

LA CONSTRUCTION DES ROUTES EN TERRITOIRE NORDIQUE ET LES IMPACTS SUR LE
PERGÉLISOL

Par
Viviane Paradis

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement
en vue de l'obtention du grade de maître en environnement

Sous la direction de Monsieur Jean-Pierre Pelletier

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Septembre 2013

SOMMAIRE

Mots clés : changements climatiques, pergélisol, étude d'impact sur l'environnement, infrastructures routières, nord du Québec.

Le nord du Québec est en plein essor grâce aux ressources énergétiques et minières que le territoire renferme. Les besoins en métaux et l'ouverture du passage du Nord-Ouest à l'année facilitent l'ouverture du nord. Des axes de transport doivent être envisagés pour assurer le déplacement des minéraux, de la machinerie et des travailleurs. L'implantation des routes et des projets linéaires similaires constitue un défi à cause de la présence du pergélisol, le sol gelé en permanence, sur lequel ils sont construits. Déjà les changements climatiques modifient le comportement du pergélisol. Il se réchauffe, la glace qu'il contient fond, et il s'affaisse par endroits. Comment construire des routes en territoire nordique tout en s'adaptant à la fonte du pergélisol?

La réalisation de grands projets, de la conception au démantèlement est généralement assujettie à une procédure d'évaluation et d'examen des impacts. Ce processus réglementé prévoit la mise en place de mesures d'atténuation pour diminuer les conséquences des impacts négatifs, un de ces impacts étant la fonte du pergélisol. C'est là l'objectif principal de l'essai, cerner les composantes de l'environnement, les activités génératrices d'impact et les mesures d'atténuation qui doivent être considérées afin de s'assurer que la fonte du pergélisol est prise en compte lors des études d'impact sur l'environnement d'un projet routier en milieu nordique.

La démarche se situe à deux niveaux en retenant d'abord un tracé de moindre impact, puis en sélectionnant des mesures adaptées pour limiter l'impact négatif sur le pergélisol. Une bonne connaissance des types de sols, de leur contenu en eau, de la présence des eaux de surface et souterraines, et de la modélisation des changements climatiques anticipés, sont autant de critères pour choisir un tracé de moindre impact. À titre d'exemple, les sols riches en glace et dont la température est près du point de congélation doivent particulièrement être évités. Quant à la mise en place des remblais, le choix des matériaux de revêtement, le déboisement, les aménagements hydrologiques et le déneigement, ils font partie des activités génératrices d'impact. En augmentant la quantité d'énergie solaire absorbée par le sol ou en permettant à une trop grande quantité d'eau de le réchauffer, ces activités, de concert avec les changements climatiques, influencent le régime thermique du pergélisol ayant pour conséquences l'apparition d'affaissements, de fissures et de glissements de terrain. Des mesures d'atténuation comme l'utilisation de surfaces réfléchissantes, de drains thermiques et de remblais à convection d'air ont prouvé leur efficacité. Certaines techniques peuvent être appliquées sur de longs segments des routes alors que d'autres seront plus appropriées ponctuellement, là où le milieu est plus sensible. Ces dernières s'appliquent durant la construction, mais aussi en réponse aux conséquences qui se manifestent avec le temps.

REMERCIEMENTS

D'abord, merci à mon directeur d'essai chez qui la capacité de synthèse remarquable et les commentaires absolument pertinents ont permis de bonifier cet essai et m'ont surtout appris qu'il m'en restait énormément à apprendre...;

Merci à mon sujet d'être demeuré scientifiquement assez complexe pour absorber ma curiosité et nourrir ma motivation;

Merci à ma famille, mes amis et mes collègues de travail de m'avoir encouragée lorsque c'était le temps et de m'avoir permis de décrocher aussi souvent que nécessaire;

Merci à mes collègues de l'université avec qui les discussions m'ont rappelé que je n'étais pas seule;

Merci à mes parents, qui ont su tranquillement installer chez moi cet intérêt pour les éléments naturels du paysage qui m'entoure;

Finalement, merci à mon amoureux qui a su renouveler d'enthousiasme, de compréhension, de positivisme et de générosité à travers ce dernier défi scolaire. Sa présence a illuminé mes fins de journées et m'a donné l'énergie nécessaire pour enchaîner les heures de travail. Merci d'avoir fait preuve de patience à mon endroit et d'avoir trouvé les mots justes qui m'ont encouragé à poursuivre.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 MISE EN CONTEXTE.....	5
1.1 Développement du nord québécois	5
1.2 Procédure d'évaluation environnementale dans le nord québécois	9
1.3 Résumé.....	12
2 DYNAMIQUE DU PERGÉLISOL	14
2.1 Fondements scientifiques	14
2.1.1 Distribution du pergélisol dans l'hémisphère nord	14
2.1.2 Équilibre thermique du pergélisol.....	17
2.1.3 Perturbation de l'équilibre thermique	20
2.2 Impact des changements climatiques sur le pergélisol	23
2.2.1 Réseau de puits d'observation.....	23
2.2.2 Tendances mondiales et canadiennes	25
2.2.3 Tendances au Québec.....	26
2.3 Résumé.....	29
3 CHOIX DU TRACÉ : COMPOSANTES DE L'ENVIRONNEMENT À PRENDRE EN COMPTE	30
3.1 Types de sols et son contenu en glace	31
3.2 Hydrologie et conditions hydrogéologiques.....	33
3.3 Topographie.....	34
3.4 Changements climatiques	35
3.5 Feux de forêt.....	36
3.6 Cartographie des éléments du milieu	36
3.7 Résumé.....	38
4 IMPACTS SUR LA STABILITÉ THERMIQUE DU PERGÉLISOL	40
4.1 Activités génératrices d'impact	41
4.1.1 Remblai	41
4.1.2 Revêtement.....	42

4.1.3 Déboisement	43
4.1.4 Bacs d'emprunt	43
4.1.5 Aménagements hydrologiques	43
4.1.6 Dénéigement.....	44
4.1.7 Zones de stockage des matériaux granulaires	45
4.1.8 Activités de moindre impact	45
4.2 Conséquences observables	46
4.2.1 Affaissements.....	46
4.2.2 Fissures.....	48
4.2.3 Glissements de terrain	49
4.2.4 Conséquences indirectes : dégradation du confort et de la sécurité	50
4.3 Développement de la matrice des impacts appréhendés	51
4.3.1 Changements climatiques.....	51
4.3.2 Schéma logique	52
4.3.3 Matrice à deux niveaux	53
4.3.4 Matrice des impacts appréhendés	55
4.4 Résumé.....	57
5 MESURES D'ATTÉNUATION	58
5.1 Mesures d'atténuation.....	58
5.1.1 Techniques visant à réduire l'entrée de chaleur	58
5.1.2 Techniques visant à extraire la chaleur des remblais	61
5.1.3 Techniques visant à adapter le remblai	63
5.1.4 Autres techniques	64
5.2 Cadre décisionnel	65
5.2.1 Applicabilité des techniques proposées.....	66
5.2.2 Cadre financier.....	70
5.2.3 Application des mesures d'atténuation : à la conception et à la construction	71
5.2.4 Application des mesures d'atténuation : entretien et suivi.....	71

5.3 Résumé.....	72
CONCLUSION	74
LISTE DE RÉFÉRENCES	77
BIBLIOGRAPHIE	82
ANNEXE 1 : RISQUES ASSOCIÉS AU DÉVELOPPEMENT D'INFRASTRUCTURES DANS LA MUNICIPALITÉ DE SALLUIT	84
ANNEXE 2 : PROCÉDURE POUR INCLURE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LES ÉIE	86

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Territoire d'application du projet Le Nord pour tous	6
Figure 1.2	Distribution du pergélisol continu, discontinu et sporadique	6
Figure 1.3	Transport routier, ferroviaire, maritime et aérien en territoire nordique québécois	7
Figure 1.4	Carte d'application du régime de protection de l'environnement.....	10
Figure 2.1	Distribution mondiale du pergélisol.....	15
Figure 2.2	Les zones de pergélisol au Québec : (A) pergélisol continu, (B) pergélisol discontinu et répandu, (C) pergélisol discontinu et dispersé, et (D) pergélisol sporadique	16
Figure 2.3	Variations annuelles des profils de température selon la profondeur	19
Figure 2.4	Éléments influents sur le transfert d'énergie entre l'atmosphère et le sol	19
Figure 2.5	Anomalies dans les profils de températures observés pour quatorze sites en Alaska	22
Figure 2.6	Puits d'observation présents avant l'année polaire internationale (<i>Pre-IPY sites</i>) et aménagés durant l'année polaire internationale (<i>IPY-Sites</i>).	24
Figure 2.7	Températures moyennes à la profondeur d'amplitude annuelle nulle pour plusieurs puits d'observations à travers le nord canadien	26
Figure 2.8	Anomalies dans les profils de températures du sol à la mine Raglan, Québec	27
Figure 2.9	Distribution du pergélisol en 1990 (a) et en 2090 selon deux scénarios de changements climatiques : CSIRO (b) et NCAR (c).....	28
Figure 3.1	Photographies aériennes présentant des polygones de coins de glace dans l'arctique canadien	32
Figure 3.2	Paysage présentant une combinaison de pingos et de lacs thermokarsts, Nunavik	32
Figure 3.3	Dégel d'un pingo et lac thermokarst qui en résulte. La flèche indique une personne debout.....	33
Figure 3.4	Changements projetés dans la température annuelle. Moyenne selon six modèles de circulation globale	35
Figure 3.5	Risques associés au développement d'infrastructures dans la municipalité de Salluit	38

Figure 4.1	Exemples de problématiques liées aux aménagements hydrologiques inadéquats sur une piste d'atterrissage au Nunavik	44
Figure 4.2	Affaissement d'un remblai routier en Alaska	47
Figure 4.3	Évolution sur trois années d'une dépression au centre d'une route au Yukon	47
Figure 4.4	Évolution des affaissements sur la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq entre 2004 et 2005	48
Figure 4.5	Affaissement du pergélisol dans un banc d'emprunt du territoire du Nord Ouest	48
Figure 4.6	Mécanisme de rotation de l'épaulement après le dégel du pergélisol en bordure de route	49
Figure 4.7	Exemples de fissures longitudinales dans l'accotement et sur la chaussée causées par une rotation de l'épaulement	49
Figure 4.8	(a) Pergélisol riche en glace, et (b) Détachement de la couche active	50
Figure 4.9	Schéma logique du régime thermique du pergélisol	52
Figure 5.1	Expérimentation de la surface réfléchissante (a) application (b) état après 30 ans	60
Figure 5.2	Exemple de détérioration de la peinture blanche	61
Figure 5.3	Principe du drain thermique	62
Figure 5.4	Principe du remblai à convection d'air. La flèche noire représente l'air froid et la flèche rouge l'air chaud expulsé	62
Figure 5.5	Exemples d'un remblai à convection, (a) Tibet, (b) Alaska	63
Figure 5.6	Évolution de la température en fonction de la profondeur pour trois techniques de mitigation et une section de référence, entre septembre 2007 et octobre 2009	70
Tableau 2.1	Diminution dans l'étendue du pergélisol (%) et augmentation de la couche active (cm) en 2100 pour plusieurs sites dans l'hémisphère nord	25
Tableau 2.2	Augmentation de l'épaisseur de la couche active et des températures du sol pour 13 sites situés dans 8 villages nordiques du Québec	27
Tableau 4.1	Matrice à deux niveaux illustrant les relations d'impacts directs et indirects	54
Tableau 4.2	Matrice des impacts appréhendés d'un projet routier et des changements climatiques sur le régime thermique du pergélisol	56

Tableau 5.1	Applicabilité et coûts des techniques d'atténuation	67
-------------	---	----

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

°C	degré Celsius
°N	degré nord
ACEE	Agence canadienne d'évaluation environnementale
ATC	Association des transports du Canada
BERE	Bureau d'examen des répercussions environnementales
CBJNQ	Convention de la Baie-James et du Nord québécois
CFFCEE	Comité fédéral-provincial-territorial sur le changement climatique et l'évaluation environnementale
CNEQ	Convention du Nord-est québécois
COMEV	Comité d'évaluation
COVEX	Comité d'examen
CQEK	Commission de la qualité de l'environnement Kativik
ÉIE	Évaluation des impacts sur l'environnement
ERT	Tomographie de la résistivité électrique
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPR	<i>Ground-penetrating radar</i>
LQE	<i>Loi sur la qualité de l'environnement</i>
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MRN	Ministère des Ressources naturelles
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
MTQ	Ministère des Transports du Québec
SOPFEU	Société de protection des forêts contre le feu

INTRODUCTION

La demande mondiale en énergie et en minerai a poussé les gouvernements, notamment ceux du Canada et du Québec, à privilégier l'exploration et l'exploitation minière. Les régions nordiques, peu exploitées et difficilement accessibles, mais regorgeantes de ressources, sont devenues en peu de temps, des territoires convoités. De grands projets prennent maintenant forme. Soutenus par l'initiative gouvernementale qu'est le Plan Nord ou maintenant Le Nord pour tous, plus d'une dizaine de projets miniers ont été annoncés au cours des derniers mois. (ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), 2011). Parallèlement, les changements climatiques ont des conséquences bien visibles dans les territoires nordiques. Alors que les glaces se font de moins en moins présentes, le vieux rêve qu'était le passage du Nord-Ouest est en train de se réaliser. La période de navigation est prolongée, favorisant ainsi le transport des matières premières et rendant plus accessible et profitable le développement de grands projets nordiques (MRNF, 2011).

