



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).

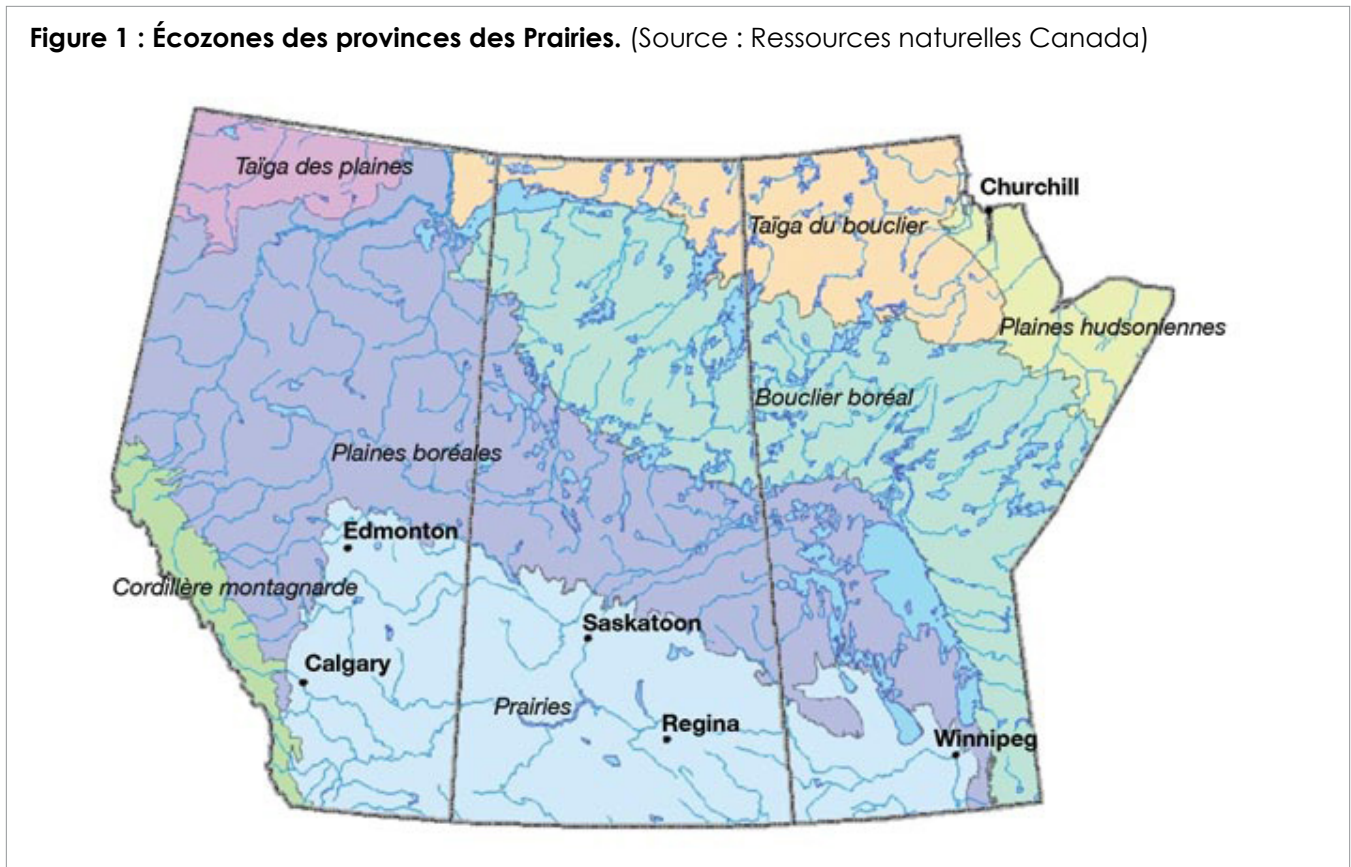
Les plaines arides de l'écozone centresud des Prairies occupent 25 % de la superficie terrestre de la région, caractérisée par des déficits hydriques persistants et souvent marqués. Cette écozone est le centre agricole et industriel de la région et l'une des plus largement modifiées au Canada, seule 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 nord-est 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 nord-ouest 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 nord-est 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 sud-ouest 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 Colombie-Britannique (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

