTS ET ADAPTATIONS

4.1 IMPACTS CONSTATÉS DANS LE PASSÉ ET RISQUES FUTURS

Un certain nombre de variables climatiques, y compris les événements météorologiques extrêmes, les ondes de tempête et les cycles de gel et de dégel, ont une incidence sur l'infrastructure routière et sur les activités au Canada atlantique.

Précipitations et conditions météorologiques extrêmes

Les impacts les plus graves à l'échelle régionale sont liés aux tempêtes tropicales ou post-tropicales et sont liés aux précipitations abondantes, aux vents violents et aux ondes de tempête. Par exemple, l'ouragan Juan (septembre 2003), qui a causé 100 millions de dollars de dommages directs à l'infrastructure d'Halifax à elle seule, y compris les routes et les autoroutes (Bowyer, 2003a); les ouragans Earl et Igor, survenus à une semaine d'intervalle en septembre 2010 ont causé la fermeture de routes partout au Canada atlantique. À Terre-Neuve-et-Labrador, environ 150 collectivités ont été isolées par les communautés de la fermeture des routes lors de l'ouragan Igor, et certaines parties de la Transcanadienne ont été emportées (Forum canadien du climat, 2014). L'augmentation des volumes de précipitations et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes (c.-à-d. raccourcissement des périodes de récurrence) contribueront à augmenter les risques d'inondations des routes qui entravent la circulation, augmentent la durée des déplacements et perturbent le transport des marchandises et les services d'urgence (Chu, 2012; Vasseur et Catto, 2008).

Des rafales de 80 à 160 km/h ont été enregistrées régionalement durant des tempêtes tropicales ou post-tropicales (Environnement Canada, 2013b). Les vents violents ont causé la fermeture des principaux ponts de l'Atlantique, tels que le pont MacDonald d'Halifax et le pont de la Confédération (Catto et coll, 2006). À l'été 2014, l'ouragan Arthur a déraciné des centaines d'arbres à Fredericton, au Nouveau-Brunswick, entravant la circulation jusqu'à ce que les équipes de la ville retirent les arbres des rues (voir l'étude de cas 1).

Les vents violents peuvent aussi survenir en l'absence de tempêtes tropicales. Par exemple, un tronçon de 170 km de route (de Moncton, au Nouveau-Brunswick, à Truro, en Nouvelle-Écosse) dans l'isthme de Chignecto a été fermé en raison de vents violents et de la poudrerie (CBC News, 2015a). De plus, un tronçon de la Transcanadienne près de Wreckhouse, à Terre-Neuve-et-Labrador, est souvent exposé à des vents violents canalisés depuis la pointe sud des monts Long Range. Les entreprises de camionnage dans la région utilisent une technologie de surveillance constante pour réduire les risques d'incidents. Une entreprise de Terre-Neuve a rapporté le renversement de camions en raison des vents violents à Wreckhouse et dans la péninsule Northern (Fleming, 2014).

ÉTUDE DE CAS 1 : RÉPERCUSSIONS DE L'OURAGAN ARTHUR SUR LE TRANSPORT À FREDERICTON

La ville de Fredericton, au Nouveau-Brunswick (population de 57 000) est située sur une grande courbe de la rivière Saint-Jean. Historiquement, les inondations causées par les crues printanières et les événements de pluie abondante ont été difficiles à gérer pour Fredericton.

Le samedi 5 juillet 2014, l'ouragan Arthur s'est transformé en forte tempête post-tropicale et a touché à terre dans l'ouest de la Nouvelle-Écosse. Fredericton a connu une période prolongée de pluie abondante et de vents violents causés par le système de tempête, y compris 150 mm de pluie (enregistrés à la base de Gagetown près de Fredericton) et des rafales de 100 km/h à l'aéroport international de Fredericton. La combinaison de vent et de pluie a saturé le sol et causé des dommages généralisés aux arbres de même que des pannes de courant dans la ville.

La tempête a eu des répercussions sur les routes et les trottoirs, le réseau public de sentiers pédestres de même que sur l'aéroport international de Fredericton. Les équipes municipales ont eu de la difficulté à enlever les arbres tombés sur les routes et les sentiers, perturbant la circulation. À plusieurs endroits, les fils électriques s'étaient entrelacés avec des branches, nécessitant une réponse conjointe de la Société d'énergie du Nouveau-Brunswick et de la Ville afin de dégager les routes pour les véhicules d'urgence. Par ailleurs, l'aéroport a également connu une longue panne de courant et a dû compter sur des générateurs pour maintenir les opérations.

L'ouragan Arthur était atypique puisqu'il s'agissait d'une tempête tropicale survenue tôt en saison, frappant Fredericton au moment où le poids des arbres était au maximum en raison de la croissance de nouvelles feuilles (et avant que les branches et les troncs aient pu se renforcer pour soutenir leur croissance). Les événements météorologiques plus intenses et inhabituels comme Arthur ont incité la ville à revoir ses pratiques opérationnelles normalisées, y compris les pratiques suivantes :

- La plantation de différentes espèces et variétés d'arbres sur les emprises publiques afin d'assurer la résilience et de minimiser les chutes d'arbres, ce qui réduira les impacts sur le réseau de rues, de sentiers et de trottoirs;
- La mise en œuvre d'un programme intensif d'élagage des arbres pour leur permettre de résister aux événements météorologiques violents;
- La révision et la mise à niveau de l'équipement et de la formation du personnel en prévision des futures tempêtes.

De plus, la ville collabore avec le programme en sciences forestières de l'Université du Nouveau-Brunswick afin de constituer un inventaire des arbres le long des rues. Avant de replanter des arbres, les caractéristiques telles que la hauteur, le système racinaire, la canopée et la résistance des différentes espèces seront évaluées pour s'assurer que les nouveaux arbres peuvent mieux résister aux vents violents et la saturation du sol.

Cet exemple illustre les impacts indirects des conditions météorologiques extrêmes sur les opérations de transport, en particulier en milieu urbain. La collaboration entre les divers secteurs tels que l'électricité, la foresterie et le transport est importante afin de renforcer la résilience des systèmes urbains aux changements climatiques.

Rédigé par Ken Forrest (La Croissance et des Services communautaires, ville de Fredericton, Nouveau-Brunswick).

Les ondes de tempête augmentent les risques liés à l'érosion et aux inondations des côtes, ayant une incidence sur les routes près de la côte (Province of Nova Scotia, 2009b). Par exemple, l'intégrité structurale d'un pont important à Corner Brook (Terre-Neuve) a presque été compromise à plusieurs reprises en raison d'ondes de tempête. Les fonctionnaires de la ville ont été contraints de fermer le pont de manière ponctuelle pour des raisons de sécurité (Rayna Luther, Infrastructure et travaux publics de la ville de Corner Brook, communication personnelle, 2015). Le tronçon de la Transcanadienne dans l'isthme de Chignecto est également vulnérable aux inondations résultant d'ondes de tempête (voir l'étude de cas 5).

Sur l'Île-du-Prince-Édouard, où aucun point ne se trouve à plus de 16 km de la mer, l'infrastructure est particulièrement vulnérable aux dégâts causés par la haute mer. Par exemple, une forte onde de tempête survenue en décembre 2010 a causé la fermeture de ponts et inondé plusieurs ponts, y compris l'Oyster Bed Bridge, le Corran Ban Bridge et le Rustico Bridge (figure 6). Sur l'Île-du-Prince-Édouard, dont le littoral est constitué principalement de grès, l'infrastructure est particulièrement vulnérable à l'érosion en raison d'ondes de tempête et de niveaux d'eau élevés. Sur l'Île-du-Prince-Édouard, au moins deux routes côtières publiques ont été abandonnées au cours des dernières années en raison de l'érosion (Brian Thompson, gouvernement de la province de l'Île-du-Prince-Édouard, communication personnelle, 2016). Cela perturbe non seulement les propriétaires et les voyageurs, mais cause aussi des dépenses non prévues pour le gouvernement, parce qu'il est nécessaire de protéger les terres et de construire d'autres routes, s'il y a lieu (Brian Thompson, gouvernement de la province de l'Île-du-Prince-Édouard, communication personnelle, 2016). Sur l'Île-du-Prince-Édouard, le taux d'érosion des côtes est en progression. Le taux moyen d'érosion est passé de 28 cm par année entre 1968 et 2010 à 40 cm par année entre 2000 et 2010 (Webster, 2012). Sans tenir compte de la hausse du niveau de la mer et des tempêtes par suite des changements climatiques, une évaluation de l'infrastructure côtière de la province a mis en évidence plus de 40 km de route à risque d'érosion d'ici 2100. (Fenech, 2014).

L'intensité et la fréquence des inondations par suite d'ondes de tempête devraient augmenter au cours du XXI^e siècle dans les régions qui font face à la hausse du niveau de la mer, y compris la plus grande partie du Canada atlantique, ce qui fait augmenter la probabilité de dommages aux routes et aux ponts côtiers.

Figure 6 : Inondation de l'Oyster Bed Bridge pendant une tempête en décembre 2010. (Source : Don Jardine)



Changements de température et précipitations

Les cycles de gel et de dégel hypothèquent les systèmes routiers, en particulier lorsque la température change rapidement. La possibilité d'une détérioration rapide des routes et d'une augmentation des coûts d'entretien augmente également lorsque la fréquence des cycles de gel et de dégel s'intensifie. Par exemple, à la conclusion d'environ trois semaines de conditions hivernales fluctuantes en février 2015, plus de 1 000 nids de poule non réparés parsemaient la ville d'Halifax - environ 300 avaient plus de deux pouces de profondeur et ont été désignés comme « prioritaires » par conséquent (Bradshaw, 2015). Ces cycles devraient devenir plus fréquents dans la plus grande partie de la région de l'Atlantique à court terme. La fréquence des cycles de gel et de dégel pourrait diminuer alors que les températures hivernales moyennes à long terme augmentent (Boyle et coll., 2013).

Les événements de pluie-sur-neige ont également des répercussions sur les routes du Canada atlantique. En 1962, environ 180 mm de pluie sur un épais manteau neigeux se sont abattus sur la côte sud de l'Île-du-Prince-Édouard et ont causé des affouillements et des dommages considérables aux routes asphaltées (Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique, 2011). Lors d'un événement semblable survenu en décembre 2014, 9 millions de dollars en dommages ont été causés aux ponts et aux routes sur l'Île-du-Prince-Édouard (McCarthy, 2014; Wright, 2015). En outre, la fonte des neiges rapide peut causer des problèmes aux systèmes de drainage municipaux. Lorsque les températures ont fluctué de -27 °C à 7 °C en l'espace d'un mois à Corner Brook (Terre-Neuve), l'importante fonte de neige a entraîné l'infiltration d'importants volumes d'eau sur de courtes périodes, surchargeant la capacité de l'infrastructure de gestion des eaux pluviales (Rayna Luther, Infrastructure et travaux publics de la Ville de Corner Brook, communication personnelle, 2015).

Les conditions de pluie verglaçante et de glace noire plus fréquentes associées à des hivers plus doux ont une incidence sur la circulation, les taux d'incidents, les coûts d'entretien et l'utilisation de produits chimiques antigivrants et dégivrants (Andrey et coll., 2013). Les hivers plus doux peuvent également avoir une incidence sur la sécurité et la capacité d'utilisation des routes de glace saisonnières dans le nord du Labrador et du Nouveau-Brunswick qui fournissent un accès aux communautés souvent en franchissant des plans d'eau gelés (CBC News, 2012, Nalcor Energy, 2014).

Les températures extrêmes ont également des effets négatifs sur l'infrastructure routière. Les régions de l'intérieur du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse connaissent déjà une augmentation de la fréquence des journées chaudes, et cette tendance devrait se poursuivre (Steeves, 2013), augmentant le risque de détérioration de la route et ajoutant du stress sur les joints de pont. Même si la fréquence des épisodes de froid extrême ne devrait pas augmenter, des journées anormalement froides continueront de survenir (Gao et coll., 2015), réduisant l'efficacité énergétique des véhicules et contribuant à des routes glacées.

4.2 PRATIQUES D'ADAPTATION

À la lumière de ces impacts, les gouvernements et les exploitants privés font appel à un certain nombre de stratégies pour améliorer la résilience des infrastructures routières. Les risques d'inondation font l'objet d'une attention particulière de ces efforts.

Mesures de protection physiques

Certaines municipalités de l'Atlantique construisent des murs de protection, des brise-lames et des digues pour protéger contre la hausse du niveau de la mer et des ondes de tempête plus importantes (Liverman et coll., 1994; Batterson et coll., 1999; Halifax Regional Municipality, 2012). Ces obstacles protègent les infrastructures situées dans des zones peu élevées contre les débordements intempestifs (qui se produisent lorsque l'eau surmonte une digue ou une levée). La construction de digues et de brise-lames plus élevés peut atténuer les impacts des débits imprévisibles des eaux dans certaines régions du Canada atlantique (Graham et Musselman, sd). L'étude de cas 2 présente un exemple de ce type d'adaptation à Halifax, en Nouvelle-Écosse.

Dans les zones très préoccupantes comme le corridor de l'isthme de Chignecto, le « durcissement » des terrains environnants au moyen d'un système de digues a protégé les routes à ce jour, bien que d'autres approches d'ingénierie (terrains durs, mous et hybrides) visant à protéger l'infrastructure et les communautés en fonction des scénarios climatiques projetés aient été examinées récemment (voir l'étude de cas 5).

ÉTUDE DE CAS 2 : ADAPTATION DÉFENSIVE À COW BAY (HALIFAX, EN NOUVELLE-ÉCOSSE)

La levée de Cow Bay est un tronçon de 350 m de route construite sur une plage de galets et de roches. Pendant de nombreuses années, malgré la protection d'un brise-lames, la levée était vulnérable aux dommages liés à la submersion par les vagues. Trois problèmes précis ont été relevés liés au brise-lames actuel :

1. Le brise-lames n'était pas suffisamment élevé à certains endroits pour prévenir le déversement de vagues.
2. La majeure partie des pierres de carapace en place n'était pas de taille suffisante pour résister à la force des vagues au cours d'une tempête majeure; la levée a été fermée au moins deux fois par an pour des raisons de sécurité.
3. Les espaces vides entre les pierres de carapace en place ont permis à de petites pierres et à des algues de passer à travers le brise-lames et de se déposer sur la chaussée.

En conséquence, la levée a souvent été lourdement endommagée par des tempêtes et a nécessité des réparations tous les trois à cinq ans. L'ampleur et les répercussions des récentes tempêtes (y compris l'ouragan Juan en 2003, la tempête post-tropicale Noel en 2007 et une tempête survenue en janvier 2010) ainsi que les risques d'impacts futurs ont incité la municipalité régionale d'Halifax à commander une étude et des recommandations pour la réfection de la levée et de son brise-lames. L'étude a utilisé un modèle d'évaluation des risques statistiques connu sous le nom de Coastal Infrastructure Adaptation Planning System (CIAPS) pour analyser l'interaction des futures conditions de marée et des ondes de tempête le long de la côte avec le rendement attendu du brise-lames en place, ainsi que pour déterminer les élévations appropriées pour obtenir des infrastructures plus résistantes (Davies et coll., 2010). Quatre solutions de remplacement ont été relevées :

1. Protéger la levée contre l'érosion en remplaçant les accotements de gravier par des lits en béton articulés;
2. Protéger contre l'érosion et éléver la route afin de minimiser les risques de déversement des vagues;
3. Reconstruire la barrière en entier (y compris les technologies imperméables); ou
4. Reconstruire la barrière selon des phases prioritaires (Davies et coll., 2010).

Selon l'évaluation des risques, la solution permettant d'optimiser les coûts était de reconstruire le brise-lames de la levée en deux phases. La conception incluait ce qui suit :

- Une augmentation de la hauteur du brise-lames;
- Un noyau en béton de 600 mm par 2,5 m;
- Quatre à huit tonnes de pierres de carapace sur la face extérieure du brise-lames;
- Une crête du brise-lames d'environ 9 m de large;
- Une pente orientée vers la mer (deux blocs horizontaux pour un bloc vertical).

...

...

Chaque phase comprenait l'achèvement d'environ la moitié de la longueur du brise-lames, et la conception permet de gérer la hauteur accrue des vagues dans les conditions projetées des ondes de tempête et du niveau de la mer. Le projet a été déposé en 2012 et un budget de 670 000 \$ en coûts de construction a été octroyé pour la phase 1 (Davies et coll, 2010; Halifax Regional Municipality, 2012). La phase 2 a été achevée en 2013.

Bien que le nouveau brise-lames n'ait pas encore eu à gérer d'ouragans majeurs, les pratiquants locaux suggèrent que l'infrastructure a réussi à atténuer les effets des fortes tempêtes et à l'action des vagues à ce jour (David Hubley, municipalité régionale d'Halifax, communication personnelle, 2016).

Figure 7 : La levée de Cow Bay en pleine tempête. (Photo de Cow Bay Causeway prise le 26 janvier, 2010 par M. Davies, Coldwater Consulting Ltd.)



Rédigé par Eric Rapaport avec la collaboration de David Hubley (municipalité régionale d'Halifax).

Pratiques de gestion des eaux pluviales

Partout au Canada atlantique, les villes atténuent les risques pour les routes posés par les inondations en améliorant les pratiques de gestion des eaux pluviales. Parmi ces dernières, on retrouve :

- L'utilisation des projections climatiques pour mettre à jour les débits conceptionnels dans les réseaux de gestion des eaux pluviales pour tenir compte des précipitations accrues. Les exemples incluent la ville de Fredericton, au Nouveau-Brunswick (Arisz, sd), la ville de Corner Brook, à Terre-Neuve (Ville de Corner Brook, 2012), et la ville de Stratford, sur l'Île-du-Prince-Édouard (CBCL Ltd., 2012).
- En utilisant le protocole d'évaluation des risques du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) pour évaluer la vulnérabilité aux changements climatiques des systèmes de gestion des eaux pluviales et des routes. Les exemples incluent Sandy Point, en Nouvelle-Écosse; Miramichi, au Nouveau-Brunswick; et Placentia, à Terre-Neuve-et-Labrador (la municipalité du district de Shelburne, 2011; Ville de Miramichi, 2013, Ingénieurs Canada, 2014). En réponse aux recommandations du CVIIP, Sandy Point investit dans de nouvelles stations de pompage pour réduire l'infiltration et sur les déversements sur les infrastructures, et Miramichi et Placentia envisagent de plus grands ponceaux tailles le long des corridors routiers qui ont été évalués (Ville de Miramichi, 2013, Ingénieurs Canada, 2014).

D'autres pratiques de gestion des eaux pluviales recensées dans la littérature peuvent également être pertinentes pour le Canada atlantique. Elles comprennent la construction de jardins ou de bassins de rétention des eaux pluviales; l'utilisation de matériaux de chaussée perméables; la plantation d'arbres (pour augmenter l'infiltration et réduire l'accumulation d'eau sur les routes), et la coordination de la gestion des eaux pluviales à l'échelle du bassin hydrologique (c.àd. maintien des zones humides et des canaux fluviaux naturels) (Marsalek et Schreier, 2010; Kessler, 2011).

Relocalisation de l'infrastructure

La relocalisation ou la protection des infrastructures routières contre les inondations peuvent s'avérer nécessaires lorsque le rivage est à risque d'être inondé ou d'être rendu inutilisable en raison de la hausse du niveau de la mer, des ondes de tempête et de l'érosion des côtes (Transportation Research Board, 2008; Davidson-Arnott et Ollerhead, 2011). Certaines municipalités du Canada atlantique ont choisi de construire les nouvelles routes loin des zones côtières (Graham et Musselman, sd) ou d'élever l'infrastructure lorsque cela est possible (p. ex., à Moncton, au Nouveau-Brunswick, voir chapitre sur le Transport urbain) (AMEC Inc., 2011). Par exemple :

- Le pont de la Confédération qui relie l'Île-du-Prince-Édouard à la partie continentale du Canada, au Nouveau-Brunswick, a été construit en tenant compte d'une hausse du niveau de la mer d'un mètre sur plus de cent ans. Le pont a aussi été conçu de manière à laisser passer sans danger les culots de glace sous le pont (Gregg, 2010).
- Le ministère des Transports de l'Île-du-Prince-Édouard reconstruit le pont Souris un mètre plus haut pour tenir compte des prévisions relatives à la hausse du niveau de la mer (Government of Prince Edward Island, 2015).
- Le gouvernement provincial de la Nouvelle-Écosse a récemment reconstruit ses routes de la série 100 plus à l'intérieur des terres par rapport à leurs emplacements originels afin d'offrir des corridors plus sûrs et plus rapides; en conséquence, ces routes sont beaucoup moins sensibles aux risques côtiers (Finck, 2013).
- Le ministère des Transports du Nouveau-Brunswick a reconstruit et soulevé un pont situé sur la route principale de Pointe-du-Chêne en prévision de hausse du niveau de la mer (Daigle, 2011).
- Le déplacement du segment de la Transcanadienne le long de l'isthme de Chignecto a fait l'objet de discussions comme solution d'adaptation à long terme possible, mais elle est actuellement considérée comme trop coûteuse (voir l'étude de cas 5).

Pratiques d'exploitation et d'entretien

Les exploitants s'adaptent également aux conditions météorologiques difficiles. Par exemple, une entreprise de camionnage à Terre-Neuve qui doit faire des réparations plus fréquentes en raison des conditions routières et météorologiques difficiles a trouvé un moyen créatif pour assurer la continuité des activités (Fleming, 2014). Comme le remorquage de camions vers les installations de l'entreprise à Corner Brook est coûteux et prend du temps; la société laisse maintenant des pièces de rechange en position stratégique dans les foyers et les entreprises de clients le long de ses routes (Fleming, 2014). Lorsque des réparations mineures sont nécessaires (c.àd. les pneus, les ressorts et les lumières), les chauffeurs contactent l'établissement le plus proche pour demander la livraison ou le remplacement des pièces appropriées. Les liens créés entre l'entreprise et les collectivités locales rendent cette approche possible.

Les gouvernements investissent dans l'entretien proactif pour réduire les risques climatiques posés à l'infrastructure de transport. Par exemple, dans le but de réduire les risques liés aux crues printanières dans les régions rurales du Nouveau-Brunswick à la suite de périodes de réchauffement rapide et de fonte des neiges, le gouvernement fédéral a investi 1,7 million de dollars en 2015 pour retirer de façon proactive la neige des routes dans huit collectivités des Premières nations vulnérables. Jusqu'à 800 camions de neige ont été retirés tous les jours de « l'infrastructure critique » (y compris les routes) dans

certaines collectivités. Au cours de l'hiver 2014, les chutes de neige locales régionales ont battu des records et contenaient un taux d'eau plus élevé que normalement, rendant l'élimination de la neige difficile pour certaines collectivités (Water Canada, 2015; Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 2015).

5.0 TRANSPORT FERROVIAIRE : IMPACTS ET ADAPTATIONS

5.1 IMPACTS CONSTATÉS DANS LE PASSÉ ET RISQUES FUTURS

L'infrastructure ferroviaire au Canada atlantique est affectée par les changements climatiques et les météorologiques extrêmes de manière très similaire au réseau routier. Par exemple, les inondations (causées par les précipitations extrêmes, les ondes de tempête et les embâcles) ont eu des impacts sur les deux modes (Environnement Canada, 2010), et les tempêtes de neige qui ont causé des inondations sur les routes de Saint-Jean, à Terre-Neuve en 1959 et sur l'Île-du-Prince-Édouard en 1989 ont également submergé les rails et bloqué les trains (Environnement Canada, 2013b).

Onde de tempête, érosion côtière et hausse du niveau de la mer

Les voies ferroviaires situées à proximité des côtes du Canada atlantique sont vulnérables aux inondations, aux affouillements et dommages liés aux ondes de tempête et à l'érosion, ce qui peut parfois entraîner des déraillements. Par exemple, en 2003, l'ouragan Juan a causé des ondes de tempête de 1,5 à 2 m dans le port d'Halifax qui ont sévèrement érodé le rivage, causé l'affouillement des voies ferrées (figure 8) et emporté plusieurs wagons dans l'océan à la gare de triage de Dartmouth (Bowyer, 2003a). De même, l'ouragan Igor en 2010 a causé des dommages, l'emportement et des fermetures de lignes de chemin de fer, plus particulièrement à Terre-Neuve (Curtis et Ehrenfeld, 2012).

Figure 8 : Débris sur les rails à pointe Dartmouth le matin suivant l'ouragan Juan. La montée était de 1,64 m au-dessus du niveau d'eau le plus élevé enregistré à la station de marégraphe d'Halifax dans l'ensemble du havre, et les niveaux d'eau sont demeurés exceptionnellement élevés au moment de la prise de la photographie. (Source : Ressources naturelles Canada)



En 1974, une tempête de vent conjuguée à une haute mer a emporté 30 m de voie ferrée et fait dérailler deux trains diesel à Cape Ray, à Terre-Neuve (Heritage Newfoundland and Labrador, sd). L'érosion côtière a causé des dommages aux rails, la réduction des vitesses, des retards opérationnels et la fermeture de voies ferroviaires au Canada atlantique affectant le transport des marchandises telles que le papier, le charbon, le bois, les produits pétroliers et les produits chimiques (Genesee et Wyoming, Inc., sd). Ces perturbations ont des impacts négatifs sur les industries locales (y compris les installations intermodales) en raison des retards dans le transport, la production et le raffinement, et des recettes et des revenus délaissés.

Des ruptures de versants dans les zones côtières ont touché le Chemin de fer QNS & L (Batterson et coll, 1999; CBC News, 2014b) et continueront de poser des risques (Spooner et coll, 2013; Evan et coll, 2005). De même, les portions de la voie situées près du littoral de la section Cape Jack du Cape Breton and Central Nova Scotia Railway (CBNS) ont subi une érosion prononcée (Stephen Newson, government de la province de la Nouvelle-Écosse, communication personnelle, 2015; CBC News, 2014a).

En ce qui concerne l'avenir, l'isthme de Chignecto suscite des préoccupations considérables, puisqu'il est vulnérable aux inondations et que les risques d'inondations devraient augmenter au cours du XXI^e siècle en raison de la hausse du niveau de la mer (Webster et coll, 2011) (figure 9; voir l'étude de cas 5).

Figure 9 : Le CN dans l'isthme de Chignecto. Les remblais font partie du réseau de digues de la région. (Source : EOS EC0-Energy Inc.)



Précipitations extrêmes

Un grand nombre d'événements de précipitations abondantes documentés ont une incidence sur le transport ferroviaire au Canada atlantique. Par exemple, le 31 août 2007, les fortes pluies qui se sont abattues ont causé l'effondrement de certains ponceaux le long de la voie du CBNS au cap Breton, en Nouvelle-Écosse, ainsi que des affouillements à de nombreux endroits. La voie a été fermée pendant environ trois semaines aux fins de réparation et de remplacement des rails, perturbant le transport des marchandises (Stephen Newson, gouvernement de la province de la Nouvelle-Écosse, communication personnelle, 2015). En tout, l'incident a coûté plus de 500 000 \$ à la compagnie de chemin de fer (Province of Nova Scotia, 2007a; 2007b).

En avril 2003, les ponceaux sous une voie ferrée se sont affaissés lors d'une importante tempête à Ellershouse, en Nouvelle-Écosse (Stephen Newson, gouvernement de la province de la Nouvelle-Écosse, communication personnelle, 2015). De même, une forte tempête tropicale survenue en décembre 2010 a causé des dommages importants à l'infrastructure ferroviaire près de Fredericton, au Nouveau-Brunswick, alors que des précipitations extrêmes ont emporté des ponts ferroviaires et affaibli les assiettes des rails (Environnement Canada, 2013c). Étant donné que l'intensité, la durée et la fréquence des précipitations extrêmes devraient augmenter (Bush et coll., 2014), ces impacts pourraient devenir plus sévères.

Les chutes de neige importantes perturbent également le transport ferroviaire dans le Canada atlantique. Par exemple, les tempêtes de neige qui ont frappé la Nouvelle-Écosse au cours de l'hiver 2015 ont retardé le transport ferroviaire de marchandises et les services à partir d'installations multimodales vers les marchés nord-américains, ce qui s'est avéré coûteux pour les exploitants (Henderson, 2015; Cuthbertson, 2015). Les fortes chutes de neige sont susceptibles de continuer à affecter le transport ferroviaire au Canada atlantique au moins à court terme.

Inondations dues aux embâcles

Les inondations des terres intérieures causées par la fonte des neiges et les embâcles¹ ont également causé des dommages importants aux réseaux ferroviaires. Les inondations résultant d'embâcles tendent à causer plus de dommages aux infrastructures que les événements en eau libre, aux ponts en particulier. Par exemple, lors de la crue de la rivière Saint-Jean, au Nouveau-Brunswick en février 1970, des embâcles formés dans six rivières ont causé la destruction de 32 ponts (routiers et ferroviaires) et endommagé 124 autres (voir figure 10) (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2012).

En avril 1987, un embâcle a provoqué l'affaissement du pont ferroviaire de Perth-Andover lors d'importantes inondations printanières au Nouveau-Brunswick. Des wagons chargés avaient été placés sur le pont dans l'espoir de retenir l'embâcle et de prévenir les inondations en aval, une pratique qui avait été employée avec succès lors d'un événement de crue printanière moins sévère en 1976. Cependant, en 1987, la pression des glaces et des eaux de crue a causé l'affaissement du pont (Environnement Canada, 2010). Dans le futur, la probabilité d'inondations causées par des embâcles devrait augmenter à mesure que le calendrier des changements saisonniers devient plus variable d'une année à l'autre (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2014).

Figure 10 : Embâcle printanier sous un pont ferroviaire sur la rivière Saint-Jean. (Source : Société d'énergie du Nouveau-Brunswick)



Température

L'augmentation de la température moyenne de l'air et l'évolution des extrêmes posent des risques incertains pour le transport ferroviaire au Canada atlantique. Les changements extrêmes de température (faible et élevée) causent la dilatation ou la contraction des rails, ce qui peut provoquer des déraillements (Dobney et coll., 2008; Peterson et coll., 2008; Ministère des Transports et du Renouvellement de l'infrastructure de la Nouvelle-Écosse, 2014). En outre, la chaleur extrême durant l'été peut entraîner le gauchissement des rails causé par l'expansion des matériaux au-delà des limites conceptuelles raisonnables, ce qui cause le « flambage de la voie » (Dobney et coll., 2008). Ce problème a toujours été rare dans les provinces de l'Atlantique (Stephen Newson, gouvernement de la province de la Nouvelle-Écosse, communication personnelle, 2015). Cependant, la région a connu des incidents causés ou exacerbés par des changements rapides de température. Par exemple, l'enquête sur un déraillement survenu dans le comté de Pictou, en Nouvelle-Écosse en juin 2014 a révélé que le gauchissement de la voie « produit par une variation de température soudaine et inhabituelle du rail et un cumul des points de tension de l'acier » avait été un facteur important (Province of Nova Scotia, 2014). Le changement extrême de température est également considéré comme ayant été un facteur majeur dans le déraillement d'une voie principale à Milford, en Nouvelle-Écosse en 2002 (Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2003). La fréquence de ces événements et la probabilité d'un accident grave pourraient augmenter en raison de l'augmentation des températures au cours du 21^e siècle (Dobney et coll., 2008).

5.2 PRATIQUES D'ADAPTATION

Bien que les exemples documentés soient limités, les exploitants ferroviaires du Canada atlantique ont déployé des efforts pour réduire les futurs risques climatiques. Par exemple, un système de ponceaux et d'aboiteaux⁸ d'urgence à Hantsport, en Nouvelle-Écosse a été construit afin de gérer les débits d'eau accrus au moyen de systèmes de ponceaux sous les voies ferrées (figure 11). Les sorties de

⁸ Désigne une série de digues de protection installées autour des terres agricoles en zones de faible élévation pour prévenir les inondations par les marées (Hatvany, 2002).

trop-plein permettent à l'excès d'eau lors d'événements extrêmes de précipitations ou d'inondations de s'écouler du ponceau par la voie d'un autre itinéraire. Ce système empêche les [éruptions de ponceaux] lors de périodes de grands débits (Stephen Newson, gouvernement de la province de la Nouvelle-Écosse, communication personnelle, 2015).

Figure 11 : Système d'aboiteaux à Hantsport, en Nouvelle-Écosse. (Source : Danika Van Proosdij)



Dans le passé, la solution habituelle à l'érosion sous les voies de chemin de fer consistait à remplacer la pierre détachée ou calée. Toutefois, en raison de l'augmentation de la fréquence des réparations et des coûts associés, cette méthode pourrait ne plus être suffisante ou efficace (Stephen Newson, gouvernement de la province de la Nouvelle-Écosse, communication personnelle, 2015). Les barrières physiques telles que les digues ont également été utilisées pour protéger l'infrastructure ferroviaire de l'impact des inondations et de l'érosion causées par les ondes de tempête, mais ces protections pourraient être insuffisantes dans le futur. Par exemple, différentes mesures options en matière d'adaptation sont actuellement à l'étude pour les systèmes de digues dans l'isthme de Chignecto (étude de cas 5).

L'une des pratiques qui est utilisée pour augmenter la résilience de l'infrastructure ferroviaire vulnérable aux températures extrêmes est de remplacer les rails soudés par des segments de rail plus courts dotés de joints qui permettent à la voie de se dilater ou de se contracter (Lim et coll., 2003). (Les rails soudés, dont les segments sont plus longs, permettent de réduire les coûts d'entretien globaux de la voie et augmentent la durée de vie moyenne des composants de la voie dans des conditions de températures modérées). Par exemple, après le déraillement de juin 2014 à Pictou, 300 pieds de rails soudés ont été remplacés à partir du point de déraillement par des panneaux de voie de 39 pieds plus faciles à entretenir et à remplacer en cas de stress causé par la chaleur ou les variations de température. En outre, l'entreprise a effectué un test de stress de la voie ferrée et les employés ont revu les exigences en matière d'entretien. Pour empêcher la survenue d'événements similaires à l'avenir, la compagnie de chemin de fer a mis au point un nouveau programme de formation technique, et a limité la vitesse des trains à 40 km/h pendant les mois d'été et la vitesse peut même être réduite davantage à 16 km/h lorsque cela est justifié en raison des conditions de chaleur extrême (Province of Nova Scotia, 2014).

6.0 TRANSPORT MARITIME

6.1 IMPACTS CONSTATÉS DANS LE PASSÉ ET RISQUES FUTURS

Les mauvaises conditions climatiques et les tempêtes ont une incidence depuis longtemps sur le transport maritime au Canada atlantique, perturbant les opérations et endommageant les navires, les ports et les infrastructures de navigation. Ces impacts présentent des défis particuliers pour Terre-Neuve-et-Labrador qui doit s'appuyer fortement sur le transport maritime pour le réapprovisionnement et la connectivité (CBC News, 2015 b, 2015c). Au cours du dernier siècle, l'amélioration des technologies prévisionnelles et de surveillance ont contribué à considérablement réduire les risques aux conditions météorologiques extrêmes pour les exploitants de navires. Cependant, les ports et les navires demeurent vulnérables à un certain nombre de risques futurs associés aux changements climatiques. Selon les estimations, la perte de productivité liée aux perturbations causées par les conditions météorologiques dans l'industrie du transport maritime au Canada atlantique s'élève à des millions de dollars annuellement (Catto et coll., 2006).

