



3 · Les Territoires du Nord

CHAPITRE 3 : LES TERRITOIRES DU NORD

AUTEUR PRINCIPAL :

KALA PENDAKUR¹

COLLABORATEURS :

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

NOTATION BIBLIOGRAPHIQUE RECOMMANDÉE :

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

¹ Le Conference Board du Canada, Ottawa (ON)

TABLE DES MATIÈRES

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

PRINCIPALES CONCLUSIONS

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

1.0 INTRODUCTION

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

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

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

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

1.1 APERÇU RÉGIONAL

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

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

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

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

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

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

2.0 UNE INTRODUCTION AU SYSTÈME DE TRANSPORT DU NORD DU CANADA

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

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

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

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

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

2.1 APERÇU DU SYSTÈME

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

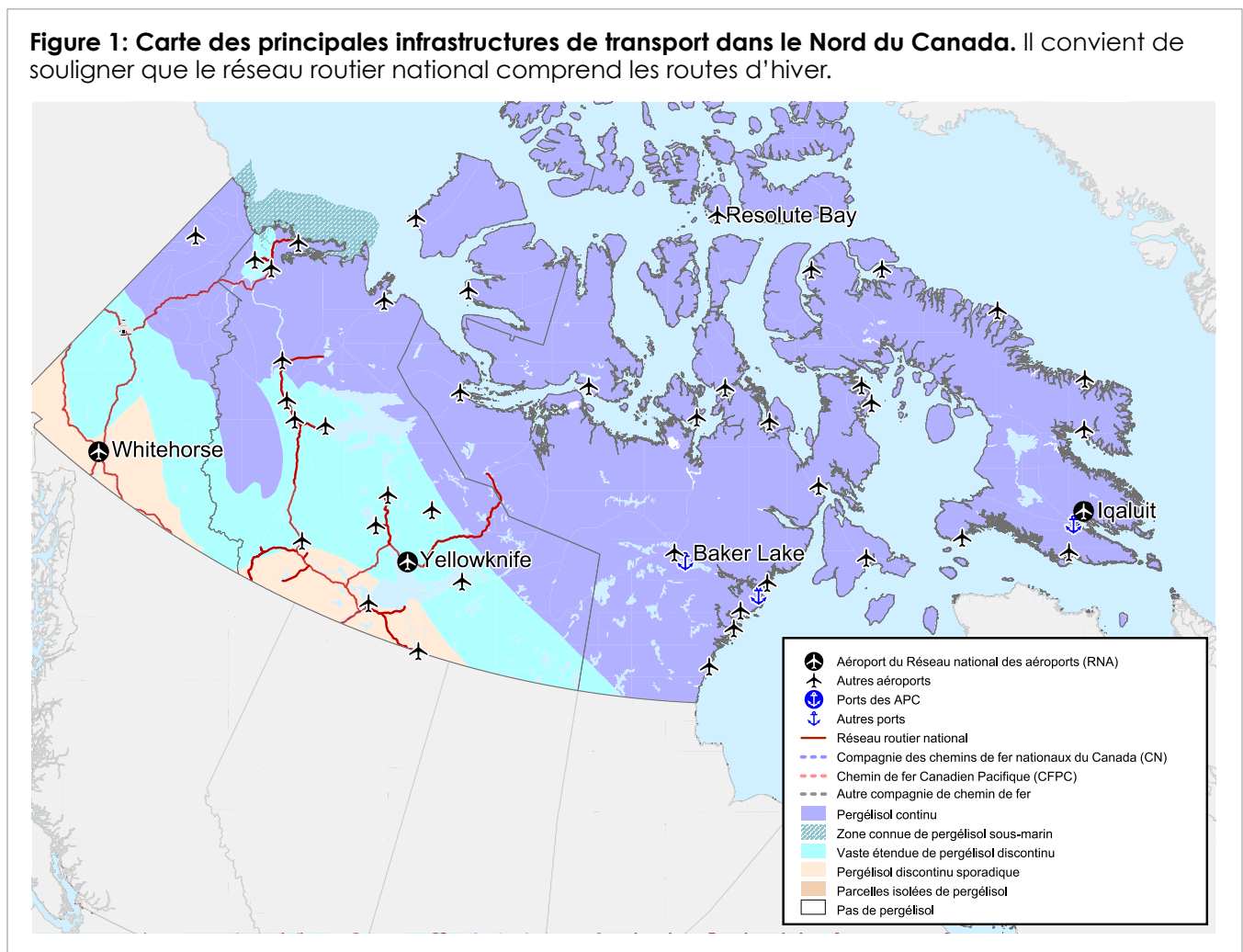


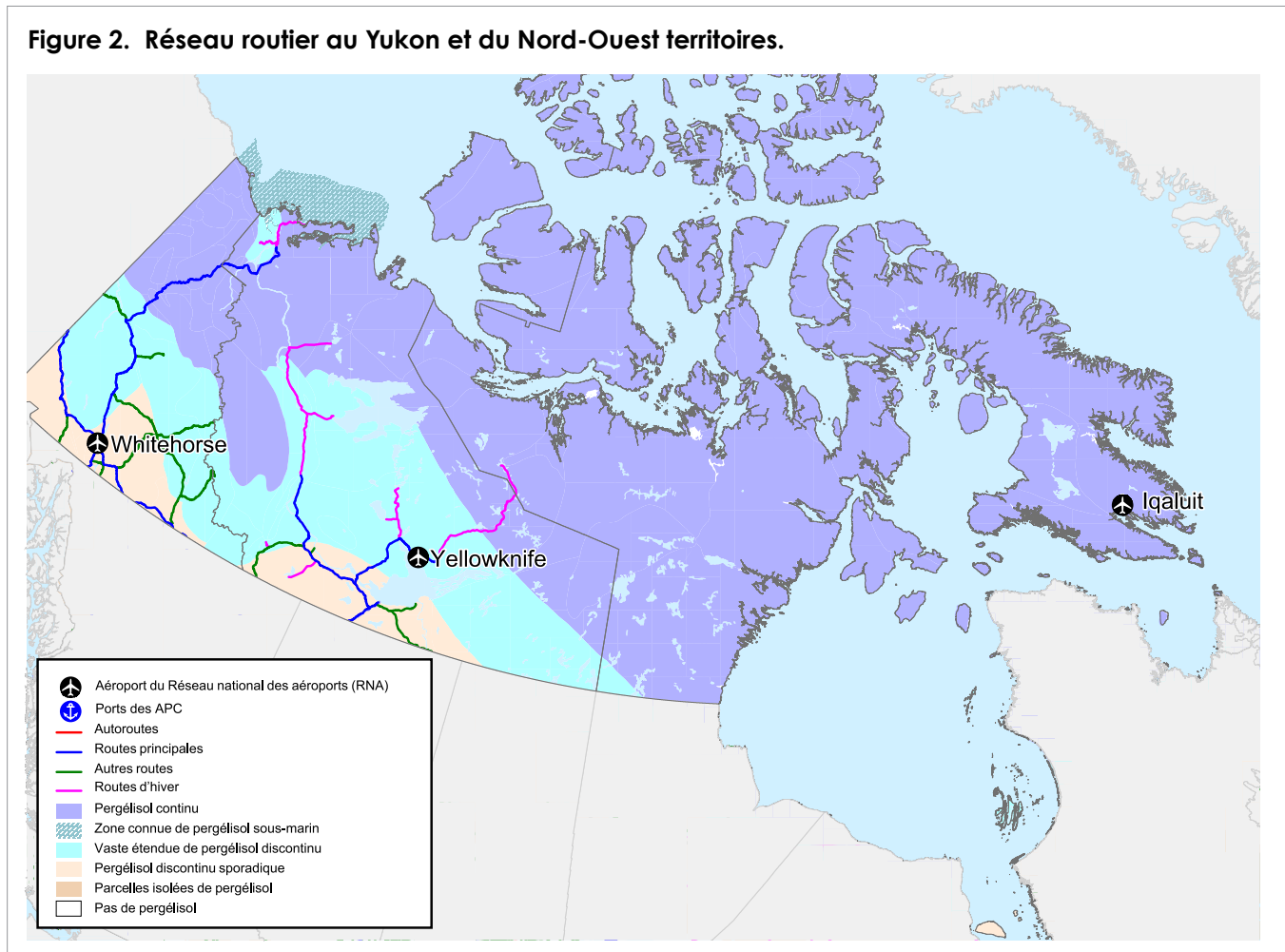
Tableau 2 : Aperçu des réseaux de transport dans les territoires.