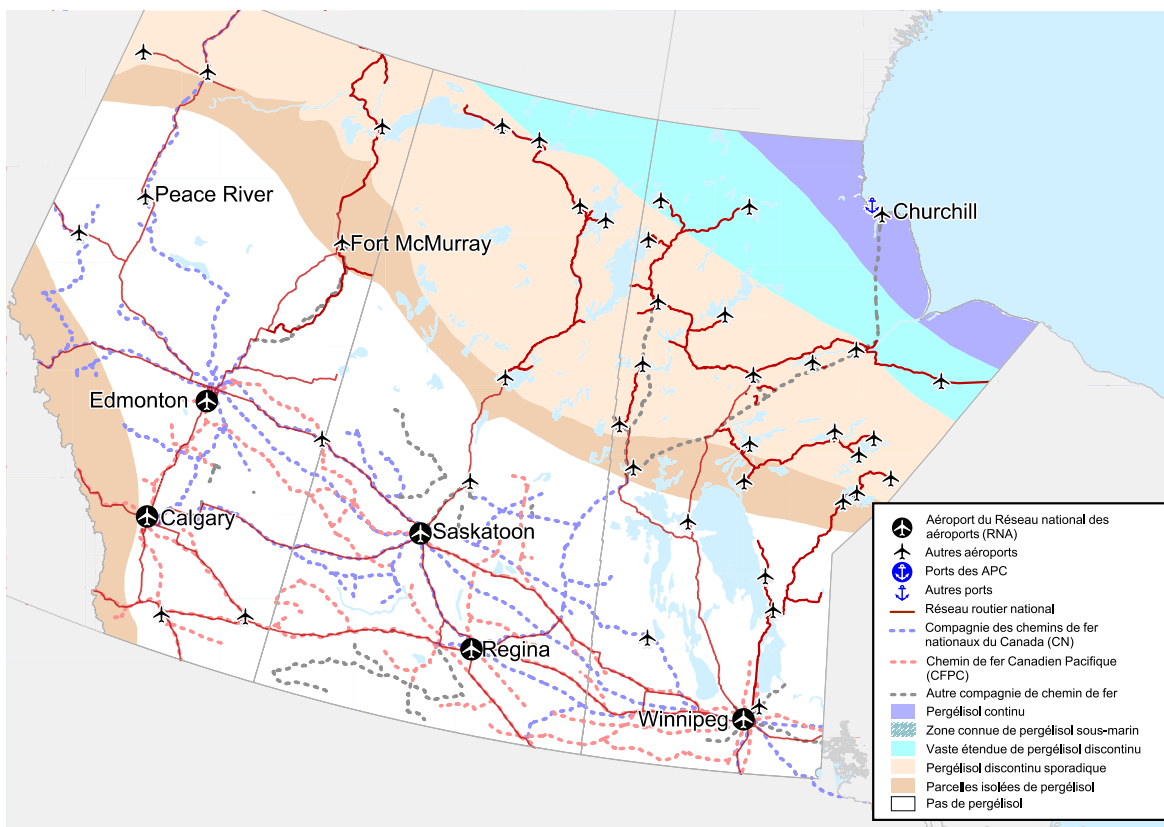
La force économique des Prairies provient de l'extraction des ressources naturelles. De 2010 à 2011, le produit intérieur brut (PIB) des trois provinces collectivement a augmenté de 11,1 % pour atteindre 429,5 milliards de dollars, soit près du double du taux de croissance nationale. En 2014, la contribution 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.