Précipitations, conditions météorologiques extrêmes, ondes de tempête et hausse du niveau de la mer

Les ouragans ont causé d'importants dommages à l'infrastructure maritime et aux navires dans le passé. Durant l'ouragan Juan, des ondes de tempête de 1,5 à 2 m et des rafales atteignant jusqu'à 230 km/h ont endommagé des quais côtiers et d'autres infrastructures portuaires côtières dans le port d'Halifax, poussé des conteneurs par-dessus bord, détaché des bouées météorologiques en plus de couler et d'endommager des navires (Bowyer, 2003a Bowyer, 2003b). « Juan blanc », un nordet de force ouragan survenu en février 2004 (cinq mois après l'ouragan) a entraîné des vagues de 10 à 15 m et une onde de tempête qui ont endommagé davantage les ports en Nouvelle-Écosse (Environnement Canada, 2013a). En 1995, lors de l'ouragan Luis, une vague de 30 m avait frappé un paquebot près de la côte de Terre-Neuve (Environnement Canada, 2013b).

On prévoit que les hausses des niveaux de la mer et des ondes de tempête poseront des risques accrus au cours du 21e siècle (Bush et coll., 2014). Une hausse du niveau de la mer de l'ordre de 70 à 100 cm est projetée pour de nombreuses régions côtières importantes du Canada atlantique d'ici 2100 (Savard et coll., 2016) et, dans certains cas, des marées et des ondes de tempête plus élevées pourraient inonder les quais, les terminaux et les équipements de chargement et causer des dommages importants en l'absence de mesures d'adaptation (Andrey et Mills, 2003). Les figures 12a et 12b illustrent l'étendue possible de l'inondation du port d'Halifax en 2100, calculée en fonction de deux scénarios de hausse du niveau de la mer (probabilités de hausse élevée et de faible hausse). À certains endroits, la hausse du niveau de la mer pourrait permettre l'entrée de navires ayant de plus grands tirants d'eau et de charges plus lourdes (Andrey et Mills, 2003).

Figure 12a : Étendue et ampleur de l'inondation advenant une hausse du niveau de la mer de 0,57 m sur dix ans dans le port d'Halifax (très probable). Pour ces projections, on suppose que l'intensité et la fréquence des tempêtes n'augmentent pas à l'avenir. (Source : Forbes et coll, 2009)

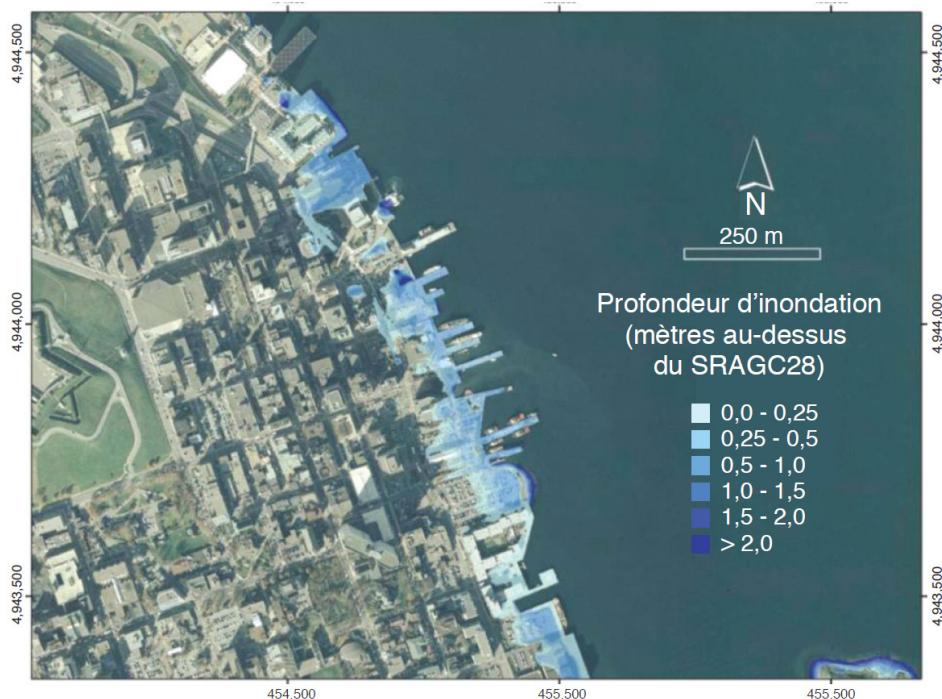
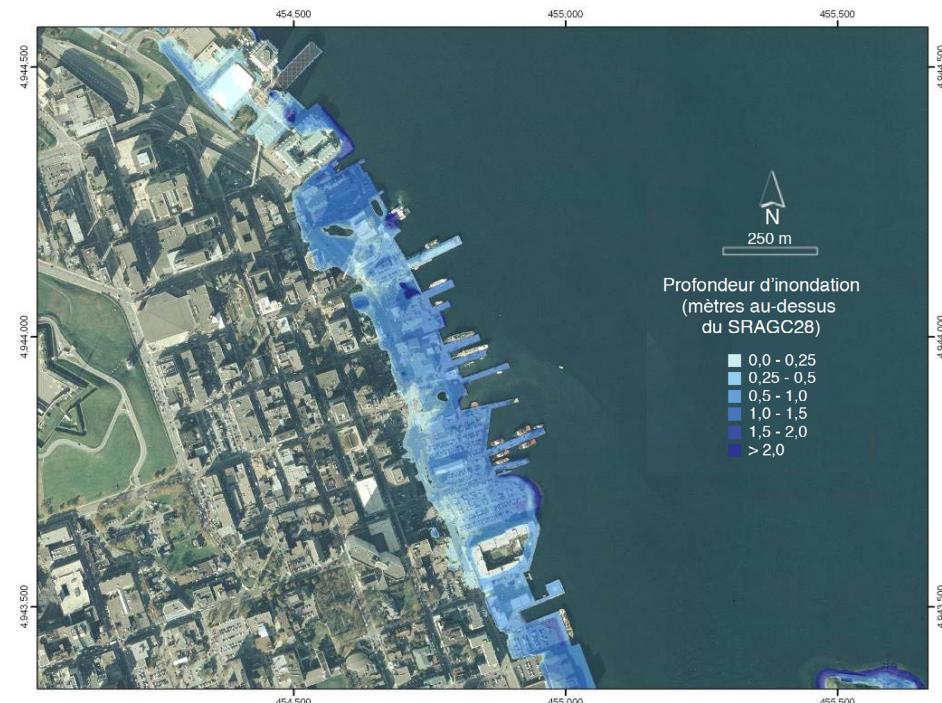


Figure 12b : Étendue et ampleur de l'inondation advenant une hausse du niveau de la mer de 1,3 m sur 50 ans (moins probable) dans le port d'Halifax. Pour ces projections, on suppose que l'intensité et la fréquence des tempêtes n'augmentent pas à l'avenir. (Source : Forbes et coll, 2009)



Glaces de mer et vents

Les vents violents ont été la source de retards coûteux pour des services de transbordeur desservant Terre-Neuve, le Labrador et la Nouvelle-Écosse (Cape Breton Post, 2015; Catto et coll., 2006). Combiné à la fragmentation des glaces de mer et aux embâcles saisonniers précoces, les vents posent des risques supplémentaires pour la navigation. Par exemple, à l'hiver 2015, les glaces entassées dans le détroit de Belle-Isle ont causé de longs retards et de la frustration chez les passagers se déplaçant entre Terre-Neuve et le Labrador (CBC News, 2015b). De même, les vents de l'est plus en plus puissants à Channel-Port aux Basques, à Terre-Neuve, peuvent menacer la fiabilité du transport par transbordeur dans la région, un corridor important reliant l'île à la terre ferme (Catto et coll., 2006).

Les vents violents continueront de poser des risques pour les navires et les ports en raison des augmentations projetées de la fréquence des événements météorologiques extrêmes. Du même coup, le temps plus doux durant l'été et l'étendue et la durée décroissantes des glaces de mer offriront des avantages potentiels pour la navigation commerciale, l'industrie des croisières et l'écotourisme en raison du prolongement de la saison du transport maritime (Andrey et Mills, 2003; Leys, 2009; Savard et coll., 2016).

ÉTUDE DE CAS 3 : PLANIFICATION EN VUE DES FUTURES CONDITIONS CLIMATIQUES EXTRÊMES AU PORT D'HALIFAX

Le gouvernement de la Nouvelle-Écosse, avec le soutien de Ressources naturelles Canada, mène une étude de cas sur les impacts des changements climatiques sur les infrastructures de transport côtières dans le port d'Halifax. Les chercheurs utilisent l'analyse coûts-avantages pour évaluer les vulnérabilités aux changements des paramètres climatiques et les options en matière d'adaptation. L'analyse se concentre sur les transferts depuis les modes de transport maritime et intermodal vers le transport par camion et par train. L'analyse inclue une enquête sur la façon dont les retards dans le transport ferroviaire causés par des conditions météorologiques extrêmes ou par des dommages aux infrastructures peuvent avoir une incidence sur l'acheminement des marchandises vers les ports maritimes. Les résultats de cette étude n'étaient pas disponibles au moment de la rédaction de ce rapport.

Les variables examinées dans l'étude comprenaient la hausse du niveau de la mer, les ondes de tempête et l'affaissement du littoral. Les cartes et les modèles informatiques ont été utilisés pour visualiser les impacts potentiels sur le système. Les participants volontaires dans l'étude comprenaient les exploitants ferroviaires du CN et des ports importants. Cette analyse coûts-avantages permettra de démontrer les impacts des changements climatiques pour les entreprises près du port d'Halifax.

Rédigé avec la collaboration de Shawn MacDonald, (Unité des changements climatiques, Gouvernement de la Nouvelle-Écosse).

6.2 PRATIQUES D'ADAPTATION

Les exploitants et les ports maritimes du Canada atlantique ont eu recours à un certain nombre de pratiques pour améliorer leur résilience face aux risques climatiques et météorologiques extrêmes. Un exemple est le port de Bay Bulls (figure 13), un centre économique à l'est de Terre-Neuve, en proximité de St. John's et des lieux de pêche productifs des Grands Bancs. En 2010, l'ouragan Igor a causé des dommages importants au port. Lors de la construction du port, la collectivité a choisi d'inclure des mesures d'adaptation afin de mieux résister aux futures conditions de tempête. La hausse du niveau de la mer, les ondes de tempête de même que les conditions météorologiques extrêmes ont été prises en compte. Pour ces raisons, le nouveau port a été construit 0,5 m plus haut qu'auparavant, que son orientation a été modifiée, et qu'un un brise-lames de 1,5 m a été construit pour fournir une protection accrue. Le port de Bay Bulls et ses actifs économiques sont maintenant mieux préparés aux conditions météorologiques plus intenses (Office of Climate Change, Energy

Efficiency and Emissions Trading, 2013). De plus en plus d'analyses coûts-avantages démontrent que les dépenses en immobilisations et d'autres dépenses aident à réduire les risques de dommages aux infrastructures et permettent des économies à long terme (voir l'étude de cas 5).

Figure 13 : Port de Bay Bulls, à Terre-Neuve.
(Source : Bureau du changement climatique et de l'efficacité énergétique, gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador)



Figure 14 : Bouée SmartAtlantic à St. John's, à Terre-Neuve. (Source : Fisheries and Marine Institute of Memorial University)



L'utilisation de nouvelles technologies pour réduire les risques climatiques est un domaine d'adaptation peu exploré. Par exemple, le Fisheries and Marine Institute of Memorial University à Terre-Neuve et l'Institute for Ocean Research Enterprise d'Halifax ont récemment mis au point l'initiative SmartAtlantic Alliance afin de moderniser davantage le système de navigation maritime au Canada en fournissant des données météorologiques et hydrologiques précises et en temps réel. Les données générées par les bouées SmartAtlantic (figure 14) sont utilisées pour produire des prévisions à haute résolution des conditions météorologiques et de la mer et à des fins de recherche scientifique.

La technologie est actuellement utilisée dans sept ports de l'Atlantique (voir l'étude de cas 4) et l'industrie du transport maritime, les plaisanciers et les armateurs, les chercheurs et les membres intéressés du public peuvent désormais accéder en ligne à des données en temps réel sur la météo et la direction des vagues à ces endroits. La technologie a été conçue pour optimiser l'efficacité sans compromettre la sécurité de la navigation, ainsi que pour améliorer la fiabilité des opérations portuaires dans diverses conditions météorologiques et climatiques (Gouvernement du Canada, 2014; Ministère des Transports et de l'Infrastructure du Nouveau-Brunswick, 2015).

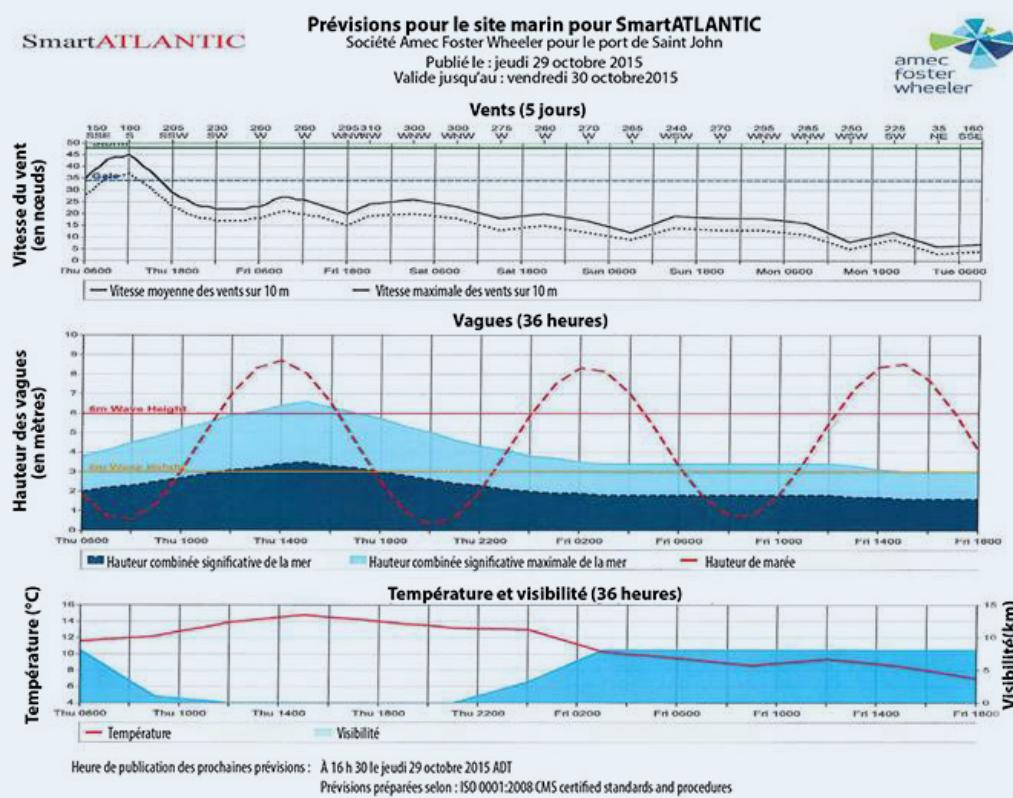
ÉTUDE DE CAS 4 : ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES À PORT SAINT JOHN

Le port de Saint John est le plus grand port du Canada atlantique par tonnage. Il est extrêmement important pour le réseau commercial du Canada, reliant les marchés mondiaux au centre du Canada par rail et par route, et desservant les industries régionalement importantes telles que l'industrie de la potasse, l'industrie pétrolière et le tourisme (à savoir l'industrie des croisières). Par conséquent, les perturbations et les impacts liés au climat sur l'exploitation du port peuvent avoir des répercussions négatives sur l'économie ainsi que sur la rentabilité du port. Les exploitants portuaires ont relevé un certain nombre de risques pour l'infrastructure et les opérations liés aux conditions climatiques extrêmes, variables ou changeantes. Les problèmes hydrologiques, principalement les crues (à savoir, les inondations causées par la fonte de la neige et de la glace au printemps dans les rivières canadiennes) ont été particulièrement problématiques.

La hausse du niveau de la mer et l'augmentation des ondes de tempête projetées posent des risques pour l'infrastructure portuaire conçue pour une durée de vie de 100 ans. À la fin de 2015, et au début 2016, le port de Saint John a connu un nombre anormalement élevé d'événements de vents forts qui ont produis des ondes de tempête fréquentes dans l'arrière-port. Au cours d'un événement particulièrement intense survenu le 29 octobre 2015 (dont la pointe a coïncidé avec une marée anormalement élevée), l'infrastructure a subi des dommages évalués à environ 20 000 \$ (Chris Hall, port de Saint John, communication personnelle, 2016).

Plusieurs mesures planifiées et mises en œuvre par le port dans le cadre de ses activités de modernisation devraient rendre le port plus résistant aux conditions climatiques variables et changeantes et plus fiable pour les transporteurs maritimes et la marine marchande. Par exemple, la bouée météorologique côtière « SmartAtlantic » ainsi qu'un outil de prévision des vagues ont été lancés récemment. La figure 15 fournit un exemple des données prévisionnelles générées par la bouée SmartAtlantic du port de Saint John. Ces données ont prédit avec précision l'onde de tempête survenue le 29 octobre 2015.

Figure 15 : Données générées par la bouée SmartAtlantic pour le port de Saint John (29 octobre 2015).
(Source : Chris Hall, Port de Saint John)



...

Le Port entreprend également une planification à long terme pour son infrastructure dans le cadre d'un plan de modernisation du port. Une étude technique préliminaire à l'appui de ces efforts a explicitement tenu compte de l'élévation future du niveau de la mer sur la base des modèles à haute résolution pour la baie de Fundy (Dupont et coll., 2005).

Rédigé avec la collaboration de Chris Hall (port de Saint John); avec renseignements supplémentaires fournis par Tyler O'Rourke (port de Saint John).

7.0 TRANSPORT AÉRIEN

7.1 IMPACTS CONSTATÉS DANS LE PASSÉ ET RISQUES FUTURS

Selon les praticiens, dans l'ensemble, les aéroports de la région de l'Atlantique sont bien équipés pour fonctionner dans des conditions météorologiques difficiles. Cependant, les événements météorologiques extrêmes et les tempêtes, y compris les pluies abondantes, les fortes chutes de neige et les vents violents, peuvent entraîner des retards et des annulations de vols, des pertes économiques associées et des inconvénients pour les voyageurs. Les retards de vols sont particulièrement problématiques pour Terre-Neuve, qui s'appuie sur l'aviation (ainsi que sur le transport maritime) pour la connectivité.

Les aéroports cherchent à maintenir les installations ouvertes dans toutes les conditions météorologiques, en particulier pour les services médicaux d'urgence qui nécessitent l'utilisation des pistes et des installations aéroportuaires. Le défi pour les aéroports est d'assurer l'efficacité des services tout en assurant la sécurité des opérations dans des conditions météorologiques extrêmes. Les aéroports de l'Atlantique sont particulièrement préoccupés par la hausse des coûts d'exploitation entraînés par des conditions météorologiques plus variables et sévères (Helen MacInnis, aéroport J.A. Douglas McCurdy de Sydney, communication personnelle, 2015; Andrew Isbill, Autorité aéroportuaire de Fredericton, communication personnelle, 2015).

Précipitations et tempêtes

Les précipitations, y compris la pluie, la neige et la pluie verglaçante sur les pistes peuvent compromettre la friction et la visibilité nécessaires aux avions pour décoller et atterrir. Les coûts opérationnels peuvent également augmenter de manière significative en réponse aux chutes de neige extrêmes (Helen MacInnis, aéroport J.A. Douglas McCurdy de Sydney, communication personnelle, 2015).

La fréquence accrue des tempêtes (et des précipitations et des inondations associées) au cours du 21^e siècle pourrait entraîner d'autres pertes de revenus en raison des perturbations opérationnelles. Ces types de retards pourraient également augmenter les coûts d'exploitation associés aux besoins de plus d'avions, à l'entretien des installations et à l'amélioration des infrastructures de soutien, comme les routes d'accès et les installations de drainage (Transportation Research Board, 2008).

Alors que les ondes de tempête, l'érosion et la hausse du niveau de la mer présentent des risques régionaux à l'infrastructure côtière, la plupart des aéroports du Canada atlantique sont construits sur des terrains relativement élevés ce qui réduit la vulnérabilité aux inondations côtières.

Les systèmes de drainage sont habituellement efficaces pour réduire les risques d'inondation des pistes. Cependant, des événements de précipitations extrêmes ont dans certains cas inondé les routes d'accès et de service ainsi que les parcs de stationnement d'aéroports du Canada atlantique.

Parfois, ces inondations ont causé des retards ou l'annulation de vols, comme ce fut le cas à l'aéroport international Stanfield d'Halifax au cours d'un intense nordet (CBC News, 2014c).

La fréquence accrue d'orages et d'ouragans est aussi une préoccupation pour certains aéroports du Canada atlantique compte tenu de leur potentiel de perturber les opérations et qu'ils posent des risques pour la sécurité (par exemple, en réduisant la visibilité durant l'atterrissement ou le décollage). Bien que l'augmentation des occurrences de ce genre de tempêtes ne soit pas reflétée dans les données historiques, l'aéroport de Sydney a documenté une fréquence accrue à court terme (Helen MacInnis, aéroport J.A. Douglas McCurdy de Sydney, communication personnelle, 2015).

Vents

Les vents violents peuvent entraîner le retard, l'annulation ou le réacheminement de vols lorsque les vents latéraux sont trop forts pour permettre aux avions de décoller ou d'atterrir en toute sécurité (United Kingdom Department for Transport, 2014). Le vent peut également endommager l'équipement au sol. Par exemple, en 2012, des vents violents ont abattu un réseau (système d'atterrissement aux instruments) à l'aéroport J.A. Douglas McCurdy de Sydney, en Nouvelle-Écosse, perturbant les opérations d'atterrissement et obligeant NAV CANADA à effectuer des réparations imprévues et coûteuses (Helen MacInnis, aéroport J.A. Douglas McCurdy de Sydney, communication personnelle, 2015).

Les pannes de courant accompagnant les tempêtes de vent peuvent créer de graves problèmes pour le transport aérien. Par exemple, lorsque l'ouragan Arthur a frappé les Maritimes à l'été 2014, l'aéroport international de Fredericton a manqué d'électricité et a dû recourir à un générateur de secours (Andrew Isbill, Autorité aéroportuaire de Fredericton, communication personnelle, 2015). Le générateur a permis à l'aéroport de poursuivre certaines opérations malgré les préoccupations des exploitants quant à sa possible défaillance. La fréquence accrue d'événements de forts vents augmentera les risques associés à ces impacts, bien que les données suggèrent que la vitesse moyenne quotidienne du vent ne devrait pas augmenter considérablement dans la région de l'Atlantique (Loder et coll, 2013).

Température

Le transport aérien dans la région de l'Atlantique est également vulnérable aux changements de température. L'augmentation des cycles de gel et de dégel pose des risques pour la stabilité des pistes, tandis que la chaleur et le froid extrêmes réduisent le rendement des moteurs et l'efficacité énergétique des aéronefs (Transportation Research Board, 2008).

L'augmentation de la turbulence causée par la température plus élevée (densité accrue de l'air) devrait avoir des répercussions sur les vols dans le nord de l'Atlantique d'ici le milieu du siècle. La proportion du temps de vol passé dans des conditions de « turbulence modérée ou supérieure » pour les voyages transatlantiques pourrait augmenter de 40 à 170 % d'ici le milieu du siècle, donnant lieu à des temps de vol plus longs, à une consommation accrue de carburant et à plus d'émissions de gaz à effet de serre (Williams et Joshi, 2013).

7.2 PRATIQUES D'ADAPTATION

Les mesures d'adaptation dans les aéroports de l'Atlantique ne sont pas bien documentées dans le domaine public. Toutefois, l'industrie aérienne dans la région de l'Atlantique est confrontée à un bon nombre des mêmes risques climatiques que les exploitants dans d'autres administrations canadiennes (y compris les événements météorologiques extrêmes et les températures extrêmes). Ainsi, beaucoup des pratiques décrites dans d'autres chapitres du présent rapport s'appliquent au Canada atlantique. Les pratiques générales d'évitement des risques comprennent des procédures normalisées pour accéder aux prévisions météorologiques et planifier les vols et des instruments de bord avancés.

8.0 ÉVALUATIONS DES RISQUES ET ANALYSES COÛTS-AVANTAGES POUR LE TRANSPORT MULTIMODAL

Certaines initiatives du Canada atlantique ont tenu compte de la vulnérabilité du réseau de transport de la région en focalisant sur le plan multimodal. Ces initiatives comprennent des évaluations des risques et d'analyse coûts-avantages des impacts des changements climatiques et des options en matière d'adaptation pour les infrastructures de transport.

8.1 ÉVALUATIONS DES RISQUES

En 2012, le ministère des Pêches et des Océans (MPO) a terminé une évaluation par des experts des risques pour les infrastructures, les voies navigables et les systèmes biologiques dans le Grand bassin aquatique (GBA) de l'Atlantique qui comprend le plateau continental de Terre-Neuve-et-Labrador, la plate-forme néo-écossaise et le golfe du Maine (Ministère des Pêches et des Océans, 2013). Le processus d'évaluation a recensé et évalué six principaux risques en fonction de « l'exposition au risque » (vulnérabilité aux impacts) sur des horizons temporels de 10 et 50 ans. Les risques relatifs au transport incluent une demande accrue pour les services d'urgence, les dommages aux infrastructures et les changements dans la navigabilité des cours d'eau. Parmi ces derniers, il a été déterminé que les plus grands risques sont posés à l'infrastructure par les changements climatiques sur les deux échelles de temps. Les auteurs soulignent que la méthodologie utilisée pour l'évaluation peut être appliquée à l'évaluation des risques à plus petite échelle des ports et des systèmes de transport côtiers du Canada atlantique.

Des institutions publiques et privées élaborent des outils pour aider à l'évaluation des risques liés aux changements climatiques. Par exemple, l'outil (CLIVE) « Coastal Impact Visualization Environment » créé en partenariat par l'Université de l'Île-du-Prince-Édouard (UPEI) et l'Université Simon Fraser, présente une « visite virtuelle » des impacts probables de l'érosion côtière et des ondes de tempête sur l'Île-du-Prince-Édouard. CLIVE est actionné à l'aide d'un contrôleur de jeu et permet à l'utilisateur de « survoler » le littoral de l'Île-du-Prince-Édouard et d'examiner les niveaux de la mer observés et futurs (à des intervalles de 30, 60 et 90 années dans le futur). L'outil quantifie les risques liés à la hausse du niveau de la mer, y compris la perte de terres. Cet outil est utile pour évaluer les infrastructures de transport qui peuvent être vulnérables aux changements côtiers afin de mieux planifier les changements dans l'entretien, la structure ou l'emplacement à court et à long terme (Office of the Vice-President, Research, 2015).

8.2 ANALYSE COÛTS-AVANTAGES

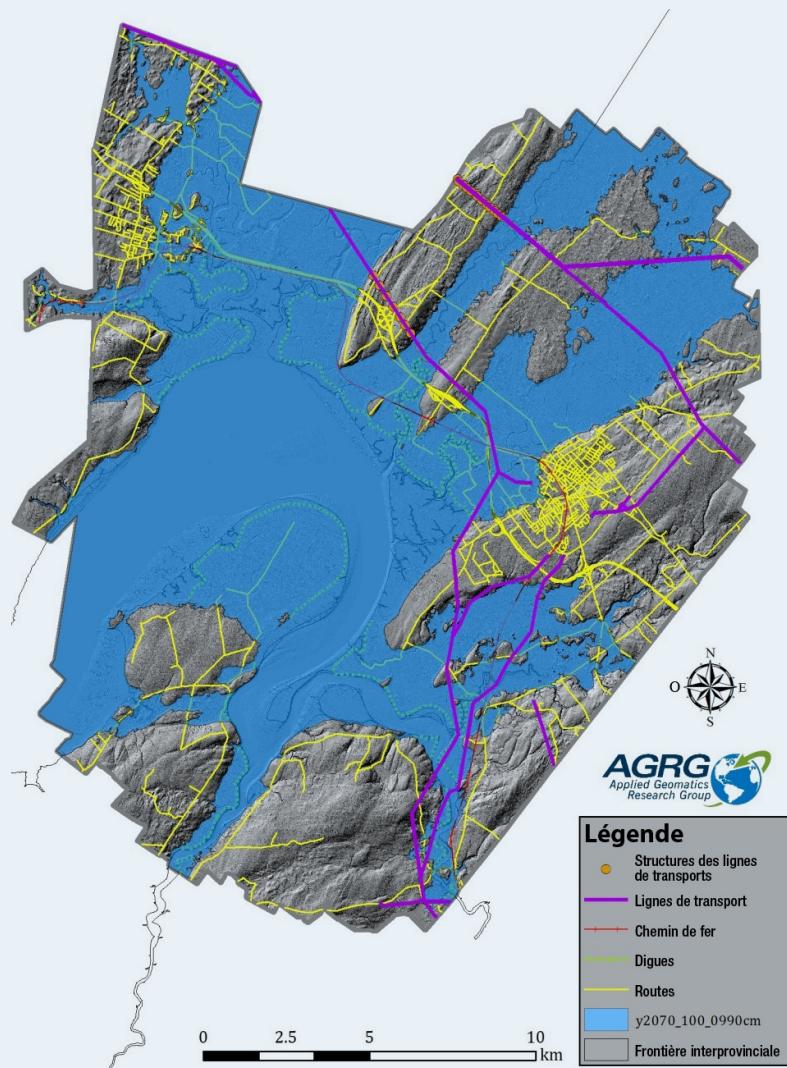
Certains praticiens de la région ont entrepris des analyses coûts-avantages des options en matière d'adaptation afin de s'assurer que les avantages d'une option donnée l'emportent sur les coûts associés aux changements climatiques. Les coûts des dommages directs et indirects (perturbations et fermetures) liés aux impacts climatiques sur les systèmes de transport peuvent être considérables. Du même coup, les efforts d'adaptation peuvent s'avérer coûteux – l'infrastructure est coûteuse à construire, et la mise en place des changements dans les pratiques opérationnelles peut entraîner des retards, de la confusion et d'autres inefficacités à court terme (Füssel, 2007). L'étude de cas 5 présente un résumé de l'analyse coûts-avantages et des options en matière d'adaptation et des impacts climatiques pour l'isthme de Chignecto.

ÉTUDE DE CAS 5 : ADAPTATION AUX RISQUES D'INONDATION ET D'ONDE DE TEMPÊTE DANS L'ISTHME DE CHIGNECTO

L'isthme de Chignecto est l'un des corridors de transport les plus importants du Canada, et le seul pont de terre se reliant la partie continentale du Canada (Nouveau-Brunswick) à la Nouvelle-Écosse. Les zones marécageuses dans l'isthme ont été endiguées dans les années 1700 pour l'agriculture. Depuis ce temps, d'importantes infrastructures ont été construites dans cette région, y compris la Transcanadienne, le chemin de fer du CN et les lignes de transport d'électricité desservant la Nouvelle-Écosse. Le commerce dans l'isthme s'effectue par la route et le rail alors que des marchandises d'une valeur estimée de 50 millions dollars y circulent quotidiennement, et 20 milliards de dollars annuellement.

Des études récentes démontrent la vulnérabilité de la région à la hausse du niveau de la mer et aux inondations par les ondes de tempête (Webster et coll., 2011, Lieske and Bornemann, 2012; and Webster et coll., 2012). En 2100, 38 km de digues, 19 km de chemin de fer et à 19 km de la Transcanadienne pourraient être gravement touchés par des inondations résultant d'un événement de 1 chaque 100 ans (figure 16). Cependant, il y a un manque d'information sur les coûts économiques associés à ces impacts dans la région de Chignecto.

Figure 16 : Un événement d'inondation qui se produit tous les 100 ans (en bleu) dans l'isthme de Chignecto en 2070 par rapport aux infrastructures routières, ferroviaires et de transport d'électricité. (Source : MacDonald et Webster, Groupe de recherche de la géométrie appliquée)



...

Une analyse coûts-avantages (ACA) collaborative des options en matière d'adaptation (y compris le maintien du statu quo) a été entreprise pour évaluer les impacts économiques liés à la hausse du niveau de la mer et aux ondes de tempête sur les infrastructures importantes (autoroutes, voies ferroviaires, digues agricoles et électricité) et le commerce dans l'isthme. Le projet est une collaboration entre les provinces du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse et Ressources naturelles Canada. L'ACA avait trois objectifs :

1. Approfondir les évaluations locales existantes des impacts des changements climatiques et des options en matière d'adaptation en y ajoutant une analyse économique.
2. Quantifier les coûts économiques associés aux dommages liés aux inondations pour le corridor de transport afin de démontrer les avantages (financiers et autres) associés aux possibles options en matière d'adaptation.
3. Appuyer les décideurs à prendre des décisions éclairées concernant les investissements en matière d'adaptation.

Six options en matière d'adaptation ont été évaluées (voir tableau 3). Ces options se concentrent principalement sur les changements qui pourraient être apportés à la gestion des digues agricoles dans l'isthme, qui protègent actuellement les terres agricoles contre les inondations dues à la marée et fournissent une protection supplémentaire pour les routes, les voies ferrées et l'infrastructure. Cependant, les digues ne sont pas conçues pour résister à de violentes tempêtes. Un compte-rendu des options d'adaptation est présenté ci-dessous. L'un des principaux énoncés de l'étude était qu'aucune option ne devait entraîner des risques ou des dommages accrus aux collectivités et aux infrastructures municipales de Sackville et d'Amherst.

Tableau 3 : Options en matière d'adaptation évaluées dans l'ACA de l'isthme de Chignecto.

Numéro de l'option	Option en matière d'adaptation	Description
1	Digues agricoles, emplacements actuels	Élevation ou rehaussement des digues aux emplacements actuels à 10 m. L'infrastructure publique non protégée derrière les digues.
2	Digues agricoles, raccourcissement	Combinaison : Rehaussement des digues et reconstruction à 10 m aux emplacements actuels, mais raccourcissement de certaines sections. Élevation de l'infrastructure.
3	Digues artificielles, emplacements actuels	Construction de digues artificielles sur les digues existantes, adaptées aux conditions de 2070, 1 chaque 100 ans (10 m).
4	Digues artificielles, raccourcissement, protection de l'infrastructure publique seulement	Raccourcir les digues, construire des digues artificielles sur les digues actuelles ainsi que de nouveaux segments adaptés aux conditions de 2070, 1 chaque 100 ans (10 m); éléver les voies ferroviaires non protégées par des digues existantes.
5	Digues artificielles, raccourcissement, protection de toute l'infrastructure	Raccourcir les digues, construire des digues artificielles sur les digues actuelles ainsi que de nouveaux segments adaptés aux conditions de 2070, 1 chaque 100 ans (10 m).
6	Modification du tracé de la Transcanadienne (50 km)	Modifier le tracé d'un tronçon de 50 km de la Transcanadienne.

...

...

RÉSULTATS

L'ACA est une analyse de haut niveau destinée à fournir une orientation stratégique concernant les options en matière d'adaptation – n'est pas destinée pour orienter les décisions en matière d'opérations ou de coûts.

Le coût des impacts associés aux changements climatiques au cours de la période 2015-2064 est estimé à 124 millions de dollars d'aujourd'hui. Lorsqu'on tient compte des pertes commerciales potentielles, le coût augmente à 435 millions de dollars.

L'option privilégiée est une approche d'adaptation selon laquelle des digues artificielles sont conçues pour protéger contre les inondations associées à un événement de 1 chaque 100 ans en 2070 (option 3). Les digues seraient raccourcies (par rapport à leur longueur actuelle) et protégeraient toutes les infrastructures (routes, voies ferrées et infrastructure électrique). Le coût de l'option privilégiée est estimé à environ 93 millions de dollars et sa valeur actualisée nette – soit la différence entre les avantages de l'adaptation et les coûts liés aux impacts des changements climatiques (réduits pour l'évaluation en dollars d'aujourd'hui à 4 %) – est estimée à 31 millions de dollars. Lorsque les pertes commerciales dues aux impacts des changements climatiques sont comptabilisées de façon globale, la valeur actualisée nette de l'option privilégiée s'élève à 278 millions de dollars.