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

2.2 TRANSPORT ROUTIER

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

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

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

2.3 AVIATION

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

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

2.4 TRANSPORT MARITIME

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

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

2.5 TRANSPORT FERROVIAIRE

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

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

3.0 CLIMAT

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

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

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

3.1 TENDANCES ET PRÉVISIONS

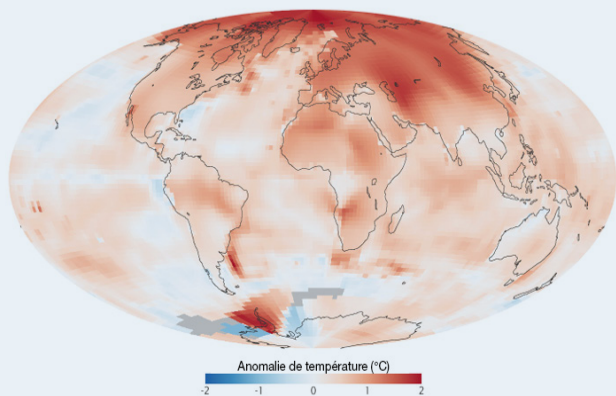
3.1.1 Atmosphère

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

QU'EST-CE QUE L'AMPLIFICATION ARCTIQUE?

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

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



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

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

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

3.1.2 Cryosphère

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

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

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

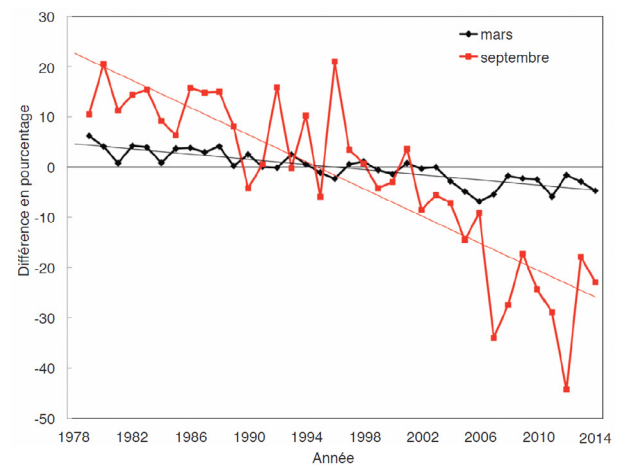
Ces tendances dans la couverture glacielle marine devraient continuer ou s'accroître (Vaughn et coll., 2013), certains modèles prévoyant une perte quasi complète de la couverture de glace marine estivale avant le milieu du siècle (Wang et Overland, 2012). La glace marine arctique s'amincit également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

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

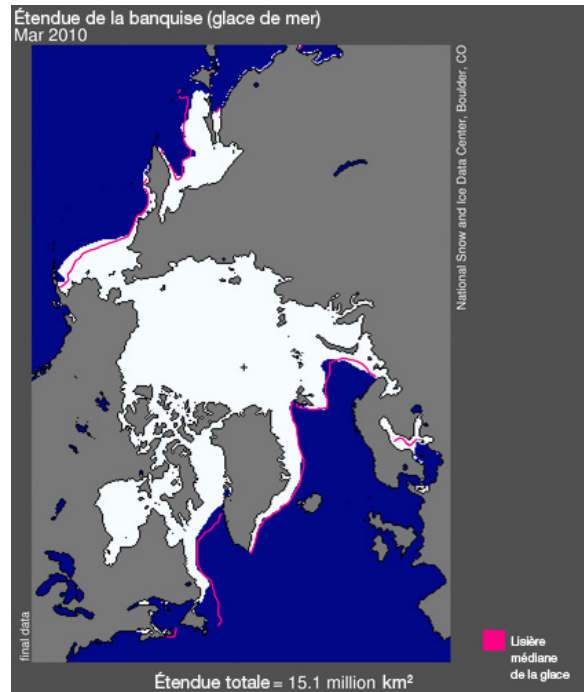
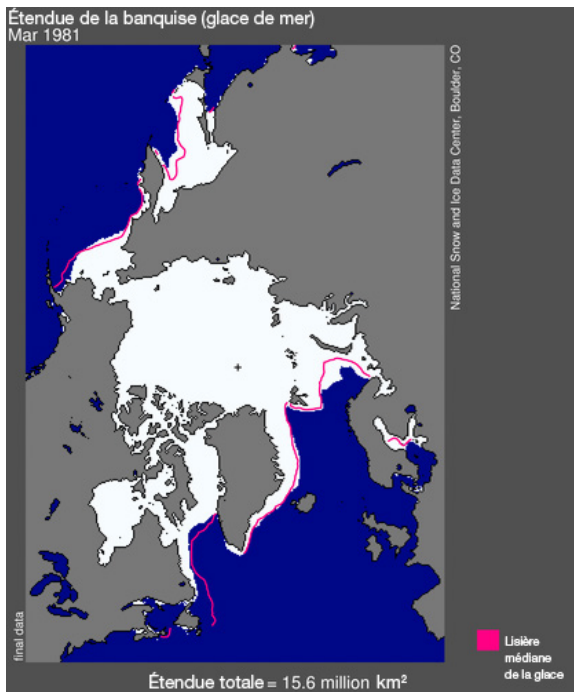
(Source : Gracieuseté du National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder)