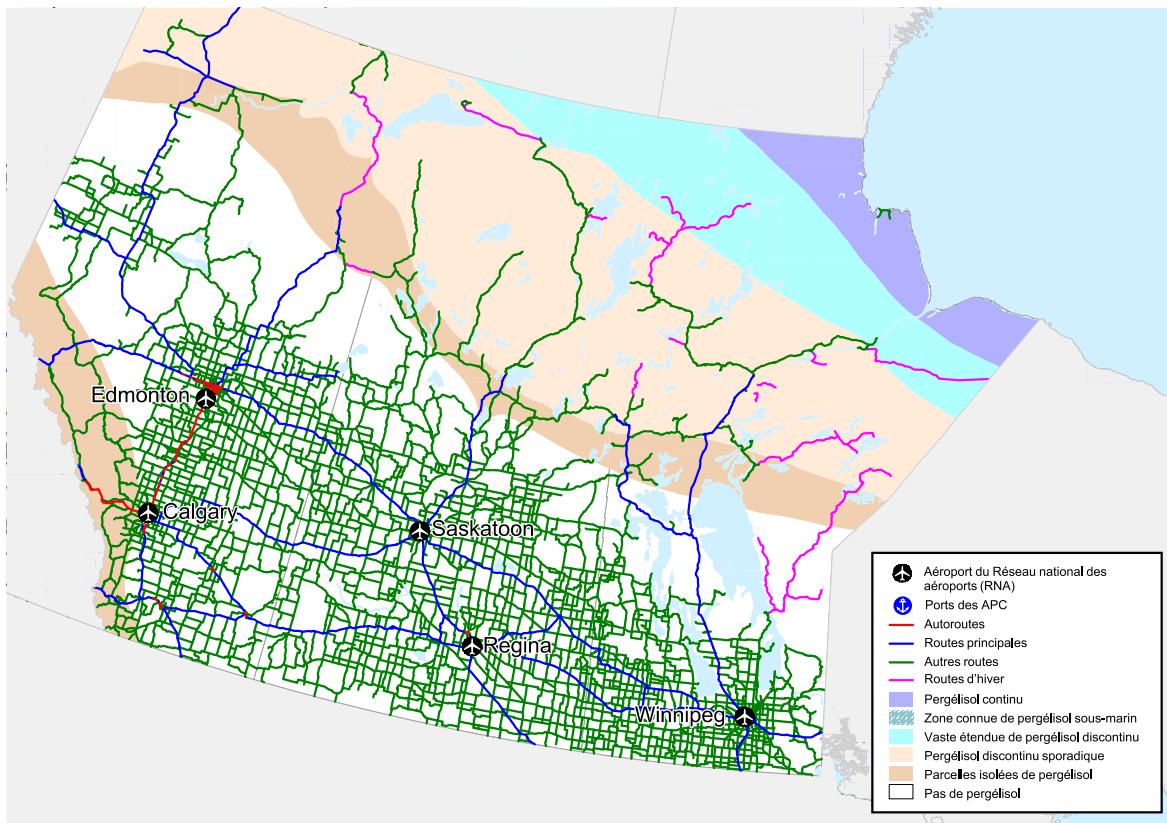
Figure 2 : Les principales infrastructures de transport dans les Prairies, y compris les zones de pergélisol. Notez que le réseau routier national représenté dans la figure comprend les routes d'hiver.



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 mi-janvier à la mi-mars, 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 I³ (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 Churchill 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).