Dans ce cas, le coût associé à la prise d'aucune mesure d'adaptation dépasse le coût associé au renouvellement de l'infrastructure.

Les leçons tirées du projet portent sur les défis de l'intégration des intérêts divergents des intervenants – toutefois, les praticiens estiment que le projet a favorisé l'échange d'informations autour d'une menace commune. Étant donné qu'historiquement, les ministères agricoles et des transports travaillent séparément en règle générale, le processus est plus susceptible de fournir une approche coordonnée pour la gestion future de l'isthme. L'étude met en évidence la valeur des digues et a incité tous les intervenants à réfléchir de manière collaborative et critique sur la façon dont les actifs sont protégés dans la région de Chignecto.

Rédigé avec la collaboration de Jeff Hoyt (Gouvernement du Nouveau-Brunswick) et Sabine Dietz (Aster Group Environmental Services).

9.0 LACUNES ET CONCLUSIONS

Plusieurs lacunes et obstacles liés à l'adaptation aux changements climatiques dans le secteur des transports au Canada atlantique ressortent clairement. Tout d'abord, on note l'absence d'évaluations de la vulnérabilité et de données détaillées propres au transport dans la région de l'Atlantique. Bien que les protocoles d'évaluation des risques aient été appliqués pour évaluer les vulnérabilités climatiques dans certains cas, on ne sait pas précisément quelles routes, voies ferrées, aéroports et ports sont les plus et les moins vulnérables. En outre, pour certaines tendances météorologiques importantes, comme le brouillard et le vent, il existe peu de données et d'ouvrages pertinents et publiés sur le climat desquels on peut tirer des conclusions. Le vent et le brouillard ont des répercussions majeures sur la navigation maritime et aérienne dans la région de l'Atlantique, donc d'autres recherches pourraient mieux orienter la planification et les opérations.

La recherche effectuée pour le présent chapitre suggère également que les risques pour les actifs et les opérations posés par les phénomènes météorologiques extrêmes sont plus apparents pour les gestionnaires d'infrastructures publiques et privées que ceux liés aux changements dans les paramètres climatiques à long terme (c.à.d. la hausse du niveau de la mer et des températures ambiantes). Une plus grande attention est accordée par les municipalités, les praticiens et les exploitants d'infrastructures (par exemple le port d'Halifax, le port de Saint John) à la fréquence accrue des phénomènes météorologiques extrêmes qu'aux autres impacts à long terme. Ce n'est pas surprenant compte tenu des ressources publiques limitées et des coûts élevés encourus à la suite d'inondations et d'autres événements catastrophiques.

Probablement pour la même raison, les praticiens et les chercheurs réalisant les évaluations des risques et la planification relative à l'adaptation au Canada atlantique reconnaissent les défis liés à la mobilisation des intervenants. La pertinence des changements climatiques pour les propriétaires d'entreprises peut être difficile à expliquer – la hausse du niveau de la mer est un processus à long terme qui ne s'harmonise pas parfaitement bien aux cycles économiques conventionnels.

Malgré certaines de ces difficultés, le présent chapitre a recensé un certain nombre d'efforts d'adaptation tangibles dans l'industrie du transport, un seul parmi de nombreux secteurs au Canada atlantique qui examine comment s'adapter aux risques climatiques émergents (Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique, 2016). L'adaptation aux changements climatiques est une préoccupation croissante dans le secteur du transport, et les intervenants investissent et planifient de plus en plus en raison des changements climatiques. Les praticiens sont conscients que la demande relative aux services de transport est appelée à changer en réponse aux perturbations de service et aux dommages physiques causés par les changements climatiques, et les mesures prises afin d'améliorer l'accès économique aux marchés nouveaux ou élargis vont modifier l'offre et la demande de marchandises dans la région. La mise en place d'une infrastructure de transport efficace et résistante au moyen de la collaboration et de l'adaptation jouera un rôle important pour réduire les impacts et optimiser les avantages liés aux changements climatiques.

10.0 ANNEXE

Les tableaux A1 à A4 : Projections des températures et des précipitations par provinces de la région de l'Atlantique jusqu'en 2100 selon trois horizons temporels (2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100). Les périodes saisonnières comprennent 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.

Tableau A1 : Projections des températures et des précipitations pour le Nouveau-Brunswick.

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changement projeté par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e – 75 ^e centiles; 50 ^e centile entre parenthèses)		
			Début du siècle		Fin du siècle
			2016-2035	2046-2065	2081-2100
PREC 2.6 (scénario de faible croissance des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	+1,1-10,1 (+4,8)	+1,0-12,4 (+6,7)	+0,9-9,9 (+3,5)
		Printemps	+1,4-8,5 (+5,4)	+2,1-10,2 (+5,9)	+2,2-10,5 (+7,3)
		Été	-3,4-+5,8 (+2,8)	-2,7-8,6 (+1,1)	-0,6-10,1 (+3,9)
		Automne	-1,9-+4,6 (+1,9)	-2,7-+4,2 (+0,6)	-2,8-+6,1 (+2,7)
	Températures (°C)	Hiver	+0,8-1,4 (+1,1)	+1,3-2,3 (+1,7)	+1,4-2,7 (+2,1)
		Printemps	+0,6-1,2 (+0,9)	+0,8-2,0 (+1,6)	+0,7-2,0 (+1,2)
		Été	+0,8-1,4 (+1,0)	+1,0-2,1 (+1,5)	+0,8-1,8 (+1,4)
		Automne	+0,9-1,4 (+1,0)	+1,2-2,3 (+1,6)	+1,0-2,0 (+1,5)
	Précipitations (%)	Hiver	-0,7-+10,1 (+5,2)	+3,6-15,2 (+8,9)	+7,0-19,1 (+11,9)
		Printemps	-0,6-+8,8 (+4,1)	+3,9-13,2 (+10,1)	+6,1-19,1 (+12,5)
		Été	-2,2-+8,2 (+3,0)	+0,2-9,1 (+3,9)	-0,7-+11,3 (+4,5)
		Automne	-2,5-+5,9 (+1,1)	-0,8-+9,5 (+5,9)	-3,1-+6,7 (+1,4)
PREC 4.5 (scénario de croissance moyenne des émissions)	Températures (°C)	Hiver	+0,7-1,8 (+1,3)	+2,0-3,3 (+2,7)	+2,9-4,3 (+3,5)
		Printemps	+0,6-1,5 (+1,0)	+1,4-2,5 (+1,8)	+1,8-3,2 (+2,7)
		Été	+0,7-1,4 (+1,1)	+1,5-2,6 (+2,1)	+2,0-3,5 (+2,5)
		Automne	+0,9-1,5 (+1,1)	+1,7-2,6 (+2,1)	+2,2-3,6 (+2,5)

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changement projeté par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e – 75 ^e centiles; 50 ^e centiles entre parenthèses)		
			Début du siècle	Milieu du siècle	Fin du siècle
			2016-2035	2046-2065	2081-2100
PREC 8.5 (scénario de croissance élevée des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	-0,2+11,3 (+5,8)	+6,0-17,3 (+11,4)	+13,1-28,6 (+19,0)
		Printemps	+0,1-7,3 (+3,4)	+6,1-15,1 (+10,6)	+12,0-23,0 (+16,6)
		Été	-2,3+6,6 (+3,2)	-1,3+9,9 (+4,2)	-1,1+14,8 (+7,8)
		Automne	-4,2+3,7 (-0,4)	-1,0+10,4 (+3,5)	+1,2-10,3 (+4,3)
	Températures (°C)	Hiver	+1,0-1,9 (+1,4)	+3,0-4,4 (+3,6)	+5,6-7,3 (+6,4)
		Printemps	+0,8-1,5 (+1,0)	+2,2-3,5 (+2,7)	+4,2-6,0 (+4,6)
		Été	+1,0-1,6 (+1,2)	+2,4-3,7 (+3,0)	+4,4-6,3 (+5,4)
		Automne	+1,0-1,8 (+1,3)	+2,5-3,8 (+3,1)	+4,4-6,2 (+5,1)

Tableau A2 : Projections des températures et des précipitations pour Terre-Neuve-et-Labrador.

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changement projeté par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e – 75 ^e centiles; 50 ^e centiles entre parenthèses)		
			Période rapprochée	Milieu du siècle	Fin du siècle
			2016-2035	2046-2065	2081-2100
PREC 2.6 (scénario de faible croissance des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	-2,4+8,1 (+3,2)	-0,1+11,8 (+5,8)	+1,0-12,9 (+6,3)
		Printemps	+1,2-10,2 (+5,3)	+1,7-13,3 (+8,1)	+2,7-13,3 (+7,9)
		Été	-0,2+7,3 (+3,5)	+0,8-9,8 (+4,8)	+0,3-8,8 (+4,3)
		Automne	+0,7-8,1 (+4,3)	+1,1-9,0 (+5,3)	+1,9-9,8 (+6,0)
	Températures (°C)	Hiver	+0,8-1,8 (+1,3)	+1,4-3,0 (+2,2)	+1,3-3,3 (+2,3)
		Printemps	+0,4-1,2 (+0,8)	+0,7-1,9 (+1,2)	+0,5-1,9 (+1,1)
		Été	+0,5-1,2 (+0,8)	+0,7-1,8 (+1,2)	+0,6-1,7 (+1,2)
		Automne	+0,7-1,3 (+1,0)	+1,0-2,1 (+1,6)	+0,9-2,1 (+1,5)

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changement projeté par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e – 75 ^e centiles; 50 ^e centiles entre parenthèses)		
			Période rapprochée	Milieu du siècle	Fin du siècle
			2016-2035	2046-2065	2081-2100
PREC 4.5 (Scénario de croissance moyenne des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	-0,3+11,7 (+5,0)	+2,9-16,1 (+9,5)	+6,5-20,8 (+14,5)
		Printemps	+0,7-11,5 (+6,0)	+3,8-13,7 (+8,5)	+5,1-17,4 (+10,5)
		Été	-0,6+7,8 (+3,3)	+0,7-10,7 (+5,1)	+2,2-10,5 (+5,9)
		Automne	-0,6+7,2 (+3,2)	+3,3-10,2 (+7,2)	+2,7-10,7 (+7,1)
	Températures (°C)	Hiver	+0,8-2,0 (+1,3)	+2,2-3,7 (+2,9)	+2,9-4,9 (+4,1)
		Printemps	+0,4-1,2 (+0,8)	+1,1-2,3 (+1,6)	+1,6-2,8 (+2,1)
		Été	+0,5-1,3 (+0,8)	+1,2-2,3 (+1,7)	+1,5-3,0 (+2,2)
		Automne	+0,8-1,3 (+1,0)	+1,5-2,5 (+1,8)	+1,9-3,3 (+2,3)
PREC 8.5 (Scénario de croissance élevée des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	+0,6-10,6 (+4,8)	+6,5-20,7 (+12,0)	+14,2-34,8 (+23,0)
		Printemps	+0,8-9,0 (+5,4)	+5,6-15,8 (+10,2)	+12,0-28,5 (+18,9)
		Été	-1,7+7,9 (+3,5)	+2,2-11,2 (+6,6)	+5,3-18,6 (+11,5)
		Automne	+0,2-7,2 (+3,8)	+4,0-11,5 (+7,8)	+7,2-18,9 (+12,2)
	Températures (°C)	Hiver	+1,0-2,2 (+1,5)	+3,4-5,2 (+4,3)	+6,5-9,0 (+7,7)
		Printemps	+0,5-1,4 (+1,0)	+2,0-3,1 (+2,4)	+3,8-6,0 (+4,7)
		Été	+0,8-1,3 (+1,0)	+1,9-3,2 (+2,5)	+3,9-5,9 (+4,6)
		Automne	+0,9-1,5 (+1,2)	+2,3-3,5 (+2,7)	+4,2-6,2 (+4,8)

Tableau A3 : Projections des températures et des précipitations pour la Nouvelle-Écosse.

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changement projeté par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e – 75 ^e centiles; 50 ^e centiles entre parenthèses)		
			Période rapprochée	Milieu du siècle	Fin du siècle
				2016-2035	2046-2065
PREC 2.6 (scénario de faible croissance des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	-0,1-6,2 (+2,8)	-2,2-+7,0 (+2,5)	+0,3-7,8 (+3,0)
		Printemps	+1,7-8,0 (+4,0)	+0,9-10,1 (+3,6)	+1,9-9,8 (+6,6)
		Été	-3,9-+7,3 (+2,8)	-3,8-+8,0 (+2,2)	-2,9-+9,2 (+2,6)
		Automne	-1,8-+4,2 (+1,5)	-2,7-+5,0 (+1,7)	-2,1-+6,5 (+2,2)
	Températures (°C)	Hiver	+0,7-1,3 (+1,0)	+1,1-2,1 (+1,5)	+1,0-2,5 (+1,9)
		Printemps	+0,6-1,2 (+0,9)	+0,8-1,9 (+1,4)	+0,7-1,9 (+1,3)
		Été	+0,7-1,2 (+0,9)	+1,0-1,8 (+1,5)	+0,9-1,8 (+1,3)
		Automne	+0,8-1,3 (+1,0)	+1,1-2,1 (+1,5)	+1,0-1,8 (+1,4)
	Précipitations (%)	Hiver	-1,8-+6,1 (+2,8)	+2,9-9,3 (+5,4)	+4,1-14,4 (+8,7)
		Printemps	-0,8-+7,6 (+3,5)	+2,8-13,7 (+8,1)	+4,0-16,5 (+8,6)
		Été	-2,2-7,6 (+3,0)	-3,6-9,2 (+4,4)	-1,3-9,8 (+6,4)
		Automne	-0,9-+6,3 (+2,7)	-1,3-+9,1 (+4,8)	-3,7-+9,1 (+3,8)
PREC 4.5 (scénario de croissance moyenne des émissions)	Températures (°C)	Hiver	+0,7-1,6 (+1,2)	+1,7-2,9 (+2,3)	+2,4-3,7 (+2,9)
		Printemps	+0,6-1,4 (+1,0)	+1,5-2,2 (+1,7)	+1,8-2,9 (+2,5)
		Été	+0,7-1,5 (+1,0)	+1,5-2,4 (+1,9)	+1,9-3,2 (+2,4)
		Automne	+0,8-1,4 (+1,1)	+1,6-2,5 (+1,9)	+2,1-3,5 (+2,4)

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changement projeté par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e – 75 ^e centiles; 50 ^e centiles entre parenthèses)		
			Période rapprochée	Milieu du siècle	Fin du siècle
			2016-2035	2046-2065	2081-2100
PREC 8.5 (scénario de croissance élevée des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	+0,6-6,7 (+3,7)	+6,5-12,5 (+8,3)	+14,2-21,1 (+13,9)
		Printemps	+0,5-8,6 (+4,4)	+3,8-13,8 (+7,6)	+7,3-18,1 (+12,8)
		Été	-4,5-+5,8 (+1,7)	-2,2-+8,5 (+4,3)	-3,0-+15,3 (+6,8)
		Automne	-4,6-+4,0 (-0,3)	-1,8-+8,8 (+4,0)	-0,6-8,6 (+3,7)
	Températures (°C)	Hiver	+9-1,6 (+1,3)	+2,5-3,6 (+3,0)	+4,7-6,2 (+5,4)
		Printemps	+0,7-1,4 (+1,0)	+2,1-3,2 (+2,5)	+3,9-5,5 (+4,4)
		Été	+0,9-1,5 (+1,1)	+2,2-3,4 (+2,7)	+4,1-6,6 (+4,9)
		Automne	+0,9-1,6 (+1,2)	+2,3-3,6 (+3,0)	+4,2-6,0 (+4,8)

Tableau A4 : Projections des températures et des précipitations pour l'Île-du-Prince-Édouard.

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changement projeté par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e – 75 ^e centiles; 50 ^e centiles entre parenthèses)		
			Période rapprochée	Milieu du siècle	Fin du siècle
			2016-2035	2046-2065	2081-2100
PREC 2.6 (Scénario de faible croissance des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	+1,2-8,7 (+3,0)	-2,3-8,8 (+5,2)	+2,1-8,0 (+5,3)
		Printemps	+1,3-7,8 (+5,6)	+1,1-9,8 (+6,2)	+4,1-9,8 (+7,7)
		Été	-3,7-+8,1 (+0,6)	-4,3-+7,7 (+1,9)	-1,4-+6,6 (+2,7)
		Automne	-3,3-+4,0 (+1,6)	-5,2-+5,5 (+0,9)	-3,3-+5,5 (+2,8)
	Températures (°C)	Hiver	+0,8-1,6 (+1,1)	+1,3-2,5 (+1,7)	+1,3-2,9 (+2,1)
		Printemps	+0,7-1,2 (+0,9)	+0,9-2,1 (+1,5)	+0,9-2,3 (+1,3)
		Été	+0,7-1,3 (+0,9)	+1,0-2,1 (+1,6)	+0,8-1,9 (+1,4)
		Automne	+0,8-1,3 (+1,0)	+1,1-2,2 (+1,5)	+1,0-1,9 (+1,4)

Scénario climatique (profil représentatif de l'évolution de concentration)	Variable climatique	Saison	Changement projeté par rapport à la période de référence 1986-2005 (25 ^e - 75 ^e centiles; 50 ^e centile entre parenthèses)		
			Période rapprochée	Milieu du siècle	Fin du siècle
			2016-2035	2046-2065	2081-2100
PREC 4.5 (Scénario de croissance moyenne des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	-1,2-+8,1 (+5,3)	+2,5-11,3 (+7,5)	+5,1-15,1 (+10,8)
		Printemps	-2,0-+7,9 (+3,1)	+3,3-14,3 (+8,5)	+6,6-20,4 (+8,8)
		Été	-3,1-+9,4 (+3,1)	-1,4-+12,2 (+3,9)	-2,1-+9,8 (+6,1)
		Automne	-0,3-+5,5 (+1,6)	-0,3-+8,1 (+5,0)	-4,7-+9,5 (+1,9)
	Températures (°C)	Hiver	+0,8-1,8 (+1,3)	+1,8-3,2 (+2,7)	+2,7-4,1 (+3,4)
		Printemps	+0,8-1,4 (+1,1)	+1,6-2,6 (+1,7)	+1,9-3,1 (+2,5)
		Été	+0,7-1,4 (+1,1)	+1,6-2,5 (+2,0)	+2,0-3,3 (+2,5)
		Automne	+0,8-1,5 (+1,0)	+1,6-2,6 (+2,1)	+2,0-3,4 (+2,5)
PREC 8.5 (Scénario de croissance élevée des émissions)	Précipitations (%)	Hiver	+1,4-9,3 (+5,3)	+3,4-13,8 (+10,7)	+8,3-22,1 (+17,1)
		Printemps	+0,7-8,7 (+5,2)	+4,0-13,1 (+9,0)	+8,6-22,5 (+14,9)
		Été	-6,0-+5,9 (+2,5)	-2,4-+9,4 (+5,4)	-1,8-+15,6 (+6,3)
		Automne	-4,2-+3,6 (-0,6)	-3,0-+8,5 (+3,8)	+0,4-+8,6 (+3,7)
	Températures (°C)	Hiver	+1,0-1,8 (+1,4)	+2,7-4,1 (+3,4)	+5,3-6,7 (+6,0)
		Printemps	+0,8-1,6 (+1,1)	+2,1-3,3 (+2,6)	+4,3-6,0 (+4,7)
		Été	+1,0-1,6 (+1,2)	+2,4-3,4 (+2,8)	+4,2-6,0 (+5,3)
		Automne	+0,9-1,6 (+1,2)	+2,3-3,7 (+2,9)	+4,2-6,0 (+4,8)

RÉFÉRENCES

- Affaires autochtones et Développement du Nord Canada. (2015, 27 mars). *Le gouvernement Harper investit dans une approche proactive pour éviter des inondations printanières potentielles dans les Premières Nations du Nouveau Brunswick* [Communiqué de presse]. Repéré à http://nouvelles.gc.ca/web/article-fr.do?nid=956479&_ga=1.132827787.442564653.1446732274
- Agence de promotion économique du Canada atlantique. (2012). *L'économie du Canada atlantique*. Repéré à <http://www.acoa-apeca.gc.ca/fra/publications/Rapportsparlementaires/Pages/LeconomieduCanadaatlantique.aspx?ProgramID=1>
- AMEC Inc. (2011). *Climate change adaptation measures for Greater Moncton Area, New Brunswick*. Repéré à http://atlanticadaptation.ca/sites/discoveryspace.uepi.ca.acasa/files/Adaptation_Measures_Greater_Moncton-2011.pdf
- Andrey, J., Hambly, D., Chaumont, D., et Rapaic, M. (2013). *Climate change and road safety : Projections within urban areas*. Ottawa, ON : Association des transports du Canada.
- Andrey, J., et Mills, B. (2003). Climate change and the Canadian transportation system : Vulnerabilities and adaptations. Dans J. Andrey et C. Knapper (Éds.), *Weather and transportation in Canada* (pp. 235-279). Publication series number 55, Department of Geography, University of Waterloo.
- Arisz, H. (s.d.) *Effects of climate change on stormwater management (SWM)* [Présentation]. Repéré à <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Climate-Climatiques/Presentations/StormwaterManagement.pdf>
- Association des aéroports du Canada Atlantique. (2012). *The economic impact of air passenger and cargo traffic through Atlantic Canada's airports is over \$2.6 billion*. Repéré à <http://www.acairports.ca/index.php?id=2>
- Association des chemins de fer du Canada. (2015). *Tendances ferroviaires 2015*. Repéré à <http://www.railcan.ca/fr/publications/trends>
- 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.
- Batterson, M., Liverman, D., Ryan, J., et Taylor, D. (1999). *The assessment of geological hazards and disasters in Newfoundland : An update*. St. John's, NL : Government of Newfoundland and Labrador, Department of Natural Resources, Geological Survey Report 95-1.
- Bowyer, P. (2003a). *L'aspect scientifique de l'ouragan Juan - Classification de l'ouragan Juan*. Gouvernement du Canada. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=258CBC16-1>
- Bowyer, P. (2003b). *La crue des eaux et les vagues causées par l'ouragan Juan à Halifax*. Gouvernement du Canada. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=BAAEAC12-1>
- Boyle, J., Cunningham, M., and 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
- Bradshaw, R. (2015, 6 mars). *Potholes open up in Halifax roads as rough Atlantic winter continues*. Global News. Repéré à <http://globalnews.ca/news/1866676/potholes-open-up-in-halifax-roads-as-rough-atlantic-winter-continues/>
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2003). *Rapport d'enquête ferroviaire R02M0050: Déraillement en voie principale du train de marchandises Q13711-13 exploité par le Canadien National au point milliaire 38,85 de la subdivision Bedford à Milford (Nouvelle-Écosse)*. 13 août 2002. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/2002/r02m0050/r02m0050.asp>
- Bush, E.J., Loder, J.W., James, T.S., Mortsch, L.D. et Cohen, S.J. (2014). Un aperçu des changements climatiques au Canada. 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. 23-64). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Cape Breton Post. (2015, 3 mars). *Weather delays Marine Atlantic crossings between N.S. and N.L.* Repéré à <http://www.capecbretonpost.com/News/Local/2015-03-03/article-4063644/Weather-delays-Marine-Atlantic-crossings-between-N.S.-and-N.L./1>
- Catto, N., Foote, D., Locke, W., DeYoung, B., Edinger, E., Ingram, D., Karn, J., et Stratman, J. (2006). *CCIAP Project A-804 : Impacts of storms and winds on transportation in Southwestern Newfoundland*. Repéré à https://www.mun.ca/geog/research/CCIAP_Project_A_804.pdf
- CBC News. (2012, 8 février). *Kennebascasis River ice road re-opened*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/new-brunswick/kennebascasis-river-ice-road-re-opened-1.1186105>
- CBC News. (2014a, 7 octobre). *Cape Breton Central Nova Scotia Railway asks to abandon line*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/nova-scotia/cape-breton-central-nova-scotia-railway-asks-to-abandon-line-1.2791539>
- CBC News. (2014b, 6 novembre). *Engineer missing after Quebec freight train derails in landslide*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/montreal/engineer-missing-after-quebec-freight-train-derails-in-landslide-1.2825969>
- CBC News. (2014c, 10 décembre). *Nova Scotia facing travel delays as nor'easter pounds province*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/nova-scotia/nova-scotia-facing-travel-delays-as-nor-easter-pounds-province-1.2867701>
- CBC News. (2015a, 27 janvier). *Maritime storm : Roads closed, flights cancelled as blizzard hits*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/nova-scotia/maritime-storm-roads-closed-flights-cancelled-as-blizzard-hits-1.2932937>

- CBC News. (2015b, 10 mars). *Ice-jammed ferry in strait off Newfoundland wears down passenger patience*. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/ice-jammed-ferry-in-strait-off-newfoundland-wears-down-passenger-patience-1.2988563>
- CBCL, Ltd. (2012). *Impacts of climate change on stormwater management : Stormwater management plan update (Town of Stratford)*. Repéré à http://www.townofstratford.ca/wp-content/uploads/2013/09/SWM_Climate_Change_Adaption-2012.pdf
- 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.
- Chu, J. (2012, 13 février). 'Storm of the century?' Try 'storm of the decade.' MIT News Office. Repéré à <http://newsoffice.mit.edu/2012/storm-of-the-decade-0213>
- Cirtwill, C., Crowley, B., et Frost, J. (2001). Port-ability: A private sector strategy for the Port of Halifax. *Atlantic Institute for Market Studies*. Repéré à <http://www.aims.ca/site/media/aims/port.pdf>
- Cruise Lines International Association. (2013). *Cruise ships drive expanding tourism and \$2.38 billion in economic impacts across Canada*. Repéré à <http://www.clia-nwc.com/cruise-fast-facts/>
- Curtis, F., et Ehrenfeld, D. (2012). The new geography of trade: Globalization's decline may stimulate local recovery. *Solutions*, 3(1), 35-40.
- Cuthbertson, R. (2015, 5 mars). CN Rail backlog not just weather related, says union. CBC News. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/nova-scotia/cn-rail-autoport-backlog-not-just-weather-related-says-union-1.2982835>
- Daigle, R. (2011). *Coastal flooding issues*. Atlantic Climate Adaptation Solutions Association. Repéré à <http://atlanticadaptation.ca/sites/discoveryspace.upei.ca.acasa/files/Coastal%20Flood%20Issues.pdf>
- Davidson-Arnott, R., et Ollerhead, J. (2011). *Coastal erosion and climate change*. Atlantic Climate Solutions Association. Repéré à http://www.csrpa.ca/sites/default/files/fichiers/coastal_erosion_and_climate_change_0.pdf
- Davies, M., MacDonald, N., et Boyd, G. (2010). Development of a life-cycle costing approach for roads exposed to storms and sea level rise. In *proceedings of Responding to Climate Change: Best Practices session*, 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Halifax, NS, 26-29 septembre.
- Dobney, K., Baker, C., Quinn, A., et Chapman, L. (2008). *Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in the UK*. International Union of Railways. Repéré à http://www.uic.org/cdrom/2008/11_wcr2008/pdf/I.3.1.1.1.pdf
- 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>
- Dupont, F., Hannah, C., et Greenberg, D. (2005). Modeling the sea level of the Upper Bay of Fundy. *AtmosphereOcean*, 43(1), 33-47.
- Environnement Canada. (2010). *Les inondations au Canada - Les provinces de l'Atlantique*. Repéré à <https://ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=4FCB81DD-1>
- Environnement Canada. (2013a). *Les causes des inondations - les embâcles*. Repéré à <https://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=E7EF8E56-1#section3>
- Environnement Canada. (2013b). *Les phénomènes météorologiques les plus importants du 20e siècle*. <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=6a4a3ac5-1>
- Environnement Canada. (2013c). *Les dix événements météorologiques les plus marquants au Canada en 2010. Tempête historique : neige, vents violents et inondations*. Repéré à <https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=7ABD10BF-1>
- Environnement Canada. (2015a). *Bulletin des tendances et des variations climatiques - Résumé de l'année 2014*. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/sc-cs/default.asp?lang=Fr&n=60AC2030-1>
- Environnement Canada. (2015b). *Le Service canadien des glaces. Climatologie des glaces : Résumé saisonnier pour l'Est du Canada - Hiver 2014-2015*. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/glaces-ice/default.asp?lang=Fr&n=E444163-1>
- Environnement Canada et Agriculture et Agroalimentaire Canada. (1999). *Cadre écologique national pour le Canada*. Repéré à <http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/ecostrat/index.html>
- Evan, S., Cruden, D., Bobrowsky, P., Guthrie, R., Keegan, T., Liverman, D., et Perret, D. (2005). *Landslide risk in Canada : A review of recent developments*. Dans O. Hungr, R. Fell, R. Couture, et E. Eberhardt (Éds.), *Landslide Risk Management* (pp. 351-363). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Fenech, A. (2014). *Assessment of the risk to Prince Edward Island's Coastal residences, infrastructure and heritage from a changing climate. Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique*.
- Finck, P. (2013). *Coastal process, geohazard, erosion and infrastructure sustainability studies at Cabots Landing Provincial Park, Port Shoreham Beach Provincial Park, and the proposed replacement for Plaster Provincial Park, Nova Scotia. Report of activities*. Mineral Resources Branch. Repéré à http://novascotia.ca/natr/meb/data/pubs/14re01/14re01_Finck.pdf
- Fleming, M. (2014). "Roads less travelled": dependency and resilience in locally-owned trucking companies on the Great Northern Peninsula of Newfoundland and Labrador and the Acadian Peninsula of New Brunswick. Doctoral (PhD) thesis, Memorial University of Newfoundland.
- Forbes, D., Manson, G., Charles, J., Thompson, K., et Taylor, R. (2009). *Halifax Harbour extreme water levels in the context of climate change : Scenarios for a 100-year planning horizon*. Geological Survey of Canada, Open File 6346, iv+22 p.

Forum canadien du climat. (2014). Forecasting a sea of change : Lessons from Atlantic Canada. Issue Paper, Vol. 2(1). Repéré à http://www.climateforum.ca/wp-content/uploads/2014/10/CCF-Issues-SeaOfChange_web.pdf

Füssel, H. (2007). Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustain Sci* (2007) 2: 265.

Gao, Y., Leung, R., Lu, J., et Masoto, G. (2015). Persistent cold air outbreaks over North America in a warming climate. *Environmental Research Letters*, 10, 1-12.

Gauthier, A. (2014). New Brunswick's merchandise trade with the world. Library of Parliament Trade and Investment. Repéré à <http://www.parl.gc.ca/Content/LOP/ResearchPublications/2014-35-e.pdf>

Genesee et Wyoming Inc. (s.d.). Cape Breton and Nova Scotia Railway (CBNS) overview. Repéré à http://www.gwrr.com/operations/railroads/north_america/cape_breton_central_nova_scotia_railway

Gouvernement du Canada. (2014). Une nouvelle technologie pour la prévision des conditions météorologiques et du régime des vagues contribuera à la sécurité des gens de mer. Repéré à http://nouvelles.gc.ca/web/article-fr.do?nid=876159&campaign=Facebook-ENG&_ga=1.191547183.44256453.1446732274

Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2012). Détails sur l'inondation - 1970-02-02 - 1970-02-06. Repéré à <http://www.elegel.gnb.ca/0001/fr/lnondation/D%C3%A9tails/251>

Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2014). Plan d'action du Nouveau-Brunswick sur les changements climatiques 2014-2020. Repéré à <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Climate-Climatiques/PlanActionChangementsClimatiques2014-2020.pdf>

Government of Prince Edward Island. (2015, 16 juin). Update on Souris bridge construction [Communiqué de presse]. Repéré à <http://www.gov.pe.ca/index.php3/publications/mvr/pt/taxan-dland/premier/mvr/newsroom/index.php3?number=news-&newsnumber=10236&dept=&lang=E>

Graham, J., et Musselman, R. (s.d.). Coastal climate change adaptation : An opportunity for Nova Scotia's towns & municipalities. Repéré à https://www.ecologyaction.ca/files/images-documents/file/Coastal/info_sheets_summaries.pdf.

Gregg, R. M. (2010). Sea level rise and the construction of the Confederation Bridge in the Gulf of Saint Lawrence [Case study on a project of Strait Crossing Bridge Limited]. Product of EcoAdapt's State of Adaptation Program.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2013). Summary for policymakers. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignore, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, et P.M. Midgley (Éds.), *Climate change 2013 : The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK et New York, USA : Cambridge University Press.

Halifax Regional Municipality. (2012). Award – Unit price tender no. 12-211, Installation of armour stone breakwater (Phase I) – Cow Bay Road – East Region. Repéré à <http://www.halifax.ca/council/agendas/documents/12113ca1011.pdf>

Hatvany, M. (2002). The origins of the Acadian aboiteau: An environmental historical geography. *Historical Geography*, 30, 121-137.

Henderson, J. (2015, 27 mars). CN Autoport still facing delays. CBC News. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/nova-scotia/cn-autoport-still-facing-delays-1.3012414>

Heritage Newfoundland and Labrador. (s.d.). Flooding and landslides. Repéré à <http://www.heritage.nf.ca/environment/tablemap4.html>

Ingénieurs Canada. (2014). PIEVC Case study : Town of Placentia, Newfoundland, water resources infrastructure.

James, T., Henton, J., Leonard, L., Darlington, A., Forbes, D., et Craymer, M. (2014). *Relative sea-level projections in Canada and the adjacent mainland United States*. Commission géologique du Canada. Ressources naturelles Canada. Dossier public 7737. Repéré à http://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/geott/ess_pubs/295/295574/of_7737.pdf

Kessler, E. (2011). Stormwater strategies : Cities prepare aging infrastructure for climate change. *Environmental Health Perspectives*, 119(2), 514-519.

Lambert-Racine, M. (2013). Le commerce international de marchandises de Terre-Neuve-et-Labrador. La Bibliothèque du Parlement. Série commerce et investissement. Repéré à <http://www.lop.parl.gc.ca/content/lop/ResearchPublications/2013-40-f.pdf>

Leys, V. (2009). Sea-level rise and storm events. Dans *The State of Nova Scotia's Coast : Technical Report* (chapitre 7). CBCL Ltd. et Province of Nova Scotia. Repéré à <http://www.novascotia.ca/coast/documents/report/Coastal-Tech-Report-Nov-09.pdf>

Lieske, D. et Bornemann, J. (2012). *Coastal dykelands in the Tantramar area : Impacts of climate change on dyke erosion and flood risk*. Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique. Repéré à <http://atlanticadaptation.ca/sites/discoveryspace.upei.ca.acasa/files/Tantramar-CoastalDykelands-ImpactsofClimateChange-MTA-2011.pdf>

Lim, N.H.Y., Park, N.-H., et Kang, Y.J. (2003). Stability of continuous welded rail. *Computers and Structures*, 81, 2219-2236.

Liverman, D., Forbes, D., et Boger, R. (1994). Coastal monitoring on the Avalon Peninsula. Newfoundland Department of Mines and Energy, Geological Survey Branch, Report 94-1, 17-27. Repéré à <http://www.nr.gov.nl.ca/mines&en/geosurvey/publications/cr1994/Liverman.pdf>

Loder, J., Han, G., Galbraith, P., J. Chassé, J., et van der Baaren, A. (Éds.). (2013). *Aspects of climate change in the Northwest Atlantic off Canada*. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences. 3045: x+ 190p.