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

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



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



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

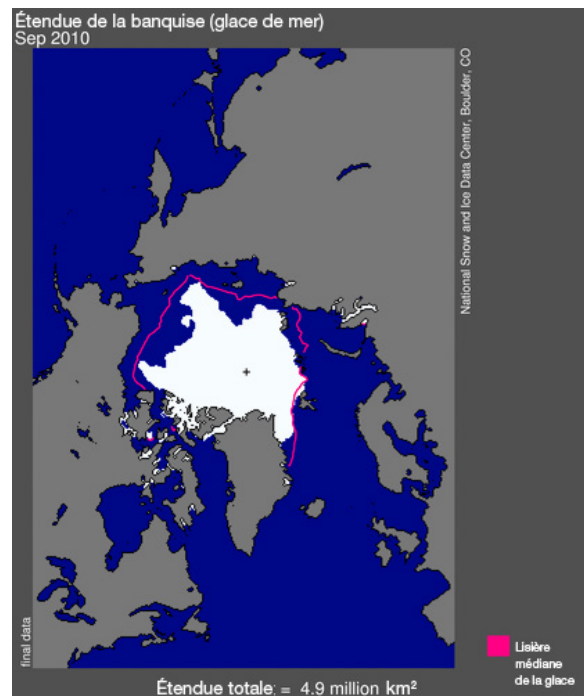
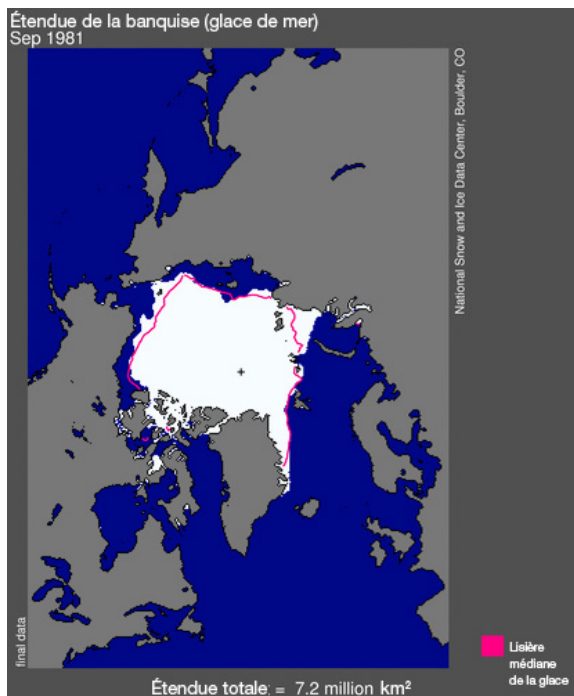
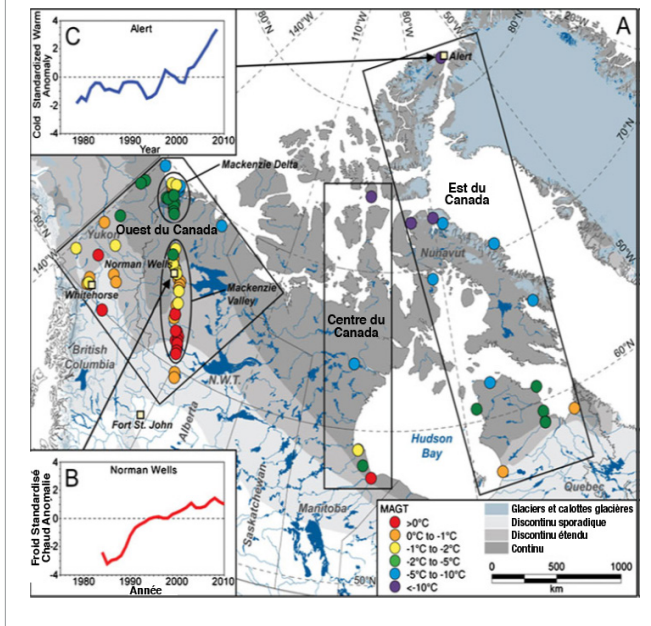