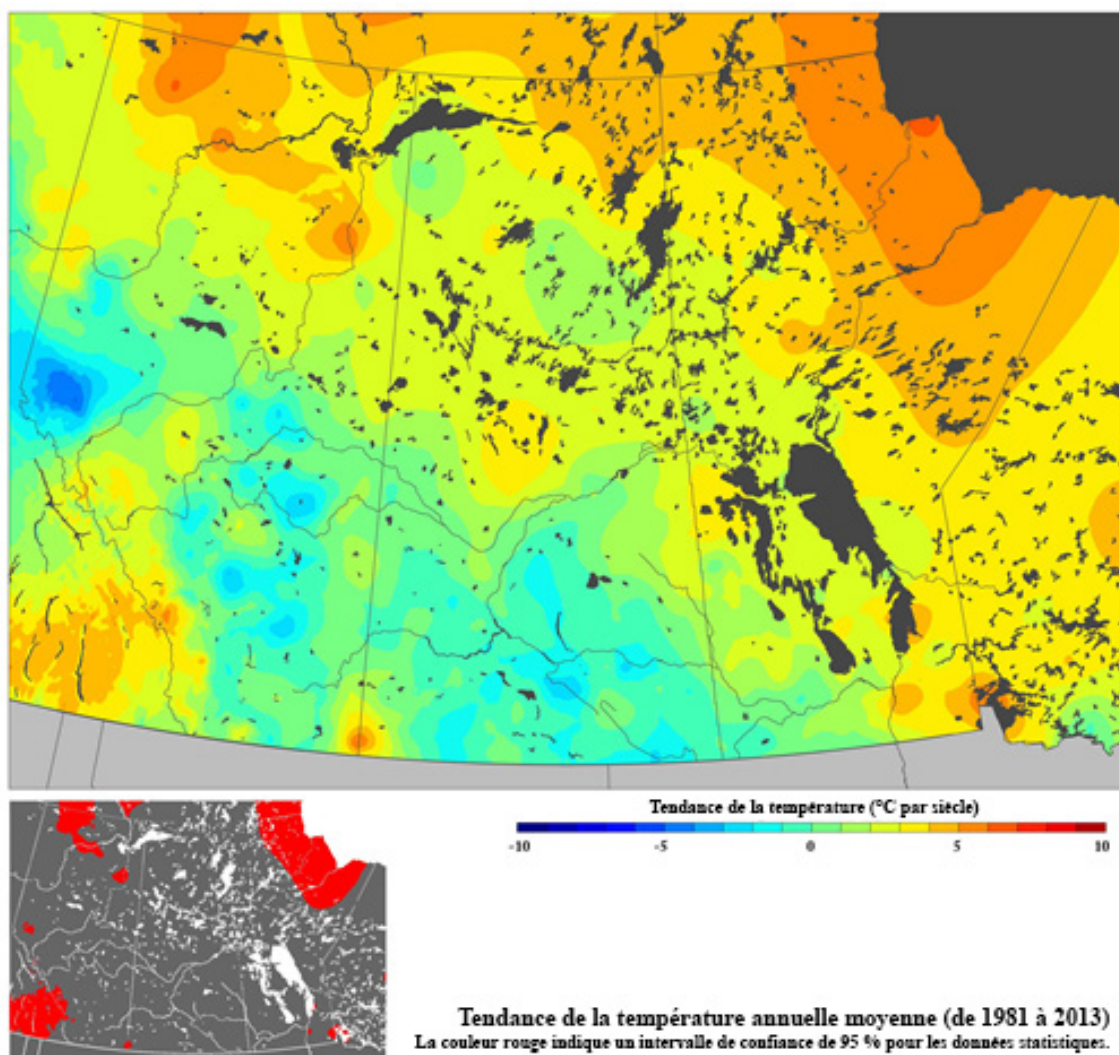
3.1 TENDANCES PASSÉES

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).