L'implantation de nouveaux lieux d'exploitation des ressources demandera l'établissement de liens de transport. Les communautés nordiques, actuellement très isolées, pourraient alors devenir des points de transit pour les travailleurs, les équipements et même la matière première. Si quelques aéroports et ports sont déjà en place, le réseau routier est développé presque exclusivement à l'intérieur des communautés (MRNF, 2011). Des liens devront alors être tissés entre les communautés et les nouveaux lieux d'exploitation. Nécessairement, le réseau routier prendra de l'expansion. C'est la prémisse de cet essai.

Ces nouvelles infrastructures routières seront parfois établies, partiellement ou totalement, sur un sol gelé en permanence, le pergélisol. Toutefois, les changements climatiques sont susceptibles de modifier l'épaisseur, l'étendue et la distribution du pergélisol (Allard and Lemay, 2012). Puisque le pergélisol peut contenir des volumes surprenants de glace, 40 % n'étant pas inhabituel, sa fonte se traduit par des affaissements et des fissures localisés sur les routes (Fortier et autres, 2011). Cette nouvelle réalité climatique, s'ajoutant à l'existence même de l'infrastructure, menace l'intégrité physique des routes existantes et celles qui seront construites (Association des transports du Canada (ATC), 2010). Alors, comment faut-il construire les routes afin de limiter les impacts qu'aura la fonte du pergélisol?

Les grands projets, dont la réalisation des routes, doivent suivre une procédure d'évaluation et d'examen des impacts, que ce soit des projets assujettis à la législation fédérale ou provinciale. Au Québec, la procédure est encadrée par la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE) et par la Convention de la Baie-James et du Nord québécois (CBJNQ). Deux règlements, le Règlement 24 et le Règlement 25 de la LQE, en régissent l'application pour que l'évaluation d'impact sur l'environnement (ÉIE), l'outil privilégié par le gouvernement, soit effectuée de manière pertinente, complète et transparente. (André et autres, 2010)

Le processus permet d'évaluer les conséquences d'un projet sur l'environnement pour en limiter ses impacts négatifs. Il favorise également une participation multidisciplinaire visant à bonifier le projet et s'inscrit dans un esprit de développement durable. Pour la réalisation d'une telle étude dans le nord du Québec, le promoteur du projet se réfère à une marche à suivre précisée à l'intérieur d'une directive. Cette directive est spécifiquement élaborée par un comité qui diffère selon que le projet se situe au sud ou au nord du 55^e parallèle. La directive requiert entre autres que le promoteur présente dans le rapport d'ÉIE de son projet les impacts, qu'ils soient positifs ou négatifs, les conséquences observables et les mesures d'atténuation qui peuvent être mises en place pour limiter les effets négatifs. (André et autres, 2010)

Par opposition à ce qui se passe sur le territoire du Québec méridional, le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) ne propose pas de directive type pour les projets routiers en milieu nordique. Par ailleurs, compte tenu des opportunités de développement dans le Nord, les projets routiers devraient se multiplier au cours des prochaines années. Cet essai a pour objet l'identification des activités génératrices d'impact, les composantes de l'environnement qui seront affectées et les mesures d'atténuation qui devraient être considérées dans les ÉIE pour que la fonte du pergélisol, causée notamment par les changements climatiques et les activités anthropiques, soit correctement prise en compte. Au final, la considération de ces éléments assurera une amélioration de la construction et de l'entretien des routes dans les zones où le pergélisol est présent.

C'est ainsi que l'objectif principal de cet essai est de cerner les composantes de l'environnement, les activités génératrices d'impact et les mesures d'atténuation qui doivent être prises en compte afin d'intégrer adéquatement la fonte du pergélisol aux ÉIE d'un projet routier en territoire nordique. Quatre objectifs spécifiques sont retenus. Premièrement, décrire l'importance et l'ampleur des conséquences qu'ont les changements climatiques sur le pergélisol en territoire nordique québécois. Deuxièmement, identifier les composantes de l'environnement qui doivent être prises en compte pour optimiser le choix du tracé d'une infrastructure routière en territoire nordique. Troisièmement, élaborer une matrice des impacts appréhendés de la fonte du pergélisol sur les projets routiers en se basant sur les connaissances scientifiques disponibles. Quatrièmement, dégager des mesures d'atténuation applicables à la réalité québécoise en s'inspirant des travaux réalisés au Québec et dans d'autres pays.

L'approche qui a été privilégiée pour atteindre ces objectifs consiste d'abord en une revue de la littérature scientifique pour bien cerner le phénomène du pergélisol. Des sources d'information gouvernementales et universitaires ont également été retenues. Dans un contexte où le nombre de routes déjà construites demeure restreint en régions nordiques, des documents provenant aussi bien du Québec et du Canada que de l'étranger, et traitant d'infrastructures similaires telles que les pistes d'atterrissage ont également été consultés. En se basant sur la revue scientifique,

les observations faites en régions nordiques par les différents paliers de gouvernements et les documents d'ÉIE consultés, les éléments naturels les plus susceptibles d'être reliés directement à un pergélisol instable ont été retenus pour optimiser le choix du tracé. C'est en s'appuyant sur ces mêmes sources et sur la Directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet de route sur le territoire du Québec méridional que diverses activités génératrices d'impact sur la stabilité du pergélisol ont été identifiées. Ces activités ont permis de développer une matrice des impacts appréhendés d'un projet routier pour tenir compte de la fonte du pergélisol. En identifiant les conséquences observables sur les routes, cette matrice qui met en relation les activités anthropiques génératrices d'impact et les composantes de l'environnement a mené à la recherche des différentes mesures d'atténuation qui peuvent être mises en place. Puisqu'aucune localisation en particulier n'est étudiée dans le cadre de cet essai, les mesures d'atténuation sont discutées de manière générale, en soulignant que l'aspect économique joue, sur cette question, un rôle déterminant quant au choix et à l'application des mesures.

C'est dans un esprit de pertinence et de validation que la recherche a été effectuée avec rigueur. Le choix des sources a été fait en nombre suffisant et selon de nombreux critères, dont la réputation de l'auteur et l'objectivité. La date de publication s'est révélée être un critère décisif dans l'analyse de la validité des sources. En effet, dans le domaine technique tout comme celui de la recherche sur le climat, les progrès se font rapidement et les données disponibles changent grandement avec les années. Par exemple, les programmes de modélisation sont de plus en plus précis à mesure que les technologies visant à acquérir les données de bases deviennent plus puissantes. Par conséquent, les ouvrages les plus récents ont été retenus. Toutefois, certains articles scientifiques, publiés il y a plusieurs années, sont toujours d'actualité et sont encore abondamment cités. Que ce soit pour donner une perspective historique ou pour donner crédit à un auteur ayant effectué les recherches initiales, certains documents plus anciens ont également été utilisés.

Afin de comprendre la problématique associée à la fonte du pergélisol et sous différents angles, plusieurs types de documents ont été consultés. Évidemment, les journaux scientifiques dont les contenus sont révisés par des pairs ont été scrutés avec minutie pour appuyer l'essai sur leur validité et leur neutralité. À titre d'exemple, le *Permafrost and Periglacial Processes*, le *Journal of Cold Regions Engineering* et le *Canadian Geotechnical Journal* comprennent de nombreux articles sur le pergélisol. Le site internet du Centre d'étude nordique affilié à l'Université Laval se révèle très utile puisqu'il recense les travaux des équipes de recherche actives dans le nord du Québec. Il est ainsi facile d'identifier les auteurs clés susceptibles de contribuer à la réflexion sur le phénomène du pergélisol. Des publications gouvernementales concernant le processus d'ÉIE et l'état du réseau routier ont permis de fonder la démarche d'évaluation tout en déterminant le portrait de l'état de la situation routière. Le caractère scientifique et technique des documents

gouvernementaux a cependant été traité avec prudence. Les contenus ont été revalidés à l'aide des publications scientifiques. D'autres publications portant sur l'évolution du climat publiées par Ouranos et le Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sont également scrutées. Les ÉIE et les directives associées des projets routiers qui ont été réalisés dans le nord du Québec et du Canada sont aussi utilisées. Bien que ces études offrent un point de vue intéressant sur le traitement des changements climatiques, elles ont été traitées avec précaution avant d'en généraliser le contenu puisqu'elles sont pertinentes à un projet particulier.

Le fruit de la réflexion engendrée par ces lectures nombreuses, pertinentes et variées, se reflète et s'articule autour de cinq chapitres. Au-delà de l'introduction, le premier chapitre traite de la mise en contexte, fait état des hypothèses de travail et rappelle le cadre légal et réglementaire s'appliquant aux interventions en milieu nordique québécois. Le deuxième chapitre fait état des recherches les plus récentes explorant les relations entre le pergélisol et les conditions climatiques. Les tendances régionales et mondiales au niveau de la stabilité du pergélisol sont également décrites. Le troisième chapitre permet d'identifier les différentes composantes et éléments de l'environnement qui contribuent à la fonte du pergélisol. Ce sont là les principaux éléments de l'environnement qui devront être pris en compte dans le choix du tracé de la route. Le quatrième chapitre constitue le cœur du travail présentant le développement de la matrice des impacts appréhendés d'une infrastructure routière construite sur le pergélisol. Enfin, le cinquième chapitre passe en revue les mesures d'atténuation qu'il est possible de mettre en place tout en relevant les difficultés émanant des cadres financiers serrés qui doivent être respectés.

1 MISE EN CONTEXTE

Avant de s'intéresser aux impacts du pergélisol sur les infrastructures routières dans le nord du Québec, une mise en contexte est nécessaire. Dans un premier temps, le portrait du Nord québécois est dressé, avec son potentiel de développement minier et énergétique. Pour satisfaire ce développement, la mise en place de nouvelles infrastructures de transport s'impose comme une hypothèse de travail. Dans un deuxième temps, la réalisation de grands projets est assujettie à un processus d'évaluation environnementale. Le cadre légal et réglementaire s'appliquant aux interventions en milieu nordique est brièvement présenté.

1.1 Développement du Nord québécois

C'est au printemps 2011 que l'ex-premier ministre du Québec, Jean Charest, présentait avec enthousiasme le Plan Nord, « le chantier d'une génération » (MRNF, 2011). Des investissements majeurs escomptés, se chiffrant en centaines de millions de dollars, autant de la part du gouvernement québécois que de la part des promoteurs de l'industrie minière, allaient rapidement être annoncés (Shields, 2012). Sur une période de 25 ans, ce sont des investissements publics de plus de 80 milliards de dollars qui étaient envisagés par le gouvernement libéral de l'époque, pour soutenir le « déploiement de l'industrie minière et des infrastructures » (MRNF, 2011; Shields, 2012). Une nouvelle ère dans le développement nordique québécois, après celle des grands développements hydroélectriques des années 60 et 70, semble alors se dessiner. En septembre 2012, le gouvernement péquiste de Pauline Marois est porté au pouvoir. Un an plus tard, le Plan Nord s'est transformé en Le Nord pour tous, mais les détails se font encore attendre. Dans tous les cas, le développement des ressources en territoire nordique reste une préoccupation dans une perspective gouvernementale de création d'emplois et de retombées économiques.

Avant de s'interroger sur le phénomène du pergélisol, les différentes limites administratives se rapportant au nord doivent être précisées. Le territoire d'application du Plan Nord ou Le Nord pour tous est la partie du territoire québécois qui se trouve au nord du 49^e parallèle, une superficie de plus d'un million de kilomètres carrés illustrée à la figure 1.1 (MRNF, 2011). Trois régions administratives, la Côte-Nord, le Saguenay-Lac-Saint-Jean et le Nord-du-Québec se partagent le nord. C'est la région Nord-du-Québec qui couvre la plus grande superficie nordique. Elle comprend le territoire de la Baie-James entre le 49^e et le 55^e parallèle, et le territoire du Nunavik du 55^e parallèle à la limite extrême nord (ministère des Régions, 2001).

La figure 1.2 représente l'étendue et la distribution du pergélisol sporadique (C), discontinu (B) et continu (A) dans le Nord québécois. La superposition des deux cartes démontre que les projets envisagés dans le territoire nordique devront tenir compte de la présence plus ou moins importante du pergélisol.