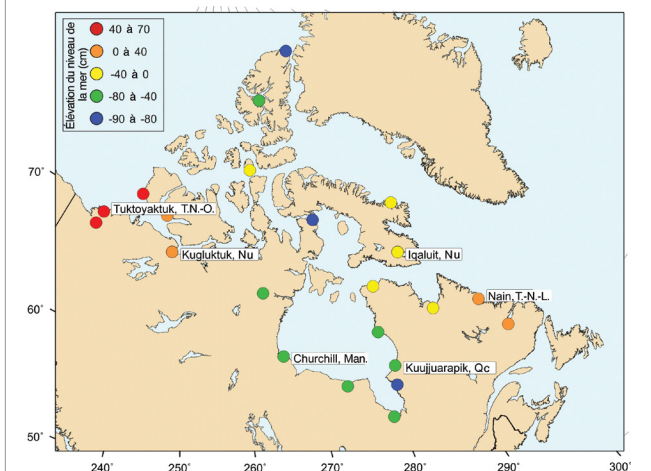
Figure 5 : La température annuelle moyenne du sol (TAMS) dans le Nord canadien enregistrée pendant l'Année polaire internationale (2007-2009). B et C montrent des séries temporelles d'anomalies normalisées en fonction de la température du pergélisol (par rapport à la moyenne de 1988 à 2007) pour un emplacement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



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

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

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



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

3.1.3 Niveau de la mer

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

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

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

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

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

4.0 TRANSPORT DE SURFACE

4.1 INCIDENCES CLIMATIQUES SUR LE TRANSPORT ROUTIER

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

4.1.1 Routes praticables en toutes saisons

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

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



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

4.1.2 Routes hivernales

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

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

4.2 RISQUES FUTURS

4.2.1 Routes praticables en toutes saisons

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

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

4.2.2 Routes hivernales

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

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

ÉTUDE DE CAS 1

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

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

Faits sur la TCWR

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

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



...