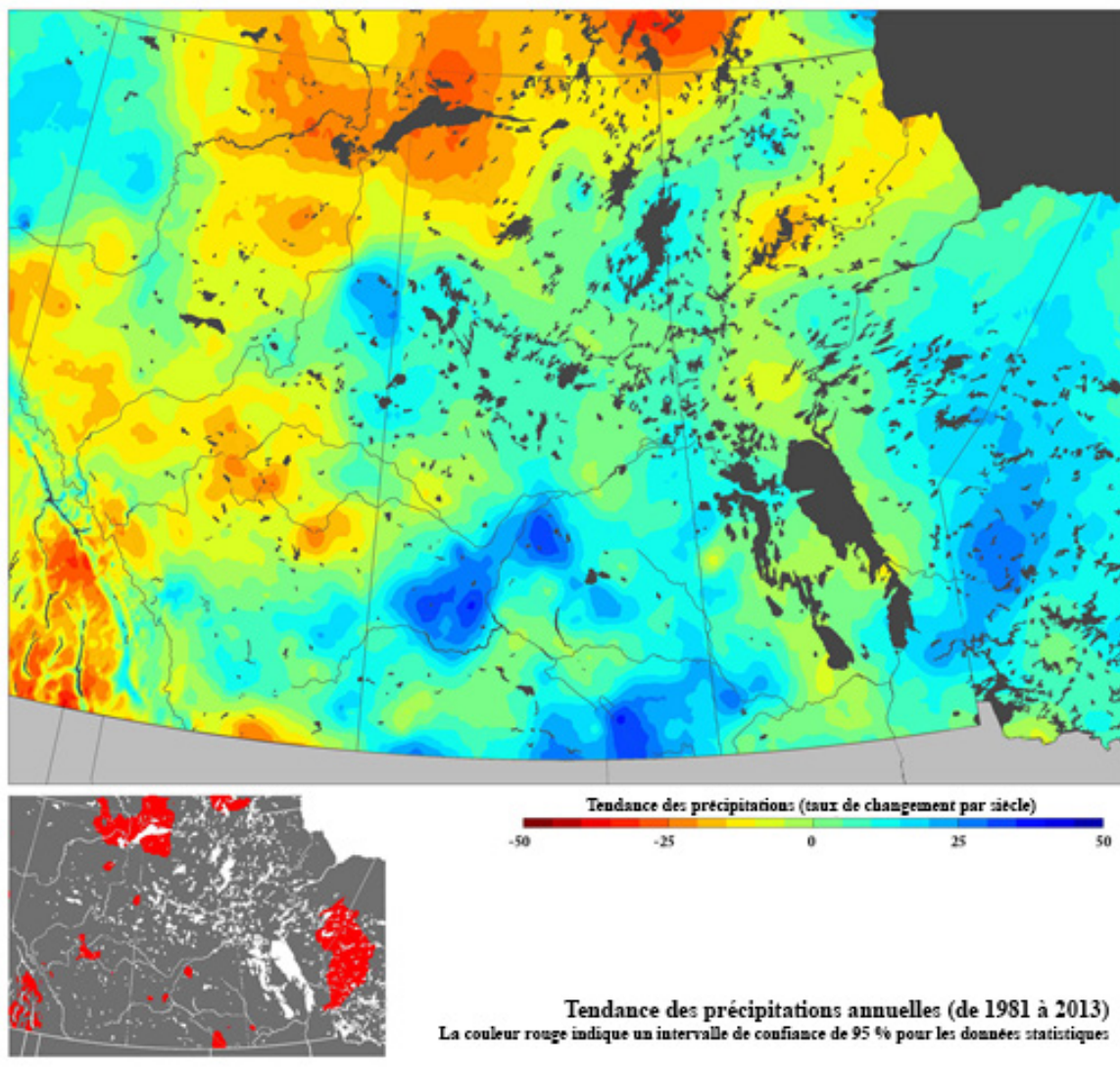
En plus de la variabilité importante entre et parmi les années, il existe également une importante variabilité spatiale dans la région. En examinant les tendances de températures moyennes annuelles, la recherche (Danny Blair et Ryan Smith, Université de Winnipeg, communications personnelles, 2015) montre 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

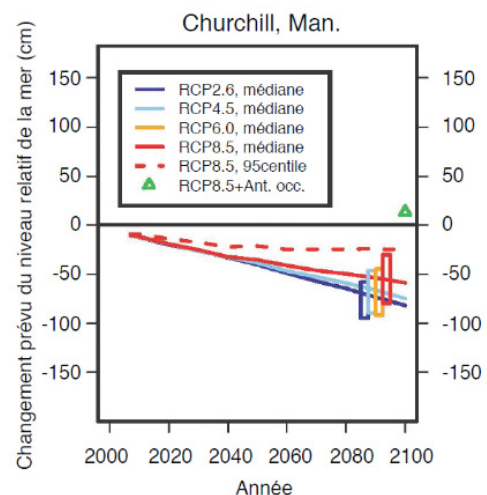
Tous les scénarios climatiques indiquent que les températures dans les Prairies devraient augmenter et les changements dans l'évapotranspiration donneraient lieu à une aridité accrue dans de nombreuses régions (Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). Dans un scénario de faible croissance des émissions, le réchauffement 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 sud-ouest 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'atterrissage;
- 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 ressuage 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 eux-mêmes 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 (Lohse-Busch 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'orniérage 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, 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.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.	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'engrassement du ballast des voies ferrées et l'augmentation des risques d'affouillement. L'engrassement 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