Figure 1.1 : Territoire d'application du projet Le Nord pour tous (tirée de : MRNF, 2011, p. 9)

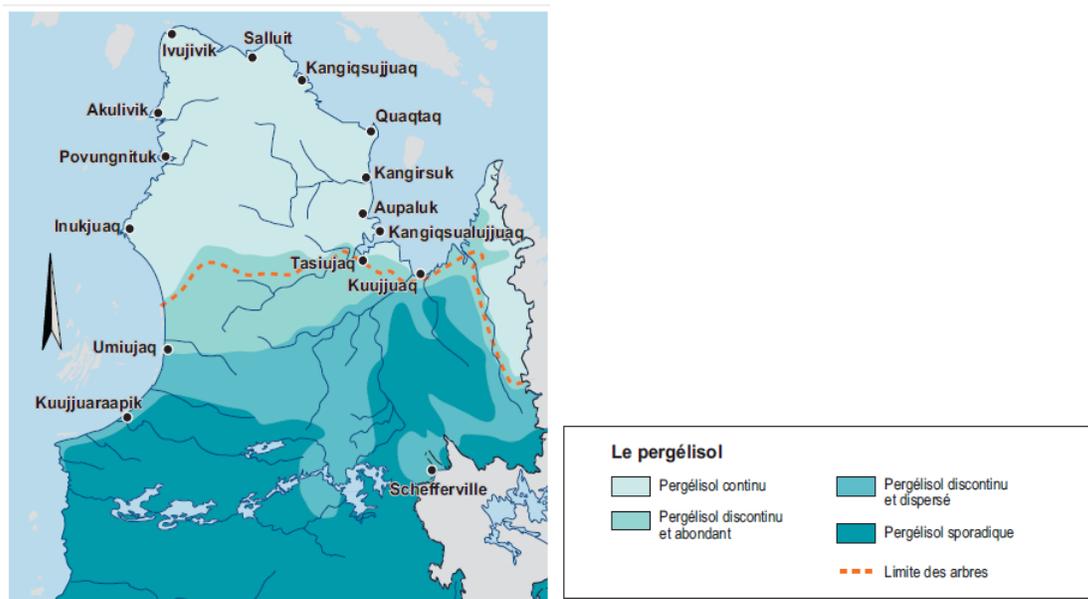


Figure 1.2 : Distribution du pergélisol continu, discontinu et sporadique (tirée de : Desjarlais et autres, 2004, p.18)

Le Nord québécois est vaste et n'est peuplé que d'un peu plus de 120 000 personnes pour une densité d'environ 0.1 personne par kilomètre carré (MRNF, 2011). Une soixantaine de villages ou communautés autochtones, situés pour la majorité près de la limite sud ou en bordure des côtes

plus au nord forment la structure d'occupation du territoire (Forum des ministres responsables du développement du Nord, 2010; MRNF, 2011). Le climat est froid et pose des problèmes pour relier les communautés éloignées. La carte présentée à la figure 1.3 illustre le transport routier, ferroviaire, maritime et aérien au terme du développement de l'exploitation des ressources nordiques.

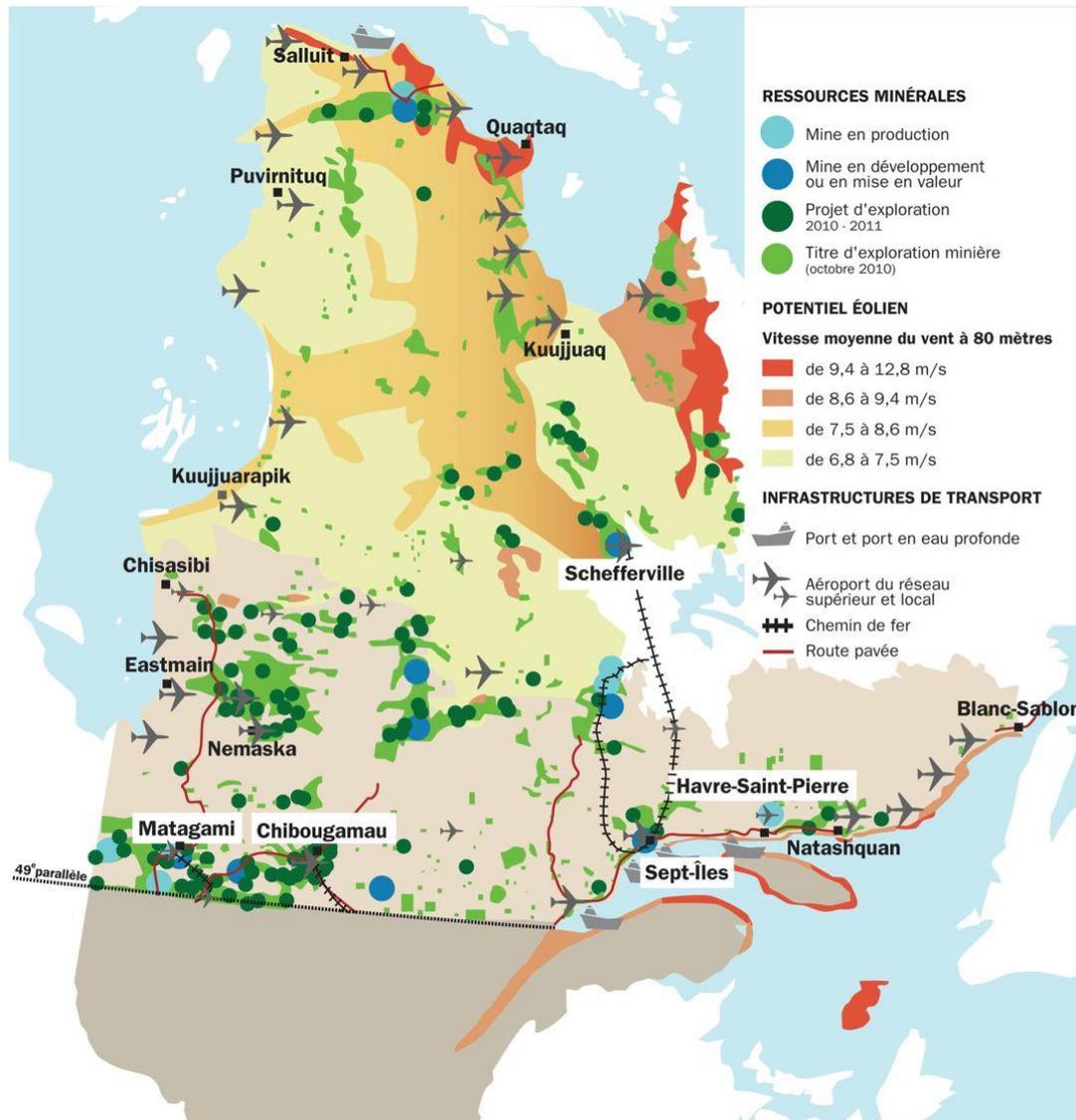


Figure 1.3 : Transport routier, ferroviaire, maritime et aérien en territoire nordique québécois (tirée de : Anonyme, 2013)

Quelques routes pavées sont localisées entre le 49° et le 55° parallèle. Les seuls chemins de fer sont aussi localisés dans cette zone. À l'ouest, le réseau d'environ 3 000 kilomètres de routes pavées ou gravelées s'est développé pour soutenir la construction des complexes hydroélectriques (ministère des Régions, 2001; MRNF, 2011). À l'est, l'accès au territoire est structuré autour de la route 138 longeant le St-Laurent jusqu'à Natashquan, et de la route 389 qui

mène à Fermont (MRNF, 2011). Dans le Moyen Nord, les villages comme Blanc-Sablon ou Kuujuarapik ne sont accessibles que par voie aérienne ou maritime. À ces infrastructures publiques, s'est constitué au cours des années, un réseau de 51 000 km de chemins forestiers qui répondent exclusivement aux besoins de l'industrie forestière (MRNF, 2011).

Au nord du 55^e parallèle, les liens terrestres permanents entre les communautés sont quasi inexistantes de même qu'entre le sud et les villages au nord. La seule exception est la route qui relie la mine Raglan au port de Baie Déception, une route en pierres concassées d'une centaine de kilomètres qui sert à transporter le nickel extrait de la mine (ministère des Transports du Québec (MTQ), 2005). Le manque d'infrastructure est d'ailleurs un frein au développement économique de la région et contribue à son isolement (ministère des Régions, 2001). De manière générale, les déplacements entre les communautés isolées et le sud de la province se font par voie aérienne et, durant l'été, par bateau. Quelques sentiers de motoneige existent, mais doivent être retracés régulièrement en raison du mouvement des glaces, une dynamique assujettie changements climatique (Tremblay et Frugal, 2008). Les chemins de glace sont de moins en moins utilisés alors que les saisons froides deviennent de plus en plus courtes. Le réchauffement climatique ajoute à l'isolement des communautés. Est-ce que le développement économique du Nord est une justification pour assurer la construction de nouvelles infrastructures routières dans ce territoire isolé?

Le développement économique se fera à travers l'exploitation des ressources naturelles du territoire, dont les mines et l'énergie éolienne (MRNF, 2011). Déjà on y compte huit mines actives : trois sur le territoire de la Baie-James, quatre sur le territoire de la Côte-Nord et une au Nunavik (Anonyme, 2013). La localisation de ces infrastructures est présentée à la figure 1.3. Ce nombre augmentera alors que chaque année, des centaines de millions de dollars sont investis pour des travaux d'exploration minière (MRNF, 2009). En 2011, le Gouvernement du Québec évaluait à onze le nombre de « nouveaux projets qui pourraient être lancés au cours des prochaines années sur le territoire du Plan Nord » (MRNF, 2011). Ces projets de mines en développement et mise en valeur sont quelques fois localisés en territoire actuellement isolé. Des infrastructures devront être développées pour répondre aux besoins de l'industrie (MRNF, 2009). À titre d'exemple, le Gouvernement du Québec a autorisé le prolongement de la route 167 sur une distance de 240 kilomètres afin d'exporter le minerai qui pourrait être dégagé d'exploitation comme le projet diamantifère Renard dans la région des monts Otish (MTQ, 2010).

Cependant, la réalisation d'infrastructures sur le territoire du Nord comprend de nombreuses difficultés liées à l'isolement et aux conditions climatiques, ce qui peut facilement faire grimper la facture en comparaison avec les coûts des projets réalisés dans le sud (Forum des ministres responsables du développement du nord, 2010; MRNF, 2011). C'est ainsi que la construction d'infrastructures représente des investissements importants qui, selon la ministre des

Ressources Naturelles Martine Ouellet, requerront « une plus grande participation de l'entreprise, ou le partage des bénéfices de l'entreprise » (Shields, 2012). Tant sur cette question que celle des redevances minières, l'Association de l'exploration minière du Québec a fait connaître ses préoccupations (Shields, 2012). Par ailleurs, la demande internationale en métaux est en pleine croissance et le sous-sol québécois possède un important potentiel pour y répondre (MRNF, 2011). De plus, l'ouverture du passage maritime du Nord-Ouest à l'année ouvre des nouvelles opportunités d'exportation (MRNF, 2011). Bien que certaines modalités financières restent à être fixées, il n'est pas prématuré, devant ces perspectives, d'affirmer que le nord du Québec se développera à coup sûr au courant des prochaines années.

Les défis sont toutefois nombreux et la fonte du pergélisol est l'un d'entre eux, notamment lors de la construction de routes. La procédure d'ÉIE qui encadre les projets routiers peut-elle s'avérer un outil essentiel pour faire face aux défis ?

1.2 Procédure d'évaluation environnementale dans le Nord québécois

Au Québec, l'outil privilégié pour l'analyse d'un projet en lien avec les grands principes du développement durable est l'ÉIE. La procédure d'évaluation environnementale est d'ailleurs enchâssée dans la LQE. Bien que le développement d'une ÉIE réponde aux mêmes étapes, la localisation du projet entraîne différentes dispositions. Comme le démontre la figure 1.4, les projets peuvent être soumis à quatre procédures différentes selon la localisation. Au nord, on retrouve le territoire soumis à la CBJNQ (nord du 55^e parallèle), le territoire soumis à la Convention du Nord-Est québécois (CNEQ) (sud du 55^e parallèle) et la Région de Moinier. Au sud, le territoire est régi par le chapitre I de la LQE. Un projet routier situé dans l'un des trois territoires du nord est assujéti aux dispositions du chapitre II de la LQE. Ce chapitre est spécifiquement établi de façon à respecter la CBJNQ et la CNEQ. Cette distinction assure une participation active des populations autochtones à toutes les étapes du processus. (MDDEFP, 2002)

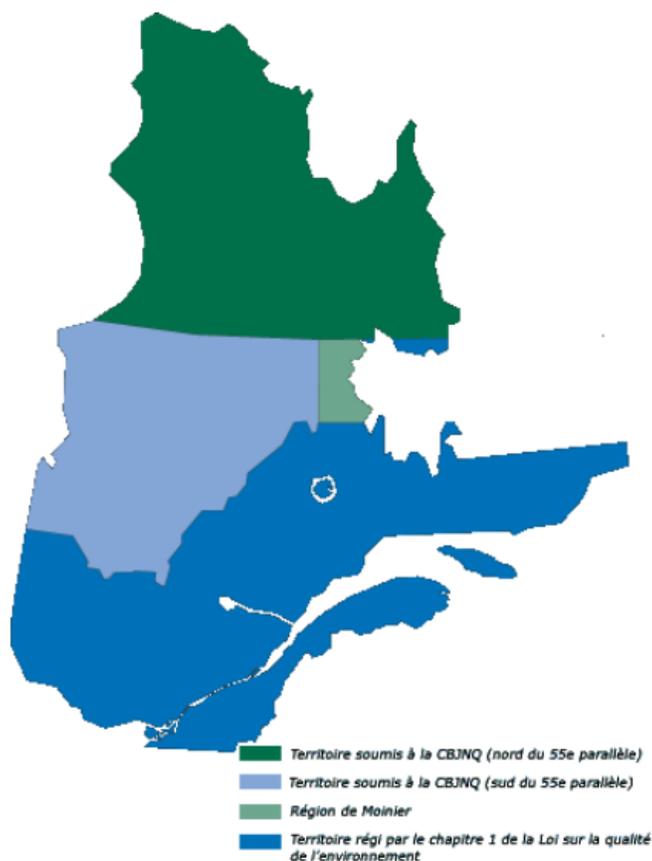


Figure 1.4 : Carte d'application du régime de protection de l'environnement (tirée de : MDDEFP, 2002)