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

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

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

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

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

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

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

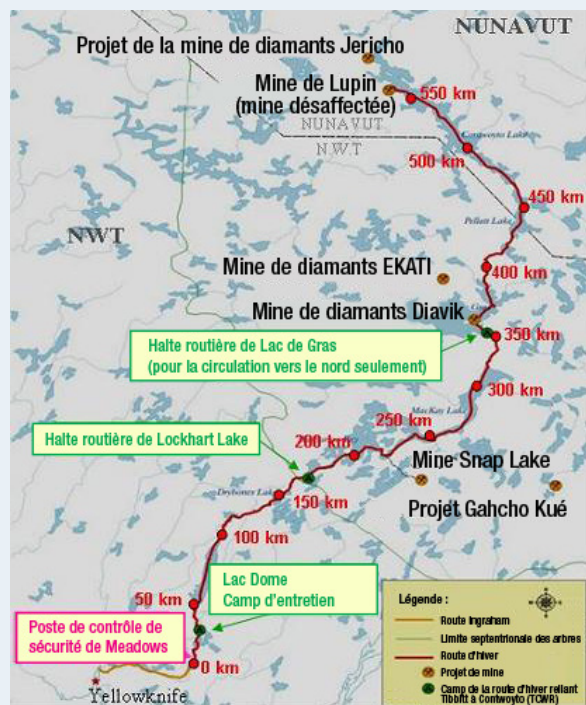
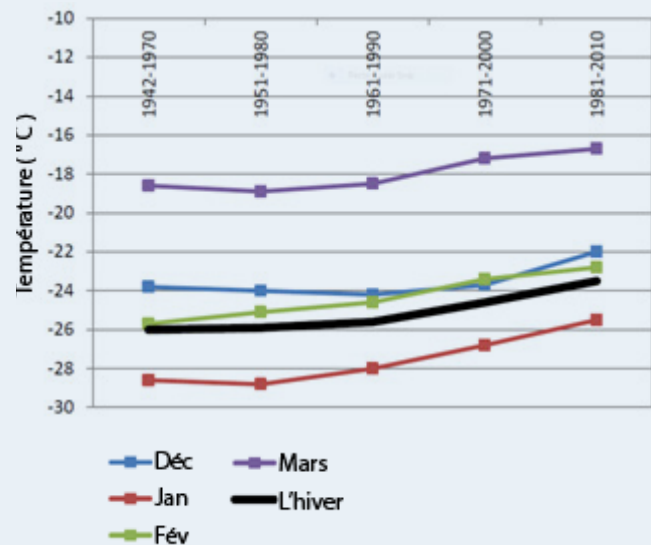


Figure 9 : Les températures moyennes historiques observées à Yellowknife pendant cinq périodes de climat normal antérieures. (Source : Environnement et Changement climatique Canada)



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

4.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

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

4.3.1 Pratiques d'entretien et de surveillance

4.3.1.1 Routes praticables en toutes saisons

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

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

4.3.1.2 Routes hivernales

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

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

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

4.3.2 Planification et emplacement de l'infrastructure

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

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

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

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

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

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

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

Application suggérée.

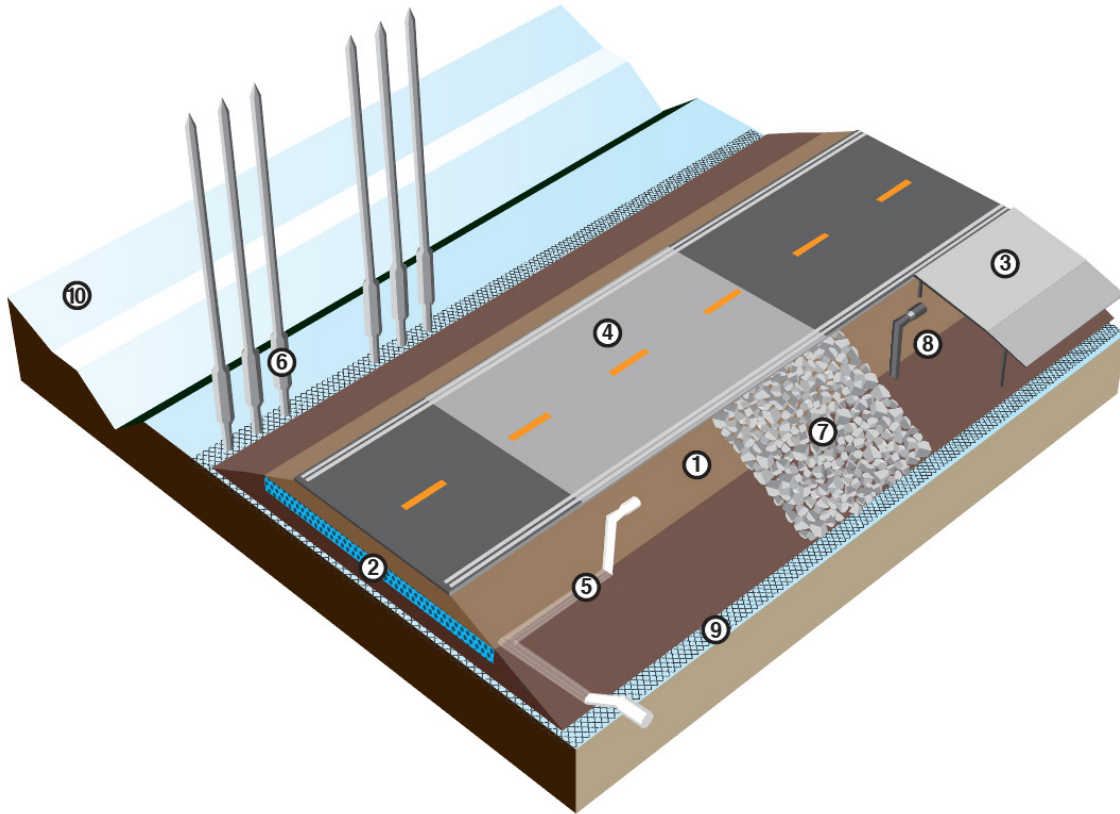
Application possible, mais pas optimale.