- Marine Atlantique. (2015). Véhicules commerciaux. Repéré à http://www.marineatlantic.ca/fr/commercial/_V%C3%A9hicules-commerciaux/
- Marlin, A. (2013). Climate change adaptation : A toolkit. EOS EcoEnergy. Repéré à http://eosecoenergy.com/en/wp-content/uploads/2013/04/EOS_ToolKit_en_dr7.pdf
- Marsalek, J., et Schreier, H. (2010). Innovation in stormwater management in Canada : The way forward. *Water Quality Research Journal of Canada*, 47(1), v-x. Repéré à http://www.mcgill.ca/files/water2010/Article-Marsalek_and_Schreier.pdf
- McCarthy, E. (2014, April 16). Highway dept dealing with numerous washouts. *The Journal Pioneer* (Summerside, PEI). Repéré à [http://www.journalpioneer.com/News/Local/2014-04-16/article-369225/Highways-dept-dealing-with-numerous-washouts/1](http://www.journalpioneer.com/News/Local/2014-04-16/article-369225/Highways-dept-dealing-with-numerous-washouts/)
- Mekis, E., et Vincent, L. (2011). An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 2, 163-177.
- Ministère des Pêches et des Océans Canada. (2013). Risk-based assessment of climate change impacts and risks on the biological systems and infrastructure within Fisheries and Oceans Canada's mandate – Atlantic Large Aquatic Basin. *DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Resp.* 2012/044. Repéré à http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/Publications/ScR-RS/2012/2012_044-eng.pdf
- Ministère des Transports et de l'Infrastructure du Nouveau-Brunswick. (2014). Rapport annuel, 2013-2014. Repéré à <http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministères/mti/publications.html>
- Ministère des Transports et de l'Infrastructure du Nouveau-Brunswick. (2015). Un outil en ligne pour la prévision des conditions météorologiques et des vagues est lancé à Port Saint John. Repéré à <http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/nouvelles/communiqué.2015.06.0586.html>
- Municipality of the District of Shelburne. (2011.) *Sandy Point* sewage treatment plant upgrade : PIEVC climate change vulnerability assessment [Présentation]. Repéré à http://www.pievc.ca/e/casedocs/shelburne/Shelburne_Project-Short_Presentation.pdf
- Nalcor Energy. (2014). *LCP ice formation environmental effects monitoring plan* (Nalcor Doc. No. MFA-PT-MD-0000-EV-PL-0003-1). Repéré à http://www.env.gov.nl.ca/env/env_assessment/projects/Y2010/1305/1305_iceFormation_eemp2014.pdf
- Newfoundland and Labrador Department of Transportation and Works. (2014). Annual report 2013-2014. Repéré à http://www.tw.gov.nl.ca/publications/TWAnnual_Report2013-14.pdf
- Newfoundland and Labrador Statistics Agency, Economics and Statistics Branch. (2015). *Canadian total exports, total for all products, top 10 countries, origin: Newfoundland and Labrador*. Repéré à http://www.stats.gov.nl.ca/statistics/Trade/PDF/NL_Exports.pdf
- Office of Climate Change, Energy Efficiency, and Emissions Trading. (2013). *Climate change projections for Newfoundland and Labrador : Late 20th century to mid-21st century*. Province of Newfoundland and Labrador. Repéré à <http://www.exec.gov.nl.ca/exec/ccee/publications/NL%20Climate%20Change%20Projections%20-%20Summary%20Presentation.pdf>
- Office of the Vice-President, Research. (2015). *CLIVE wins MIT competition*. Simon Fraser University. Repéré à <http://www.sfu.ca/vpresearch/research-news/2014/clive-wins-mit-competition.html>
- Peterson, T., McGuirk, M., Houston, T., Horvitz, A., et Wehner, M. (2008). Climate variability and change with implications for transportation. *Transportation Research Board Special Report 290*. Washington, DC : National Research Council of the National Academies. Repéré à <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290Many.pdf>
- Port of Halifax. (2015). *Economic impact report*. Repéré à <http://portofhalifax.ca/about-us/economic-report/>
- Porte Canadienne de l'Atlantique. (2010). *La Stratégie sur la Porte et le Corridor de commerce de l'Atlantique*. Repéré à <http://www.portedelatlantique.gc.ca/strategie-index.html>
- Power, B. (2012, 13 février). \$35m port terminal project nearing completion. *The Halifax Chronicle Herald*. Repéré à <http://thechronicleherald.ca/business/62440-35m-port-terminal-project-nearing-completion>
- Prince Edward Island Department of Transportation and Infrastructure Renewal. (2012). *Transportation and infrastructure renewal strategic plan, 2012-2015*. Repéré à <http://www.gov.pe.ca/photos/original/TIRstrategicpla.pdf>
- Province of Nova Scotia. (2007a). *Incident cost estimate worksheet: Incident CBNSIW070595*.
- Province of Nova Scotia. (2007b). *Incident cost estimate worksheet: Incident CBNSIW070581*.
- Province of Nova Scotia (2009a). *The state of Nova Scotia's coast: Chapter 5 – Working water fronts*. Repéré à <https://www.novascotia.ca/coast/documents/report/Coastal-Tech-Report-Chapter5.pdf>
- Province of Nova Scotia (2009b). *The state of Nova Scotia's coast: Chapter 7 – Sea-level rise and storm events*. Repéré à <https://www.novascotia.ca/coast/documents/report/Coastal-Tech-Report-Chapter7.pdf>
- Province of Nova Scotia. (2014, 11 juillet). *Train derailment cause determined* [Communiqué de presse]. Repéré à <http://novascotia.ca/news/release/?id=20140711004>
- Savard, J.-P., van Proosdij, D. et O'Carroll, S. (2016). Perspectives relatives à la région de la côte Est du Canada. 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. 99-152). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Senneville, S., St-Onge, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, M.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S. et Villeneuve, R. (2013). *Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du saint-laurent dans la perspective des changements climatiques*. Rapport final remis au ministère des Transport du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, janvier 2013, 370 p.
- Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique. (2011). *Historical list of climate change storm events in PEI*. Repéré à http://atlanticadaptation.ca/sites/discoveryspace.upei.ca.acasa/files/Historical%20List%20of%20Climate%20Change%20Storm%20Events%20PEI%20-%20Sep%202011_0.xls

Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique. (2016). *Climate change reports*. Repéré à <http://atlanticadaptation.ca/reports>

Spooner, I., Batterson, M., Catto, N., Liverman, D., Broster, B., Kearns, K., Isenor, F., et McAskill, G. (2013). Slope failure hazards in Canada's Atlantic Provinces : A review. *Atlantic Geology*, 49, 1-14.

Stassinu-Stantec Limited Partnership. (2011). *Analysis of infrastructure constraints on the future development of iron resources in Labrador, Canada*. Repéré à http://www.nr.gov.nl.ca/nr/mineralstrategy/infrastructure_report_summary.pdf

Statistique Canada. (2011). Recensement de la population. Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/02/cst01/demo62a-fra.htm>

Steeves, D. (2013). Extreme heat and health in Nova Scotia: Temperature and humidity normals and trends. *Environment Canada Extreme Heat Webinar*. 4 juin, Dartmouth, Nova Scotia. Repéré à http://www.chnet-works.ca/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=623%3A337-june-4-2013-part-2-of-5-extreme-heat-and-health-in-nova-scotia--doug-steeves&id=22%3Afireside-chat-presentations-and-recordings-2013&Itemid=13&lang=en

Strait Crossing Bridge Ltd. (2015). *Confederation Bridge*. Repéré à <http://www.confederationbridge.com/about/confederation-bridge.html>

Swansburg, E., El-Jabi, N. et Caissie, D. (2004). Climate change in New Brunswick (Canada) : Statistical downscaling of local temperature, precipitation, and river discharge. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2544: 42p. Repéré à <http://www.dfo-mpo.gc.ca/library/283189.pdf>

Taylor, K., Stouffer, R., et Meehl, G. (2012). A summary of the CMIP5 experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485-498.

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.

Transports Canada (2010). *Politique nationale des aéroports*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/programmes/aeroports-politique-rna-1129.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>

Traversier CTMA. (2015). *Horaire*. Repéré à <http://www.traversierctma.ca/fr/horaire>

United Kingdom Department for Transport. (2014). *Transport resilience review : A review of the resilience of the transport network to extreme weather events*. Repéré à https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/335115/transport-resilience-review-web.pdf

United States Environmental Protection Agency. (2015). *Climate change indicators in the United States: Tropical cyclone activity*. Repéré à <http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/weather-climate/cyclones.html>

United States Global Change Research Program. (2014). *National climate assessment: Changes in Hurricanes*. Repéré à <http://nca2014.globalchange.gov/report/our-changing-climate/changes-hurricanes>

Vasseur, L., et Catto, N. (2008). *Canada atlantique*. In D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (Éds.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007* (pp. 119-170). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.

Ville de Corner Brook. (2012). *Future Corner Brook: Integrated municipal sustainability plan*. Repéré à http://www.cornerbrook.com/images/CityHall/Development%20and%20Planning/IMSP%20AND%20DEVELOPMENT%20REGULATIONS%202012/CB_IMSP_web_.pdf

Ville de Miramichi. (2013). *Climate change vulnerability/risk assessment : King George Highway, Route 117* (ETF Project 12-0245).

Water Canada. (2015). *Federal government contributes to flood mitigation efforts in New Brunswick*. Repéré à <http://watercanada.net/2015/federal-government-contributes-to-flood-mitigation-efforts-in-new-brunswick/>

Webster, T. (2012). *Coastline change in Prince Edward Island, 1968-2010 and 2000-2010*. Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique. Repéré à <https://atlanticadaptation.ca/en/islandora/object/acasa%3A214>

Webster, T., Kongwongthai, M., et Crowell, N. (2012). *An evaluation of flood risk to infrastructure across the Chignecto Isthmus*. Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique. Repéré à <https://atlanticadaptation.ca/en/islandora/object/acasa%3A450>

Webster, T., McGuigan, K., et MacDonald, C. (2011). *Lidar processing and flood risk mapping for coastal areas in the District of Lunenburg, Town and District of Yarmouth, Amherst, Count Cumberland, Wolfville, and Windsor*. Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique. Repéré à <https://atlanticadaptation.ca/en/islandora/object/acasa%3A448>

Williams, R., et Daigle, R. (2011). *Scenarios and guidance for adaptation to climate change and sea-level rise – NS and PEI municipalities*. Nova Scotia Department of Environment et Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique. Repéré à https://www.novascotia.ca/nse/climate-change/docs/ScenariosGuidance_WilliamsDaigle.pdf

Williams, P., et Joshi, M. (2013). Intensification of winter transatlantic aviation turbulence in response to climate change. *Nature : Climate Change*, 3, 644-648.

Wright, T. (2015, January 30). December rainstorm caused \$9 million in damages for Prince Edward Island. *The Guardian* (PEI). Repéré à [http://www.theguardian.pe.ca/News/Local/2015-01-30/article-4025578/December-rainstorm-caused-\\$9-million-in-damages-for-Prince-Edward-Island/](http://www.theguardian.pe.ca/News/Local/2015-01-30/article-4025578/December-rainstorm-caused-$9-million-in-damages-for-Prince-Edward-Island/)



9 · Urbain

CHAPITRE 9 : URBAIN

AUTEURS PRINCIPAUX :

JEFF CASELLO¹
WILL TOWNS²

COLLABORATEURS :

ELAINE AUCOIN (VILLE DE MONCTON),
JOCELYN BEATTY (UNIVERSITÉ DE WATERLOO),
NAZZARENO CAPANO (VILLE DE TORONTO),
IAN PICKETTS (UNIVERSITY OF NORTHERN BRITISH COLUMBIA),
VESNA STEVANOVIC-BRIATICO (VILLE DE TORONTO),
JOHN STREICKER (VILLE DE WHITEHORSE),
STEPHANE THIBODEAU (VILLE DE MONCTON)

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

Casello, J., et Towns, W. (2017). Urbain. Dans K. Palko et D.S. Lemmen (Éds.), *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation pour le secteur canadien des transports 2016* (pp. 289-340). Ottawa (ON) : Gouvernement du Canada.

¹ Faculté de génie civil et génie de l'environnement et l'École de la planification, Université de Waterloo, Waterloo (ON)

² École de la planification, Université de Waterloo, Waterloo (ON)

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions.....	291
1.0 Introduction.....	292
1.1 Tendances dans les milieux urbains du Canada.....	293
1.2 Adaptation aux changements climatiques.....	295
2.0 Le climat et les transports urbains	296
2.1 Sensibilité du transport urbain au climat	296
2.2 Tendances et projections climatiques	303
2.3 Risques climatiques pour le transport urbain	307
3.0 Infrastructure routière urbaine	308
4.0 Transport ferroviaire urbain	310
5.0 Transport actif	312
6.0 Pratiques d'adaptation aux changements climatiques pour le transport urbain	317
7.0 Interdépendances avec d'autres secteurs urbains.....	332
8.0 Lacunes et obstacles	335
9.0 Conclusion	335
Références	336

PRINCIPALES CONCLUSIONS

- **L'accroissement de la redondance (en particulier entre les modes de transport) dans les réseaux de transport urbain permet d'augmenter la résilience aux changements climatiques.** Un système redondant donne aux voyageurs des choix, de sorte que si une option connaissait des difficultés, d'autres options efficaces seraient disponibles. La redondance devient encore plus importante en situation d'urgence (y compris les urgences dues aux conditions climatiques extrêmes), car elle permet aux voyageurs d'arriver à destination et aux économies de fonctionner même en cas d'importantes perturbations de service.
- **Les événements météorologiques extrêmes ont une influence sur les perspectives et les actions des décideurs urbains.** Les événements ayant des impacts socio-économiques graves montrent aux décideurs municipaux que l'activité humaine, les décisions de planification imprévoyantes ou l'omission d'agir peuvent aggraver les dommages liés aux conditions météorologiques. L'expropriation des terres plaines inondables et la déviation des routes loin des zones vulnérables sont des exemples de changements stratégiques apportés en réponse à des événements météorologiques extrêmes dans certaines villes canadiennes.
- **Les stratégies d'adaptation « sans regret » ou à « faible regret » offrent aux municipalités la possibilité d'améliorer à coût relativement faible la résilience de l'infrastructure de transport à des points névralgiques du cycle de vie de l'infrastructure.** Un exemple est l'amélioration de la capacité de gestion des eaux pluviales afin de tenir compte des futures conditions de précipitations possibles au moment où l'infrastructure devra être renouvelée. Ces stratégies contribuent également à renforcer l'appui du public à l'égard des efforts d'adaptation lorsqu'elles offrent des avantages tangibles, communiqués clairement et réalisés rapidement.
- **Les coûts liés à l'infrastructure résiliente sont considérés comme un obstacle à la mise en œuvre de mesures d'adaptation.** En ce qui a trait au financement des dépenses en capital et en coûts opérationnels, des outils de financement innovateurs et des partenariats intergouvernementaux pourraient aider à promouvoir l'adaptation au moment d'aborder la question du déficit croissant en matière d'infrastructure municipale du Canada.
- **Un besoin de collaboration structurée existe entre les ministères, les organismes de transport, les services d'urgence, les conseils municipaux, les ingénieurs, les spécialistes des changements climatiques et la population civile.** La collaboration permettrait de faire en sorte que l'adaptation devienne une entreprise communautaire, et mettrait en évidence les principales interdépendances dans le secteur du transport urbain (par exemple, avec les fournisseurs d'électricité et de télécommunications).
- **Les Villes canadiennes ont entrepris un certain nombre d'initiatives qui renforcent la résilience.** Les exemples de Whitehorse, Prince George, Toronto et Moncton démontrent la diversité nécessaire des stratégies d'adaptation pour faire face à l'ampleur des défis géographiques et climatiques d'un bout à l'autre du pays. Ces études de cas laissent entendre que, de plus en plus, les spécialistes en urbanisme ne s'arrêtent plus seulement à l'évaluation des risques et qu'ils commencent à mettre en œuvre des pratiques d'adaptation et à construire une infrastructure résiliente.

1.0 INTRODUCTION

Les systèmes de transport urbain sont vulnérables aux événements météorologiques extrêmes et aux effets conjugués des changements climatiques. Les conditions météorologiques extrêmes occasionnent des perturbations et des retards dans les déplacements urbains causés par l'affouillement des routes et des voies de transport, et par les dommages aux systèmes électriques et aux systèmes de communication sur lesquels dépendent ces modes de transport. La hausse des températures provoque l'orniérage de la chaussée, le gauchissement des rails ainsi que des dommages aux infrastructures construites sur le pergélisol dans les collectivités du Nord. Ces derniers risques conjugués à d'autres risques climatiques peuvent avoir une incidence sur le coût, l'efficacité et la sécurité du transport urbain au Canada.

Dans le présent chapitre, le terme transport urbain renvoie à tous les modes de transport qui transportent des personnes et des biens dans les villes et, plus largement, dans les régions métropolitaines. Cela comprend les infrastructures et les véhicules (automobiles, autobus), le système de transport sur rails (y compris les métros, les systèmes légers sur rail [SLR] et les trains de banlieue), de même que les modes actifs comme la marche et le cyclisme. Prendre note que les aéroports, les systèmes ferroviaires régionaux et nationaux, les ports maritimes et les services de traversiers³ sont abordés dans les chapitres régionaux du présent rapport.

Le présent chapitre se concentre sur la vulnérabilité du transport urbain aux impacts des changements climatiques graduels et aux événements météorologiques extrêmes, en prenant en compte les interactions entre les infrastructures, les services et les populations concentrés des villes. Le chapitre se penche également sur les efforts actuels déployés par les municipalités canadiennes, et sur les efforts prévus dans l'avenir afin d'augmenter la résilience du transport. Bien que certaines de ces adaptations peuvent s'avérer coûteuses, beaucoup peuvent être classées comme des stratégies « sans regret » ou « à faible regret » qui entraînent peu de coûts supplémentaires, produisent des avantages conjoints ou préviennent des dépenses futures. L'intégration des considérations climatiques dans les processus décisionnels, par exemple, dans l'élaboration des plans officiels, des processus de gestion financière et dans les décisions d'investissement dans l'infrastructure, facilite l'identification de ce type d'adaptation.

Reconnaissant que la recherche portant sur l'étude des impacts climatiques sur les transports urbains est limitée au Canada, le présent chapitre s'appuie également sur des recherches américaines pertinentes pour compléter le contenu canadien au besoin.

Statistique Canada a récemment remplacé le terme « centre urbain » par « centre de population ». Il existe trois catégories de centre de population :

- les petits centres de population (entre 1 000 et 29 000 personnes);
- les moyens centres de population (entre 30 000 et 99 000 personnes);
- les grands centres de population (plus de 100 000 personnes) (Statistique Canada, 2011a).

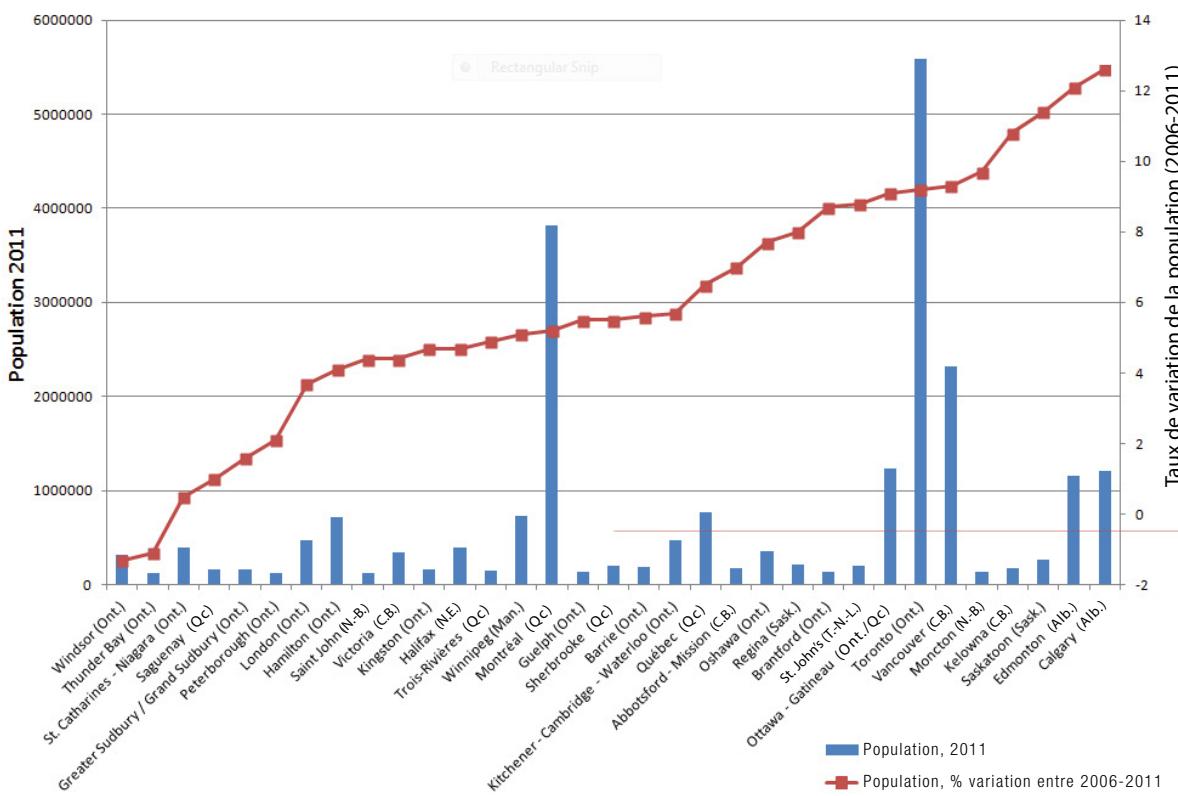
Le présent chapitre se concentre principalement sur les deux dernières catégories. Les termes « centres urbains » et « centres de population » sont utilisés de manière interchangeable.

³ Les services de traversier fournissent des services de transport uniquement dans quelques centres urbains canadiens (par exemple, Halifax et Vancouver).

1.1 TENDANCES DANS LES MILIEUX URBAINS DU CANADA

Le Canada est de plus en plus urbain. Lors du recensement national de 2011, 81 % des Canadiens ont indiqué qu'ils vivaient dans des moyens ou grands centres de population. Les tendances démographiques indiquent que les plus grandes zones urbaines du Canada – appelées régions métropolitaines de recensement (RMR) – sont en croissance rapide, en grande partie en raison de leur capacité à attirer au Canada des générateurs économiques tels que les services financiers, les organismes de recherche et de développement, les touristes ainsi que les nouveaux arrivants (Filion et Bunting, 2010). La figure 1 présente la croissance de la population dans les RMR du Canada pendant la période 2006-2011.

Figure 1 : Les RMR du Canada ayant les taux de croissance les plus élevés du recensement national de 2006 au recensement national de 2011. (Source : Statistique Canada)



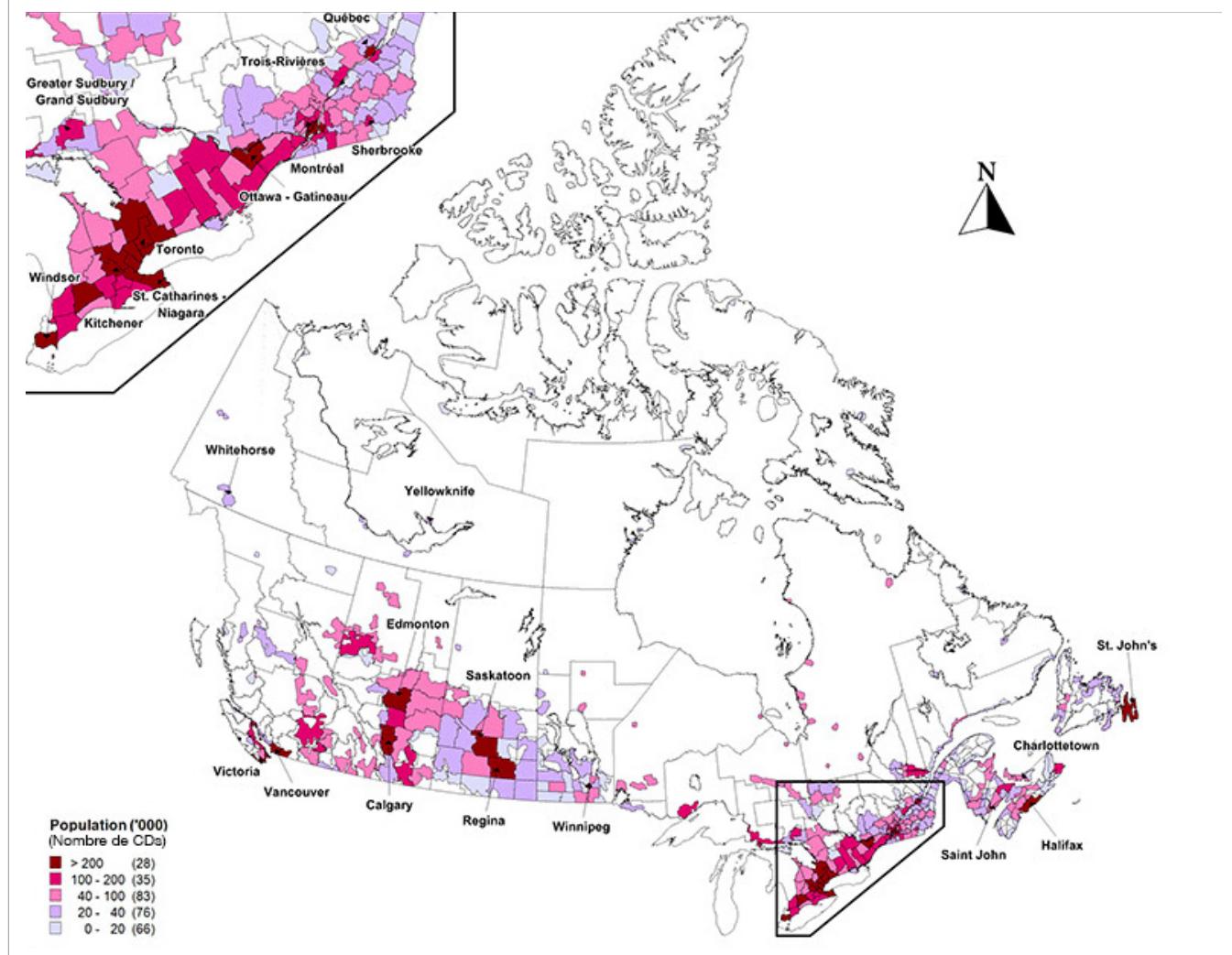
Les agglomérations de grande et de moyenne taille mènent le mouvement d'urbanisation au Canada. Alors que les grandes régions métropolitaines de trois villes (Montréal, Toronto et Vancouver) représentent maintenant 35 % de la population canadienne (Postmedia News, 2012), de nombreuses villes de plus petite taille ont aussi connu une croissance importante (Saskatoon, Kelowna et Moncton, par exemple). Selon les experts, cette tendance devrait se poursuivre pour une bonne partie du 21^e siècle. Ainsi, l'adaptation aux risques climatiques dans les villes canadiennes se produira de concert avec la gestion de la croissance de la population urbaine.

La mesure dans laquelle les villes canadiennes seront touchées par les changements climatiques et leurs capacités d'adaptation varie considérablement. « La capacité d'adaptation » est une fonction de nombreux facteurs, y compris la géographie. Les RMR sont réparties dans un certain nombre de régions climatiques, dont deux dans le Nord du Canada (à Whitehorse, au Yukon, et à Yellowknife,

dans les Territoires du Nord-Ouest), qui font face à des défis particuliers liés au réchauffement rapide et à la fonte du pergélisol (voir le chapitre 3).

Le développement urbain du Canada dans la période d'après-guerre a été caractérisée par un étalement à faible densité et tentaculaire vers l'extérieur des centres-villes traditionnels, encourageant (et souvent nécessitant) l'utilisation quotidienne de la voiture (Blais, 2013). La congestion routière pèse de plus en plus lourd sur les régions urbaines du Canada, coûtant de 6 à 11 milliards de dollars par année en productivité économique perdue dans la région du Grand Toronto et de Hamilton, et de 500 millions à 1,2 milliard de dollars par année dans la région métropolitaine de Vancouver, selon la méthodologie particulière appliquée (Dachis, 2013; Dachis, 2015). Toutefois, de nombreuses municipalités canadiennes ont commencé à reconnaître l'importance des quartiers compacts favorisant les déplacements à pied pour améliorer l'efficacité et la durabilité de leur environnement urbain (ministère de l'Infrastructure de l'Ontario, 2013; Metro Vancouver, 2011; Haider et coll., 2013). Ainsi, on note un mouvement général pour le développement « en hauteur » aux dépens de l'étalement, et la densité de population augmente conjointement avec la croissance de la population : dans les RMR, la densité de population a augmenté en moyenne de 6 % depuis la période 2006-2011 (Statistique Canada, 2011a; voir la figure 2).

Figure 2 : Densité urbaine et agglomérations au Canada. (Source : Statistique Canada)



Lorsqu'on évalue les impacts climatiques sur les villes, la densité (de population et d'infrastructure) est un facteur qui complique la situation. Les impacts localisés, tels que les vents violents et les pluies abondantes, perturbent davantage la circulation et les activités économiques, et touchent davantage de personnes et d'éléments d'infrastructure dans les centres urbains que dans les zones moins densément peuplées (Revi et coll., 2014; Solecki et coll., 2011).

L'état de détérioration de l'infrastructure municipale complique encore davantage la capacité des villes à forte croissance et de plus en plus denses du Canada d'accueillir une population croissante. Le Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes (BRIC) de 2016, qui a évalué l'état des infrastructures appartenant aux municipalités canadiennes, a attribué la cote de « mauvais » à « très mauvais » à 14 % des trottoirs, des routes et des ponts et une valeur de remplacement totale de 50,4 milliards de dollars. Le BRIC a attribué les mêmes cotes à 17 % des infrastructures de transport en commun (véhicules, technologie mobile, systèmes de sécurité, équipements de signalisation et installations terminales) dont la valeur de remplacement serait de 9 milliards de dollars (Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes, 2016). Selon le Bulletin, dans les conditions actuelles d'investissement et d'entretien, la plupart des infrastructures de transport urbain nécessiteront des investissements considérables de plus en plus importants avec le vieillissement, et ce, même pour les infrastructures qui ont actuellement une cote de « passable » à « très bon » (Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes, 2016). La pression exercée sur ces infrastructures par les changements climatiques est susceptible d'accélérer la nécessité de remplacer ou de mettre à niveau les actifs plus âgés.

Le nombre d'usagers du transport en commun par habitant au Canada augmente également chaque année (Association canadienne du transport urbain, 2012), tandis que les taux de propriétaires de voitures dans les RMR sont en baisse (Perl et Kenworthy, 2010). Le transport en commun attire de plus en plus l'attention de tous les ordres de gouvernement au Canada, alors que l'appui financier fédéral et provincial pour le transport urbain au Canada augmente de 5,2 % par an depuis 2008 (Transports Canada, 2013). Cela est cohérent avec la tendance internationale élargie en matière de gouvernance urbaine visant à améliorer les modes de transport en commun comme moyen pour réduire la congestion routière et améliorer la santé publique (Bradford, 2008).

Enfin, il est utile d'examiner les interactions entre les systèmes d'infrastructure multiples dans les villes. Les réseaux de transport de véhicules et de trains à niveau dépendent fortement des infrastructures de drainage pour gérer l'écoulement d'averse. Les réseaux de transport ferroviaires dans les villes comme Calgary, Edmonton, Toronto, et Montréal dépendent d'un système électrique fiable pour alimenter les véhicules et les réseaux de communication. Les systèmes de transport en commun de véhicules et d'autobus comptent également sur les ressources municipales de distribution d'électricité et d'intervention d'urgence pour la signalisation routière et la sécurité routière. Cela fournit un contexte important pour le présent chapitre, alors que les secteurs public et privé au Canada sont mis au défi de maintenir ou d'améliorer cet éventail d'infrastructures urbaines interdépendantes tout en améliorant la résilience des réseaux de transport aux changements climatiques.

1.2 ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Un certain nombre de stratégies peuvent être utilisées pour réduire les impacts des changements observés et projetés dans le climat et les conditions météorologiques extrêmes sur les systèmes de transport urbain. Les stratégies présentées dans le présent chapitre entrent dans les catégories générales suivantes :

- investir dans des infrastructures, des pratiques opérationnelles et des matériaux plus résilients pour les infrastructures de transport;
- accroître la redondance au sein des réseaux de transport, à savoir offrir plusieurs choix d'itinéraires ou de modes de transport urbain ayant des coûts d'utilisation similaires;
- mettre à jour les critères de conception adaptés au climat utilisés dans les normes d'ingénierie afin de mieux tenir compte des conditions futures;

- améliorer les politiques et les contrôles en matière d'aménagement du territoire (par exemple, les modifications de zonage ou les exigences de construction dans les zones vulnérables);
- renforcer la résilience des collectivités aux conditions climatiques extrêmes et aux effets météorologiques au moyen de mesures d'adaptation sociale.

2.0 LE CLIMAT ET LES TRANSPORTS URBAINS

Il est important de comprendre les interactions historiques entre le climat, les conditions météorologiques et la géographie pour déterminer l'incidence des changements climatiques sur le transport urbain dans les villes canadiennes au 21^e siècle. L'emplacement est un facteur important de la vulnérabilité urbaine aux changements climatiques, alors que de nombreuses villes au Canada sont situées dans des zones de faible élévation à proximité d'importants plans d'eau (Filion et Bunting, 2010). Les plaines inondables, les régions côtières ainsi que d'autres zones vulnérables pourraient être sujettes à d'importantes inondations, à de l'érosion prononcée et à des dommages importants aux infrastructures dus aux changements climatiques et aux événements météorologiques extrêmes plus fréquents (Revi et coll., 2014). Bien que les dispositions actuelles relatives à la planification limitent souvent le développement dans les zones vulnérables, cet héritage en matière de vulnérabilité urbaine persiste et est accentué par l'augmentation de la densité de population. Comprendre comment les villes ont abordé la question des effets des changements climatiques dans le passé aide les villes vulnérables à prendre des décisions et à faire des investissements éclairés pour s'adapter aux changements climatiques émergents.

La présente section donne un aperçu des impacts climatiques et des effets liés aux conditions météorologiques sur le transport urbain au Canada, ainsi que des conditions climatiques projetées pour le 21^e siècle. D'autres chapitres dans le présent rapport abordent les questions climatiques propres aux régions.

2.1 SENSIBILITÉ DU TRANSPORT URBAIN AU CLIMAT

De nombreuses leçons ont été tirées sur la façon de s'adapter à des conditions météorologiques particulièrement mauvaises dans tous les modes de transport urbain au Canada. Certains exemples sont examinés dans la présente section.

Cyclone à Regina en juin 1912

Le cyclone de Regina du 12 juin 1912 est la tornade la plus destructrice de l'histoire canadienne. Il a fait 30 victimes, laissé 2 500 personnes sans-abri et causé 1,2 million de dollars (environ 25 millions en dollars de 2015⁴) en dommages à la propriété et à l'infrastructure (Environnement Canada, 2013a; Saskatchewan Archives Board, 2011). Les dommages étaient si importants qu'il a fallu à la Ville 40 ans pour rembourser les dettes qu'elle avait contractées (Saskatchewan Archives Board, 2011). La perte de la gare de marchandises du Chemin de fer Canadien Pacifique a été particulièrement dommageable. Le cyclone a retourné des wagons et détruit les entrepôts de grains, rasant un élément clé du réseau de transport du grain de l'Ouest canadien et causant un préjudice important aux villes partout au pays qui dépendaient du grain de l'Ouest (Martin, 2012).