La participation de la population autochtone est assurée par la présence de comités composés de membres actifs des communautés. Deux comités et une commission effectuent l'évaluation et l'examen des impacts environnementaux des projets, selon la localisation du projet. Au sud du 55° parallèle, l'évaluation préliminaire et l'élaboration des directives sont assurées par le Comité d'évaluation (COMEV) alors que l'examen est réalisé par le Comité d'examen (COMEX). Au nord du 55° parallèle, la Commission de la qualité de l'environnement Kativik (CQEK) assume l'ensemble de ces responsabilités. Des variantes sont possibles selon que le projet soit sous juridiction provinciale ou fédérale, mais le processus général demeure le même. (MDDEFP, 2002)

Brièvement, le processus d'évaluation environnementale comporte cinq grandes étapes. Premièrement, le promoteur du projet doit déposer la « déclaration de l'initiateur du projet » qui comprend des renseignements préliminaires tels que la nature, la portée, la localisation et les différentes variantes du projet. Deuxièmement, cette déclaration est évaluée par le COMEV ou la CQEK et une directive spécifique au projet est préparée et transmise au promoteur. Cette directive prévoit notamment les différents éléments qui doivent être inclus dans l'ÉIE, comme les composantes du milieu naturel à étudier et les activités génératrices d'impact à prendre en

compte. Troisièmement, le promoteur du projet procède à l'ÉIE qui doit être conforme au *Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement et le milieu social dans le Territoire de la Baie-James et du Nord québécois* ou au *Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement dans une partie du Nord-Est québécois*, selon la localisation du projet. Quatrièmement, l'ÉIE est acheminée vers le COMEX ou la CQEK qui doit en faire l'évaluation. Afin de recueillir les impressions et inquiétudes des parties prenantes et du public, c'est à cette étape que des consultations et des représentations ont lieu. Le COMEX et le CQEK émettent alors leurs recommandations sur la décision finale et, s'il y a lieu, les mesures supplémentaires qui devraient être incluses au projet. Cinquièmement, en se fondant sur les avis émis, l'administrateur dépose la décision finale et les conditions du projet. Selon la nature du projet, cet administrateur est le ministre du Développement durable, de l'Environnement et de la Faune des Parcs, le président de l'Agence canadienne d'évaluation environnementale (ACEE) ou le président de l'Administration locale crie. Lorsque le promoteur obtient une réponse favorable de l'administrateur, il peut procéder à la mise en œuvre du projet en respectant les diverses exigences qui ont été formulées. (MDDEFP, 2002)

Dans ce processus, l'étape centrale est la réalisation de l'ÉIE. Il s'agit d'une vaste réflexion qui cherche à analyser plusieurs variantes d'un projet afin de choisir celle dont les impacts seront jugés moindres par rapport aux différentes sphères du développement durable. L'ÉIE, réalisée par une équipe multidisciplinaire, a aussi de particulier la mise en place de mesures spécifiques visant à rendre acceptables les impacts jugés inacceptables. De ce fait, le processus tend à bonifier un projet pour le rendre à la fois respectueux des sociétés et de l'environnement, mais aussi économiquement rentable.

Sans entrer dans la complexité qu'est la réalisation d'une ÉIE, sept grandes étapes doivent être contenues dans le rapport final. Premièrement, le promoteur doit justifier la pertinence du projet en présentant la solution retenue qui répond le mieux au besoin de départ. (Pelletier, 2012)

Deuxièmement, il s'interroge à propos de solutions de rechange, d'alternatives ou de variantes qui pourraient permettre d'atteindre le même objectif, mais dont les conséquences seraient moindres. (Pelletier, 2012)

Troisièmement, la zone à l'étude est définie. Dans le cadre d'un projet linéaire, comme les chemins de fer, les pipelines ou les routes, le choix d'un corridor à privilégier est d'abord effectué. Dans ce corridor, plusieurs tracés sont étudiés selon les enjeux écologiques, sociaux et économiques. (Pelletier, 2012)

Quatrièmement, le milieu récepteur est décrit. L'analyse exhaustive de l'ensemble des composantes du milieu étant périlleuse à entreprendre, seules les composantes critiques sont retenues. Si le pergélisol est défini comme étant un enjeu dans le projet, son état et sa distribution doivent être étudiés à cette étape. Les données recueillies sont ensuite analysées

géographiquement pour faire ressortir les sensibilités sociales, biologiques et physiques. C'est avec cette carte des résistances que le corridor de moindre impact est retenu. (Pelletier, 2012)

Cinquièmement, les impacts de la variante retenue sont analysés. Pour chacune des activités du projet et pour les étapes de conception, de construction, d'exploitation et de fermeture, les impacts sont soulevés. La relation entre l'activité qui génère l'impact et chacune des composantes de l'environnement affectées doit être décrite, et l'impact doit être caractérisé et évalué. Une matrice des impacts appréhendés est ensuite construite. Elle intègre toutes les activités génératrices d'impact et toutes les composantes de l'environnement (naturel, humain, économique et paysager). Dans cette matrice, tous les impacts sont identifiés sans tenir compte de leur importance. Une matrice des impacts potentiels est ensuite issue de la première pour limiter la caractérisation des impacts aux éléments qui revêtent une valeur particulière au projet. Les impacts sont ensuite caractérisés et évalués selon le jugement de l'équipe qui réalise l'ÉIE. (Pelletier, 2012)

Sixièmement, le projet est bonifié à travers la recherche de mesures d'atténuation capables de limiter les impacts négatifs. C'est à cette étape que des mesures de protection de l'environnement et de compensation peuvent être engagées. (Pelletier, 2012)

Septièmement, le Plan de gestion environnementale et sociale est annexé à L'ÉIE et s'adresse aux décideurs et gestionnaires de projet. Il contient des renseignements essentiels sur les différentes étapes du projet et les dispositions de mises en œuvre. (Pelletier, 2012)

Bref, la réflexion derrière l'ÉIE assure que l'ensemble des activités soit pris en compte afin de limiter les conséquences négatives d'un projet sur l'environnement, la société et l'économie. Avec ce processus préventif, les gouvernements s'assurent de minimiser les mauvaises surprises qui pourraient survenir à la construction, durant l'exploitation ou à la fermeture d'un projet.

1.3 Résumé

Le Nord québécois, cet immense territoire en majorité vierge de tout développement, est convoité pour les ressources naturelles qu'il renferme. Avec l'ouverture du passage du nord-ouest et l'augmentation de la demande en minerai, l'arrivée de promoteurs désirant l'exploiter se fait sentir. Afin de rendre l'exploitation possible, des nouveaux axes de transport doivent toutefois être pensés. Pour le transport de matière première en grande quantité, la voie terrestre est souvent préférable. Des projets de routes sont à prévoir.

Mais le nord est aussi un territoire fragile qu'on dit souvent très susceptible aux changements climatiques. Le pergélisol pose des défis particuliers à cause de sa tendance à se déformer lorsqu'il fond. Comment intégrer cette réalité dans la réflexion sur le transport?

Les grands projets étant assujettis à la législation provinciale ou fédérale, c'est le processus d'évaluation environnementale qui s'impose. Cette procédure, dont des exigences particulières

au milieu nordique assurent une participation des communautés autochtones, permet d'évaluer les impacts de toutes les étapes d'un projet, de sa conception à sa fermeture. Ultimement, les impacts négatifs sont atténués pour que le projet s'inscrive dans les principes du développement durable.

À travers l'ÉIE, une étape importante consiste à décrire le milieu récepteur du projet. Dans le nord, une caractéristique qui résulte du climat lance des défis aux ingénieurs : le pergélisol. De quoi s'agit-il? Où existe-t-il? Comment se comporte-t-il avec les changements climatiques? Le chapitre deux répond à ces interrogations.

2 DYNAMIQUE DU PERGÉLISOL

Les impacts de la fonte du pergélisol sur les infrastructures routières sont nombreux. Une maîtrise minimale du phénomène physique permet d'expliquer la dynamique interne au phénomène. Cette connaissance favorisera la formulation des contenus habituels nécessaires à la construction de la matrice des impacts appréhendés alors que le processus d'évaluation des impacts est initié.

Une première section présente une synthèse scientifique sur le pergélisol, incluant son étendue spatiale, les notions d'équilibre thermique et les perturbations qui peuvent influencer cet équilibre. La deuxième section rappelle les impacts des changements climatiques tant à l'échelle globale que régionale et dans quelle mesure l'état du pergélisol peut être affecté.

2.1 Fondements scientifiques

Le pergélisol est défini comme tout sol ou roc qui demeure gelé, soit à une température inférieure ou égale à 0 °C, pour une période égale ou supérieure à deux années consécutives (Allard and Lemay, 2012). Cette caractéristique du sol en régions nordiques est le résultat d'un échange d'énergie qui s'opère entre l'atmosphère, les éléments de surface (végétation, neige) et le sol en place. La première section du chapitre rappelle les bases scientifiques permettant au lecteur de saisir adéquatement les dynamiques naturelles du pergélisol.

2.1.1 Distribution du pergélisol dans l'hémisphère nord

Puisqu'il est une conséquence directe d'un climat froid, le pergélisol existe, on le devine, dans les régions nordiques. À l'échelle mondiale, le territoire couvert par du pergélisol occupe une proportion importante soit environ le quart de la surface des continents (Nelson et autres, 2002). La figure 2.1 représente les territoires où le pergélisol est présent dans l'hémisphère nord. Sur la carte, le violet foncé indique que le pergélisol est présent partout alors que les teintes plus pâles indiquent qu'il est présent qu'à certains endroits du territoire. Au Canada, c'est 70 % du territoire qui est occupé par du pergélisol, en proportions plus ou moins grandes (Zhang et autres, 2008). À partir d'une latitude d'environ 58°N il est présent quasi continuellement (Buteau et autres, 2010; Allard and Lemay, 2012).

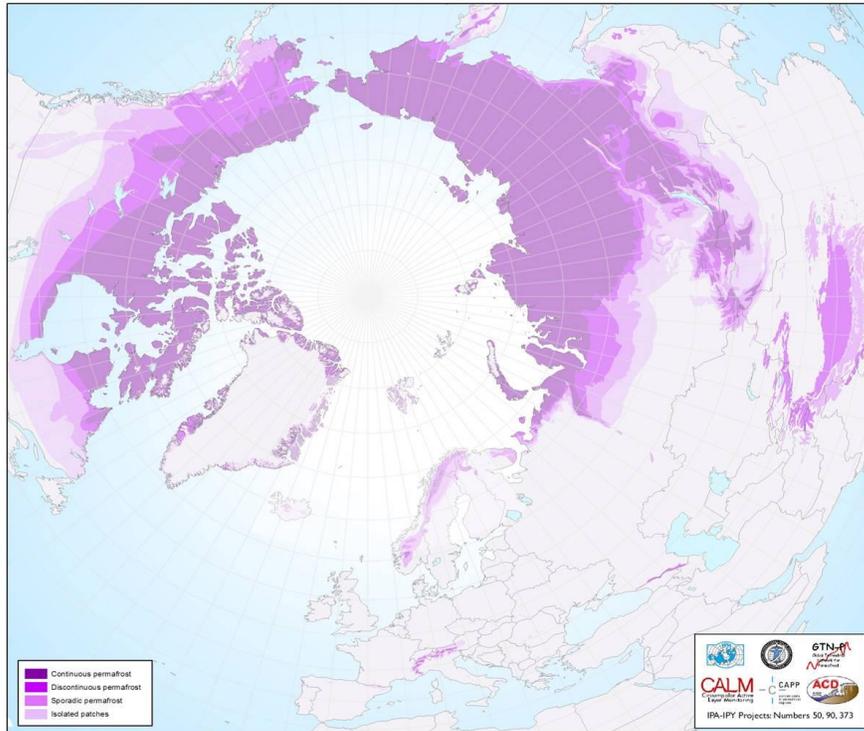


Figure 2.1 : Distribution mondiale du pergélisol (tirée de : International Permafrost Association (2011))

Les parties nordiques des continents, le nord du Canada, l'Alaska, le nord de la Russie, le nord de l'Europe et les côtes du Groenland offrent un climat propice à l'existence du pergélisol. De plus, des îlots de pergélisol de montagne sont présents en hautes altitudes, notamment dans les Rocheuses, les Alpes et, de façon très limitée, dans les Appalaches au Québec. Une importante zone de pergélisol occupe le plateau Qinghai-Xizang sur le territoire chinois (Zhao et autres, 2004). En observant la figure 2.1, on note que sa présence répond à un gradient latitudinal et altitudinal, ce qui s'explique par le fait que la température de l'air est le facteur déterminant dans l'existence du pergélisol (Throop et autres, 2012). D'ailleurs, on remarque que de grands systèmes climatiques, en régissant les températures moyennes, peuvent avoir une influence sur sa présence. À titre d'exemple, le *gulf stream* limite la présence de pergélisol en Europe alors qu'à la même latitude en Amérique du Nord et en Russie le pergélisol domine le paysage.