S.O. : sans objet; N/R : N/R

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

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

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



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

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

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



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

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

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

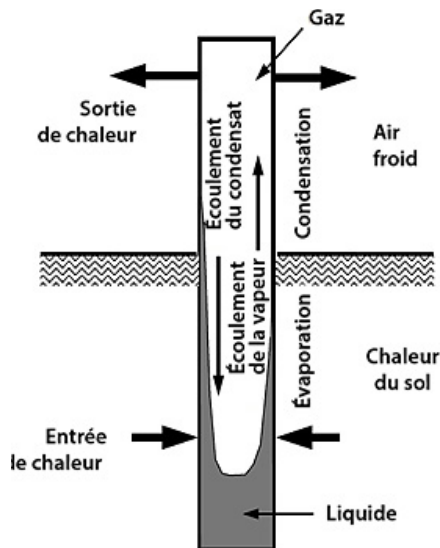


Figure 13 : Fondation à thermosiphon à courbe plate dans un garage d'entretien aéroportuaire à Inuvik, dans les Territoires du Nord-Ouest. (Source : Igor Holubec)



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

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

Les méthodes pour améliorer la stabilité des remblais comprennent :

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

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

ÉTUDE DE CAS 2

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

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

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

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



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

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

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

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

5.0 TRANSPORT FERROVIAIRE

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

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

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

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

6.0 TRANSPORT AÉRIEN

6.1 INCIDENCES DU CLIMAT SUR LE TRANSPORT AÉRIEN

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

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

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

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

6.2 RISQUES FUTURS

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

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

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

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

6.3 MÉTHODES D'ADAPTATION

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

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

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

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

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

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

ÉTUDE DE CAS 3

ÉTUDE DE CAS 3 : AMÉLIORATIONS DE L'INFRASTRUCTURE À L'AÉRO-PORT INTERNATIONAL D'IQALUIT

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

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

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

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

7.0 TRANSPORT MARITIME

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

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

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

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

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

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

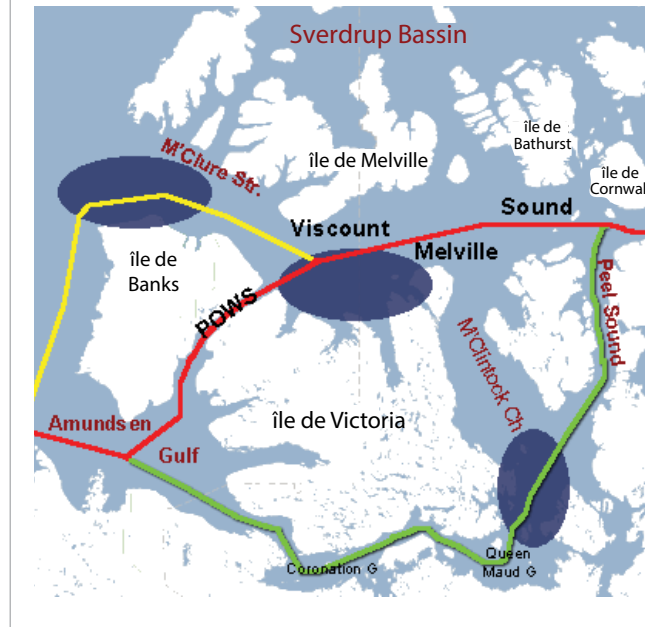
Pour le transport riverain, les niveaux d'eau plus bas ont nécessité l'utilisation de barges plus légères ou de plus petites charges pour maintenir les normes de sécurité, nuisant aux opérations dans certains cas (Deton'Cho-Stantec, 2013). Par exemple, les faibles niveaux d'eau dans le fleuve Mackenzie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