Au cours du siècle qui s'est écoulé depuis cet événement, les protocoles de gestion et de communication en cas d'urgence ont considérablement changé (y compris l'utilisation des médias électroniques et sociaux pour avertir les exploitants et les voyageurs des menaces imminentes), et les

⁴ Toutes les conversions des valeurs historiques en dollars contemporains dans le présent chapitre ont été effectuées à l'aide de la Feuille de calcul de l'inflation, qui fournit des conversions à l'aide de l'indice des prix de produits de consommation. <http://www.banquedcanada.ca/taux/renseignements-complementaires/feuille-de-calculation-de-l-inflation/>.

codes et les matériaux de construction urbaine sont beaucoup plus résistants au vent et à la pluie (Martin, 2012). Bien que les dommages et les perturbations associées à un événement similaire soient probablement importants, les impacts d'une tornade sur le transport et sur d'autres infrastructures ne seraient pas aussi dévastateurs aujourd'hui en raison des codes de construction plus stricts et de l'amélioration des matériaux (Martin, 2012).

Inondation de la vallée du fleuve Fraser au printemps 1948

Un réchauffement anormalement rapide d'une énorme accumulation de neige sur la montagne a causé le débordement du fleuve Fraser, en Colombie-Britannique, au cours des mois de mai et juin 1948. Les inondations ont englouti 2 300 maisons, laissant 16 000 personnes sans-abri et faisant 10 morts (Robinson et Cruikshank, 2006). Les dommages ont été évalués à 20 millions de dollars (environ 220 millions en dollars de 2015) (Environnement Canada, 2010).

Le réseau de digues installé pour protéger les zones urbaines de Chilliwack, Mission et New Westminster était considéré comme offrant une protection appropriée contre les inondations mineures, mais n'a pu résister aux crues élevées de l'inondation. Le 10 juin, la crue du fleuve a atteint un niveau maximal de 7,6 m à Mission, inondant les rues et les routes à proximité, empêchant la circulation des véhicules, des piétons et sur les deux lignes ferroviaires qui traversaient la ville (McLean et coll., 2007; Environnement Canada, 2010). Alors que seulement 0,5 % des 1 375 km de plaine inondable est à risque d'inondation aujourd'hui, cette zone à haut risque est composée de nombreux centres urbains et abrite deux aéroports et des segments importants des réseaux routier et ferroviaire (Environnement Canada, 2010).

Les gouvernements et les décideurs ont appris plusieurs leçons à la suite des inondations du fleuve Fraser. Une meilleure coordination régionale, une meilleure planification d'urgence et une sensibilisation accrue ont incité les administrations municipales ainsi que le gouvernement provincial et fédéral à investir 300 millions de dollars depuis 1948 pour améliorer les digues et d'autres mesures de prévention des inondations dans la région (pour résister à une inondation qui se produit tous les 200 ans); par conséquent, la capacité d'adaptation de même que la résilience de ces communautés ont été améliorées (McLean et coll., 2007).

Bien que des améliorations considérables aient été apportées dans la lutte contre les inondations, les régions urbaines de la vallée du fleuve Fraser encourent des risques accrus liés à des événements semblables ou plus importants au cours des prochaines décennies en raison des changements climatiques.

Figure 3 : L'inondation du fleuve Fraser à Mission de 1948. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



Ouragan Hazel dans la région du Grand Toronto en octobre 1954

L'ouragan Hazel, qui a frappé la région du Grand Toronto (RGT) en octobre 1954, est possiblement la catastrophe urbaine liée aux intempéries la plus connue du Canada, et demeure l'une des tempêtes les plus coûteuses de l'histoire de la région. Un automne humide a causé la sursaturation des sols en Ontario (Environnement Canada, 2013a), une situation qui a aggravé les effets des 210 mm de pluie qui sont tombés dans une période de 36 heures. Des crues soudaines importantes ont tué 81 personnes (Office de protection de la nature de Toronto et de la région, 2014). Les dommages ont totalisé 100 millions de dollars (environ 900 millions en dollars de 2015), dont la moitié a servi au remplacement des infrastructures de transport endommagées ou détruites (Robinson et Cruikshank, 2006).

Les perturbations des systèmes de transport ont été importantes :

- De nombreuses lignes de trains ont été retardées ou autrement touchées, et un wagon du CN a été renversé (Environnement Canada, 2013a).
- Le CN a signalé une augmentation spectaculaire des déplacements par train durant l'événement en raison des inondations généralisées des routes. Environ 14 000 personnes ont voyagé en train durant l'ouragan Hazel, par rapport à la moyenne quotidienne de 1 000 personnes (Environnement Canada, 2013a), démontrant l'importance d'offrir des options de transport redondantes afin de préserver la mobilité durant les événements extrêmes.
- Des inondations et des affouillements importants se sont produits sur l'autoroute 400 et les routes 11 et 12, entravant la circulation automobile. Certains segments de ces routes, au plus fort de la tempête, étaient sous environ un mètre d'eau.
- Un total de 40 ponts ont été endommagés, et 10 ont été mis hors service. De nombreux ponts servant d'artères principales, y compris des ponts enjambant la rivière Don, le chemin York Mills et l'avenue Bayview, ont été emportés, causant des perturbations sociales considérables (Environnement Canada, 2013a).

La RGT a pris des mesures d'adaptation à la suite de l'ouragan Hazel pour contrer les effets immédiats de l'ouragan et réduire la vulnérabilité à des événements similaires à l'avenir. La Ville a concentré ses efforts sur la prise de décision en matière de politique de gestion des urgences et en matière d'infrastructure. Par exemple, l'emplacement proposé pour la route express Gardiner de Toronto a été modifié afin d'élever la chaussée et d'éloigner la route des rives du lac Ontario. L'autoroute très achalandée qui traverse le centre-ville de Toronto n'était pas encore construite en 1954, mais elle aurait été presque entièrement inondée par un ouragan de cette ampleur si elle avait été construite comme il était prévu initialement (Environnement Canada, 2015). Par ailleurs, dans la foulée de l'ouragan Hazel, la Ville a choisi de mettre davantage l'accent sur le rétablissement rapide des services de transport en commun afin d'atténuer la congestion routière pendant et après les situations d'urgence (Environnement Canada, 2015).

L'ouragan Hazel a également contribué à changer les perspectives des décideurs en Ontario. Ils n'allait plus simplement considérer les catastrophes naturelles comme des « actes de la nature ». Plutôt, un lien important et transformateur a été fait entre les dommages liés aux conditions météorologiques et les décisions en matière de planification (Henstra, 2011). L'ouragan Hazel a incité l'Office de protection de la nature de Toronto et de la région à apporter de nombreux changements stratégiques qui ont donné lieu à une résilience accrue aux événements météorologiques extrêmes et aux inondations. Plus précisément, l'Office a adopté les mesures qui suivent :

- a exproprié les terrains inondés situés à proximité des cours d'eau et a empêché le développement dans ces zones;
- a augmenté la quantité d'espaces verts capable d'absorber l'eau dans la ville;
- a amélioré l'infrastructure et les techniques de gestion des cours d'eau (Robinson et Cruikshank, 2006).

Avant l'ouragan Hazel, des groupes de bénévoles s'acquittaient généralement des activités de nettoyage à la suite de tempêtes en Ontario. L'ouragan Hazel a incité les municipalités à faire appel au gouvernement provincial et au gouvernement fédéral pour obtenir les ressources nécessaires afin de se préparer adéquatement en vue d'événements météorologiques extrêmes et favoriser la récupération après coup (Robinson et Cruikshank, 2006).

Tempête de verglas sur l'Est du Canada en janvier 1998

Du 4 au 10 janvier 1998, une quantité importante de pluie verglaçante est tombée de l'Est de l'Ontario jusqu'à la Nouvelle-Écosse. Plus de 100 mm de glace sont tombés durant plus de 80 heures de précipitations, laissant plus de 4 millions de personnes sans électricité et entraînant d'importantes perturbations dans le transport. Des fils électriques, des poteaux électriques et des branches d'arbres ont bloqué les routes, et les pannes de courant ont perturbé la signalisation routière. Des routes ont été fermées et les services de transport en commun ont été retardés et annulés, alors que la chaussée glacée a causé des accidents et rendu les déplacements dangereux (Bertin, 1998). Plus de 16 000 membres des Forces armées canadiennes ont été déployés pour gérer la crise après coup; Environnement Canada a estimé que le montant des réclamations d'assurance initiales s'élevait à plus de 1,5 milliard de dollars et que les réclamations totales ont dépassé 3 milliards de dollars (Environnement Canada, 2013b).

Figure 4 : Membres de l'armée canadienne enlevant des débris causés par l'ouragan Hazel. (Source: Bibliothèque et Archives Canada)



Figure 5 : Branches d'arbres tombées à la suite de la tempête de glace. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



À la suite de la tempête de verglas, plusieurs mesures fondées sur les leçons apprises ont été mises en œuvre. Par exemple, la province de Québec a adopté une loi obligeant toutes les municipalités à préparer un plan d'urgence et à améliorer la communication entre les gouvernements provinciaux et les administrations municipales (Institut de prévention des sinistres catastrophiques, 2016). Hydro-Québec a aussi pris des mesures pour prévenir les pannes de courant, comme renforcer la structure des pylônes de transmission et ajouter ou enterrer des lignes de transport d'électricité (The Canadian Press, 2008). Bien que ces mesures soient largement axées sur la santé et la sécurité publiques, l'amélioration de la planification des urgences, des communications et des réseaux électriques contribuent également à la résilience des réseaux de transport.

Ouragan Juan à Halifax en septembre 2003

Certaines villes des provinces atlantiques ont également subi des graves répercussions d'événements météorologiques extrêmes, et selon les modèles climatiques, la fréquence de ces événements va augmenter dans cette région au cours du 21^e siècle (AMEC Inc., 2011). L'ouragan Juan, qui a frappé Halifax le 29 septembre 2003, est la tempête la plus destructrice de l'histoire de la ville en raison des effets de l'onde de tempête (housse temporaire du niveau de la mer), des inondations importantes et des vents violents (Environnement Canada, 2013a). Les vents soutenus ont atteint une vitesse maximale de 160 km/h. Des rafales atteignant jusqu'à 230 km/h se sont abattues sur le port d'Halifax

et des ondes de tempête de 1,5 à 2 m ont occasionné une érosion importante des berges et la perte de voies ferroviaires (Bowyer, 2003a). Des conteneurs ont été soufflés par-dessus bord de navires dans le port, et plusieurs wagons ont été emportés dans l'Atlantique à la gare de triage de Dartmouth (Bowyer, 2003c). La volatilité de la tempête et les perturbations des services de transport qu'elle a causées ont contribué à la fermeture des entreprises et des écoles pendant cinq jours (Bowyer, 2003b). Les coûts estimés des dommages causés par l'ouragan Juan s'élevaient à 200 millions de dollars (Environnement Canada, 2013a). L'événement a incité les décideurs des provinces atlantiques à améliorer les processus de planification et de préparation en vue d'événements météorologiques extrêmes : des canaux ont été clairement établis pour la communication et la coordination entre les organismes d'intervention d'urgence provinciaux et locaux, et une formation spéciale sur l'intervention en cas d'ouragan a été offerte au personnel affecté aux urgences immédiatement après les événements (Government of Nova Scotia, 2003).

Figure 6 : Une onde de tempête provoque des dommages à un quai du port de Halifax. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



Inondations dans la région du Grand Toronto en juillet 2005 et en juillet 2013

Plusieurs événements extrêmes de tempête en été ont causé des perturbations et des dommages importants dans la région du Grand Toronto (RGT). En août 2005, des pluies intenses et des inondations ont coûté 47 millions de dollars à la Ville de Toronto (l'assurance couvrait une somme additionnelle de 500 millions dollars en dommages) (McLeod, 2011). Un ponceau majeur sur l'avenue Finch a subi des dommages de 4 millions de dollars en raison de l'affouillement (Ville de Toronto, 2014; McLeod, 2011; voir la figure 7).

Figure 7 : Une section de l'avenue Finch affaissée durant la pluie torrentielle du 19 août 2005.
(Source : Ville de Toronto)



De la même manière, durant une violente tempête en juillet 2013, 126 mm de pluie sont tombés sur la RGT sur une période de deux heures, causant 850 millions de dollars en réclamations d'assurance (Environnement Canada, 2014). Même si le taux horaire des précipitations (intensité) était plus élevé lors de cet événement que lors de l'ouragan Hazel, les dommages étaient considérablement moins importants en partie en raison des améliorations apportées aux politiques de planification d'urgence de l'Ontario après l'ouragan Hazel (Henstra, 2011; Aulakh, 2013). Néanmoins, les perturbations des transports ont été importantes. Les services de métro ont été interrompus en raison des inondations, les passagers des trains GO ont été évacués à l'aide de bateaux de la police et les automobilistes ont dû composer avec des routes affaissées. Cependant, les réseaux de transport dans la ville ont été presque entièrement rétablis le jour suivant (CBC News, 2013). Un certain nombre de mesures d'adaptation ont été relevées à la suite de cette crise, y compris l'élaboration de plans de prévention et de gestion des inondations plus robustes pour la vallée de la rivière Don, et l'installation de sources d'alimentation de secours en cas d'urgence dans les installations d'entretien des autobus et des locomotives.

Inondation de Calgary en juin 2013

Un dernier exemple important concerne l'inondation de la rivière Bow, à Calgary, en Alberta, en juin 2013. Au plus fort de la tempête, 200 mm de pluie sont tombés au cours d'une période d'environ 16 heures sur des sols sursaturés et, parfois, encore gelés (Davison et Powers 2013). À titre de catastrophe climatique la plus coûteuse au Canada à ce jour, l'inondation a causé des dommages dans la ville de Calgary estimés à plus de 6 milliards de dollars. Les dommages ont été causés aux ponts, aux ponceaux, aux routes (plus de 1 000 km) et à l'infrastructure de transport en commun (Environnement Canada, 2014). En outre, l'affouillement (l'érosion du sol d'assise par l'eau en mouvement rapide) a causé l'affaissement partiel du pont Bonnybrook, laissant six wagons du Canadien Pacifique suspendus au-dessus de la rivière Bow; peu de temps après, le pont a été mis hors service (Presse canadienne, 2014). Le Bureau de la sécurité des transports (2014) a jugé qu'« une crue sans précédent a contribué au déraillement » et a recommandé de procéder à des inspections plus fréquentes des ponts, de réduire la vitesse des trains dans les zones sujettes à l'affouillement, et d'investir dans la recherche de technologies de détection précoce pour les structures vulnérables à l'affouillement et à l'érosion.

Figure 8 : Wagons sur le pont ferroviaire de Bonnybrook en train de s'effondrer à la suite du déraillement du train qui s'est produit le 27 juin 2013. (Source : Bureau de la sécurité des transports du Canada)



2.2 TENDANCES ET PROJECTIONS CLIMATIQUES

La présente section offre un résumé des conditions climatiques projetées pour le 21^e siècle au Canada présentant un intérêt particulier pour le transport urbain. Parmi celles-ci, soulignons les suivantes :

- une plus grande variation et davantage d'extrêmes dans les températures de l'air saisonnières et annuelles;
- les changements dans la configuration des précipitations;
- une intensité et une durée accrues des vents, en particulier lors de tempêtes;
- les changements dans les configurations de la glace de lac et de mer;
- l'augmentation de la dégradation du pergélisol;
- les changements des niveaux d'eau dans les eaux côtières et les voies navigables intérieures;
- les combinaisons de ces changements climatiques.

Température de l'air

Au Canada, la température moyenne de l'air a augmenté de 1,5 °C de 1950 à 2010, et devrait augmenter d'environ 1,5 à 2,5 °C d'ici le milieu du siècle (dans le cadre d'un scénario de faible croissance des émissions) avec des chaleurs extrêmes plus fréquentes et de très grands froids moins fréquents (Bush et coll., 2014). Dans les villes, ces tendances sont exacerbées par l'effet des îlots thermiques urbains, à savoir la différence entre la température de surface et la température de l'air (typiquement de 10 à 15 °C pour les surfaces et de 1 à 3 °C pour l'air) dans les centres urbains et les secteurs ruraux environnants. L'effet des îlots thermiques urbains est dû à une combinaison de facteurs (figure 9), y compris ceux qui suivent :

- le manque de végétation dans les villes (qui régule la température);
- la faible capacité de réflexion des rayons solaires de l'infrastructure urbaine;
- la forte capacité d'absorption de chaleur des matériaux urbains (par exemple, l'asphalte noir) – les secteurs très développés offrent une capacité d'humidification de surface pour l'évapotranspiration (qui refroidit l'air ambiant) inférieure aux surfaces végétalisées en raison des revêtements imperméables comme la chaussée et le béton (de 75 à 100 % de couverture dans la plupart des villes);
- la production de chaleur anthropogénique (d'origine humaine), par exemple, la climatisation, les véhicules, les activités industrielles;
- la topographie urbaine, par exemple, les rues étroites limitent la capacité des bâtiments à réfléchir la chaleur la nuit et limitent le passage des vents refroidissant (US Environmental Protection Agency, 2008).

Les îlots thermiques urbains ont une incidence sur l'intégrité de l'infrastructure de transport, en particulier la chaussée. La figure 10 donne un exemple de carte d'îlot thermique urbain pour Montréal, au Québec.

Figure 9 : Une illustration du profil des îlots thermiques urbains. L'effet des vagues de chaleur est plus fort dans les zones urbaines que dans les banlieues et les zones rurales, sans doute à cause de l'effet d'îlot thermique. (Source : Ressources naturelles Canada)

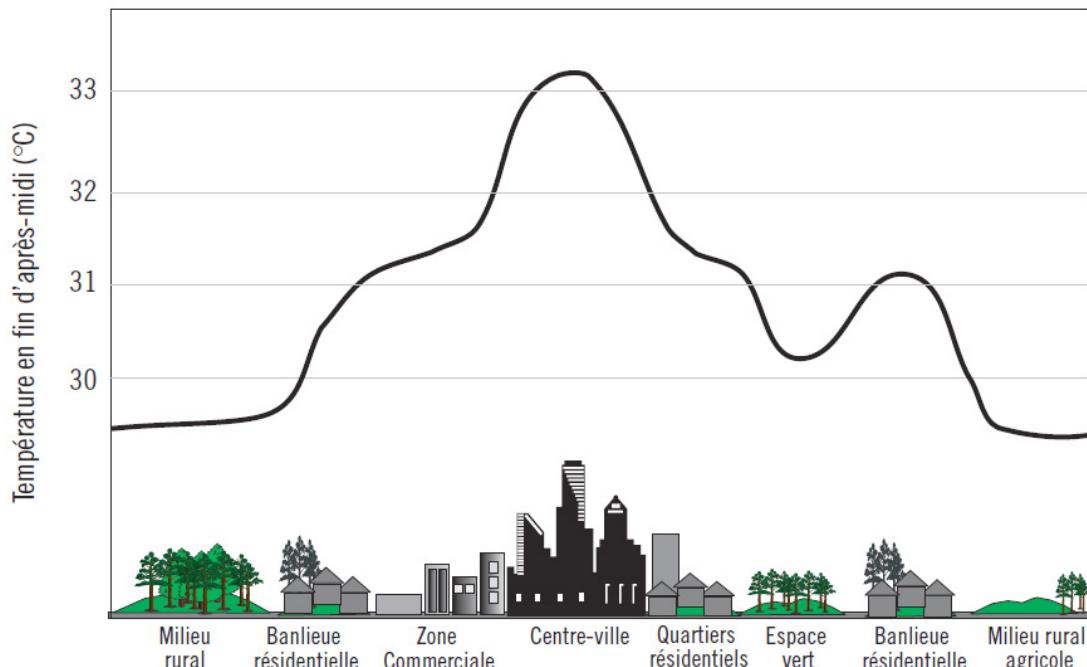
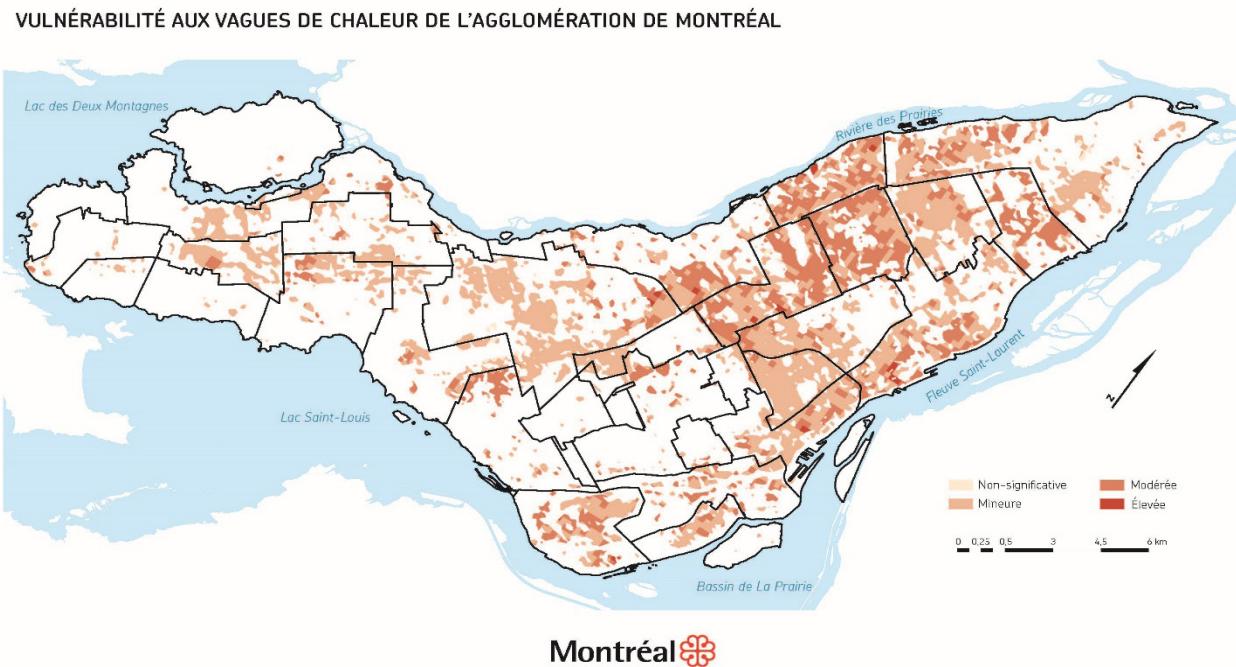
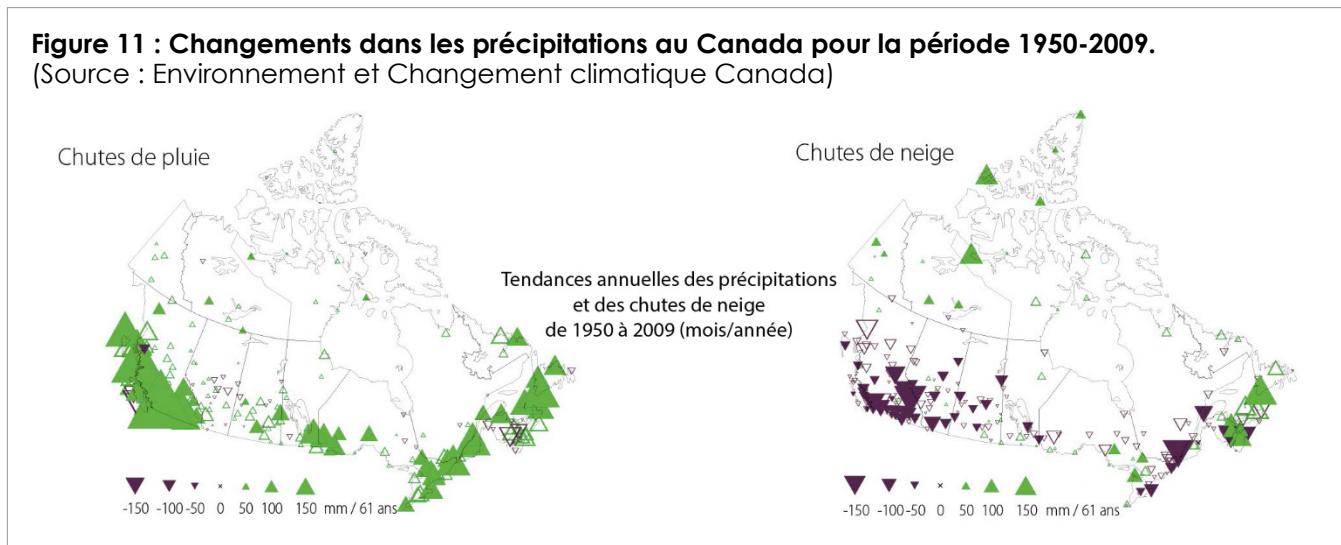


Figure 10 : Carte des îlots thermiques urbains pour Montréal, au Québec. (Source : Ville de Montréal)



Précipitations

Les changements projetés dans les précipitations au Canada comprennent une augmentation des précipitations en Colombie-Britannique et dans les provinces atlantiques, ainsi que des changements dans la répartition saisonnière des précipitations dans l'ensemble du pays (Bush et coll., 2014). On prévoit une augmentation des précipitations durant toutes les saisons dans la majeure partie du Canada, à l'exception d'une baisse en été dans le Sud-Ouest (Bush et coll., 2014). La figure 11 montre les changements dans la configuration des précipitations au Canada au cours des 59 dernières années.



Vent

Les changements dans les configurations de vent ont un lien avec les tendances et les extrêmes de température et de précipitations. Une étude suggère que l'intensité de la vitesse moyenne quotidienne du vent augmentera de 10 à 30 % partout au Canada d'ici la fin du 21^e siècle par rapport aux conditions de références de la période 1955-2009 (Cheng et coll., 2014). Toutefois, l'importance de ces changements demeure incertaine.

Glaces de lac, de rivière et de mer

Les changements dans la configuration des glaces de lac, de rivière et de mer présentent des risques pour les régions urbaines situées à proximité des cours d'eau et des océans. L'importance et la durée saisonnière de la glace intérieure sont sujettes à diminuer à mesure que les hivers deviennent plus doux; cependant, l'évolution des configurations des débâcles printanières présente des risques en ce qui concerne les inondations dues aux embâcles et la gestion des infrastructures sur les rivières et les lacs (Bush et coll., 2014). Par exemple, au printemps 2015, ce phénomène a entraîné l'évacuation d'urgence de Perth-Andover, au Nouveau-Brunswick (voir le chapitre 8) (Presse canadienne, 2015a).

Figure 12 : Un embâcle force l'ordre d'évacuation à Perth-Andover au printemps 2015. (Source : Caserne de pompiers de Perth-Andover)



Niveaux d'eau

Les niveaux des eaux intérieures et des océans devraient changer de façon considérable au Canada, bien que la direction du changement varie géographiquement. Alors que les niveaux devraient augmenter dans la majeure partie des côtes atlantique et pacifique, une grande partie de la côte nord connaîtra une baisse relative du niveau de la mer due à un phénomène connu sous le nom de « relèvement isostatique » qui fait en sorte que les terres autrefois écrasées par des glaciers décompressent lentement et remontent (Atkinson et coll., 2016). Alors qu'on s'attend à une baisse du niveau d'eau dans certaines voies navigables intérieures (comme les Grands Lacs) en raison d'une évaporation accrue, le niveau d'autres cours d'eau devrait augmenter, au moins temporairement (Bush et coll., 2014).

Pergélisol

La fonte du pergélisol est une problématique importante dans le Nord du Canada, où l'infrastructure est construite sur des sols reposant sur du pergélisol (Prowse et coll., 2009; Association des transports du Canada, 2010a) (voir le chapitre 3).

Les variations de température peuvent également changer la nature des risques liés au transport en hiver. Par exemple, les zones habituellement frappées par des chutes de neige pourraient connaître une augmentation des précipitations de pluie verglaçante et de la formation de glace noire.

2.3 RISQUES CLIMATIQUES POUR LE TRANSPORT URBAIN

Les réseaux routiers, les systèmes de transport ferroviaire et les réseaux de transport actif sont vulnérables aux risques climatiques et météorologiques extrêmes de deux façons principales. Tout d'abord, les opérations peuvent être perturbées par des événements météorologiques extrêmes et les droits de passage obstrués, comme décrit à la section 2.1. Deuxièmement, l'infrastructure est structurellement et physiquement vulnérable aux variations croissantes projetées de certaines variables climatiques (par exemple, la température et les précipitations). L'infrastructure peut être exposée à des intempéries extrêmes dont les conceptions techniques originelles n'ont pas tenu compte, car on croyait que les extrêmes climatiques historiques représentaient avec exactitude les conditions futures (voir encadré). Les événements violents de même que les changements graduels des conditions météorologiques « moyennes » peuvent donc réduire la durée de vie et le rendement des infrastructures et augmenter les coûts d'entretien et d'exploitation (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014). Le tableau 1 donne un aperçu des impacts des changements climatiques sur les systèmes de transport urbain.

VULNÉRABILITÉS RÉGLEMENTAIRES : CODES, NORMES ET OUTILS CONNEXES (CNOC)

On pourrait appeler « vulnérabilité réglementaire » l'omission de suffisamment tenir compte de l'évolution des conditions climatiques dans l'élaboration et l'application de normes d'ingénierie et l'aménagement du territoire. Une enquête sur les études de cas qui ont utilisé le Protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP)⁵ s'est penchée sur le rôle joué par les codes, les normes et les outils connexes (CNOC) à l'égard de l'infrastructure résiliente (Ingénieurs Canada, 2012). L'enquête a révélé que certaines administrations appliquent les codes nationaux directement, que certaines modifient les codes nationaux et que d'autres élaborent des codes adaptés afin de tenir compte de la géographie locale et des préférences en matière de tolérance au risque. Selon le rapport, il est possible que l'adoption d'un « facteur d'ajustement climatique » dans les CNOC au niveau national ne révolutionne pas les pratiques locales, mais les auteurs suggèrent que les mises à jour fréquentes en fonction des projections des modèles climatiques pourraient aider les praticiens à adapter leurs CNOC. D'autres outils à ajouter aux CNOC ont été considérés comme très appropriés pour le Canada, au nombre desquels figurent les suivants : le jugement professionnel et l'orientation de la gestion en fonction des conditions locales; les pratiques acceptées dans les régions; l'entretien, l'opérabilité et les considérations en matière d'approvisionnement; d'autres facteurs sociaux, environnementaux et économiques (Ingénieurs Canada, 2012).

⁵ Le Protocole d'ingénierie du CVIIP, dirigé par Ingénieurs Canada, est un processus en cinq étapes mis sur pied pour analyser la vulnérabilité de l'ingénierie des systèmes d'infrastructure individuels en fonction du climat actuel et des projections climatiques. Pour de plus amples renseignements, consultez l'adresse suivante : <http://pievc.ca/>

3.0 INFRASTRUCTURE ROUTIÈRE URBAINE

L'infrastructure routière urbaine comprend les routes pour les véhicules (c.à.d, les camions et les autobus, que ce soit des trolleybus ou des autobus diesel); l'électricité pour les feux de circulation, la signalisation et l'éclairage; les ponts et l'infrastructure de gestion des eaux pluviales (ponceaux, fossés et autres). Alors que le nombre de kilomètres véhicule parcourus (KVP) dans les villes canadiennes est légèrement en baisse (Perl et Kenworthy, 2010), le réseau routier demeure d'une importance cruciale pour les économies urbaines pour le mouvement du fret et des passagers. Cela est particulièrement vrai dans le cas des villes dépourvues de solides corridors pour le transport en commun entre les centres urbains et les banlieues.

PRÉCIPITATIONS

Les précipitations affectent les routes urbaines et les ponts de diverses façons. L'affouillement (causé par l'instabilité du sol ou du talus lorsque l'eau s'infiltra dans la sous-structure de la chaussée) et les inondations entraînent souvent des retards, des détours et la fermeture des routes, réduisant la mobilité et augmentant le temps de déplacement à la fois pour les voitures et le transport en commun par autobus (United States Federal Highway Administration, 2015; Andrey et Mills, 2003). Les épisodes de précipitations de forte intensité perturbent l'alimentation électrique pour la signalisation routière et d'autres infrastructures de soutien, causent des perturbations du réseau routier lorsque les volumes de ruissellement dépassent la capacité des ponceaux et des étangs de collecte des eaux de ruissellement, et surpassent la perméabilité des matériaux de construction, réduisant la sécurité routière (augmentant le risque d'accident et le risque d'affouillement des ponts (Andrey et Mills, 2003; Transportation Research Board, 2008; Revi et coll., 2014) Par exemple, le 29 mai 2012 à Montréal, 45 mm de pluie sont tombés en moins d'une heure, entraînant des crues éclair et la fermeture de rues.

Alors que la proportion des chutes de neige comme précipitations hivernales est susceptible de diminuer au Canada au cours du 21^e siècle (Bruce, 2011), les tempêtes hivernales extrêmes produisant de fortes chutes de neige continueront de perturber les routes et le transport en commun. Ces événements pourraient entraîner des retards importants dans les services, comme ce fut le cas à Ottawa, en 2013, lorsque de fortes chutes de neige ont entraîné des pertes de traction et l'embourbement des autobus (CTV News, 2013).

Les événements de pluie verglaçante sont sujets à devenir plus fréquents dans de nombreuses régions du Canada (Cheng et coll., 2011), provoquant l'accumulation de glace, le blocage de routes et des pannes de courant dus aux chutes de branches d'arbres et à l'affaissement de lignes électriques, et posant des risques pour la sécurité routière dans les zones urbaines (Andrey, 2010; Andrey et coll., 2013). L'utilisation accrue de sel pour lutter contre les conditions routières glacées contribue à la corrosion des infrastructures en béton et a des répercussions négatives sur la santé des écosystèmes et des sources d'approvisionnement en eau en milieu urbain en bordure de route (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014).

TEMPÉRATURE

Le stress lié au climat que subissent les mélanges de revêtement est un problème croissant pour les exploitants routiers. Alors que la plupart des revêtements d'asphalte et de béton utilisés au Canada sont conçus pour résister à des températures variant entre -20 °C et 30 °C, les températures prévues dans de nombreuses villes canadiennes au cours du 21^e siècle dépassent ces limites. Durant les épisodes de chaleur extrême pendant les mois d'été, le ramollissement, l'orniérage, le ressusage et la remontée de l'asphalte devraient augmenter en fréquence et en gravité (Mills et Andrey, 2002). Le ramollissement et l'orniérage se produisent lorsque les voitures écrasent le revêtement chaud (Mills et coll., 2009). Le ressusage se produit lorsque le bitume ressort de la surface de traitement de la chaussée (la couche imperméable sur laquelle les véhicules circulent); la remontée se produit

lorsque le bitume remonte jusqu'à la frange de l'enrobé bitumineux, mais pas au-delà de la surface bitumineuse imperméable. Alors que le ressuage provoque des dommages plus graves à la chaussée, les deux phénomènes réduisent l'intégrité de la chaussée (Texas Department of Transportation, 2006). Le ramollissement de la chaussée conduit également à la réduction des charges maximales sur les routes municipales, à une diminution de la qualité de roulement et du rendement des véhicules, à des coûts d'entretien accrus, et réduit la durée de vie des routes, des ponts et des ponceaux (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014). Dans des conditions de chaleur extrême, les camions et les autobus endommagent plus lourdement les routes que les automobiles en raison de leurs limites de charge de châssis et de leurs capacités de chargement de passagers plus importantes, ce qui exacerbe les problèmes d'ornièrage des chaussées et de cisaillement (Savonis et coll., 2008).