Malgré cette couverture importante à l'échelle globale, il y a peu d'agglomérations majeures qui occupent un territoire dominé par le pergélisol. Romanovsky et autres (2010) suggèrent tout de même qu'environ 4 millions de personnes y habitent. Dans le nord de la Russie, certaines villes, telles Yakutsk, Noril'sk et Vorkuta, comptent plus de 100 000 habitants et sont essentiellement construites sur le pergélisol (Nelson et autres, 2002). En Amérique du Nord, Fairbanks, Barrow, Whitehorse et Yellowknife, quoique moins peuplées, sont elles aussi construites sur le pergélisol (Nelson et autres, 2002).

En poursuivant un axe nord-sud, le pergélisol varie par son étendue relative et par son épaisseur. De manière générale, les scientifiques s'entendent pour diviser les zones de pergélisol selon quatre appellations basées sur la couverture relative du pergélisol : le pergélisol sporadique (moins de 2 % de la superficie), le pergélisol discontinu et dispersé (entre 2 et 50 % de la superficie), le pergélisol discontinu et répandu (plus de 50 %), et le pergélisol continu (présent partout sauf sous les grands lacs et rivières) (Allard and Lemay, 2012). La figure 2.2 présente ces quatre zones telles qu'elles sont établies pour le Québec dans la région du Nunavik.

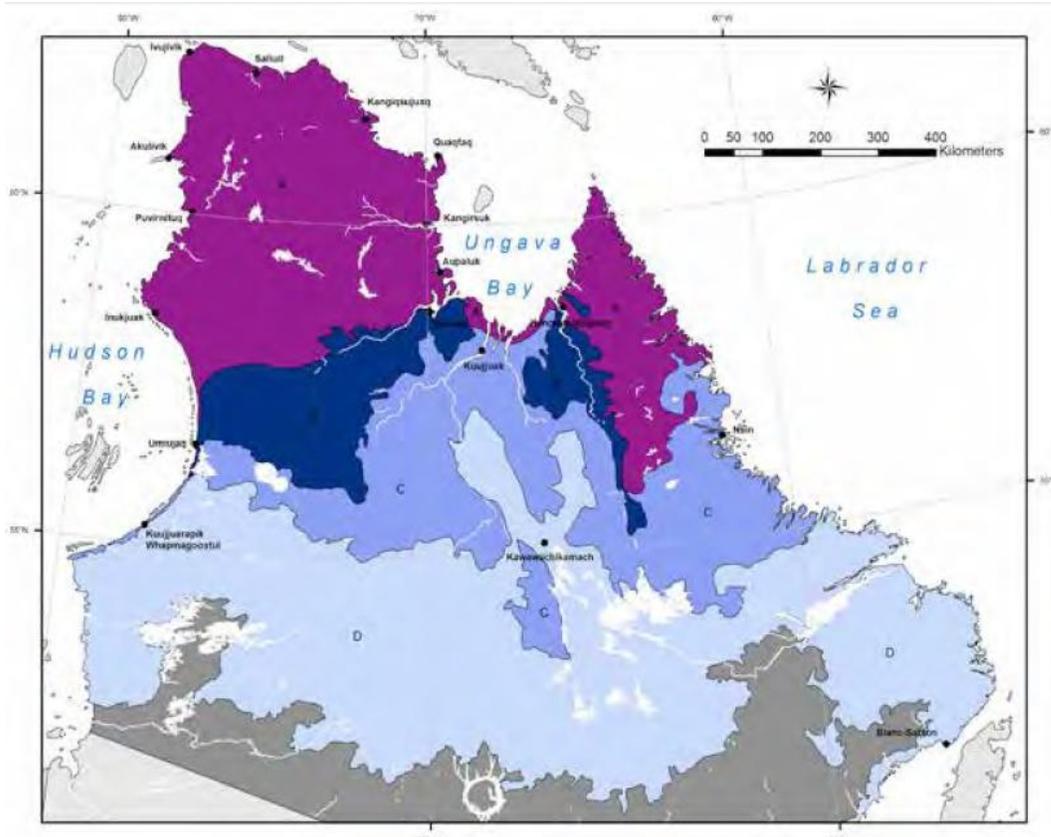


Figure 2.2 : Les zones de pergélisol au Québec : (A) pergélisol continu, (B) pergélisol discontinu et répandu, (C) pergélisol discontinu et dispersé, et (D) pergélisol sporadique (tirée de : Allard and Lemay, 2012, p.173)

À sa limite sud, le pergélisol sporadique se trouve principalement dans les tourbières puisqu'elles possèdent d'importantes propriétés isolantes. L'isolation qu'elles fournissent permet au pergélisol de subsister même si le climat actuel ne permettait pas son développement. Sa présence résiduelle est d'ailleurs liée à la dernière période glaciaire (Allard et Séguin, 1987; Allard and Lemay, 2012). Il est également possible de trouver, de façon très limitée, certains ilots de pergélisol résiduels sous la forêt boréale (Smith et autres, 2010). À long terme, si le climat ne se refroidit pas, le pergélisol disparaîtra de ces endroits. Le pergélisol sporadique possède généralement une température près du point de congélation ce qui facilite sa disparition rapide

lorsque la température de l'air se réchauffe plusieurs années consécutives (Allard and Lemay, 2012).

Dans la zone « discontinu et dispersé », le pergélisol peut être présent, par exemple, sous les collines dénudées, là où ni végétation ni neige n'isolent le sol des froides températures de l'air ambiant (Allard et Séguin, 1987). On le retrouve également sous les tourbières et dans l'argile riche en glace, où sa température varie généralement entre -1°C et 0°C (Allard and Lemay, 2012).

Plus au nord, dans la zone « discontinu et répandu », le pergélisol se retrouve dans tous les types de sols. De manière générale, il est cependant absent des surfaces couvertes par des peuplements arbustifs ou forestiers denses, là où l'isolation agit pour limiter les températures froides de l'hiver de pénétrer en profondeur (Allard and Lemay, 2012). Sa température est généralement comprise entre -3°C et 0°C (Allard and Lemay, 2012).

Dans la zone continue, le pergélisol est présent partout, à des températures variant entre -6°C et -3°C , sauf sous les grandes étendues d'eau (Allard and Lemay, 2012). À ces latitudes, le biome observé est généralement la toundra arctique, caractérisée par la présence limitée de végétation (lichen) et des hivers très froids (Smith et autres, 2010). Dans cette zone, le pergélisol peut présenter des épaisseurs supérieures à 150 mètres, alors qu'il est beaucoup plus mince dans les autres zones (Allard and Lemay, 2012). À la mine Raglan, à proximité de la Baie d'Ungava, le pergélisol atteint des profondeurs de 590 mètres, essentiellement à travers la roche mère (Allard and Lemay, 2012).

Les limites entre les différentes zones sont, selon la définition, déterminées à partir de l'étendue relative du pergélisol. Il est néanmoins possible d'établir quelques généralités. Ainsi, pour l'Amérique du nord, la limite entre le pergélisol sporadique et le pergélisol discontinu se trouve à une latitude de 56°N et où la température moyenne de l'air est de -5°C (Allard and Lemay, 2012; Buteau et autres, 2010). Parallèlement, la limite entre le pergélisol discontinu et le pergélisol continu se trouve approximativement à une latitude de 58°N et où la température moyenne de l'air est de -7°C (Allard and Lemay, 2012; Buteau et autres, 2010). La température de l'air et la latitude sont deux facteurs qui permettent d'inférer sur l'état du pergélisol. Ils ne sont cependant pas les seuls, et la section suivante présente ces autres facteurs.

2.1.2 Équilibre thermique du pergélisol

Bien que la température moyenne de l'air ait une influence sur le pergélisol, d'autres facteurs, tout aussi importants, viennent en préciser l'état. À ce compte, la présence de neige et de végétation à la surface, le type de sol en place et la proportion d'eau souterraine dans le sol ont tous leur rôle à jouer dans l'échange d'énergie qui s'opère pour maintenir le sol gelé en permanence (Lemke et autres, 2007).

Le pergélisol est en fait la conséquence directe d'un transfert d'énergie entre l'atmosphère et le sol. Afin de bien comprendre cette relation, il est d'abord possible d'imaginer une situation où ni végétation ni neige ne sont présentes à la surface, et où les dépôts de surfaces sont peu épais. Dans cette situation, la température annuelle moyenne de l'air devient le principal déterminant de la température du pergélisol (Throop et autres, 2012). L'énergie, que l'on peut concevoir comme une vague de froid, est, par conduction, transférée de l'air vers le sol (Allard et autres, 1995). Ce transfert d'énergie par conduction, et non pas par convection dû à l'état solide de l'eau est une caractéristique unique du pergélisol (Allard et autres, 1995). Ainsi, la relation est simple : plus la température de l'air est basse, plus le sol sera gelé en profondeur.

Comme le démontre la figure 2.3, la température dans le sol varie au cours de l'année. En effet, la température varie jusqu'à une profondeur nommée « amplitude annuelle nulle ». Sous cette profondeur, la température du pergélisol représente l'équilibre entre deux éléments, soit (1) la température annuelle moyenne à la surface du sol (indiquée par *mean annual ground surface temperature* (MAGST) sur la figure), et (2) le flux d'énergie positive provenant du centre de la Terre (Zhang et autres, 2008). Ce deuxième élément est d'ailleurs la raison pour laquelle, en observant la figure ci-dessous, on note que la température augmente avec la profondeur sous le point d'amplitude annuelle nulle. Pour un climat stable, le gradient de température sous le point d'amplitude annuelle nulle demeure constant.

Au-dessus du point d'amplitude annuelle nulle, la température du sol varie au cours de l'année. La portion de cette couche supérieure du sol qui passe à une température supérieure à 0°C durant l'été est appelée la couche active. Dans cette zone, l'eau passe d'un état solide à un état liquide durant la saison chaude. L'épaisseur de cette couche peut varier d'année en année, mais est généralement stable lorsque le climat est stable. Le pergélisol, selon la définition, est par conséquent compris entre la base de la couche active et le terrain non gelé sous-jacent (Zhang et autres, 2008). Selon la température annuelle moyenne à la surface, le pergélisol sera plus ou moins profond.

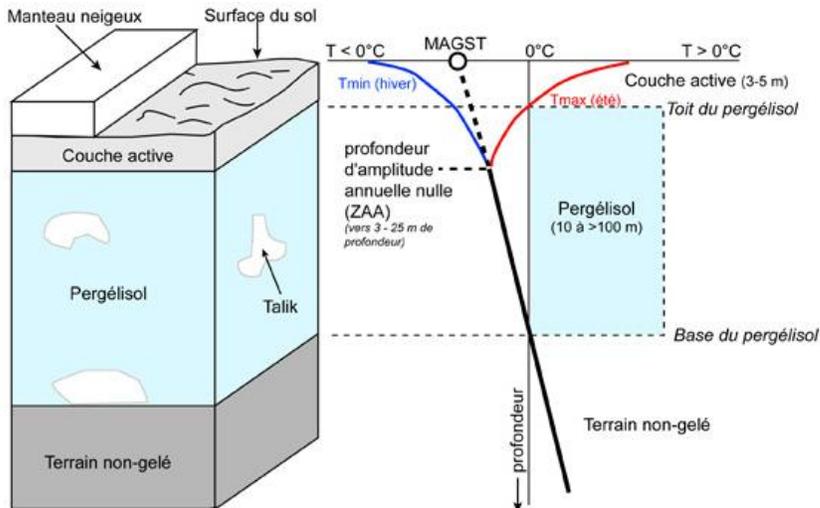


Figure 2.3 : Variations annuelles des profils de température selon la profondeur (tirée de : Société suisse de géomorphologie, 2009)

La température annuelle moyenne de l'air, bien qu'étant le principal facteur, n'est évidemment pas le seul à considérer dans l'équilibre thermique du sol (Throop et autres, 2012). En fait, la présence de neige, de végétation, d'un dépôt épais de matière organique, contenant de grandes proportions d'eau par exemple, peuvent amortir le transfert d'énergie de l'atmosphère vers le sol puisqu'ils en absorbent une portion importante (Throop et autres, 2012). Comme le démontre la figure 2.4, tous ces éléments doivent être pris en considération dans l'analyse de la température du pergélisol.

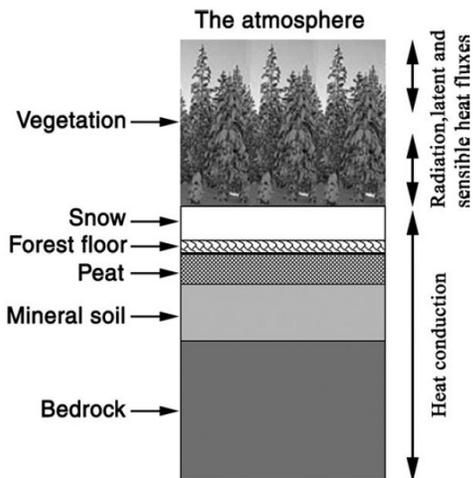


Figure 2.4 : Éléments influents sur le transfert d'énergie entre l'atmosphère et le sol (tirée de : Zhang et autres, 2008, p. 445)

En analysant la situation de l'atmosphère vers le sol, le premier facteur à considérer est la présence de végétation. Celle-ci, de manière générale, aide à conserver la température du sol basse durant l'été puisque ce dernier n'est pas soumis aux radiations solaires (Jean, 2012). En contrepartie, durant l'hiver, les zones boisées vont avoir tendance à présenter une couverture de

neige plus épaisse en empêchant le vent de la souffler (Jean, 2012). Cela contribuera à conserver les températures de sols plus élevées (Smith et autres, 2010; Jean, 2012).