7.2 RISQUES ET POSSIBILITÉS FUTURS

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

Rédigé par Doug Matthews (Matthews Energy Consulting)

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

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

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

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

7.3 PRATIQUES D'ADAPTATION

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

7.3.1 Adaptations pour les navires et la navigation

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

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

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

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

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

7.3.2 Adaptations pour les installations maritimes

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

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

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

8.0 LACUNES EN MATIÈRE DE RENSEIGNEMENTS

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

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

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

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

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

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

9.0 CONCLUSIONS

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

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

⁴ Voir : Blais-Stevens et Behnia (2015)

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

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

RÉFÉRENCES

- Affaires autochtones et Développement du Nord Canada. (2010, janvier). *Lignes directrices sur l'aménagement des Terres du Nord*. Accès : routes et sentiers. Repéré à <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/fra/1100100023568/1100100023583>
- Alberta Transportation. (2003, juin). Glossary – Erosion and Sedimentation Terms. Repéré à <http://www.transportation.alberta.ca/Content/docType372/Production/refmatglsry2.pdf>
- Andrey, J., Kertland, P., et Warren, F.J. (2014). Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport. Dans F.J. Warren et D.S. Lemmen (Éds.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation* (pp. 233-252). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Arctic Adaptation Exchange. (2014). *About*. Repéré à <http://arcticadaptationexchange.com/about>
- Association des transports du Canada. (2010). *Lignes directrices de développement et de gestion des infrastructures de transport dans les régions de pergélisol*. Ottawa, ON.
- Association des transports du Canada. (2011). *Lignes directrices relatives à la construction et à l'exploitation des routes d'hiver*. Ottawa, ON.
- Atkinson, D. (2005). Observed storminess patterns and trends in the circum-Arctic coastal regime. *Geo-Marine Letters*, 25(2), 98-109.
- Atkinson, D.E., Forbes, D.L., et James, T.S. (2016). Un littoral dynamique dans un contexte de climat en mutation. Dans D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James et C.S.L. Mercer Clarke (Éds.), *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat* (pp. 27-68). Ottawa, ON : Gouvernement du Canada.
- Auld, H., Waller, J., Eng, S. Klaassen, J., Morris, R., Fernandez, S., Cheng, V., et MacIver, D. (2010). The changing climate and national building codes and standards. *Résumé présenté à la American Meteorological Society : Ninth Symposium on the Urban Environment. Session 5 : Global Climate Change and Urbanization*. Keystone, CO.
- Beaulac, I., et Doré, G. (2006). Permafrost degradation and adaptations of airfields and access roads, Nunavik, Québec, Canada (document de travail). Repéré à https://www.researchgate.net/publication/237558706_PERMAFROST_DEGRADATION_AND_ADAPTATIONS_OF_AIRFIELDS_AND_ACCESS_ROADS_NUNAVIK_QUEBEC_CANADA
- Best, M., Walkington, P., et Zuzelo, P. (2014). Runway Grooving in Canada, Ottawa (YOW), Runway 07-25. Présenté à SWIFT 2014. Vancouver, BC.
- Blais-Stevens, A., et Behnia, P. (2015). Debris flow susceptibility mapping using a qualitative heuristic method and Flow-R along the Yukon Alaska Highway Corridor, Canada. *Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions*, 3(5), 3509-3541.
- Bowron, B., et Davidson, G. (2011, mars). *Climate change adaptation planning : A Nunavut toolkit*. Ottawa, ON : Canadian Institute of Planners, Gouvernement du Nunavut, et Gouvernement du Canada. Repéré à <https://www.cip-icu.ca/Files/Resources/NUNAVUT-TOOLKIT-FINAL>
- Brown, L., et Duguay, C. (2010). The response and role of ice cover in lake-climate interactions. *Progress in Physical Geography*, 34(5), 671-704.
- Brownie, D. (2013, octobre). *A Northern transportation strategy for Canada : Discussion paper*. PROLOG Canada Inc., et Van Horne Institute. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/eng/ctareview2014/pdf/Van%20Horne%20Institute/NorthernTransportationDiscussionPaper.pdf>

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

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

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

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