Par ailleurs, la chaleur extrême produit également un stress thermique chez les travailleurs de la construction (Transportation Research Board, 2008); les jours d'été particulièrement chauds, il peut ne pas être sécuritaire ou possible d'effectuer des travaux de construction pendant les heures de pointe durant le jour (United States Federal Highway Administration, 2015).

L'infrastructure des ponts est également vulnérable à la chaleur extrême. Les ponts sont conçus pour résister à une certaine activité d'expansion et de contraction au moyen des matériaux flexibles intégrés entre les points fixes. Cependant, à mesure que les températures augmentent, les limites de ces joints de dilatation peuvent être dépassées et causer le déplacement de matériaux ou la fissuration des matériaux du tablier, en particulier au niveau de l'interface à points fixes. La fissuration peut conduire à une détérioration substantielle du pont, entraînant des fermetures et de longs détours (Cohen et coll., 2005). De plus, tant la chaleur extrême que le froid extrême peuvent entraîner le dysfonctionnement des feux de circulation (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014).

En raison des changements dans les configurations saisonnières de température, la fréquence des cycles de gel et de dégel risque d'augmenter partout au Canada, et le moment et le début des événements de gel-dégel sont susceptibles de changer et d'avoir une incidence sur l'infrastructure routière (Transportation Research Board, 2008). Pendant les périodes de dégel, l'humidité s'infiltra dans les petites fissures, gèle et prend de l'expansion avec le retour du temps froid, puis fond (causant des faiblesses dans la chaussée) lors du prochain dégel (United States Federal Highway Administration, 2015). La chaussée devient alors plus sujette au cisaillement (craquage) et à l'ornièrage, affectant l'intégrité et la stabilité des routes (Transportation Research Board, 2008; United States Federal Highway Administration, 2015). De plus, dans les climats nordiques, les cycles de gel et de dégel et la hausse des températures contribuent à la dégradation accrue du pergélisol, posant des risques pour la stabilité des routes urbaines et de leurs remblais (Woudsma et coll., 2007; Association des transports du Canada, 2010a).

CHANGEMENTS DANS LES NIVEAUX D'EAU

L'affouillement des ponts, causé par l'érosion du sable de soutien et de la roche sédimentaire autour des ponts construits sur les cours d'eau (Transportation Research Board, 2008), a affecté de nombreuses administrations canadiennes lors d'événements causant un niveau d'eau élevé (Environnement Canada, 2014). De même, les inondations et les ondes de tempête présentent des risques d'érosion des routes côtières – cela est particulièrement problématique dans les provinces atlantiques et en Colombie-Britannique (AMEC Inc., 2011). Vancouver a récemment été désignée la 15^e ville la plus vulnérable dans le monde à la hausse du niveau de la mer, avec des impacts probables sur l'infrastructure routière d'ici 2100 (alors qu'une hausse de 1,1 m du niveau de la mer est projetée). Ces impacts comprennent l'inondation, l'érosion et l'affouillement des rues du centre-ville situées dans des zones de faible élévation (Mills, 2016).

VENTS

Les données suggèrent que l'intensité des rafales (en moyenne et lors d'événements extrêmes) est susceptible d'augmenter au cours du 21^e siècle au Canada (Cheng et coll., 2008), mais avec une grande variabilité régionale (Cheng et coll., 2014). Les débris (par exemple, les lignes électriques, les arbres et les branches projetés au sol) causés par les vents forts peuvent bloquer les routes, les trottoirs et les pistes cyclables (Ville de Montréal, 2015), alors que les rafales de neige perturbent la visibilité durant les mois d'hiver (Andrey et coll., 2013). Les vents violents peuvent également causer la fermeture temporaire des ponts – par exemple, le pont Burlington Skyway près de Hamilton, en Ontario est fermé lorsque les vents atteignent ou dépassent 85 km/h (Craggs, 2014).

FEUX DE FORêt

Les changements des configurations de température et de précipitations affectent la fréquence et la gravité des feux de forêt, en particulier dans les régions plus sèches de l'Ouest du Canada (les Prairies et la Colombie-Britannique). Les recherches récentes indiquent que la fréquence des feux de forêt augmentera au cours du 21^e siècle et que les organismes de gestion des incendies dans les zones côtières et tempérées devront possiblement adapter leurs capacités de planification et d'intervention pour faire face aux changements potentiels dans les régimes des feux (Wang et coll., 2015). Cela a une incidence sur le transport, en particulier sur la planification des interventions d'urgence. Par exemple, au cours des feux de forêt catastrophiques de 2011 à Slave Lake, en Alberta, le personnel affecté aux urgences a coordonné avec succès l'évacuation des résidents par la route, malgré l'épaisse fumée et la disponibilité de seulement quelques routes permettant de sortir de la ville (qui sont rapidement devenues congestionnées). Ce succès a été attribué à la planification et à la coordination entre les services municipaux et le personnel affecté aux urgences avant la crise (KPMG, 2012).

POSSIBILITÉS

Il existe également des possibilités pour le transport routier associées aux changements climatiques. Dans les villes du Sud, par exemple, la saison de la construction est susceptible d'être plus longue et les coûts d'entretien des routes en hiver pourraient être inférieurs en raison des hivers plus doux, et ce, en dépit d'une proportion croissante de la pluie verglaçante (Andrey et Mills, 2003; Fu et coll., 2009). Il reste à voir cependant quel sera l'impact de l'augmentation des cycles de gel et de dégel sur ces économies de coûts.

4.0 TRANSPORT FERROVIAIRE URBAIN

Les systèmes ferroviaires urbains comprennent les métros, les SLR et les tramways. Ils comprennent également les systèmes de transport de fret urbain, bien que les renseignements sur les systèmes ferroviaires régionaux et nationaux se trouvent dans les chapitres régionaux du présent rapport.

Des projets de transport en commun ferroviaires en cours et projetés, y compris ceux qui sont mentionnés ci-dessous, viennent compléter les systèmes de métro et de SLR actuels et fréquemment utilisés à Vancouver, Calgary, Edmonton, Montréal et Toronto. D'autres administrations dont les populations sont moins importantes commencent également à reconnaître les avantages d'investir dans le transport en commun rapide. Par exemple, la Ville de London a entrepris la phase de consultations publiques et de sélection pour le mode de transport en commun rapide, et la Ville de Victoria a entrepris les étapes de planification pour instaurer un SLR dans sa région métropolitaine. Ces projets démontrent un regain de l'intérêt et de l'appui du public à l'égard du transport en commun rapide en général, et pour les modes de transport sur rail en particulier.

- **Toronto** : SLR Eglinton-Crosstown et prolongement du métro à Scarborough (phase de construction);
- **Kitchener-Cambridge-Waterloo** : SLR ION (phase de construction);
- **Région du Grand Toronto et de Hamilton** : Électrification du réseau GO Transit (phase de planification);
- **Ottawa** : SLR, ligne de la Confédération (phase de construction).

PRÉCIPITATIONS

De nombreux systèmes ferroviaires urbains comptent sur les réseaux d'électricité municipaux; par conséquent, les locomotives et l'équipement de signalisation sont vulnérables aux pannes de courant dans des conditions météorologiques extrêmes (par exemple, de pluie et de neige). Les plates-formes de voies sont également soumises à un certain nombre d'impacts climatiques similaires à ceux des routes urbaines, y compris une stabilité réduite pendant les inondations et l'érosion lors d'événements extrêmes de précipitations (Mills et Andrey, 2002).

Comme pour les routes, les précipitations peuvent surcharger l'infrastructure de gestion des eaux pluviales qui protège le transport en commun sur rail souterrain, de surface et surélevé. Les événements météorologiques extrêmes peuvent entraîner des inondations et l'immersion des systèmes ferroviaires comme ce fut le cas à Toronto à l'été 2013 (Wooler, 2004). Les précipitations extrêmes survenues à Montréal en mai 2012 (dont il est question à la section 3) ont également entraîné la fermeture des tunnels et l'évacuation de plusieurs stations de métro (Ville de Montréal, 2015).

TEMPÉRATURE

L'infrastructure ferroviaire est sujette au gauchissement en cas de chaleur extrême, augmentant le risque de dysfonctionnement des capteurs, de retards et de limitations des vitesses, et ☐ dans les cas extrêmes – de déraillement (Savonis et coll., 2008). Les tunnels utilisés dans les systèmes souterrains de transport en commun ferroviaire peuvent également éprouver des difficultés opérationnelles en cas de chaleur extrême, y compris des problèmes mécaniques liés à la ventilation. Par conséquent, les exploitants sont tenus de convenablement tenir compte du confort, de la santé et de la sécurité des passagers (Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research (OFCM), 2002).

Le froid extrême affecte également le transport ferroviaire urbain. Par exemple, le système de métro de la Toronto Transit Commission (TTC) a été confronté à plusieurs pannes de courant dans des conditions de froid extrême en hiver 2015, principalement en raison du bris de conduites d'eau qui ont causé l'inondation des tunnels (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014). Les températures froides peuvent également causer le gel des commutateurs d'aiguillage de voie, causant des retards (Presse canadienne, 2015b). Toutefois, cette situation pourrait devenir moins problématique dans les villes du Sud si la fréquence des nuits et des jours froids diminue conformément aux projections (Bush et coll., 2014).

CHANGEMENTS DANS LES NIVEAUX D'EAU ET ONDES DE TEMPÊTE

Durant les périodes d'inondations dues aux embâcles saisonniers, les voies ferrées à proximité des plans d'eau et leurs remblais peuvent être inondés, affaissés ou érodés. L'affouillement représente aussi un risque pour les ponts ferroviaires comme le suggèrent les événements survenus à Calgary à l'été 2013 (voir la section 2.1).

VENTS

Les événements de forts vents posent également des risques pour l'infrastructure et l'exploitation ferroviaire, dont les dommages aux fils aériens et à l'équipement de signalisation en hauteur, et le renversement de wagons (OFCM, 2002). À l'instar des routes, les lignes de chemin de fer peuvent également être obstruées par la chute de débris, provoquant des retards dans les services.

POSSIBILITÉS

L'investissement dans le transport ferroviaire peut améliorer la redondance des réseaux de transport urbain, offrant des options de transport en commun lorsque les routes sont fermées, dangereuses ou congestionnées (encadré 1). Les projets de transport ferroviaire pourraient également bénéficier d'une saison de la construction plus longue en raison du raccourcissement des hivers (Transportation Research Board, 2008).

REDONDANCE DANS LES SYSTÈMES DE TRANSPORT URBAIN

La redondance est une méthode pour améliorer la résilience des réseaux de transport aux conditions météorologiques extrêmes et aux changements climatiques. Un système de transport redondant permet d'offrir aux voyageurs des choix de sorte que même lorsque des perturbations majeures de service se produisent (par exemple, une congestion extrême ou des affaissements), d'autres options sont disponibles et les voyageurs peuvent effectuer leurs déplacements et les économies peuvent continuer à fonctionner. Par exemple, dans les grandes villes comme Montréal et Toronto, si des inondations localisées causent l'arrêt du système de métro, les utilisateurs peuvent toujours se déplacer à pied, à vélo ou en autobus. Comme exemple opposé, soulignons la dépendance presque exclusive des voyageurs à l'égard de l'autoroute 401 dans la région du Grand Toronto et de Hamilton pour les déplacements entre Toronto et les points à l'Est et à l'Ouest. Si l'autoroute 401 devait être fermée, les réseaux de routes d'évitement et les autres modes de transport seraient insuffisants pour maintenir des temps de déplacement raisonnables et la fiabilité.

L'amélioration de la redondance ne signifie pas la construction de nouvelles routes, en particulier au-delà du niveau de la demande actuelle dans les corridors. Dans l'histoire de l'Amérique du Nord, la construction de routes supplémentaires a souvent stimulé une demande latente (cachée) pour l'augmentation de la capacité routière et a peu fait pour réduire la congestion, améliorer l'efficacité du réseau ou régler les problèmes liés à l'étalement urbain (Duranton et Turner, 2011).

5.0 TRANSPORT ACTIF

Les réseaux pédestres et cyclistes sont essentiels au déplacement des personnes dans les villes canadiennes. Les usagers du transport en commun, les cyclistes et les automobilistes à un certain point durant leurs déplacements, sont tous des piétons, et les installations piétonnières et cyclistes sont les formes les plus fiables de connectivité dans les villes. De plus en plus d'investissements dans les modes de transport actif sont effectués au niveau municipal au Canada pour aborder la question des préoccupations liées à la fois à l'atténuation et à l'adaptation aux changements climatiques (Younger et coll., 2008; Ayres, 2014). Bien que les avantages sociaux et environnementaux du transport actif soient largement diffusés dans les documents de planification municipale, ces modes sont également de plus en plus attrayants pour les courts trajets comme un moyen de gagner du temps alors que les villes canadiennes deviennent de plus en plus denses et congestionnées.

Les modes de transport actif offrent également une forme importante de redondance pour les réseaux de transport urbain (encadré 1). La marche et le vélo offrent un « filet de sécurité »

permettant les déplacements lorsque le transport mécanisé est temporairement impossible. Étant donné les avantages du transport actif en ce qui concerne la santé publique, l'insensibilité relative aux impacts des changements climatiques ainsi que leurs faibles coûts d'investissement et leurs impacts limités sur l'environnement, de nombreuses villes canadiennes (et ailleurs dans le monde) investissent de plus en plus dans ces modes de transport.

PRÉCIPITATIONS

Les systèmes de transport actif sont confrontés aux mêmes vulnérabilités que les routes en ce qui a trait à la dégradation de la chaussée, aux problèmes de gestion des eaux pluviales liées au ruissellement et à la perméabilité, et aux perturbations opérationnelles qui y sont associées (par exemple, les inondations et l'affouillement). Cela est particulièrement vrai pour les trottoirs et les pistes cyclables à proximité des routes urbaines, qui constituent la majorité des infrastructures de transport actif au Canada (Transports Canada, 2011).

On note une tendance consistant à laisser de côté la marche et le vélo lors d'événements de précipitations – toutes les formes de précipitations réduisent la proportion des déplacements effectués par l'entremise des modes de transport actif (Koatse et Rietveld, 2009). De même, la sécurité des piétons diminue par mauvais temps, alors que le nombre de blessures survenant à l'extérieur augmente considérablement durant les événements de précipitations hivernales (y compris la neige, la pluie et la pluie verglaçante) (Morency et coll., 2012). Malgré tout, le transport actif demeure une forme importante de redondance. Les voyageurs sont susceptibles de marcher par mauvais temps si les routes ou les lignes de transport en commun sont hors service, ce qui signifie que le volume de déplacements essentiels n'est pas affecté de manière considérable par les événements météorologiques violents (Koatse and Rietveld, 2009; Sabir et coll., 2010).

TEMPÉRATURE

Les températures extrêmes affectent également l'utilisation des modes de transport actif. La marche et le vélo durant les journées chaudes nécessitent plus d'efforts et peuvent poser des risques pour la santé, en particulier pour les populations vulnérables, comme les personnes âgées (Younger et coll., 2008), un phénomène aggravé par l'effet des îlots thermiques urbains (voir la section 2.2). Certaines recherches (Sabir et coll., 2010, par exemple) suggèrent que, par très grand froid, les cyclistes préfèrent le transport en commun et la marche, tandis que le contraire est vrai pendant les périodes de temps chaud extrême. Cependant, d'autres recherches (par exemple, Koatse et Rietveld, 2009) ont conclu que les températures extrêmement élevées ou extrêmement basses contribuent à réduire l'utilisation du vélo.

CHANGEMENTS DANS LES NIVEAUX D'EAU ET ONDES DE TEMPÊTE

Comme dans le cas des routes, les sentiers pédestres et les pistes cyclables (en particulier le long des routes côtières ou dans les parcs à proximité de l'océan) sont à risque d'inondation et d'affaissement en raison de la hausse du niveau de la mer et des ondes de tempête (Mills, 2016).

VENTS

L'infrastructure de transport actif a tendance à être moins vulnérable aux impacts structurels que les réseaux routiers et de transport en commun en raison de l'absence de véhicules lourds et motorisés. Toutefois, les sections aériennes des trottoirs et des pistes cyclables de même que la signalisation peuvent être endommagées par des vents violents lors d'événements météorologiques extrêmes (OFCM, 2002). Les vents violents sont également associés à une utilisation réduite du vélo (Koatse et Rietveld, 2009). Les vents forts constituent aussi un danger pour les cyclistes et les piétons à cause des débris qui volent ou tombent.

POSSIBILITÉS

Les hivers plus doux ayant moins de neige dans de nombreuses villes canadiennes contribueront à prolonger l'accès saisonnier aux infrastructures pour la marche et le vélo. Certaines villes du Nord considèrent les risques climatiques à l'infrastructure routière comme une occasion d'intensifier l'utilisation des modes de transport actif. Par exemple, Whitehorse a mis au premier plan le transport actif au cours des dernières années et a investi dans des installations cyclables de haut niveau. Cette décision est due, en partie, à l'augmentation projetée de la durée de la saison au cours de laquelle le cyclisme et la marche sont possibles pour la plupart des déplacements (Transports Canada, 2011).

Tableau 1 : Aperçu des impacts liés à chaque mode de transport urbain en fonction des éléments climatiques abordés dans la présente section.

Facteurs climatiques	Impacts des facteurs climatiques sur les routes urbaines, les ponts, les trottoirs et l'infrastructure de soutien (gestion des eaux pluviales, signalisation, électricité)	Impacts sur les infrastructures de transport ferroviaire urbain, les activités et l'infrastructure de soutien (gestion des eaux pluviales, signalisation, électricité)
Précipitations	<ul style="list-style-type: none"> Événements de pluie et chutes de neige plus extrêmes; précipitations moyennes annuelles supérieures Immersions, inondations, érosion et affouillement des voies ferroviaires Ponceaux bloqués, ce qui cause l'effondrement du ponceau Blocages et perturbations des routes dus aux tempêtes de neige, de verglas, de pluie Instabilité du support et des talus due à l'humidité accrue du sol Retards dans les déplacements, détours et interruptions Affouillement et fermetures des ponts Retards et détours dans les services de transport en commun par autobus Surcharge de l'infrastructure de gestion des eaux pluviales Conditions de chaussée glissante plus fréquente sur le réseau routier (risque accru d'accidents de la route) Perturbation des services publics (pannes de courant, par exemple) Baisse du transport actif Inondation des installations d'entreposage d'autobus 	<ul style="list-style-type: none"> Obstruction des voies ferroviaires et des aiguillages des voies ferroviaires Retards dans le transport ferroviaire, inondations, immersions et fermetures des voies, des tunnels et des stations Perturbations des services publics (pannes de courant, par exemple) pour les locomotives électriques et l'équipement de signalisation Stabilité réduite de l'assiette des rails lors d'inondations Érosion du remblai et des passages à niveau lors d'événement de pluie Inondation des installations d'entreposage de train
	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des événements de pluie verglaçante Conditions de chaussée glissante plus fréquentes (en hiver) Déplacement des modes de transport actif vers le transport en commun et l'automobile Perturbation des services publics (pannes de courant, par exemple) Utilisation accrue de sel – effets sur l'écosystème; dysfonctionnement des postes de signalisation; corrosion du béton 	<ul style="list-style-type: none"> Perturbation des services publics (pannes de courant, par exemple) Voies ferroviaires entravées (par des branches tombées, par exemple) Utilisation accrue de sel – effets sur l'écosystème; dysfonctionnement des postes de signalisation; corrosion du béton

Facteurs climatiques	Impacts des facteurs climatiques sur les routes urbaines, les ponts, les trottoirs et l'infrastructure de soutien (gestion des eaux pluviales, signalisation, électricité)	Impacts sur les infrastructures de transport ferroviaire urbain, les activités et l'infrastructure de soutien (gestion des eaux pluviales, signalisation, électricité)
Température de l'air	<p>Chaleurs accablantes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ramollissement de la chaussée et des trottoirs, orniéragés, bourrelets, ressauage et remontée • Réduction du confort des passagers, du rendement des véhicules et de la durée de vie des routes et des trottoirs • Expansion thermique des ponts • Stress thermique pour les travailleurs et les utilisateurs du transport actif (construction impossible ou dangereuse durant le jour) • Dysfonctionnements de la signalisation routière • Hausse des coûts d'entretien des routes et des véhicules • Diminution de la part du mode de transport actif; déplacement vers le mode de transport en commun et l'automobile • Augmentation de la demande d'électricité qui cause une panne d'électricité 	<ul style="list-style-type: none"> • Gauchissement des rails (limites de vitesse, déversements, déraillements, retards de service, dysfonctionnement des capteurs) • Dysfonctionnement des capteurs sur les voies ferroviaires
	<p>Froids extrêmes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dysfonctionnements de la signalisation routière • Diminution de la part du mode de transport actif; déplacement vers le mode de transport en commun et l'automobile 	<ul style="list-style-type: none"> • Gel des aiguillages des voies ferroviaires • Fissuration des rails • Perturbations des services publics (par exemple, les pannes de courant, bris des conduites d'eau causant des inondations dans les tunnels) pour les locomotives électriques, les équipements de signalisation et les tunnels
	<p>Augmentation et déplacement des cycles de gel et de dégel</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cisaillage et orniérage de la chaussée et formation de nids de poule • Dommages à l'infrastructure de gestion des eaux pluviales (fissures et déchaussement) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages aux voies ferroviaires et aux tunnels souterrains
	<p>Dégradation du pergélisol (Nord)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Déstabilisation des routes d'hiver (déchaussement, affaissement, défaillances du remblai, par exemple) • Déstabilisation des sentiers pédestres et des pistes cyclables • Impacts sur l'infrastructure de gestion des eaux pluviales, les conduites d'eau et les services publics souterrains 	<ul style="list-style-type: none"> • Déstabilisation de l'assiette des rails et du remblai • Ralentissement des commandes, réduction de la vitesse des trains

Facteurs climatiques	Impacts des facteurs climatiques sur les routes urbaines, les ponts, les trottoirs et l'infrastructure de soutien (gestion des eaux pluviales, signalisation, électricité)	Impacts sur les infrastructures de transport ferroviaire urbain, les activités et l'infrastructure de soutien (gestion des eaux pluviales, signalisation, électricité)	
Changements dans les niveaux d'eau et dans la configuration des glaces de lac et de mer	Inondations dues aux embâcles	<ul style="list-style-type: none"> • Inondations saisonnières des routes • Perturbation des services publics (pannes de courant, par exemple) • Surcharge de l'infrastructure de gestion des eaux pluviales • Affouillement de ponts 	
	Hausse du niveau de la mer (sur la côte)	<ul style="list-style-type: none"> • Érosion, affouillement et inondation de la chaussée et des pistes cyclables • Affouillement de ponts 	
	Ondes de tempête lors d'événements météorologiques extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> • Inondations dues aux ondes de tempête (inondation des routes, des ponts, des autoroutes, des pistes cyclables et des trottoirs le long des côtes) • Surcharge de l'infrastructure de gestion des eaux pluviales 	
Vents	Augmentation de la vitesse moyenne quotidienne du vent et de la fréquence des événements de vents violents	<ul style="list-style-type: none"> • Besoins d'entretien accrus des structures de grande taille (par exemple, les lignes électriques et l'équipement de signalisation) • Mauvais fonctionnement des feux de circulation et dommages aux feux de circulation • Conditions de travail dangereuses en raison des débris emportés par le vent • Ponceaux bloqués (par exemple, arbres et débris) • Fermeture des ponts et dommages • Obstruction de la chaussée, des trottoirs et des pistes cyclables causée par les débris (lignes électriques affaissées, chutes d'arbres et de branches par exemple) • Perturbation des services publics et des communications en raison d'une panne d'électricité • Dommages aux pistes cyclables et aux trottoirs élevés • Utilisation réduite des vélos par temps de vents violents 	
Feux de forêt	Feux de forêt plus fréquents	<ul style="list-style-type: none"> • Accès impossible ou congestionné aux collectivités et aux points d'évacuation 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun exemple recensé dans la littérature

6.0 PRATIQUES D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR LE TRANSPORT URBAIN

La réduction de la vulnérabilité des zones urbaines canadiennes aux changements climatiques et aux conditions météorologiques extrêmes nécessite une gouvernance et une collaboration efficaces au sein des gouvernements, des organismes de transport et d'autres secteurs municipaux et entre ces derniers. Au Canada, les cadres stratégiques et les programmes de financement fédéraux, provinciaux et territoriaux peuvent soutenir les efforts d'adaptation municipaux, alors que les organismes de transport public et privé sont chargés de fournir des services sécuritaires et efficaces dans la perspective de conditions météorologiques et climatiques plus variables.

Le partage des connaissances sur les pratiques relatives à l'infrastructure résiliente et les pratiques opérationnelles est également essentiel. Au niveau municipal, il existe un certain nombre de réseaux de partage des connaissances sur l'adaptation climatique, y compris ICLEI Canada (gouvernements locaux pour la durabilité). L'initiative Building Adaptive and Resilient Communities (Bâtir des collectivités adaptatives et résilientes, BARC) de ICLEI Canada (encadré 2) est un outil interactif en ligne conçu pour aider les gouvernements locaux à recenser et à adopter des stratégies d'adaptation au climat. Les municipalités membres reçoivent un soutien un à un offert par le personnel pour l'utilisation de l'outil (ICLEI, 2010), et le transport est l'un des aspects névralgiques du programme.

INITIATIVE BÂTIR DES COLLECTIVITÉS ADAPTATIVES ET RÉSILIENTES (BARC)

L'initiative BARC fonctionne à l'aide d'un processus « par jalon » à cinq étapes :

- **Initier**, où les intervenants sont recensés et les résolutions du conseil sont prises pour aborder l'adaptation;
- **Rechercher**, où il faut déterminer les changements climatiques probables et l'évaluation des risques;
- **Planifier**, où les objectifs, les mesures et l'établissement des budgets d'adaptation sont mis en place;
- **Mettre en œuvre**, où les mesures sont mises en œuvre et le soutien politique est solidifié;
- **Surveiller et examiner**, où l'efficacité des mesures est établie, les succès sont communiqués et les examens sont effectués (ICLEI, 2010).

Les stratégies d'adaptation peuvent être placées dans les cinq dernières catégories en fonction de leur style d'intervention, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2014).

STRATÉGIES DE GESTION DES RISQUES EN CAS DE CATASTROPHE

Ces stratégies sont connues des municipalités et ont aidé de nombreuses villes à réduire avec succès les impacts des événements météorologiques violents dans le passé (par exemple, l'ouragan Juan à Halifax, les feux de forêt à Slave Lake). Les exemples incluent la modification des procédures de gestion des urgences à la lumière des impacts climatiques vécus ou attendus, et l'évaluation des risques organisationnels à l'aide de programmes informatisés et de logiciels, et autres. Récemment, Calgary et Toronto ont connu une expérience en matière d'intervention en cas de catastrophes climatiques à la suite des événements météorologiques violents qui se sont produits dans les deux villes en 2013 (Davison et Powers, 2013). Les exemples incluent la mise à jour des plans de préparation en vue d'inondations, d'incendies, de tsunamis et d'ouragans et la mise à jour des cartes des zones inondables.

ADAPTATION DE L'ESPACE ET DE L'AMÉNAGEMENT

Cette catégorie de stratégies comprend la modification des procédures pour le contrôle de l'aménagement et de la conception des infrastructures dans certains secteurs afin de prendre en considération les impacts climatiques passés ou attendus. Les conceptions de routes à faible impact comprennent des normes qui visent à réduire à la fois les quantités totales et les taux de ruissellement, et les méthodes naturelles pour atténuer le ruissellement (National Cooperative Highway Research Program, 2006), comme l'obligation d'utiliser des matériaux perméables (Credit Valley Conservation Authority, 2014). Ces conceptions s'appliquent également au transport actif – par exemple, les lignes directrices des North American City Transportation Officials (NACTO) pour les trottoirs et la conception des pistes cyclables reconnaissent l'importance des considérations à faible impact pour la gestion des eaux pluviales. Cela comprend l'augmentation de la perméabilité des matériaux de construction (en réduisant simultanément les coûts à long terme de l'entretien des infrastructures) pour gérer le ruissellement excessif (NACTO, 2012).

Un autre exemple comprend l'apport de modifications au zonage ou aux exigences de construction basées sur la cartographie des zones inondables, l'évitement du routage du transport à travers les zones vulnérables, ou l'exigence que l'infrastructure soit élevée au-dessus d'un certain point (AMEC Inc., 2011). De plus en plus, les municipalités reconnaissent que le fait de considérer l'aménagement et le transport en même temps permet de réduire la vulnérabilité aux changements des conditions environnementales (Larrivée, 2010).

MESURES D'ADAPTATION STRUCTURELLES ET PHYSIQUES

Possiblement la catégorie de mesures d'adaptation la plus tangible, ces stratégies comprennent des solutions basées sur l'ingénierie pour améliorer la résilience physique des réseaux de transport urbain. Aux fins d'adaptation aux précipitations plus fréquentes et plus intenses, les praticiens peuvent élargir les ponceaux, les accotements et les fossés pour améliorer la gestion des eaux pluviales et l'écoulement laminaire, et construire des puits de gravier plus profonds sous les routes et les rails (Savonis et coll., 2008). Les risques d'inondation dus à la hausse du niveau de la mer et aux ondes de tempête peuvent être atténués par la construction de digues et au moyen d'autres techniques de gestion des inondations dans les zones urbaines de faible élévation pour protéger les routes et autoroutes (AMEC Inc., 2011; Mills, 2016).

Aux fins d'adaptation aux changements de températures, les municipalités peuvent utiliser des matériaux de substitution pour obtenir un revêtement plus résistant à la chaleur et à l'orniérage, ainsi que des conceptions de chaussées résistantes à l'orniérage, par exemple, des surfaces plus minces (Andrey et Mills, 2003; United States Federal Highway Administration, 2015). Par exemple, le système « SuperPave » du ministère des Transports de l'Ontario est un système de sélection de matériaux qui utilise les données météorologiques de stations locales et les données de rendement du revêtement pour orienter le choix de mélanges d'asphalte appropriés résistant à la chaleur et à l'orniérage pour les routes provinciales et certaines municipalités ontariennes (ministère des Transports de l'Ontario, 2013) (voir le chapitre 6). La Ville de Toronto a également installé des ventilateurs de refroidissement pour les appareils de signalisation routière et l'infrastructure de systèmes de transport intelligents (STI) pour réduire les risques liés à la chaleur (Ville de Toronto, 2011).

Pour les infrastructures de transport construites sur du pergélisol en voie de réchauffement dans les villes du Nord, les stratégies d'adaptation comprennent la stabilisation mécanique des remblais et la suppression du pergélisol avant la construction; ces méthodes sont toutefois extrêmement coûteuses (Cheng, 2005; United States Arctic Research Commission Task Force, 2003). L'installation de galeries antineige, de conduits d'aération et de thermosiphons peut également protéger les routes et les voies ferroviaires contre le réchauffement des températures (Reimchen et coll., 2009). Dawson City a installé un revêtement de couleur claire sur la rue principale de la ville afin d'augmenter la réflectivité et de réduire l'impact des températures plus élevées sur le pergélisol (Walsh et coll., 2009).

Autres mesures d'adaptation structurelles et physiques :

- Installation des infrastructures d'alimentation de secours pour l'alimentation des fils électriques aériens (par exemple, pour les trolleybus et les tramways) et de la signalisation (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014).
- Élevation des routes et des voies ferroviaires dans les zones inondables (AMEC Inc., 2011; Koatse et Rietveld, 2012).
- Activités intensives de « prévention des inondations » dans les corridors de circulation visant à remplacer les ponceaux et à installer des capteurs d'inondation sur l'infrastructure ferroviaire (Groupe de travail sur les transports et l'environnement, 2014).
- Imperméabilisation des boîtiers de disjoncteurs et d'autres installations souterraines qui fournissent l'alimentation au métro (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014).
- Entretien régulier des systèmes de gestion des eaux pluviales, en particulier les ponceaux, pour maintenir la capacité, et conception de systèmes de drainage pour diriger le ruissellement loin de la chaussée (plutôt que parallèlement à la chaussée), évitant ainsi l'érosion de la chaussée et l'exposition des services publics (Ville de Toronto, 2014).
- Maintien d'une pente latérale positive pour faciliter l'écoulement de l'eau de la surface des routes, et augmentation des capacités des ponceaux et des fossés (United States Federal Highway Administration, 2015).
- Étanchéisation et/ou élévation, s'il y a lieu, des événements et des trous d'homme au niveau de la rue, protection des stations de pompage souterraines, des boîtiers de disjoncteurs et d'autres installations souterraines qui alimentent les systèmes de métro (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014).
- Élevation de tronçons de routes, de trottoirs et de pistes cyclables vulnérables au-dessus du niveau de la mer ou des niveaux de crue projetés (Schwartz, 2011).

ADAPTATION INSTITUTIONNELLE

L'adaptation institutionnelle réfère à l'adoption de politiques visant les changements climatiques. Cela comprend des modifications à la prestation des services des organismes de transport, et des approches relatives à l'entretien des infrastructures. Par exemple, pour les lignes de chemin de fer qui font l'objet de gauchissement, la réduction du service ou de la vitesse pourrait être mise en œuvre au moins à court terme pour assurer la sécurité (Savonis et coll., 2008). Cette catégorie comprend également ce qui suit :

- Mesures de financement novatrices disponibles aux municipalités pour l'adaptation, tels que :
 - des « obligations vertes » (des instruments de créance utilisés pour lever des capitaux privés pour des projets à des fins environnementales précises, y compris le transport en commun et le transport actif);
 - des abattements fiscaux locaux ou incitatifs pour des toits verts et d'autres infrastructures et pratiques de gestion des eaux pluviales qui peuvent produire des avantages pour le transport en matière de réduction du ruissellement;
 - des subventions intergouvernementales ciblées pour des infrastructures de transport résilientes (Harford et coll., 2015).
- Pratiques organisationnelles déterminées au moyen du protocole d'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques du CVIIP (Comité vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques). Par exemple, les recommandations découlant d'une évaluation du CVIIP des

impacts liés à l'augmentation des températures et des précipitations sur les routes et les structures associées à Sudbury comprenaient ce qui suit :

- suivi annuel plus étroit des données hydrauliques relatives aux ponceaux ainsi que des indicateurs clés de rendement de la chaussée (par exemple, les cycles de gel et de dégel, les températures moyennes et extrêmes);
- modification des mélanges de la chaussée afin de mieux résister à la chaleur (SuperPave);
- réalisation d'analyses de sensibilité sur la stabilité du talus d'accotements à haut risque;
- amélioration de la couverture par les arbres le long des routes à faible vitesse pour réduire l'effet des îlots thermiques (Ingénieurs Canada, 2014).
- Planification organisationnelle, pratiques financières et de gestion des risques. Un exemple est le travail entrepris par TransLink pour intégrer les risques climatiques dans les processus de prise de décision, une responsabilité qui incombe à leur directeur financier (voir la section 4).
- Systèmes de transport intelligents (STI). Ces systèmes sont de plus en plus répandus et ont des applications d'adaptation potentielles dans les centres urbains. Les technologies STI peuvent aider les municipalités à « gérer de façon adaptative » la circulation routière, les pratiques d'entretien des infrastructures et les modèles d'investissement grâce à la collecte de données sur les opérations, l'intégrité structurelle de l'infrastructure et d'autres variables, y compris les données climatiques. Selon les recherches, les municipalités peuvent optimiser leurs opérations d'entretien des routes en hiver et économiser de l'argent à l'aide de renseignements en temps réel (Fu et coll., 2009). Un exemple est l'utilisation de systèmes d'information routière dans certaines villes canadiennes, qui fournissent des données en temps réel sur l'état et l'utilisation des routes pour les municipalités (Clean Air Partnership, 2012).
- Pratiques de réduction de la glace. La recherche suggère que « l'application de sel anti-givrage préhumidifié jumelée à l'application de sable et au passage du chasse-neige réduisent les risques d'accident » (Andrey et coll., 2013) dans des conditions de routes glacées. Pour éviter ou résoudre les problèmes environnementaux liés à l'utilisation accrue de sel sur les routes glacées, les municipalités ontariennes emploient des solutions de remplacement à plus faible impact, c.-à-d., du jus de betterave, de la saumure de fromage (Clean Air Partnership, 2012).