Quant à elle, la neige agit simplement à titre de couche isolante. Lorsqu'elle s'accumule tôt durant la saison et persiste pour de nombreuses semaines au printemps, la couche de neige empêche le sol de se refroidir grandement en profondeur durant l'hiver (Throop et autres, 2012). Dans les régions de pergélisol sporadique et discontinu, la couverture de neige joue un rôle majeur. À travers des sites étudiés dans la région de Schefferville, une épaisseur de 75 à 80 centimètres s'est révélée largement suffisante pour empêcher la formation de pergélisol (Allard et Séguin, 1987). Dans cette même région, les crêtes et les buttes exposées sont soumises à de forts vents qui repoussent la neige ce qui permet la présence de pergélisol (Allard et Séguin, 1987).

Sous la couche de neige, le type de dépôt a également une importance puisque la conductivité thermique (capacité de transmettre l'énergie) peut varier. Les sols plus fins, contenant beaucoup d'argile par exemple, ont une porosité moins grande et donc une plus petite capacité thermique (Throop et autres, 2012). À titre d'exemple, au Nunavik, la profondeur de l'amplitude annuelle nulle peut être de 22 mètres dans la roche mère, un peu moins dans le sable, et seulement 5 à 6 mètres dans l'argile (Allard and Lemay, 2012). Ainsi, les sites qui possèdent une faible épaisseur de dépôts naturels au-dessus de la roche mère répondent plus directement aux changements de températures (Throop et autres, 2012). Néanmoins, la présence d'eau, sous forme liquide ou solide, est plus déterminante pour inférer sur la température du sol. En effet, la conductivité thermique est moindre si le sol contient beaucoup de glace. La température du sol demeure par conséquent plus élevée puisque de l'énergie est nécessaire pour le passage de l'état solide à l'état liquide de l'eau (Throop et autres, 2012).

Bref, la température du sol est influencée par plusieurs facteurs, soient la température moyenne de l'air, la présence de végétation et de neige, et le type de dépôt en place ainsi que sa teneur en eau. Si un ou plusieurs de ces facteurs sont modifiés année après année avec une même tendance, le régime thermique du sol est affecté.

2.1.3 Perturbation de l'équilibre thermique

Les changements climatiques, qui ont entre autres pour effet d'augmenter progressivement les températures de l'air, perturbent l'équilibre thermique établi dans le sol à travers les années. Au niveau du pergélisol, ces changements se traduisent par une augmentation de l'épaisseur de la couche active et par une augmentation de la température du sol. Conséquemment, l'épaisseur du pergélisol diminue. Cette section décrit plus spécifiquement ces processus.

L'augmentation de l'épaisseur de la couche active est la première conséquence à être observée lorsque les températures moyennes de l'air augmentent (Brown and Romanovsky, 2008). Les

températures plus chaudes de l'été permettent en effet de dégeler le sol sur une plus grande profondeur (Allard and Lemay, 2012). D'année en année, l'épaisseur de la couche active augmente. Ceci a d'ailleurs des conséquences directes sur les infrastructures qui appuient leurs fondations dans un sol qui était assumé comme gelé annuellement lors de leurs constructions (ATC, 2010).

Avec l'augmentation des températures de l'atmosphère, une plus grande quantité d'énergie est consacrée à geler une couche active plus épaisse, ce qui limite directement l'énergie consacrée à maintenir les températures basses dans le pergélisol (Romanovsky et autres, 2010). En effet, l'énergie apportée par les températures froides d'hiver doit d'abord apporter sous zéro une portion de plus en plus grande de sol (couche active) avant de refroidir le pergélisol (Romanovsky et autres, 2010). Par conséquent, le pergélisol, sous la profondeur d'amplitude annuelle nulle, tend tranquillement à se réchauffer (Romanovsky et autres, 2010). Ce réchauffement s'opère à la fois à la surface du pergélisol et à la base de ce dernier puisque trop peu d'énergie est disponible pour le refroidir (Lemke et autres, 2007). Ceci résulte en une diminution de l'épaisseur du pergélisol (Lemke et autres, 2007).

Au milieu des années 80, Lachenbruch et Marshall ont été les premiers à faire le lien entre anomalies observées dans les profils de température du pergélisol en Alaska et les changements climatiques (Lachenbruch and Marshall, 1986). La figure 2.5 présente leurs résultats. Chaque profil, identifié par trois lettres, correspond à un site différent situé en Alaska. Les zones grises illustrent le réchauffement qui s'est produit systématiquement à chacun des sites observés durant les décennies précédant la publication. Les lignes pointillées indiquent les profils de températures qui seraient observés si la température avait été constante et les lignes pleines les profils qui ont été mesurés à l'époque. En prenant des mesures en profondeur, il leur a été possible de calculer la température moyenne qui était observée dans les derniers siècles et, en la comparant aux moyennes plus récentes, de conclure en un réchauffement climatique puisque seule une augmentation des températures de l'air pouvait expliquer les anomalies notées (Lachenbruch and Marshall, 1986).

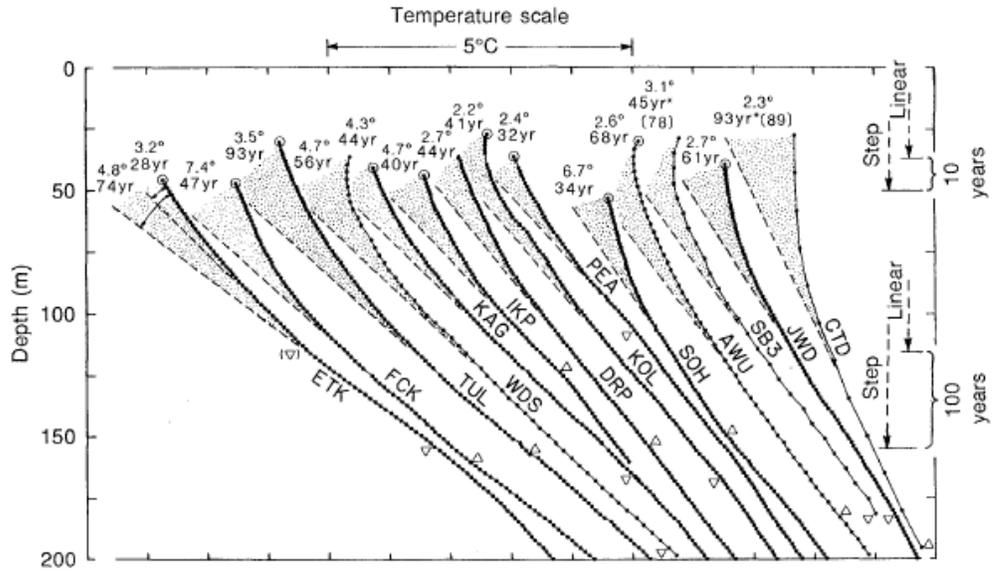


Figure 2.5 : Anomalies dans les profils de températures observés pour quatorze sites en Alaska (tirée de : Lachenbruch and Marshall, 1986, p. 692)

Sur une échelle temporelle variant d'une décennie à quelques siècles, le profil de température du pergélisol est donc modifié par rapport aux nouvelles conditions atmosphériques en surface (Smith et autres, 2005). Éventuellement, si les températures de l'atmosphère sont trop chaudes pour permettre sa subsistance, le pergélisol disparaît totalement. Cela peut s'opérer sur une période de quelques années pour un pergélisol de faible épaisseur, par exemple dans les zones où il est discontinu, mais s'échelonne sur plusieurs siècles dans le cas d'un pergélisol dont l'épaisseur est supérieure à une centaine de mètres (Brown and Romanovsky, 2008).

Lors du processus de disparition du pergélisol, un phénomène particulier prend place autour du processus de dégel lorsque le sol contient des quantités notables d'eau. En passant de l'état gelé à l'état liquide, l'eau emmagasine de l'énergie sous forme latente. Alors que dans un sol théoriquement sec l'énergie est transmise à 100 % par conduction, un sol qui présente une teneur en eau importante absorbe une portion de l'énergie dans le changement d'état solide-liquide (Smith et autres, 2010). Ainsi, lorsque le pergélisol approche de la température fatidique de 0 °C, il y a une période importante où les températures du sol semblent rester fixes et où la majorité de l'énergie est consacrée à dégeler la glace (Brown and Romanovsky, 2008; Smith et autres, 2010).

Le pergélisol étant une conséquence directe des températures atmosphériques, celui-ci est directement affecté lorsque ces dernières augmentent. D'abord, c'est la couche active qui s'étire plus en profondeur, suivie par un réchauffement du pergélisol qui est modulé en fonction de la teneur en eau du sol. En résulte une diminution progressive de l'épaisseur du pergélisol et, éventuellement, sa disparition.

À court et moyen terme, le pergélisol dans les zones où il est continu ne disparaîtra pas puisqu'il atteint des profondeurs importantes qui requièrent des siècles à se coordonner aux températures de l'atmosphère (Osterkamp and Lachenbruch, 1990). Par contre, l'augmentation de l'épaisseur de la couche active est une conséquence importante pour ces régions. D'autres parts, là où le pergélisol est mince, discontinu et près de 0°C, les conséquences du réchauffement climatique se traduiront rapidement en une diminution de son étendue (Osterkamp and Lachenbruch, 1990).

2.2 Impact des changements climatiques sur le pergélisol

Actuellement, les effets du réchauffement climatique sur les conditions du pergélisol sont déjà, à l'échelle mondiale, observés et bien documentés. Depuis Lachenbruch et Marshall en 1986, les scientifiques ont développé tout un réseau permettant de suivre l'évolution du pergélisol par rapport au climat. Dans cette deuxième section du chapitre, les tendances mondiales et locales sont décrites. Les différentes données étant acquises par le biais d'un réseau de puits d'observation, ce dernier est d'abord décrit brièvement.

2.2.1 Réseau de puits d'observation

Pour que la relation puisse être établie et caractérisée entre les changements climatiques et le réchauffement du pergélisol, un réseau de puits d'observation a été développé à travers les années. Historiquement, les puits d'observations étaient, la plupart du temps, le résultat de forages dédiés à l'exploration minière. Une fois les résultats initiaux recueillis, ces puits étaient convertis pour mesurer les températures du sol. De nos jours, des puits d'observation sont développés spécifiquement pour les besoins scientifiques via des subventions, mais surtout parallèlement au développement d'infrastructures.

Au Québec, le pergélisol est étudié depuis la fin des années 1950, alors que les besoins en exploration minière, principalement dans la région de Schefferville, étaient importants (Allard et Séguin, 1987). Quant au nord du Canada, les données sont beaucoup plus récentes et datent, au mieux, du début des années 1980 (Smith et autres, 2005). Dans les autres régions nordiques, les premières données datent de 1940 en Alaska et de 1950 en Russie (Lemke et autres, 2007). Partout, le réseau a été développé afin de répondre aux besoins des industries, qu'elles soient minières ou pétrolières, et, plus récemment, des communautés nordiques qui voient leurs infrastructures, par exemple les aéroports, menacées (Smith et autres, 2010). À titre d'exemple, le vaste réseau développé dans la vallée de la rivière Mackenzie l'a été en collaboration avec *Enbridge Pipelines* dans le cadre d'un programme visant à examiner l'impact du pipeline sur les terrains adjacents et sous-jacents (Smith et autres, 2005).

Puisque les puits d'observation sont souvent liés au développement économique, le réseau offre, naturellement, une couverture beaucoup plus complète dans les zones développées ou en cours de développement (Smith et autres, 2010). Parallèlement, l'isolement de plusieurs régions limite

l'établissement et l'entretien des puits d'observation (Romanovsky et autres, 2010). Toutefois, en 2007-2008, la communauté scientifique a attiré l'attention sur les questions nordiques dans le cadre l'année polaire internationale, ce qui a permis de doubler le nombre de puits d'observation dédiés à l'étude du pergélisol (Romanovsky et autres, 2010). La figure suivante témoigne d'ailleurs de ce développement récent concentré en Alaska et dans le nord-ouest du Canada (Smith et autres, 2010).