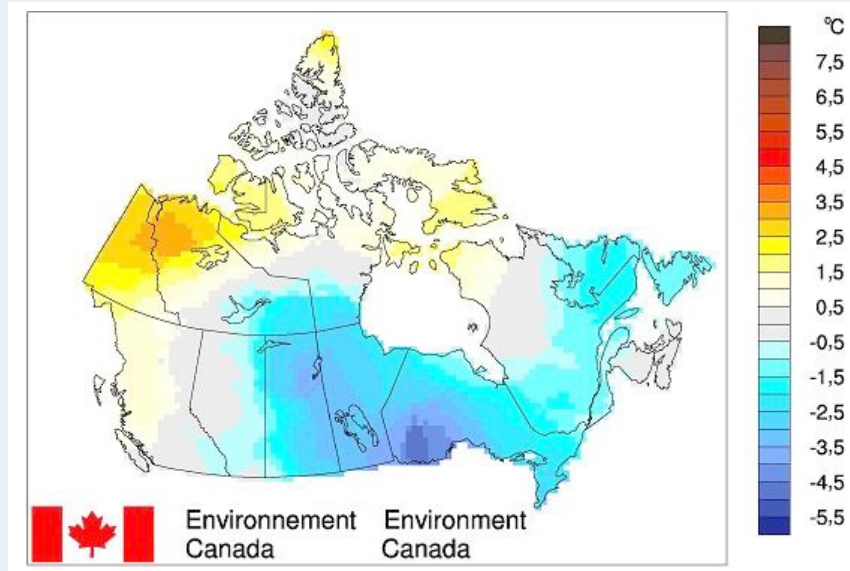
On a décrit le transport par chemin de fer des céréales vers le port dans les Prairies à l'hiver 2013-2014 comme une « tempête parfaite » de problèmes (Cash, 2014). La manutention des céréales dans la région est un processus complexe auquel participent de nombreux acteurs. Cette année en particulier, 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 céréalères 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 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 hebdomadaires pour les trains en provenance des ports de la C.-B. vers Toronto.

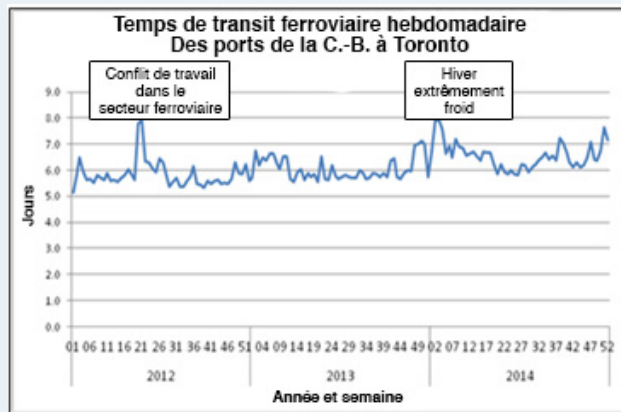
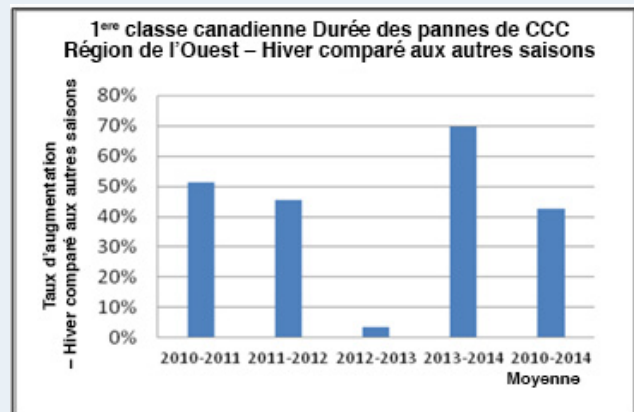


Figure 9b : Défaillances de la CCC – pourcentage d'augmentation en hiver par rapport aux autres saisons. (Source : Association des chemins de fer du Canada)



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, le 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 un 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

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 (pi³/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 pi³/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 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 apportés.
- 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 élever 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 ¾ po à 1 po d'un matériau hydrofuge, même si la piste est toujours classée comme une piste d'atterrissage 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

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., Oommmen, 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 Agrolologists Conference Proceedings, p. 35. Repéré à http://www.albertaagrolologists.ca/site/page_404?url=http://www.albertaagrolologists.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 and 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., Happychuk, 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=5BA5EAF-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-DF91A48CAOC5B1FC>

- 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/jec/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/transportandenviron-1014-f.pdf> et [annexe A http://www.comt.ca/reports/transportandenviron-app-1014.pdf](http://www.comt.ca/reports/transportandenviron-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/geoft/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-136796688.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/transports/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 and 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.piev.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.