MESURES D'ADAPTATION SOCIALE

Ces mesures d'adaptation comprennent des stratégies visant à tirer parti des réseaux sociaux pour accroître la sensibilisation et le temps de réponse lors d'événements extrêmes. Par exemple, de nombreuses municipalités utilisent maintenant les médias sociaux pour communiquer des avis et des alertes aux voyageurs au sujet des conditions routières et de l'infrastructure de transport actif (par exemple, les inondations) et les retards dans les services de transport en commun lors d'événements météorologiques extrêmes (Mims, 2010; White et coll., 2009). Le tableau 2 donne un aperçu des pratiques d'adaptation abordées dans le présent chapitre.

La section qui suit présente cinq études de cas décrivant des approches d'adaptation précises en matière de transport dans des villes canadiennes, y compris une description des endroits et des façons dont les mesures d'adaptation ont été appliquées, leurs avantages, leurs coûts, leurs compromis et les leçons apprises.

Tableau 2 : Exemples de pratiques d'adaptation pour le transport urbain (les citations se trouvent dans la section 6.0).

Risques et impacts climatiques	Adaptations pour les routes, des ponts, et les infrastructures associées (y compris la signalisation, la gestion des eaux pluviales)	Adaptations pour l'infrastructure ferroviaire urbaine et les opérations
Précipitations extrêmes; inondations; volumes annuels plus élevés de précipitations	<ul style="list-style-type: none"> Mise à jour des règlements de zonage pour exiger des normes de construction à faible impact (par exemple, les revêtements perméables) Augmentation de la capacité de gestion des eaux pluviales (par exemple, l'élargissement des ponceaux, des accotements et des fossés); la construction de puits de gravier plus profonds sous la chaussée pour favoriser le drainage souterrain Exiger l'élévation ou le transfert des routes loin des laisses de crue Étanchéisation des événets et des trous d'homme au niveau de la rue Protection des chambres de pompes souterraines Installation de sources d'alimentation de secours pour la signalisation Amélioration des pratiques et des matériaux de drainage et d'entretien (par exemple, des matériaux poreux et perméables) Construction de digues ou d'autres infrastructures pour la gestion des inondations Réalisation d'évaluations de la vulnérabilité, mise à jour de la planification des mesures d'urgence et révision de la cartographie des zones inondables Surveillance des données hydrauliques et des indicateurs de rendement de la chaussée Inspections plus fréquentes des ponceaux et des ponts 	<ul style="list-style-type: none"> Exigences visant l'élévation des rails au-dessus des niveaux de crue Construction de puits de gravier plus profonds sous les assiettes des rails afin d'améliorer la perméabilité et le drainage souterrain; l'installation de systèmes de pompage pour les tunnels Imperméabilisation des événets au niveau de la rue, des boîtiers de disjoncteurs, des stations de pompage et d'autres installations souterraines qui fournissent l'alimentation au métro Réalisation d'évaluations de la vulnérabilité, mise à jour de la planification des mesures d'urgence et révision de la cartographie des zones inondables Utilisation des avis et des mises à jour de centres de régulation de transit pour les usagers des transports ferroviaires urbains Activités de « prévention des inondations » dans les corridors de circulation (par exemple, installation de capteurs d'inondation sur les locomotives, remplacement ou mise à jour des ponceaux)
Proportion accrue de la pluie verglaçante dans les précipitations hivernales	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration des pratiques d'application de sel pour contrôler la neige et la glace (par exemple, en utilisant des matériaux à faible impact, en ajustant le moment et le mélange des applications ou du déneigement) Prise en compte des risques climatiques lors du renouvellement des infrastructures Amélioration du suivi en temps réel des conditions routières 	<ul style="list-style-type: none"> Installation de source d'alimentation de secours pour les fils électriques aériens et les principales installations d'entretien et d'entreposage de la flotte Émission d'avertissements de changement de services avant les fermetures les retards (par exemple, à l'aide des médias sociaux)

Risques et impacts climatiques	Adaptations pour les routes, des ponts, et les infrastructures associées (y compris la signalisation, la gestion des eaux pluviales)	Adaptations pour l'infrastructure ferroviaire urbaine et les opérations
Température	<p>Cycles de gel et de dégel</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suivi des cycles de gel et de dégel, des volumes de circulation et des exigences de rétablissement pour orienter les modifications budgétaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucun exemple recensé dans la littérature
	<p>Chaleur extrême (dilatation thermique des ponts, dégradation de la chaussée, gauchissement des rails, et autres)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de matériaux de revêtement résistant à la chaleur • Installation de systèmes de refroidissement pour les moteurs diesel • Augmentation de la fréquence d'entretien des ponts • Installation ventilateurs de refroidissement pour les feux de signalisation et de réchauffeurs d'aiguilles pour les utiliser dans des conditions de températures extrêmes • Augmentation de la fréquence de la construction nocturne • Utiliser des chaussées de couleur claire pour améliorer l'albédo 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation de systèmes de refroidissement et de réchauffeurs d'aiguilles • Réduction des limites de vitesse et des services pour faire face au gauchissement des rails • Modification des températures de contraintes pour réduire la probabilité de gauchissement des rails • Augmentation de la fréquence de la construction nocturne
	<p>Froid extrême (défaillances électriques, fissuration de l'infrastructure et autres)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre du suivi en temps réel des conditions routières (c.-à-d. le SIMR) 	<ul style="list-style-type: none"> • Chauffage pour les infrastructures de tunnel souterrain (par exemple, pour éviter les bris des conduites d'eau)
	<p>Dégel et dégradation du pergélisol (déstabilisation du sol, des accotements)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Installation de système de refroidissement à pierre concassée ou installation d'un système d'isolation ou de réfrigération du sol • Utilisation d'un revêtement de couleur claire pour améliorer l'albédo • Installation d'une infrastructure de préservation du pergélisol, comme des galeries anti-neige, thermosiphons, de conduits d'aération longitudinaux, de déneigement des pentes latérales et autres • Transfert des routes vulnérables • Révision des limites poids et de vitesse sur les routes d'hiver 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la fréquence d'entretien des ponts • Utilisation des réseaux de médias sociaux pour émettre des avis de service et des alertes • Renforcement des remblais • Installation d'une infrastructure de préservation du pergélisol, comme des galeries anti-neige, des thermosiphons, des conduits d'aération longitudinaux et autres • Dégagement des pentes latérales sur les talus de chemin de fer • Révision des limites de poids et de vitesse des trains passant dans des zones affaiblies

Risques et impacts climatiques	Adaptations pour les routes, des ponts, et les infrastructures associées (y compris la signalisation, la gestion des eaux pluviales)	Adaptations pour l'infrastructure ferroviaire urbaine et les opérations
Variation des niveaux d'eau et des configurations des glaces de lac et de mer	<p>Inondations en raison des changements dans les configurations des glaces de lac et de mer et dans les niveaux d'eau (inondations dues aux embâcles, ondes de tempête, hausse du niveau de la mer et autres)</p> <ul style="list-style-type: none"> Investissement dans les digues, les murs de soutènement ou l'infrastructure de gestion du ruissellement Amélioration de la capacité de gestion des eaux pluviales (par exemple, élargissement des ponceaux, des accotements et des fossés); construction de puits de gravier plus profonds sous la chaussée pour favoriser le drainage Utilisation de revêtements perméables Utilisation des réseaux de médias sociaux pour émettre des avis et des alertes aux voyageurs Élévation des routes, des trottoirs et des pistes cyclables au-dessus des niveaux de crue (ou le déplacement s'il s'agit d'un problème récurrent) 	<ul style="list-style-type: none"> Investissement dans les digues, les murs de soutènement ou l'infrastructure de gestion du ruissellement Utilisation des réseaux de médias sociaux pour émettre des avis et des alertes aux voyageurs
Vents	<p>Dommages à la signalisation, aux panneaux de signalisation et aux équipements associés</p> <ul style="list-style-type: none"> Amélioration de la conception des infrastructures en hauteur (c.-à-d., les ponts, la signalisation ferroviaire) pour les conditions de vent turbulent Installation de sources d'alimentation de secours pour la signalisation pour les voitures, les piétons et les vélos 	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration de la conception des infrastructures en hauteur (c.-à-d., les ponts, la signalisation ferroviaire) pour les conditions de vent turbulent Installation de sources d'alimentation de secours pour les signaux ferroviaires
Feux de forêt	<p>Accès impossible ou congestionné aux points d'accès aux collectivités</p> <ul style="list-style-type: none"> Mise à jour des plans d'intervention d'urgence pour l'évacuation Élaborer un plan de continuité des activités pour les événements météorologiques extrêmes de manière à assurer les services essentiels 	<ul style="list-style-type: none"> Aucun exemple recensé dans la littérature

Risques et impacts climatiques	Adaptations pour les routes, des ponts, et les infrastructures associées (y compris la signalisation, la gestion des eaux pluviales)	Adaptations pour l'infrastructure ferroviaire urbaine et les opérations
Généralités	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration des considérations relatives aux changements climatiques dans les pratiques de gestion des risques financiers, la gestion des actifs et la prestation de services • Émission d'« obligations vertes » pour lever des capitaux pour des projets d'infrastructure écologique • Mise en œuvre des remises fiscales locales et d'incitatifs pour les propriétaires fonciers privés pour améliorer la gestion des eaux pluviales • Accès à des subventions intergouvernementales ciblées pour les infrastructures de transport résilientes • Amélioration de la redondance au sein des modes de transport et entre ces derniers pour améliorer la résilience • Achat de véhicules de transport en commun (autobus et trains) mieux à même de résister aux conditions météorologiques défavorables • Accroissement de l'utilisation variée des terrains afin de réduire le nombre et la durée des déplacements de véhicules (réduction de l'usure des routes) • Établissement d'un calendrier pour l'évaluation de l'état, les conditions et les interactions climatiques des infrastructures • Réalisation d'exercices d'urgence dans l'ensemble des services municipaux (pour faire en sorte que le personnel et les équipements soient préparés) • Réalisation ou mise à jour de la cartographie des zones inondables afin de recenser les infrastructures et les actifs communautaires vulnérables • Modification ou mise à jour des règlements et des normes de zonage pour tenir compte de la hausse du niveau de la mer, imposer des marges de recul et autres 	

ÉTUDE DE CAS 1 : UN OUTIL NOVATEUR POUR ÉVALUER LES RISQUES CLIMATIQUES POUR LA VILLE DE TORONTO

L'adaptation des réseaux de transport de grandes villes est essentielle en raison de l'importance sociale et économique d'une capacité de mobilité sécuritaire et fluide. La Ville de Toronto prévoit que les risques liés au climat pour son système de transport augmenteront considérablement au cours des prochaines décennies (Ville de Toronto, 2008). Les décisions prises aujourd'hui concernant les investissements en capital, la prestation des programmes et les relations avec les partenaires clés seront importantes pour veiller à ce que la Ville améliore sa résilience aux changements climatiques.

Ce raisonnement a soutenu la décision de la Ville de Toronto pour élaborer une stratégie d'adaptation aux changements climatiques. Le conseil municipal de Toronto a fourni les avantages politiques nécessaires qui ont donné lieu à un rapport et à un programme intitulé « Ahead of the Storm : Preparing Toronto for Climate Change » (Ville de Toronto, 2008). Il s'agissait d'un exercice de dépistage multisectoriel pour évaluer de la vulnérabilité organisationnelle aux changements climatiques, y compris un examen des meilleures pratiques et des outils internationaux. Le transport était un centre d'intérêt principal d'un groupe de travail multipartite composé à la fois de membres de la Ville de Toronto et d'intervenants externes. Le rapport qui en a découlé a recommandé l'élaboration d'un outil pratique pour l'évaluation des vulnérabilités et des risques à l'infrastructure et aux opérations de transport de la Ville dans le contexte des phénomènes météorologiques extrêmes et de l'apparition lente des changements climatiques. La Ville a choisi un consortium de consultants pour créer le Climate Change Risk Assessment Tool and Process (CCRAT) (outil et processus d'évaluation des risques aux changements climatiques). Cette application logicielle permet aux fournisseurs de services et d'infrastructures de relever et de hiérarchiser les principaux risques liés aux changements environnementaux et climatiques, ainsi que pour évaluer les avantages des diverses mesures d'atténuation et d'adaptation.

La Direction des services de transport (DST) de la Ville de Toronto (DST) a fait preuve de leadership et a contribué à développer et à appliquer le projet pilote CCRAT. Les produits livrables comprenaient un document de synthèse, un processus d'évaluation, un outil logiciel et un manuel d'utilisation. Il s'agissait d'un exercice révolutionnaire pour la Ville. Avant le projet, la Ville ne savait pas s'il était possible de déployer un outil d'évaluation des risques avec les ressources et les connaissances disponibles.

En 2011, la DST a appliqué le CCRAT pour évaluer la vulnérabilité et la résilience de 90 actifs hautement prioritaires et services essentiels à sept événements météorologiques extrêmes. Durant une série de 15 ateliers d'une demi-journée, 14 évaluateurs de risques ont examiné 1 650 scénarios d'impact pour les périodes 2010-2020 et 2040-2050. L'équipe a élaboré des « scénarios de risque » (des combinaisons d'événements météorologiques extrêmes et d'impacts) en fonction des causes et des vulnérabilités relevées. Les impacts pourraient être multiples ou en cascade (à savoir, jusqu'à « quatre paliers d'impacts »), par exemple, les impacts économiques résultant des retards de transport causés par les fermetures de routes ou de voies durant des événements météorologiques extrêmes. Les évaluateurs de risques de la DST ont également relevé plus de 60 initiatives actuelles qui améliorent la capacité d'adaptation ainsi que 100 mesures d'adaptation à court et à long terme. Voici des exemples d'initiatives qui sont en cours :

- ajout d'appareils de chauffage et de ventilateurs dans les contrôleurs de feux de circulation;
- élaboration de lignes directrices pour la construction de rues « vertes »;
- coordination des efforts pour améliorer la verdure urbaine afin de réduire les effets des îlots thermiques urbains;
- utilisation d'une combinaison de chasse-neige et de camions d'application de sel afin de mieux réagir aux conditions de pluie verglaçante (Bureau de l'environnement de la Ville de Toronto, 2011).

Le développement et l'application du CCRAT ont été une occasion pour la Ville de faire preuve de diligence raisonnable à l'égard des citoyens et de renforcer la sensibilisation organisationnelle. Un autre

...

...

résultat clé a été l'élaboration d'une politique sur la gestion des risques liés aux changements climatiques de la ville, qui a permis d'établir les fondements institutionnels pour l'adaptation.

Les praticiens qui ont participé au CCRAT considèrent l'activité comme une réussite. L'utilisation simultanée d'une approche descendante (menée par la Ville) et d'une approche ascendante (menée par la communauté), lorsque cela s'y prêtait, a été considérée comme particulièrement bénéfique, de même que la mise en place d'un programme de travail bien défini dans lequel les rôles et les responsabilités de tous les intervenants étaient clairement délimités. Chaque groupe fonctionnel au sein de la DST a développé des attentes clairement définies pour les services qu'ils offrent et l'infrastructure qu'ils maintiennent. La nomination d'évaluateurs de risques spécialement formés pour chaque groupe a été considérée comme une partie intégrante de la cohésion organisationnelle. La sélection d'un chef évaluateur de risques en tant que gestionnaire de projet – un chef d'équipe ayant une expérience des systèmes de gestion de l'environnement, de l'évaluation des risques et une compréhension approfondie de la structure organisationnelle – était également cruciale.

Un certain nombre de leçons ont été tirées :

- Les praticiens laissent entendre que le CCRAT aurait été plus efficace si les interdépendances et les « risques synergiques » entre les secteurs public et privé (tels que l'énergie, les communications, les assurances et les finances) avaient été désignés avant sa mise en œuvre. L'engagement et la collaboration avec ces secteurs réduisent le risque de perturbations économiques à l'égard de la communauté, et permettent des possibilités de mettre en place une infrastructure plus adaptative et résiliente.
- Une autre déficience potentielle était que le « risque résiduel » (à savoir, le degré de risque qui reste une fois qu'une adaptation est mise en œuvre) n'a pas été évalué pour chaque mesure d'adaptation proposée durant cette phase. L'analyse des risques résiduels et l'analyse des coûts-avantages peuvent être des mécanismes utiles et importants pour aider les gestionnaires municipaux à prioriser les mesures d'adaptation.
- Les praticiens ont également cerné des défis liés à la communication efficace de l'ampleur des changements climatiques au public. La Royal Academy of Engineering (2011) note l'importance de consulter les utilisateurs des biens et des services en ce qui concerne les nouveaux niveaux de service potentiels, en plus des montants que les contribuables seraient prêts à payer pour un certain niveau de service. Un défi important pour l'industrie et les politiciens consiste à trouver la meilleure façon de communiquer au public les limites de la résilience et la nécessité de modifier la demande en matière d'infrastructure.

Dans l'ensemble, le CCRAT a aidé Toronto à fixer des objectifs organisationnels clairs sur la question de l'adaptation au climat, et permet à la DST de gérer ses actifs et ses services en conformité avec les priorités du conseil municipal relatives à l'excellence du service à la clientèle et à la réduction des coûts d'une manière transparente et entièrement responsable. Plus important encore, bon nombre des mesures d'adaptation relevées dans le CCRAT ne requièrent pas d'augmentations importantes dans les budgets d'investissement ou d'exploitation. Par exemple, l'amélioration des bases de données d'inventaire, l'adoption de systèmes de gestion de l'environnement, la formation et l'amélioration de la coordination sont une expression des principes de « meilleure gestion » et augmentent à la fois la capacité d'adaptation et l'efficacité organisationnelle, encourant peu ou aucun coût supplémentaire pour la municipalité. Il s'agit d'un exemple d'adaptation à « faible regret ». Le centre d'intérêt se déplace vers des mesures ambitieuses à long terme qui nécessitent des investissements supplémentaires. À l'été 2014, ces mesures ont reçu un soutien marqué de la part du conseil (par exemple, un nouveau système de gestion des ponceaux, approuvé pour 350 000 \$ pour dresser l'inventaire de tous les ponceaux de moins de 3 m de largeur dans le réseau routier de la ville). En somme, la Ville de Toronto considère le CCRAT utile tant pour le secteur public que privé pour évaluer leurs vulnérabilités respectives aux changements climatiques et pour établir la voie à emprunter en matière d'adaptation pour la résilience.

Rédigé avec la collaboration de Nazzareno Capano (Division des services de transport, Ville de Toronto) et Vesna Stevanovic-Briatico (Division des services de transport, Ville de Toronto).

ÉTUDE DE CAS 2 : ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES À LA VILLE DE MONCTON

De nombreuses villes des provinces maritimes ressentent déjà certains impacts liés au climat. À Moncton, au Nouveau-Brunswick, la fréquence des inondations causées par les tempêtes extrêmes et les changements dans la configuration des marées a augmenté au cours de la dernière décennie (Ville de Moncton, 2013). La ville de Moncton est située à la croisée de la rivière Petitcodiac et de la baie de Fundy, une région qui connaît l'une des amplitudes des marées les plus importantes au monde. Les inondations côtières et intérieures, ainsi que l'érosion, posent des risques importants à l'infrastructure de transport. La région devrait également connaître une hausse progressive du niveau de la mer de même qu'une augmentation importante des précipitations et des températures d'ici au milieu du siècle (AMEC Inc., 2011).

De 2010 à 2012, les collectivités de la région du Grand Moncton ont participé à la partie atlantique de l'Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale (ICAR). Cette initiative de partage des coûts avec les gouvernements provinciaux et le gouvernement fédéral a été conçue pour recenser les menaces liées aux changements climatiques, les vulnérabilités et les outils d'adaptation utiles dans la lutte contre l'érosion et les inondations côtières et intérieures et pour la conception des infrastructures et la gestion des eaux souterraines. Le transport était l'un des centres d'intérêt de cette initiative, en grande partie en raison des problèmes historiques de la région liés aux infrastructures de transport et à l'infrastructure d'égout sanitaire située au-dessous des seuils d'inondation.

Voici les recommandations propres à la ville de Moncton qui découlent de l'exercice de CAR :

- bâtir de nouvelles artères pour éviter les zones de faible élévation et les zones inondables de la rivière Petitcodiac et ses affluents;
- élévez une nouvelle infrastructure routière et de ponts pour assurer l'accès aux services essentiels lors d'événements météorologiques extrêmes;
- assurer la prévention des inondations des routes principales situées à des élévations vulnérables afin de minimiser les dégâts causés par les inondations et d'assurer le rétablissement rapide du système;
- ordonner des élévations des niveaux de crue plus élevés dans les futures décisions de planification des transports (AMEC Inc., 2011). Une élévation minimale de 10,5 m a été proposée afin de tenir compte de la laisse de crue de l'événement centenaire qui devrait frapper la région en 2100 en fonction de la cartographie des zones inondables.

En guise de réponse, la Ville de Moncton a élaboré une Stratégie d'adaptation aux changements climatiques et de gestion des inondations en 2013, et a depuis mis en œuvre une série de changements stratégiques. Par exemple, la Ville :

- a changé son règlement de zonage pour définir la hauteur minimale du plancher pour les espaces habitables à 10,5 m;
- entend éléver, lorsque c'est possible de le faire, les nouvelles routes et les ponts au-dessus du seuil de 10,5 m;
- a élaboré des plans d'évacuation étendus pour les routes vulnérables en cas d'un événement majeur d'onde de tempête;
- offre une remise de 500 \$ pour l'installation d'un clapet antiretour approuvé dans le cadre d'un programme d'incitation pour les propriétaires fonciers locaux.

Sur la base de ces initiatives, Moncton a élaboré un Plan directeur de transport durable régional qui aidera la Ville à évaluer la vulnérabilité de tous les modes de transport dans le réseau au moyen de scénarios détaillés de mobilité et d'inondation. Les résultats aideront la Ville à établir les priorités relatives aux améliorations des réseaux de transport et aux mises à niveau des rues. Les modèles et les scénarios

...

...

d'inondation permettent aux fonctionnaires provinciaux d'établir quels seront les intérêts (c.-à-d. l'infrastructure provinciale dans la collectivité) qui pourraient être touchés par les conditions futures. Des recommandations seront faites au conseil municipal en ce qui concerne les éléments d'infrastructure qui doivent faire l'objet de mises à niveau ou qui doivent être abandonnés, accompagnées d'une clarification des exigences budgétaires.

L'efficacité et la rapidité de la planification, des politiques et des pratiques en matière d'adaptation par Moncton peuvent être attribuées au soutien pour l'adaptation offert par tous les ordres de gouvernement. Au niveau municipal, le Comité des mesures d'adaptation aux changements climatiques, composé de membres du personnel de la plupart des services de la Ville, présente des rapports annuels au conseil. Les praticiens conviennent que le Comité a fait de l'excellent travail pour créer une responsabilisation en matière d'adaptation aux changements climatiques au sein des services et entre ces derniers. L'élaboration d'une approche intégrée à la fois au sein de la municipalité et avec les partenaires provinciaux et fédéraux s'est avérée une valeur inestimable.

Rédigé avec la collaboration d'Elaine Aucoin (Planification et gestion de l'environnement, Ville de Moncton) et Stéphane Thibodeau (Ingénierie et Services environnementaux, Ville de Moncton).

ÉTUDE DE CAS 3 : ADAPTATION DU TRANSPORT AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES À LA VILLE DE WHITEHORSE, AU YUKON

Whitehorse est une importante plaque tournante du transport régional alors que les modes de transport ferroviaire, maritime et aérien ont tous contribué de manière importante à l'historique de la ville. La ville repose en grande partie sur la route de l'Alaska pour la connectivité externe, et sur l'automobile pour la mobilité urbaine, bien que les services de transport en commun soient également disponibles. Le climat de la ville est relativement doux (par rapport aux autres communautés du Nord) et semi-aride en raison de son emplacement à l'ombre des montagnes côtières. Au cours des dernières années cependant, Whitehorse a connu des précipitations très variables, y compris de nombreux hivers où les chutes de neige ont dépassé la moyenne. Des changements climatiques de cette nature posent un certain nombre de risques pour le réseau de transport de la ville. L'augmentation projetée des feux de forêt de même que l'intensité, la durée et la fréquence des événements de tempête (et les préoccupations connexes liées aux inondations et au drainage) posent des risques indirects pour la circulation routière. Les responsables locaux ont désigné les obstacles de la route et les affaissements lors d'événements météorologiques extrêmes comme des préoccupations majeures, car elles pourraient empêcher la livraison de nourriture et d'autres biens essentiels. D'autres impacts sur les transports urbains comprennent l'augmentation de la fréquence des cycles de gel et de dégel; l'emprise sur les budgets d'entretien des routes l'hiver en cas d'importantes chutes de neige; et, une pression accrue sur les ponceaux en raison de l'augmentation de l'augmentation des précipitations en été et en hiver.

Pour répondre à ces préoccupations, la Ville de Whitehorse a participé à l'élaboration du Plan communautaire d'adaptation aux changements climatiques de Whitehorse en 2011 (Hennessey et Streicker, 2011). Des intervenants communautaires de divers secteurs ont participé au projet. Bien que le plan ne soit pas de force obligatoire en droit (le document est pertinent aux politiques, mais n'est pas déterminé par les politiques), il a contribué à « intégrer » les changements climatiques dans les processus décisionnels municipaux, ce qui signifie que les données et les projections climatiques ont été prise en compte dans les décisions en matière d'investissement et de planification. Les grands objectifs du plan comprennent l'augmentation de la part du mode de transport en commun, l'intensification du développement et l'augmentation de la part de la production agricole de la région par le truchement d'une planification de la sécurité alimentaire (y compris une production accrue de nourriture dans les

...

...

serres voisines afin de réduire la dépendance à l'égard des importations). Les mesures d'adaptation suggérées pour les transports urbains comprennent les suivantes :

- l'établissement de budgets annuels visant à gérer les préoccupations relatives aux changements climatiques, y compris la planification relative aux besoins accrus en matière de déneigement;
- l'accroissement de l'utilisation de stations de surveillance de la route;
- la réalisation d'études de faisabilité exploratoires sur des techniques de déglaçage automatique des routes;
- l'augmentation de la porosité des surfaces des routes afin d'améliorer le rétablissement à la suite de précipitations.

Ces mesures d'adaptation comprennent à la fois des mesures à « faible regret » et « sans regret ». Par exemple, lorsque des améliorations aux routes sont nécessaires en raison du cycle de vie ou de l'état de l'infrastructure, le plan suggère que la Ville procède à une mise à niveau des systèmes d'aqueduc et d'égout afin de gérer les plus grands débits d'eaux pluviales. Cela ne nécessite qu'une légère augmentation des coûts marginaux dans le budget du projet. Par la même occasion, cette stratégie signifie que seules les routes approchant la fin de leur durée de vie ou en très mauvais état seront adaptées à court terme étant donné que le coût de remplacement de l'infrastructure utilisable par une infrastructure de plus grande capacité de drainage est prohibitif. Pour des raisons pratiques, cette approche d'adaptation doit être mise en œuvre de façon fragmentaire. Une adaptation « sans regret » sur le plan opérationnel requiert des inspections proactives au début du printemps des installations de drainage afin de repérer les égouts pluviaux gelés et de réduire les risques d'inondation.

Les inondations sont également une préoccupation pour les routes résidentielles de Whitehorse, alors certains lotissements plus âgés ont déjà connu des problèmes localisés attribuables aux systèmes de drainage désuets. C'est pourquoi l'infrastructure de gestion des eaux pluviales dans les nouveaux lotissements est maintenant conçue avec des seuils de volume plus élevés. Whitehorse utilise en outre la redondance dans le transport comme solution d'adaptation à petite échelle; les lotissements doivent être construits avec plus d'un point d'accès par la route en cas d'affaissements, d'inondations ou de feux de forêt.

Rédigé avec la collaboration de John Streicker (Ville de Whitehorse) et de Jocelyn Beatty (Université de Waterloo).

ÉTUDE DE CAS 4 : SÉCURITÉ ROUTIÈRE ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES À PRINCE GEORGE

Prince George, situé à l'intérieur de la Colombie-Britannique, abrite environ 76 000 personnes. La ville dispose d'un large éventail de modes de transport, y compris le transport ferroviaire et maritime intérieur et le transport urbain. Alors que le réseau de transport de la ville est confronté à un certain nombre de risques liés aux changements climatiques, les températures hivernales plus douces sont susceptibles d'avoir le plus grand impact, principalement en raison de l'augmentation des cycles de gel et de dégel, des événements de pluie sur la neige et de pluie verglaçante. Les inondations résultant d'embâcles sur la Nechako et de la crue sur le Fraser sont une autre préoccupation majeure. Prince George a élaboré en 2012 un certain nombre de mesures d'adaptation aux changements climatiques propres au transport tenant compte des risques d'inondation posés aux routes, aux infrastructures de transport actif et aux installations ferroviaires. Ces démarches a été entreprises dans le cadre d'un plan global d'adaptation communautaire.

Un comité d'orientation composé de praticiens locaux et de spécialistes du milieu universitaire (pour équilibrer les besoins locaux avec les pratiques exemplaires) a relevé 23 mesures d'adaptation prospectives relatives à l'infrastructure, aux opérations aux interventions d'urgence et à la sécurité, et au financement.

Par l'entremise du processus, la Ville a également cerné un certain nombre d'initiatives en cours qui font partie de l'adaptation aux changements climatiques. Les initiatives comprenaient le contrôle de la neige et des glaces, la gestion de l'utilisation du sel, l'élévation de la route et la construction de digues. Par exemple, à la suite d'une inondation résultant d'un embâcle dans une zone industrielle en 2008, la ville a relevé la chaussée à un niveau de crue possible qu'une fois par 200 ans, et a construit une digue de 3,3 km pour protéger l'infrastructure ferroviaire locale (Picketts, 2012). Dans ses recommandations finales de mesures immédiates, le comité a recommandé des changements à l'entretien des routes d'hiver, l'amélioration de la sécurité routière et des points à considérer pour la conception sensible au climat (Picketts, 2012). La Ville a établi le transport comme la plus haute priorité pour des mesures continues (Picketts et coll., 2013).

Prince George se concentre maintenant à mettre en œuvre les mesures de suivi dans les secteurs clés offrant des résultats prometteurs à brève échéance. La Ville a commencé à compiler des données climatiques de même que des renseignements sur les procédures afin de mieux orienter le processus décisionnel concernant l'entretien des routes, y compris des données sur les interactions des véhicules avec le climat. En ce qui concerne la conception des routes et la gestion des eaux pluviales, un certain nombre de nouveaux matériaux perméables ont été proposés aux fins de mise à l'essai. Les prochaines étapes comprennent ce qui suit :

- poursuivre les partenariats avec les universités et le gouvernement provincial;
- encourager les évaluations climatiques tous les nouveaux projets d'infrastructure;
- intégrer les données climatiques dans les critères de décision;
- maintenir le dialogue avec l'industrie du transport;
- encourager le partage de renseignements entre les membres du personnel de la Ville (Picketts, 2012).

La composante de transport a été considérée comme un succès par les praticiens compte tenu du niveau élevé d'intérêt public à l'égard des questions de mobilité; le caractère pratique des solutions a été examiné de même que les possibilités d'économies de coûts significatives. Cependant, un inconvénient à la mise au point du projet sur la sécurité routière en hiver a été le fait que relativement peu d'attention a été accordée aux modes actifs et de transport public (Picketts, 2014). À la lumière des commentaires des praticiens qui ont participé au processus de mise en œuvre, quatre principaux points à prendre en considération présentant un intérêt particulier pour l'adaptation dans les collectivités de taille moyenne du Nord ont été relevés :

1. bâtir et maintenir les connaissances locales et la capacité pour la prise de décisions concernant l'adaptation aux changements climatiques;

...

...

2. l'« intégration » ou la normalisation de l'adaptation dans les plans, les priorités et les pratiques professionnelles des fonctionnaires locaux;
3. priorité accordée aux projets concrets autour desquels la communauté peut se rallier et dont les résultats sont facilement reconnaissables;
4. établissement d'un lien entre les mesures d'adaptation et les coûts et les priorités au moyen d'une communication claire avec les politiciens et les membres du public (Picketts, 2014).

Cette étude de cas montre comment les collectivités peuvent réussir à intégrer les analyses climatiques rigoureuses dans les évaluations de la vulnérabilité en orientant la discussion sur la détermination de mesures explicites plutôt que sur le simple dépistage général des risques (Picketts, 2013). La mise en place d'une plus grande collaboration et l'adoption d'objectifs communs au sein de l'organisation municipale ont également été considérées comme essentielles pour maintenir l'élan généré par cette initiative.⁶

Rédigé avec la collaboration de M. Ian Picketts (University of Northern British Columbia).

⁶ Un article de journal universitaire résumant le travail entrepris en matière de transport à Prince George en est aux derniers stades de révision et sera inclus dans le prochain numéro de *Regional Environmental Change*.

ÉTUDE DE CAS 5 : PRISE EN COMPTE DES RISQUES LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES À TRANSLINK

TransLink est l'autorité de transport régional de Vancouver métropolitain dotée d'un système d'actifs et de services comprenant des autobus, des trains de banlieue, de pistes cyclables, des sentiers pédestres et des routes. Ce réseau dessert environ 1,2 million de voyages par jour.

L'organisation considère que la gestion des risques liés aux changements climatiques est importante pour la prestation des services et l'entretien et le développement des infrastructures, en particulier étant donné qu'elle construit l'infrastructure pour durer une centaine d'années. La croissance projetée de la population de la région devrait aggraver ces risques - Metro Vancouver devrait croître de 1 million de personnes au cours des 30 prochaines années, augmentant davantage la pression sur le système de transport de la région.

TransLink a commencé à étudier les impacts des changements climatiques en 2010 et a procédé à l'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques de ses actifs en 2012 à l'appui de son plan de gestion des actifs. Par l'entremise du processus, l'organisation a relevé les risques suivants liés aux changements climatiques à l'égard de ses services :

- Housse du niveau de la mer qui pourrait :
 - inonder les actifs qui font maintenant des zones inondables « élargies »,
 - réduire la hauteur libre sous les ponts,
 - nuire aux activités du terminal SeaBus (service de transbordeur).
- L'augmentation des précipitations, qui pourrait provoquer l'inondation temporaire des actifs de TransLink tels que les circuits d'autobus, les tunnels, les stations de transport en commun et les stations de conversion électrique des trolley.

...

...

- Les températures plus douces et les vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses, qui pourraient avoir une incidence sur la santé et le confort des passagers utilisant les éléments du parc de véhicules dépourvus de climatisation.