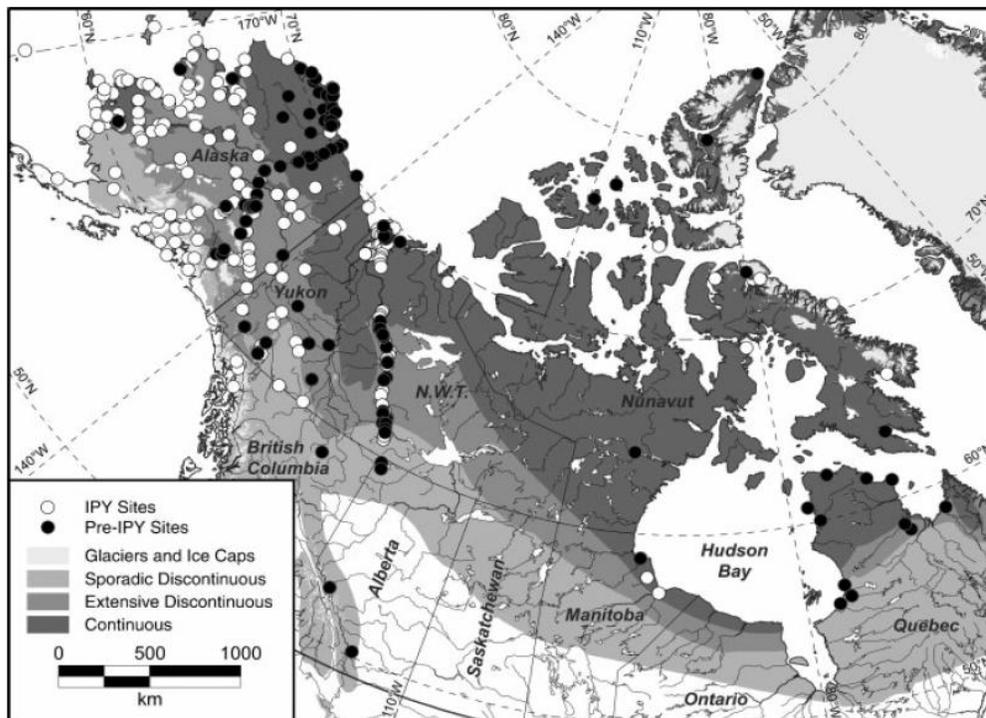


Figure 2.6 : Puits d'observation présents avant l'année polaire internationale (*Pre-IPY sites*) et aménagés durant l'année polaire internationale (*IPY-Sites*) (tirée de : Smith et autres, 2010, p. 118).

Les données acquises à travers ce réseau sont essentielles puisqu'elles permettent de suivre l'évolution du pergélisol et de valider les modèles informatiques de prévision (Smith et autres, 2005). Après avoir doublé durant l'année polaire internationale, le réseau canadien regroupe aujourd'hui 170 puits d'observation (Derksen et autres, 2012). La couverture est cependant inégale. De plus, ces puits d'observations n'ont pas tous la même fonction. Certains sont peu profonds et visent la collecte de données au niveau de la couche active du pergélisol alors que d'autres atteignent la base du pergélisol et permettent de suivre l'ensemble du profil de température (Brown and Romanovsky, 2008).

L'ensemble des données acquises à travers ce vaste réseau permet, entre autres, d'établir des tendances quant à la subsistance du pergélisol. Les tendances québécoises sont discutées dans les prochaines sections, mais un court survol des situations canadiennes et internationales est d'abord effectué.

2.2.2 Tendances mondiales et canadiennes

Les changements climatiques affectent l'ensemble de la planète et leurs répercussions sur le pergélisol sont notées à l'échelle mondiale. De manière générale, la majorité des puits d'observation présentent, au cours des 20 à 30 dernières années, une augmentation de 0.5 à 2°C à la profondeur d'amplitude annuelle nulle (Brown and Romanovsky, 2008; Romanovsky et autres, 2010). Cette augmentation est accompagnée, on le devine, d'une diminution dans l'étendue du pergélisol et d'une augmentation de l'épaisseur de la couche active.

Une étude synthèse regroupant les prévisions d'experts selon différents modèles d'augmentation des températures de l'atmosphère est présentée au tableau 2.1. Le tableau détaille les diminutions dans l'étendue du pergélisol et l'augmentation de l'épaisseur de la couche active (*active-layer thickness* (ALT)) qui sont prévues en 2100 (Shaefer et autres, 2011). Les prévisions couvrent un large spectre de résultats qui peut être expliqué par le choix de scénarios climatiques différents. Les études retenues, de même que celle de Shaefer et autres (2011), s'entendent cependant sur une diminution de l'étendue du pergélisol et sur une augmentation de la couche active, et ce, dans toutes les régions de l'hémisphère nord (Shaefer et autres, 2011).

Tableau 2.1 : Diminution dans l'étendue du pergélisol (%) et augmentation de la couche active (cm) en 2100 pour plusieurs sites dans l'hémisphère nord (tiré de : Shaefer et autres, 2011, p. 173)

Study	Scenario (s)	Domain	Decrease in permafrost area (%)	Increase in ALT (cm)
Marchenko et al. (2008)	A1B	Alaska	7.0 ^a	162 ^b
Zhang et al. (2008a)	B2, A2	Canada	16–20 ^a	30–70
Zhang et al. (2008b)	B2, A2	Canada	21–24	30–80
Euskirchen et al. (2006)	A1B	No. Hem.	27 ^a	–
Saito et al. (2007)	A1B	Northern Hemisphere	40–57	50–300
Lawrence and Slater (2005)	A2, B1	Northern Hemisphere	60–90	50–300
Eliseev et al. (2009)	B1, A1B, A2	Northern Hemisphere	65–80 ^a	100–200
Lawrence and Slater (2010)	A1B	Northern Hemisphere	73–88	–
Lawrence et al. (2008)	A1B	Northern Hemisphere	80–85	50–300
This Study	A1B	Alaska	22–61	69–105
This Study	A1B	Canada	22–36	55–90
This Study	A1B	Northern Hemisphere	20–39	56–92

^aCalculated from numbers or tables in text.

^bCalculated from estimated trends.

Par ailleurs, au courant des cent prochaines années, la limite sud du pergélisol migrera de quelques centaines de kilomètres vers le nord sur tous les continents (Nelson et autres, 2002; Joy Hassol, 2004; Lemke et autres, 2007). En fait, la disparition du pergélisol s'effectue d'abord dans les zones où il est sporadique ou discontinu. La moitié du pergélisol canadien répond à ce critère, se trouvant entre -2 et 0°C (Smith et autres, 2005). La figure 2.7 présente les températures moyennes enregistrées à la profondeur d'amplitude annuelle nulle pour différents sites canadiens. Les puits représentés par les couleurs rouge (supérieure à 0°C), orange (0 à -1°C) et jaune (-1 à -2°C) verront leurs profils de température modifiés largement durant les

prochaines décennies pour, éventuellement, demeurer au-delà du seuil de 0°C (Derksen et autres, 2012). Avec l'augmentation des températures liée aux changements climatiques, ces locations seront les premières à subir les effets de la fonte du pergélisol.

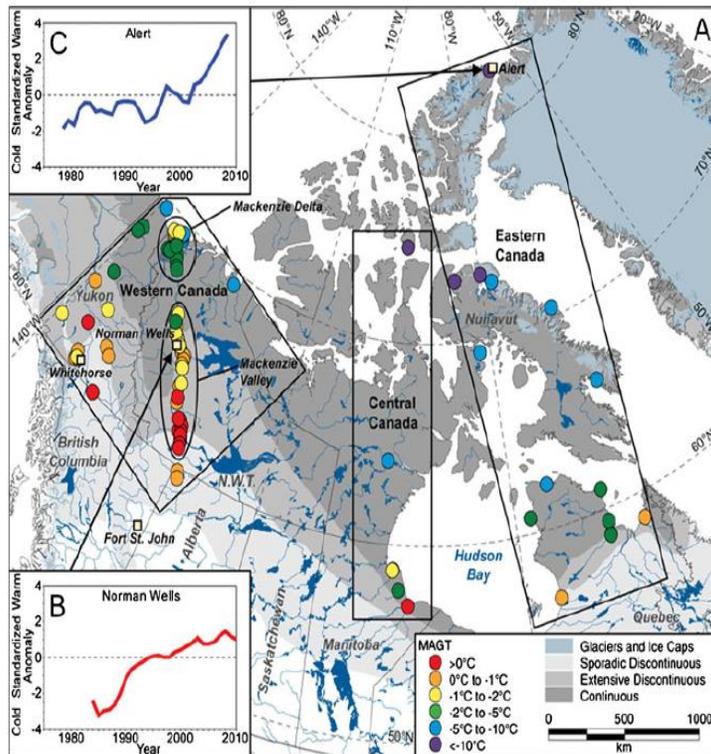


Figure 2.7 : Températures moyennes à la profondeur d'amplitude annuelle nulle pour plusieurs puits d'observations à travers le nord canadien (tirée de : Derksen et autres, 2012, p. 65)

Évidemment, bien que les tendances illustrées pour le Canada sont confirmées à l'échelle mondiale, on peut trouver quelques variations régionales (Romanovsky et autres, 2010). C'est le cas du Nord québécois.

2.2.3 Tendances au Québec

Le Québec est en fait un bon exemple pour illustrer les différences régionales puisque le réchauffement du pergélisol s'est opéré beaucoup plus récemment qu'ailleurs. Alors que Lachenbruch et Marshall (1986) ont daté le commencement du réchauffement en Alaska au début du siècle dernier, les données recueillies révèlent que ce n'est qu'à partir de 1993 que le réchauffement a débuté dans la province (Allard and Lemay, 2012). Cependant, le réchauffement s'est avéré rapide puisqu'une hausse d'environ 2°C est notée entre 1993 et 2005, ce qui est comparable aux hausses notées sur deux à trois décennies ailleurs dans le monde (Allard and Lemay, 2012; Derksen et autres, 2012). Cette période a fait suite à un faible refroidissement d'environ 0.4°C qui s'est échelonné sur une cinquantaine d'années (Allard et autres, 1995; Chouinard et autres, 2007). D'ailleurs, le réchauffement s'exprime clairement avec la figure 2.8.

Elle regroupe trois profils de température dans le pergélisol à la mine Raglan, située au Nunavik (Chouinard et autres, 2007). Les anomalies, soit le changement de direction dans la partie supérieure des profils de températures, sont observables sous la couche active et jusqu'à des profondeurs d'environ 60 mètres (Chouinard et autres, 2007).

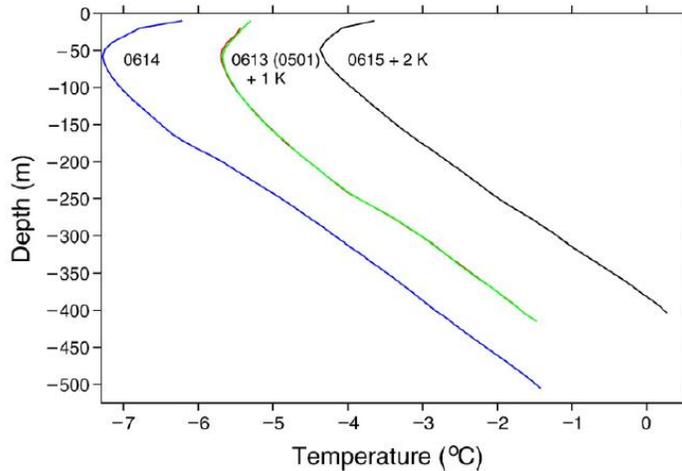


Figure 2.8 : Anomalies dans les profils de températures du sol à la mine Raglan, Québec (tirée de : Chouinard et autres, 2007, p. 360)

Comme ailleurs, le réchauffement des températures du sol est associé à une augmentation de l'épaisseur de la couche active. Une étude synthèse a regroupé, entre autres, les données recueillies dans huit villages du Nunavik (Smith et autres, 2010). Le tableau 2.2, extrait de l'étude en question, confirme que les tendances observées à l'échelle mondiale s'appliquent également au Québec. Pour tous les sites, il y a une augmentation de l'épaisseur de la couche active (indiqué par : ΔAL) et une augmentation des températures du sol (indiqué par : ΔT) à 4 et 20 mètres de profondeur (Smith et autres, 2010). En moyenne, l'augmentation est de 1.9°C à 4 mètres et de 1.2°C à 20 mètres (Smith et autres, 2010). Ces augmentations témoignent de l'importance et de l'étendue de la fonte du pergélisol québécois.

Tableau 2.2 : Augmentation de l'épaisseur de la couche active et des températures du sol pour 13 sites situés dans 8 villages nordiques du Québec (tiré de : Smith et autres, 2010, p. 132)

Site (Cable no)	Material	AL1993 (cm)	AL 2008 (cm)	ΔAL (cm)	Depth maximum AL (cm)	ΔT at 4m	ΔT at 20m
Salluit (Sal-154)	Gneiss	279	345 ³	66	374 (2006)	1.4 ³	1.2 ³
Salluit (Sal-155)	Till	168	299	131	299 (2008)	3.0	1.0
Akulivik (Aku-162)	Till	138	240	102	240 (2008)	1.4	–
Akulivik (Aku-232)	Sand/Clay	135	138	3	143 (2006)	1.5	1.0
Quaqtaq (Quaq-156)	Sand/gravel	151	156	5	181 (2006)	1.7	1.8
Quaqtaq (Quaq-158)	Gneiss	416	556	140	592 (2007)	0.8	1.3
Puvirnituk (Puv-303)	Gneiss	339	512	173	566 (2007)	3.1	1.7
Aupaluk (Aupa-299)	Sand/gravel	155	210 ³	55	229 (1999)	1.6	1.1
Tasiujaq (Tas-304)	Sand	113	203	90	207 (2006)	1.7	–
Tasiujaq (Tas-roc)	Schist	411	566	155	630 (1995)	2.1	1.3
Kangiḡsualujjaq (Kan-231)	Gneiss	607 ¹	1163 ³	556	1163 (2007)	3.4 ³	1.2 ³
Kangiḡsualujjaq (Butte cotière)	Clay	254 ⁵	332 ³	80	–	1.5	0.05
Umiujaq (Umi-roc)	Basalt	1008 ²	2000 ⁴	992	2000 (2006)	1.5	1.2*

En étudiant ces tendances et à l'aide de modèles informatiques complexes, combinant statistique et physique, les scientifiques sont outillés pour effectuer des prévisions de l'état du pergélisol pour les prochaines années. Dans la littérature scientifique, on retrouve plusieurs études qui présentent les résultats des modélisations (Zhang et autres, 2008; Shaefer et autres, 2011). Comme on peut le remarquer au tableau 2.1, les résultats peuvent varier selon les paramètres pris en compte. L'étude de Zhang et autres (2008) est présentée dans le cadre de cet essai puisqu'elle prend en compte plusieurs facteurs influant dans l'équilibre thermique, c'est-à-dire la végétation, la couche de neige, la couche de matière organique, le type de sol et son humidité. Dans l'étude, la distribution du pergélisol a été modélisée à l'échelle canadienne pour le 21^e siècle à partir de six scénarios climatiques issus des projections du GIEC (Zhang et autres, 2008). Ces scénarios sont basés sur des projections différentes quant aux émissions de gaz à effet de serre (Zhang et autres, 2008). Les résultats de l'étude prévoient notamment une diminution de l'étendue du pergélisol au Canada entre 16 et 19.7 % de 1990 à 2090 (Zhang et autres, 2008).