TransLink s'est également assuré que son service des finances et ses comptables jouent un rôle central dans ses efforts d'adaptation. Le dirigeant principal des finances (DPF) doit s'assurer que les risques liés aux changements climatiques sont pris en compte dans le processus décisionnel de TransLink. TransLink considère que cette structure est efficace, car elle intègre les changements climatiques dans l'ensemble de l'organisation créant des liens avec la gestion des risques, l'apport de stratégies, la planification et les processus d'examen relatifs aux immobilisations et l'établissement de rapports.

Rédigé par Kathy Palko, adapté de *Comptables Professionnels Agrées Canada (2015) Étude de cas sur l'adaptation no 2 : TransLink*⁷

⁷ CPA (2015) Étude de cas sur l'adaptation no 2 : TransLink. Repéré : <https://www.cpacanada.ca/fr/ressources-en-comptabilite-et-en-affaires/domaines-connexes/durabilite/publications/translink-changement-climatique-etude-de-cas-2>

7.0 INTERDÉPENDANCES AVEC D'AUTRES SECTEURS URBAINS

Les réseaux de transport urbain dépendent d'autres infrastructures et services publics (y compris l'électricité et les télécommunications) pour déplacer de manière efficace d'imposants volumes de personnes et de marchandises. Les interdépendances entre ces systèmes, l'économie et la société sont examinées dans la présente section.

L'électricité est l'une des principales interdépendances. La dépendance croissante de la mobilité urbaine à l'égard du réseau de distribution d'électricité (en particulier des SLR et des trains banlieue et, mais des automobiles et de l'infrastructure) peut créer une vulnérabilité multisectorielle lorsque des événements météorologiques extrêmes perturbent l'approvisionnement et la distribution d'électricité. Faire en sorte que les feux de circulation demeurent opérationnels pendant et immédiatement après les conditions météorologiques extrêmes est une autre préoccupation.

Les applications de systèmes de transport intelligents (STI) largement utilisées pour la gestion de la circulation et du transport en commun dépendent aussi de l'infrastructure de télécommunications qui peut être touchée par des conditions météorologiques extrêmes (Revi et coll., 2014). Sans une coordination adéquate, les interactions entre les conduites d'eau et les systèmes de transport en commun souterrains peuvent perturber les deux secteurs. C'est le cas tant dans le contexte de changements climatiques à évolution lente que lors d'événements météorologiques extrêmes. Par exemple, les tuyaux peuvent geler et fendre au cours de cycles de gel et de dégel ou dans des conditions de froid extrême, endommageant l'infrastructure de distribution de l'eau et perturbant les réseaux de transport en commun souterrains. Le système de métro de la Toronto Transit Commission a connu une situation semblable lors des derniers hivers (McLeod et Stevanovic-Briatico, 2014).

La capacité des organismes de transport de réduire les dommages liés aux événements météorologiques violents est donc affectée par la façon dont les autres divisions municipales et les fournisseurs de services publics (par exemple, les télécommunications et les services de distribution d'électricité) intègrent les considérations relatives aux changements climatiques dans leurs planifications et leur prestation de services. Ainsi, lorsqu'un secteur est à risque, beaucoup d'autres le sont également. Par exemple, si les inondations ou les vagues de chaleur perturbent l'approvisionnement en énergie, tous les autres services peuvent être affectés, provoquant des pannes et des interruptions en cascade. Si la circulation routière est perturbée, l'efficacité de toute une ville peut être réduite.

Dans les endroits où les infrastructures sont à risque d'être compromises ou de tomber en panne en raison des impacts climatiques, la planification de la continuité des activités devient importante. Ce type de planification assure que les services ne sont pas compromis par des événements extrêmes ou imprévus. Il est primordial de planifier la façon dont les effectifs peuvent être déployés plus efficacement durant et après les situations d'urgence, particulièrement du fait que les changements climatiques devraient générer des événements météorologiques extrêmes plus fréquents. Les praticiens interrogés aux fins du présent chapitre ont indiqué que la coordination intersectorielle peut être améliorée si les décideurs travaillent en étroite collaboration avec les ingénieurs de la ville et les comités consultatifs techniques sur les stratégies d'adaptation aux changements climatiques pour les infrastructures et les activités de transport.

Par exemple, la Division des services de transport (DST) de la Ville de Toronto a collaboré avec d'autres secteurs et organismes municipaux sur des activités d'adaptation et de préparation relatives aux changements climatiques. Le tableau 3 présente ces initiatives en cours. Les interdépendances entre les secteurs recensés par la DST comprennent les pannes de courant causées par la chaleur extrême, le vent et la pluie verglaçante ainsi que les impacts sur le système de régulation du trafic et les infrastructures de communication. Selon les praticiens du domaine du transport, une évaluation des risques liés aux changements climatiques pour le secteur de l'électricité permettrait de déterminer les zones les plus vulnérables de la ville en fonction de divers scénarios climatiques. Ces renseignements orienteraient la mise en œuvre et le déploiement physique de mesures d'adaptation, telles que l'installation de technologies d'alimentation sans coupure sur les systèmes de régulation du trafic.

Les interruptions sur les réseaux routiers et de transport en commun affecteront également la capacité du personnel à se rendre au travail, entraînant des pénuries de personnel et, en fin de compte, des répercussions sur la prestation des services municipaux. La planification de la continuité des activités pour les événements météorologiques extrêmes peut répondre à ces questions en prévoyant des régimes de travail de rechange, des formations périodiques, l'essai des itinéraires et la tenue d'une base de données des coordonnées en cas d'urgence pour le personnel (conservée par un superviseur et accessible à tout moment).

En plus des services municipaux, il est également nécessaire de mobiliser pleinement la société civile urbaine et de fournir des renseignements au public sur l'importance de l'adaptation (Larrivée, 2010). Selon les praticiens, la participation du public en matière d'adaptation a tendance à inciter des conversations sur l'atténuation climatique (réduction des émissions de carbone). La tâche des organismes municipaux est de souligner l'importance des deux politiques en collaboration pour maximiser la valeur sociale des investissements en infrastructure. La participation du public est également nécessaire afin de préparer la société à fonctionner – à accéder au travail, aux soins de santé et à d'autres activités – lorsque les systèmes de transport ou les systèmes d'infrastructure fonctionnent à des niveaux inférieurs.

Tableau 3 : Exemple de collaboration interne et externe pour la planification adaptative pour les changements climatiques et le transport urbain à la Ville de Toronto.

Partenariat	Action coordonnée
Office de protection de la nature de Toronto (OPNT)	<p>Système d'annonce de crue :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'OPNT fournit des avertissements de crue à l'unité de communications des services d'urgence routiers (UCSUR) de la DST pour l'autoroute Don Valley Parkway et le prolongement de Bayview. Cette surveillance en temps réel, assurée à l'aide de caméras et d'un protocole de communication, aide la DST à mettre en œuvre des fermetures de routes et à réguler le trafic. • La DST se réunit régulièrement avec le personnel de l'OPNT pour examiner les protocoles d'interventions en cas d'inondation et les interventions en temps réel à la suite d'événements, et pour établir une intervention plus globale en cas d'inondation. <p>Évaluation environnementale :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'OPNT effectue une évaluation environnementale interne et en collaboration avec la DST afin de recenser les risques et les mesures d'atténuation possibles pour améliorer les mesures de maîtrise actuelles des inondations qui surviendraient le long de la promenade Don Valley et de l'avenue Bayview (le corridor Don Valley)
Consultation avec le Bureau de l'énergie et de l'environnement; la Toronto Transit Commission et les Services d'ingénierie et de construction; et d'autres organismes, conseils, commissions et divisions de la Ville de Toronto	<p>Évaluation des risques liés aux changements climatiques (ERCC) (Voir l'étude de cas 1) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cet outil relève et évalue les risques liés aux changements climatiques, y compris les impacts des changements climatiques sur la prestation de services, la gestion des infrastructures et la protection de l'environnement naturel. • L'ERCC permet aux fournisseurs de services et d'infrastructures de relever et de hiérarchiser les principaux risques et impacts liés aux changements climatiques, et d'évaluer les avantages de diverses mesures d'atténuation des risques ou mesures d'adaptation.
Toronto Transit Commission (TTC)	<p>Exemples d'initiatives en cours :</p> <ol style="list-style-type: none"> • Élaboration d'un processus harmonisé pour la mise en œuvre des zones d'arrêt d'autobus en béton; le revêtement d'asphalte aux arrêts d'autobus présente généralement une distorsion sévère (l'orniérage, par exemple) en raison des charges des autobus et des conditions de chaleur extrême; • Installation d'aires d'autobus en béton sur la chaussée dans le cadre des projets de resurfaçage. Ces aires sont généralement uniquement installées lorsque la surface d'asphalte actuelle présente de l'orniérage ou un déplacement modéré (> 25 mm) ou plus; • 100 emplacements des feux de signalisation ont été recensés et priorisés pour l'installation de dispositifs d'alimentation sans coupure (UPS), y compris des dispositifs de signalisation ferroviaires, aux principales intersections et dans les stations des rampes d'accès à l'autoroute expresse. Un programme pilote a été lancé pour équiper 12 sites prioritaires; • Un examen de deuxième phase est en cours pour relever les besoins en matière d'UPS aux intersections critiques situées sur les voies d'urgence; et • A conclu des ententes de services mobiles de ravitaillement en diesel et en essence par camion; des cartes de carburant de tiers sont disponibles lorsque la livraison de carburant est affectée lors d'événements météorologiques extrêmes.

8.0 LACUNES ET OBSTACLES

Les praticiens suggèrent que sans l'acceptation à tous les niveaux, à savoir du niveau de la direction jusqu'au niveau opérationnel, de l'ampleur des risques liés aux changements climatiques, souvent, les efforts de planification pour l'adaptation ne sont pas pleinement mis en œuvre. Dans certains cas, les praticiens ont obtenu du succès en communiquant l'importance d'éviter des coûts plus importants à l'avenir en effectuant des investissements proactifs. L'analyse coûts-avantages peut également appuyer les décisions en matière d'adaptation en aidant les praticiens à établir les priorités dans les investissements pour la mise à niveau de l'infrastructure et pour démontrer la valeur des mesures prises pour réduire la vulnérabilité future (Feltmate et Thistlethwaite, 2012). Le fait que plus de villes parviennent à réaliser et à communiquer des économies de coûts à long terme et la compétitivité économique par le truchement de mesures d'adaptation permet de réduire les obstacles à la mise en œuvre généralisée de ces mesures.

La coordination des mesures entre les divers ordres de gouvernement, d'organismes et de secteurs est un autre défi à la prise de décision adaptive. Par exemple, les administrations municipales confrontées à des risques d'inondation doivent coordonner l'intervention d'urgence avec d'autres ordres de gouvernement en plus de faire face aux défis liés à la prévention des inondations et à la protection physique (Chiwizer et Tarlock, 2013).

9.0 CONCLUSION

Le présent chapitre a démontré que les réseaux de transport urbain sont vulnérables aux changements climatiques et aux conditions météorologiques extrêmes de nombreuses façons, et a recensé les efforts déployés par les villes canadiennes pour gérer ces risques. Bien que les municipalités aient toujours adopté des mesures d'adaptation à la suite de catastrophes, les études de cas abordées dans le présent chapitre indiquent que, de plus en plus, les municipalités et leurs partenaires travaillent à adapter de manière proactive à la fois l'infrastructure et les opérations avant l'apparition des impacts climatiques. Les études de cas dans le présent chapitre offrent des exemples de régions urbaines canadiennes qui ont entrepris des évaluations de la vulnérabilité, qui apportent des améliorations structurelles et physiques, et qui effectuent des changements organisationnels pour améliorer leur résilience à un environnement de transport en évolution rapide. D'autres approches d'adaptation relevées dans la littérature pourraient être appliquées par les professionnels du transport au Canada lorsque cela s'y prête. Il est clair que les solutions demanderont une combinaison appropriée de mesures d'adaptation proactives et réactives.

Le présent chapitre a également mis en évidence l'importance de la redondance (tant dans les routes que dans les modes de transport) pour améliorer la résilience, ainsi que l'importance des stratégies d'adaptation à « faible regret » afin de renforcer le soutien de la part des gouvernements et des communautés à l'égard des efforts d'adaptation. Les coûts initiaux élevés des nombreuses stratégies d'adaptation (en particulier des solutions structurelles) peuvent avoir un effet dissuasif, et la complexité des contextes financiers et opérationnels des villes modernes pose des obstacles à l'adaptation. Par conséquent, il est de plus en plus important pour les praticiens du domaine du transport de travailler en collaboration avec d'autres secteurs municipaux vers des objectifs d'adaptation communs. Grâce à de solides efforts de coopération, les réseaux de transport urbain multimodaux du Canada seront plus à même de relever avec succès les défis posés par les changements climatiques.

RÉFÉRENCES

- AMEC Inc. (2011). *Climate change adaptation measures for Greater Moncton Area, New Brunswick*. Repéré à http://atlanticadaptation.ca/sites/discoveryspace.upei.ca.acasa/files/Adaptation_Measures_Greater_Moncton-2011.pdf
- 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. (2010). Long-term trends in weather-related crash risks. *Journal of Transport Geography*, 18, 247-258.
- Andrey, J., Hambly, D., Chaumont, D., et Rapaic, M. (2013). *Climate change and road safety : Projections within urban areas*. Ottawa, ON : Association des transports du Canada.
- Association canadienne du transport urbain. (2012). *Besoins en infrastructures de transport collectif pour la période de 2012 à 2016*. Repéré à http://cutaactu.ca/en/public-transit/publicaffairs/resources/CUTA_IS_Report2012_E.pdf
- Association des transports du Canada. (2010). *Lignes directrices de développement et de gestion des infrastructures de transport dans les régions de pergélisol*. 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.
- Ayres, T. (2014). Bicycle promotion as a response to climate change. *Ergonomics in Design : The Quarterly of Human Factors Applications*, 22(2), 30-32.
- Bertin, O. (1998, 10 janvier). Ice grounds most planes, trains and passengers. *The Globe and Mail*, p. B3. Repéré à <http://search.proquest.com.proxy.lib.uwaterloo.ca/docview/1143162265/fulltextPDF/95025EC4EEE14E5EPQ/1?accountid=14906>
- Blais, P. (2013). *Perverse cities: Hidden subsidies, wonky policy, and urban sprawl*. Vancouver, BC : UBC Press.
- Bowyer, P. (2003a). L'aspect scientifique de l'ouragan Juan – Classification de l'ouragan Juan. Gouvernement du Canada. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=258CBC16-1>
- Bowyer, P. (2003b). Résumé de la saison des cyclones tropicaux au Canada de 2003. Gouvernement du Canada. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=DCA5B0C3-1>
- Bowyer, P. (2003c). La crue des eaux et les vagues causées par l'ouragan Juan à Halifax. Gouvernement du Canada. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=BAAEAC12-1>
- Bradford, N. (2008). The OECD's local turn : « Innovative liberalism » for the cities? Dans R. Mahon et S. McBride (Eds.), *The OECD and Transnational Governance*. Vancouver, BC : UBC Press.
- Bruce, J. (2011). Climate change information for adaptation : Climate trends and projected values for Canada from 2010 to 2050. Institut de prévention des sinistres catastrophiques. 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%20EN.pdf
- Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes. (2016). *Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes : Éclairer l'avenir*. Repéré à www.canadainfrastructure.ca/downloads/Bulletin_de rendement_des_infrastructures_canadiennes_2016.pdf
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2008). *Climate change impacts on US transportation infrastructure*. *Transportation Research Board Special Report 290*. Washington, DC : National Research Council of the National Academies.
- Bureau de la sécurité des transports du Canada. (2014). *Rapport d'enquête ferroviaire R13C0069. Effondrement d'un pont et déraillement. Chemin de fer Canadien pacifique. Train de marchandises 292-26, Point milliaire 172,5, Subdivision Brooks. Calgary (Alberta)*. 27 juin 2013. Repéré à <http://www.tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/2013/r13c0069/r13c0069.asp>
- Bush, E.J., Loder, J.W., James, T.S., Mortsch, L.D. et Cohen, S.J. (2014). Un aperçu des changements climatiques au Canada. 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. 23-64). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Canadian Press. (2014, 17 décembre). 'Unprecedented' flood at root of Calgary bridge failure: TSB. CTV News. Repéré à <http://www.ctvnews.ca/canada/unprecedented-flood-at-root-of-calgary-bridge-failure-tsb-1.2151386>
- Canadian Press. (2015a, 19 avril). Evacuation order still in effect for N.B. village at risk of flooding. CTV News. Repéré à <http://www.ctvnews.ca/canada/evacuation-order-still-in-effect-for-n-b-village-at-risk-of-flooding-1.2334549>
- Canadian Press. (2015b, 23 novembre). GO trains delayed by frozen track switch. Toronto Star. Repéré à <http://www.thestar.com/news/gta/2015/11/23/go-trains-delayed-by-frozen-track-switch.html>
- CBC News. (2013, 10 juillet). Toronto severe thunderstorm watch cancelled. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/toronto/toronto-severe-thunderstorm-watch-cancelled-1.1379640>

Cheng, C., Li, G., Li, Q., Auld, H., et Fu, C. (2008). Possible impacts of climate change on wind gusts under future climate conditions over Ontario, Canada. *Journal of Climate*, 25(9), 3390-3408.

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., Lopes, E., Fu, C., et Huang, F. (2014). Possible impacts of climate change on wind gusts under downscaled future climate conditions : Updated for Canada. *Journal of Climate*, 27(3), 1255-1270.

Cheng, G. (2005). Permafrost studies in the Qinghai-Tibetan Plateau for road construction. *Journal of Cold Regions Engineering*, 19(1), 19-29.

Chiwizer, D., et Tarlock, A. (2013). New challenges for urban areas facing flood risks. *Fordham Urban Law Journal*, 40, 1739-1792.

Clean Air Partnership. (2012). Accelerating adaptation in Canadian communities : York Region de-icing strategy (Étude de cas 2 de 9). Repéré à www.cleanairpartnership.org/files/2%20Case%20Study.pdf

Cohen, S., Soohoo, W., et Sumitami, M. (2005). *Climate change will impact the Seattle Department of Transportation*. City of Seattle, Office of the City Auditor. Repéré à http://www.seattle.gov/light/News/Issues/Green/Climate_Change_Presentation_10_31_05.pdf

CPA (2015) Étude de cas sur l'adaptation no 2 : TransLink. Repéré à <https://www.cpacanada.ca/fr/ressources-en-comptabilite-et-en-affaires/domaines-connexes/durabilite/publications/translink-changement-climatique-etude-de-cas-2>

Craggs, S. (2014, 17 mars). Will closing the Skyway lead to traffic chaos this summer? CBC News Hamilton. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/hamilton/news/will-closing-skyway-lead-to-traffic-chaos-this-summer-1.2576429>

Credit Valley Conservation Authority. (2014). *Low-impact development : Road right-of-ways*. Repéré à <http://www.creditvalleyca.ca/low-impact-development/road-right-of-ways/>

CTV Atlantic. (2015, 19 avril). *Flood risk forces evacuation in Perth-Andover, NB*. Repéré à <http://atlantic.ctvnews.ca/flood-risk-forces-evacuation-in-perth-andover-n-b-1.2334463>

CTV News. (2013, 27 février). *OC Transpo buses stuck in snow, delays of more than an hour*. Repéré à <http://ottawa.ctvnews.ca/oc-transpo-buses-stuck-in-snow-delays-of-more-than-an-hour-1.1174771>

Dachis, B. (2013). *Cars, congestion, and costs: A new approach to evaluating government infrastructure investment*. Institut C.D. Howe, Commentaire No. 385. Repéré à http://www.cdhowe.org/pdf/Commentary_385.pdf

Dachis, B. (2015). *Tackling traffic : The economic cost of congestion in Metro Vancouver*. Institut C.D. Howe (E-brief). Repéré à https://www.cdhowe.org/pdf/e-brief_206.pdf

Davison, J., et Powers, L. (2013, 22 juin). Why Alberta's flood hit so hard and fast. CBC News. Repéré à <http://www.cbc.ca/news/canada/calgary/why-alberta-s-floods-hit-so-hard-and-fast-1.328991>

Duranton, G., et Turner, M.A. (2011). The fundamental law of road congestion: Evidence from US cities. *American Economic Review*, American Economic Association, vol. 101(6), pages 2616-52, October. Repéré à <http://www.nber.org/papers/w15376>

Environnement Canada. (2010). *Les inondations au Canada : Colombie-Britannique*. Repéré à <https://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=B7B62836-1>

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 dix principaux événements météorologiques canadiens de 1998*. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=3DED7A35-1>

Environnement Canada. (2014). *Les dix événements marquants au Canada en 2013*. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=5BA5EAFC-1&offset=2&toc=show>

Environnement Canada. (2015). *L'ouragan Hazel – Mesures d'atténuation*. Repéré à <https://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=CA3BC939-1>

Feltmate, B., et Thistlethwaite, J. (2012). *Climate change adaptation: A priorities plan for Canada. Report of the climate change adaptation project (Canada)*. Repéré à <https://uwaterloo.ca/environment/sites/ca.environment/files/uploads/files/CCAP-Report-30May-Final.pdf>

Filion, P., et Bunting, T. (2010). *Epochs of Canadian urban development*. Dans T. Bunting, P. Filion, et R. Walker, R. (Éds.), *Canadian cities in transition : New directions in the twenty-first century* (chapter 2). Don Mills, ON: Oxford University Press.

Forces maritimes de l'Atlantique. (2003). *Dommages causés par l'ouragan à un quai du port de Halifax*. Repéré à <https://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=Fr&n=B084FF40-1>

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.

Gouvernement de la Nouvelle-Écosse. (2003). *A report on the emergency response to Hurricane Juan*. Repéré à http://novascotia.ca/dma/emo/resources/docs/report_on_the_emergency_response_to_hurricane_juan.pdf

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects.* Contributions of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Dans C. Field, V. Barros, D. Dokken, K. Mach, M. Mastrandrea, T. Bilir, M. Chatterjee, K. Ebi, Y. Estrada, R. Genova, B. Girma, E. Kissel, A. Levy, S. MacCracken, P. Mastrandrea, and L. White (Éds.), Cambridge, UK et New York, NY: Cambridge University Press, USA. 1132 p.

Groupe de travail sur les transports et l'environnement. (2014). *Les transports et l'environnement : Rapport du Groupe de travail.* Ottawa, ON : Conseil des ministres responsables des transports et de la sécurité routière. Repéré à <http://www.comt.ca/reports/transportandenviron-1014-f.pdf>

Haider, M., Tomalty, R., et Komorowski, B. (2013). *The 2012 smart growth report : Progress towards smart growth in Canada.* Repéré à http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2242648

Harford, D., Lapointe, B., Berry, J., et Danielson, L. (2015). *Adaptation financing for local governments in Canada.* Présentation de webinaire au Communauté de pratique de l'adaptation au changement climatique, 8 avril.

Hennessey, R., et Streicker, J. (2011). *Whitehorse climate change adaptation plan.* Whitehorse, YT : Northern Climate ExChange, Yukon Research Centre, Yukon College. Repéré à http://www.fcm.ca/Documents/reports/PCP/whitehorse_climate_change_adaptation_plan_EN.pdf

Henstra, D. (2011). *The dynamics of policy change : A longitudinal analysis of emergency management in Ontario, 1950–2010.* *Journal of Policy History*, 23(03), 399–428.

ICLEI Canada. (2010). *Changing climate, changing communities: Guide and workbook for municipal climate adaptation.* Repéré à http://www.icleicanada.org/images/icleicanada/pdfs/GuideWorkbookInfoAnnexes_WebsiteCombo.pdf

Ingénieurs Canada. (2012). *Roads and associated structures expert working group review: Climate considerations in Canadian codes, standards and related instruments affecting roads infrastructure systems.*

Ingénieurs Canada. (2014). *PIEVC : Adapting infrastructure to climate change – Canadian case studies.*

Institut de prévention des sinistres catastrophiques. (19 décembre 2016). *15 years later: Ice Storm Revisited.* Repéré à <http://www.iclr.org/resourcecentre/icestorm98mainpage.html>

Koatse, M., et Rietveld, P. (2009). *The impact of climate change and weather on transport : An overview of empirical findings.* *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 14, 205-221.

Koatse, M., et Rietveld, P. (2012). *Adaptation to climate change in the transport sector.* *Transport Reviews*, 32(3), 267-286.

KPMG. (2012). *Lesser Slave Lake regional urban interface wildlife – Lessons learned.* Rapport final. Repéré à https://www.ibaa.ca/?page=AB_GovDisastResponse

Martin, A. (2012, 27 juin). *Wrack and ruin.* *The Regina Leader Post.* Repéré à <http://www.leaderpost.com/health/Wrack+Ruin/6848568/story.html>

McLean, D., Mannerström, M., et Lyle, T. (2007). *Revised design flood for Lower Fraser River.* Canadian Hydrotechnical Conference. Repéré à <http://www.ebbwater.ca/wp/wp-content/uploads/2013/06/McLeanMannerstromLyle2007.pdf>

McLeod, D. (2011). *Adaptation à un climat changeant – État de préparation de l'infrastructure municipale.* Bureau de l'environnement de la Ville de Toronto. Présentation à la Fédération canadienne des municipalités le 3 mars 2011. Repéré à https://www.fcm.ca/Documents/presentations/2011/webinars/Adaptation_to_a_Changing_Climate_FR.pdf

McLeod, D. et Stevanovic-Briatico, V. (2014, 23 octobre). *Module 6: Infrastructure Networks : The changing climate's impact on the transportation and energy sectors.* L'Alliance des villes des Grands Lacs et du Saint-Laurent [webinaire]. Repéré à http://cdn.gslcities.org/wp-content/uploads/2015/11/UpdatedModule_6_v3_Infrastructure-Networks_FINAL.pdf

Metro Vancouver. (2011). *Regional growth strategy – Metro Vancouver 2040 : Shaping our future.* Repéré à <http://www.metrovancouver.org/services/regional-planning/metro-vancouver-2040/Pages/default.aspx>

Mills, B. et Andrey, J. (2002). *Climate change and transportation : Potential interactions and impacts.* Dans *The potential impacts of climate change on transportation federal research partnership workshop (October 1-2) : Summary and discussion papers* (pp. 77-88). Repéré à <http://climate.dot.gov/documents/workshop1002/workshop.pdf>

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.

Mills, T. (2016, 27 janvier). *Preparing for sea level rise in Vancouver.* Natural Resources Canada Tools of Change [webinaire]. Repéré à <https://cullbridge.adobeconnect.com/a782512023/p6q5t6z265/>

Mims, C. (2010, 14 juin). *How Twitter helps in a disaster.* *MIT Technology Review.* Repéré à <http://www.technologyreview.com/view/419368/how-twitter-helps-in-a-disaster/>

Ministère des affaires municipales de l'Ontario. (2013). *Plan de croissance de la région élargie du Golden Horseshoe, 2006 : Consolidation administrative, Juin 2013.* Repéré à https://www.placestogrow.ca/index.php?option=com_content&task=view&id=359&Itemid=12&lang=fr

Ministère des Transports de l'Ontario. (2013). *Pavement design and rehabilitation manual (deuxième édition).* Repéré à www.library.mto.gov.on.ca/getattachment.asp

- Morency, P., Voyer, C., Burrows, S., et Goudreau, S. (2012). Outdoor falls in an urban context : Winter weather impacts and geographical variations. *Public Health*, 103(3): 218-222.
- National Cooperative Highway Research Program. (2006). *Evaluation of best-management practices for highway runoff control*. Transportation Research Board, Report No. 565. Repéré à http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_565.pdf
- 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.
- North American City Transportation Officials (NACTO). (2012). *Urban street design guide*. Repéré à <http://nacto.org/usdg/>
- 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
- Ouranos. (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois. Montréal, Québec, 48 p. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/programmes/climat-municipalites/Plan-adaptation.pdf>
- Perl, A., et Kenworthy, J. (2010). The Canadian city at a crossroads between "passage" and "place." Dans T. Bunting, P. Filion, et R. Walker. (Éds.), *Canadian cities in transition : New directions in the twenty-first century* (chapitre 11). Don Mills, ON : Oxford University Press.
- Picketts, I. (2012). Implementing climate change adaptation in Prince George, BC. Volume 5: *Transportation infrastructure*. Repéré à http://princegeorge.ca/environment/climatechange/adaptation/Documents/2012_PGRAC_Transport_volume%20with%20Exec%20Sum.pdf
- Picketts, I., Curry, J., Déry, S., et Cohen, S. (2013). Learning with practitioners : Climate change adaptation priorities in a Canadian community. *Climatic Change*, 118, 321-327.
- Picketts, I. (2014). Practitioners, priorities, plans, and policies : Assessing climate change adaptation actions in a Canadian community. *Sustainability Science*, 10 (3), 503-513.
- Postmedia News. (2012, 8 février). Canada census 2011 : The cities leading Canada's population boom. Repéré à <http://news.nationalpost.com/2012/02/08/canada-census-2011-see-which-cities-and-towns-have-grown-the-most/>
- 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. *Environment Abstracts*, 38(5), 272-281.
- Reimchen, D., Doré, G., Fortier, D., Stanley, B., et Walsh, R. (2009). Cost and constructability of permafrost test sections along the Alaska Highway, Yukon. *Transportation Association of Canada Annual Conference 2009*, Soil Stabilization for Changing Environments Session, Vancouver, BC.
- Revi, A., Satterthwaite, D., Aragon-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R., Pelling, M., Roberts, D., et Solecki, W. (2014). Urban areas. Dans *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK : Cambridge University Press.
- Robinson, D., et Cruikshank, K. (2006). Hurricane Hazel : Disaster relief, politics, and society in Canada, 1954-55. *Journal of Canadian Studies* 40, (1) : 37-70.
- Royal Academy of Engineering. (2011). *Infrastructure, engineering, and climate change adaptation : Ensuring services in an uncertain future*. Repéré à <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/engineering-the-future>
- Sabir, M., van Ommerman, J., Koetse, M., et Rietveld, P. (2010). *Impact of weather on daily travel demand*. Tinbergen Institute Discussion Paper. VU University, Amsterdam. Repéré à [http://www.fietsberaad.nl/library/repository/bestanden/Sabir%20et%20al%20\(2010a\).Pdf](http://www.fietsberaad.nl/library/repository/bestanden/Sabir%20et%20al%20(2010a).Pdf)
- Saskatchewan Archives Board. (2011). *The Regina cyclone of 1912*. Repéré à <http://www.saskarchives.com/collections/exhibits/regina-cyclone-1912>
- 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.
- Schwartz, H. (2011). Adapting to climate change : Another challenge for the transportation community. Dans Special Task Force on Climate Change and Energy (Éd.), *Transportation Research Circular E-152: Adapting Transportation to the Impacts of Climate Change*. Washington, DC : Transportation Research Board of the National Academies.
- Solecki, W., Leichenko, R., et O'Brien, K. (2011). Climate change adaptation strategies and disaster risk reduction in cities : Connections, contentions, and synergies. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3, 135-141.
- Statistique Canada. (2011a). Chiffres de population et des logements - Faits saillants en tableaux, Recensement de 2011. Repéré à <http://www12.statcan.ca/census-recensement/2011/dp-pd/hlt-fst/pd-pl/Table-Tableau.cfm?Lang=fra&T=205&S=3&RPP=50>
- Statistique Canada. (2011b). Population urbaine et rurale, par province et territoire (Canada). Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/demo62a-fra.htm>
- Statistique Canada. (2014). Projections démographiques pour le Canada (2013 à 2063), les provinces et les territoires (2013 à 2038). Repéré à <http://www.statcan.gc.ca/pub/91-520-x/91-520-x2014001-fra.htm>
- Swedlove, F. (2014, 5 décembre). Government alone can't fix Canada's infrastructure deficit. *The Globe and Mail*. Repéré à <http://www.theglobeandmail.com/globe-debate/government-alone-can't-fix-canadas-infrastructure-deficit/article2196661/>

Texas Department of Transportation. (2006). Maintenance solutions for bleeding and flushed pavements. Repéré à http://www.depts.ttu.edu/techmrtweb/Reports/Products/5230_P1.pdf

The Canadian Press. (5 janvier 2008). Lessons to be learned from ice storm: report author. CTV News. Repéré à <http://www.ctvnews.ca/lessons-to-be-learned-from-ice-storm-report-author-1.269871>

Toronto and Region Conservation Authority. (2016). *The history of flood control in the TRCA*. Repéré à <http://www.trca.on.ca/protect/water-management/flood-protection.dot>

Transports Canada. (2011). Guide de planification et de ressources sur les transports actifs au Canada. Division des initiatives environnementales.

Transports Canada. (2013). *Les transports au Canada 2011 – Annexe A – Addenda statistique (Tableau EC73 : Demande de transport en pourcentage du PIB, 2011)*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/anre-menu-3045.htm>

United States Arctic Research Commission Task Force. (2003). *Climate change, permafrost, and impacts on civil infrastructure*. Special Report 01-03. Arlington, VA: US Arctic Research Commission.

United States Environmental Protection Agency (2008). *Reducing urban heat islands : Compendium of strategies*. Repéré à <http://www.epa.gov/heatisld/resources/compendium.htm>

United States 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>

Ville de Moncton. (2013). *Stratégie d'adaptation aux changements climatiques et de gestion des inondations*. Repéré à [www.moncton.ca/Assets/Residents+French/Environnement+French/Strat\\$c3\\$la9gie+d\\$!27adaptation+aux+change+ment+climatiques.pdf](http://www.moncton.ca/Assets/Residents+French/Environnement+French/Strat$c3$la9gie+d$!27adaptation+aux+change+ment+climatiques.pdf)

Ville de Montréal. (2015). *Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal*. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,112913600&dad=portal&schema=PORTAL

Ville de Toronto. (2008). *Ahead of the storm: Preparing Toronto for climate change*. Repéré à http://www1.toronto.ca/City%20Of%20Toronto/Environment%20and%20Energy/Our%20Goals/Files/pdf/A/ahead_of_the_storm.pdf

Ville de Toronto. (2011). *Toronto's adaptation actions*. Repéré à https://www1.toronto.ca/City%20Of%20Toronto/Environment%20and%20Energy/Our%20Goals/Files/pdf/toronto_cc_adapt_actions.pdf

Ville de Toronto. (2014). *Coordinated watercourse management plan. Staff report*. Repéré à <http://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2014/pw/bgrd/backgroundfile-68981.pdf>

Walsh, R., Orban, S., Walker, R., Coates, J., Croteau, J., Stone, D., et Strynadka, T. (2009). *Front street paving project, Dawson City, Yukon : Adapting to climate change in a National Historic District*. TAC 2009 Environmental Achievement Award Submission (Yukon Highways and Public Works). Repéré à <http://www.colascanada.ca/uploads/colascanada/File/expertise/EnvironmentalAchievementYukonPaper.pdf>

Wang, X., Thompson, D., Marshall, G., Tymstra, C., Carr, R., et Flannigan, M. (2015). Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change. *Climatic Change*, 130(4), 573-586.

White, C., Plotnick, L., Kushma, J., Hiltz, S., et Turoff, M. (2009). An online social network for emergency management. *International Journal of Emergency Management*, 6(3/4), 369- 382.

Wooler, S. (2004). *The changing climate : Impact on the Department for Transport*. Repéré à <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.dft.gov.uk/pgr/scienceresearch/key/thechangingclimateitsimpacto1909>

Woudsma, C., Kanaroglou, P., Maoh, H., et Marshall, S. (2007). *Climate change and Canadian road transport : Assessing impacts and adaptations*. Ottawa, ON : Ressources naturelles Canada, Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques.

Younger, M., Morrow-Almeida, H., et Vindingi, S. (2008). The built environment, climate change, and health opportunities for co-benefits. *American Journal of Preventative Medicine*, 35(5), 517-526.