Les trois cartes de la figure 2.9 illustrent l'évolution prévue du pergélisol canadien entre 1990 et 2090. Pour les deux scénarios représentés (CSIROM et NCAR), on remarque que les zones roses, là où le pergélisol est prévu disparaître complètement d'ici 1990, occupent une portion importante au Québec (Zhang et autres, 2008). Les zones de couleur jaune, orange et rouge indiquent que le pergélisol est noté entre une et neuf années sur dix; donc en voie de disparaître. C'est à sa limite sud, là où il est sporadique et discontinu, que le pergélisol aura tendance à disparaître au cours des prochaines décennies (Zhang et autres, 2008). Cependant, sous les tourbières et les sols très humides, comme dans les terres bordant la Baie d'Hudson, le pergélisol aura tendance à subsister plus longtemps grâce à l'effet de l'énergie latente discuté plus haut (Zhang et autres, 2008).

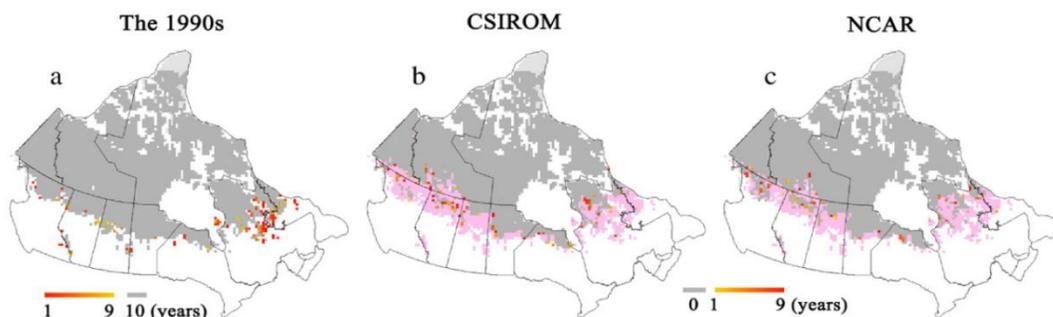


Figure 2.9 : Distribution du pergélisol en 1990 (a) et en 2090 selon deux scénarios de changements climatiques : CSIROM (b) et NCAR (c) (tirée de Zhang et autres, 2008, p. 450)

Puisqu'ils doivent intégrer de nombreux facteurs, ces modèles comportent des incertitudes importantes qui doivent être prises en compte. Ces incertitudes résultent de la variabilité dans les prévisions d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, mais aussi du manque de

données sur l'état actuel du pergélisol. À ce sujet, la communauté scientifique développe de nouvelles technologies passives qui permettent l'acquisition de données à distance, c'est-à-dire sans l'intermédiaire de puits d'observation (Buteau et autres, 2010). À titre d'exemple, la télédétection dans les longueurs d'onde de l'infrarouge peut fournir des informations sur la température entre les différentes interfaces (air, végétation, neige, surface sur sol) (Buteau et autres, 2010). Par la combinaison de ces données avec celles obtenues dans les puits d'observation, les modèles de prévisions et de suivi de l'état du pergélisol deviennent, progressivement, plus précis (Buteau et autres, 2010).

2.3 Résumé

Le pergélisol est le résultat d'une équation thermique. Son état dépend de plusieurs facteurs. La température de l'air à la surface du sol, la végétation, la couche de neige, le type de sol et son contenu en glace influencent le régime thermique du pergélisol, soit sa température et l'épaisseur de sa couche active. Puisque le pergélisol est le résultat de la combinaison de ces facteurs, la modification de l'un ou plusieurs d'entre eux modifie l'équilibre établi. C'est le cas des changements climatiques. L'augmentation des températures de l'air provoque nécessairement une modification du régime thermique du sol.

Les données acquises depuis plusieurs années démontrent globalement un réchauffement du pergélisol et une augmentation de sa couche active. Ce n'est que récemment que ce réchauffement s'est observé au Québec, mais la vitesse à laquelle il s'opère est importante. À court et moyen terme, le pergélisol plus chaud, situé au sud et dont la couverture est sporadique et discontinue, disparaîtra totalement. Plus au nord, là où il est continu, l'effet se manifestera en une augmentation de la profondeur de la couche active.

Lorsque le pergélisol se réchauffe et que sa température passe au-dessus du point de congélation, la glace contenue fond et se transforme en eau. Cette transformation a des impacts cruciaux. Le pergélisol, auparavant solide comme du béton, devient complètement instable. Advenant qu'une infrastructure y soit construite, elle s'affaisse ou devient fissurée. Bref, l'intégrité physique des infrastructures est menacée par une modification du régime thermique du pergélisol.

3 CHOIX DU TRACÉ : COMPOSANTES DE L'ENVIRONNEMENT À PRENDRE EN COMPTE

Le chapitre deux a mis en lumière une série de facteurs qui sont responsables de l'équilibre thermique du pergélisol. Lorsque l'un de ces facteurs est modifié, par exemple la température de l'air, la stabilité thermique du pergélisol est menacée. Mais cette stabilité thermique est aussi dépendante de certaines composantes de l'environnement, à savoir le type de sol et son contenu en glace, l'hydrologie, l'hydrogéologie, la topographie et les feux de forêt. Ainsi, pour une même augmentation de température, la stabilité thermique du pergélisol sera plus ou moins affectée selon les caractéristiques de ces composantes. La combinaison de certaines caractéristiques a pour effet de créer des zones où le pergélisol, très instable, est particulièrement vulnérable aux changements climatiques. Nécessairement, ces zones devraient être évitées autant que possible lors du choix de location d'infrastructures, qu'elles soient routières ou habitables (Allard and Lemay, 2012).

Dans le processus de l'ÉIE, une des premières étapes à être réalisée pour les projets linéaires, comme les pipelines, les chemins de fer ou les routes, consiste à faire le choix d'un corridor de moindre impact et par la suite d'un ou plusieurs tracés à l'intérieur de ce corridor (Bureau d'examen des répercussions environnementales (BEFE), 2013). Ultimement, le tracé retenu devrait minimiser les kilomètres à l'intérieur des zones où le pergélisol est le plus instable. Puisque le nord est très peu développé comparativement au sud du Québec, certains aspects sur le plan humain, tels que l'intégration au paysage et le climat sonore, deviennent moins restrictifs. Cela procure alors une plus grande flexibilité dans le choix d'un tracé. Ce dernier devrait être fait en accordant une attention particulière aux facteurs de nature biophysique et climatique.

Ainsi, les directives gouvernementales pourraient requérir des promoteurs qu'ils acquièrent suffisamment de connaissances sur les éléments du milieu nordique pour leur permettre de faire un choix de moindre impact. Trois principaux types d'information sont à recueillir et portent sur le type de sol, les conditions hydrologiques et hydrogéologiques, et la topographie. Cartographier ces éléments du paysage permet de cerner rapidement les zones à éviter. Deux autres types d'information peuvent aussi être considérés, les changements climatiques et les zones affectées par les feux de forêt. Puisqu'ils évoluent dans le temps, ces derniers sont plus difficiles à cartographier.

Dans ce chapitre, les cinq premières sections traitent respectivement des cinq éléments suivant : (1) les types de sol et le contenu en glace; (2) l'hydrologie et les conditions hydrogéologies; (3) la topographie; (4) les changements climatiques; et (5) les feux de forêt. La sixième et dernière section traite quant à elle des outils technologiques disponibles pouvant être utilisés pour effectuer la cartographie.

3.1 Types de sols et son contenu en glace

La connaissance du type de sol est primordiale puisqu'elle indique les teneurs en glace possibles (Allard and Lemay, 2012). De manière générale, plus un sol est fin, plus la quantité d'eau qu'il peut soutenir sous forme gelée est grande (Allard and Lemay, 2012). Lorsque les températures augmentent, la glace fond et le sol s'affaisse (Lemke et autres, 2007). Spécifiquement, cet effet s'explique par la réduction de volume lorsqu'il y a une transition entre la phase gelée et la phase liquide de l'eau (Nelson et autres, 2002)

Au Québec, une grande portion du territoire est couverte de sédiments marins qui résultent de la mer laissée par la dernière glaciation (Fortier and Bolduc, 2008). Ces sols sont souvent très fins, tout comme le sont les silts, les argiles et les tills (Fortier et autres, 2011). Ils peuvent par conséquent contenir de fortes teneurs en glace (Grondin et autres, 2005). Par exemple, de l'argile qui contient d'épaisses lentilles de glace peut présenter un pourcentage d'eau par volume de 90 % (Allard and Lemay, 2012). Ces types de sols sont très présents au Nunavik et au Labrador et par leur nature, très susceptibles d'être affectés lourdement par les changements climatiques (Allard and Lemay, 2012).

A l'inverse, des sols graveleux et sableux contiennent naturellement de plus faibles volumes en glace. Il n'est toutefois pas impossible que ces sols s'affaissent suite à une augmentation de température (Allard and Lemay, 2012). Évidemment, un roc affleurant constitue un sol beaucoup plus stable qui est fortement recherché pour la construction, particulièrement pour les infrastructures ayant des dimensions plus limitées telles que les pistes d'atterrissage ou les bâtiments.

Cet élément déterminant est souvent le premier à être cartographié pour le choix d'un terrain assez stable pour accueillir une infrastructure (Allard and Lemay, 2012). Des photographies aériennes et des images satellites à haute résolution peuvent être utilisées pour identifier des caractéristiques géomorphologiques du paysage qui sont générées spécifiquement dans les zones où le pergélisol est riche en glace. Les figures suivantes illustrent d'ailleurs quelques éléments faciles à reconnaître pour l'œil habitué d'un expert.

Les polygones de coins de glace sont de grandes structures formées par l'intrusion d'eau sur une longue période dans une faille de la couche active du sol. Année après année, la faille prend de l'expansion. En rejoignant d'autres failles, des polygones sont formés. Ces figures indiquent une teneur en eau importante (Haltigin et autres, 2012). Par leurs tailles et leurs motifs particuliers, ils sont facilement identifiables à vol d'oiseau (Haltigin et autres, 2012). La figure 3.1 illustre quelques-uns de ces polygones tels qu'ils sont observés dans le l'arctique Canadien.

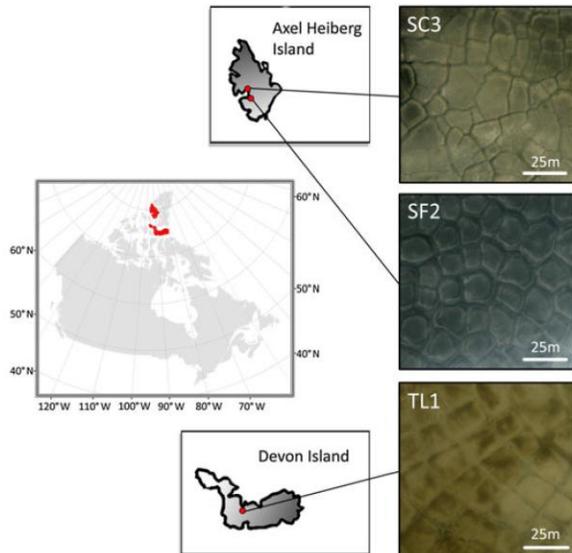


Figure 3.1 : Photographies aériennes présentant des polygones de coins de glace dans l'arctique Canadien (tirée de : Haltigin et autres, 2012, p. 180)

Il en est de même pour les pingos, qui sont de petites collines dont le cœur est constitué de glace, et qui peuvent parfois présenter des diamètres de quelques dizaines de mètres (Allard and Lemay, 2012). La figure 3.2 permet d'en imaginer la taille. Présentant des caractéristiques similaires, les palsas sont de beaucoup plus petites tailles. Lorsque ces formations fondent, des dépressions sont créées, engendrant un paysage connu sous le nom de thermokarst, dont l'irrégularité résulte de l'hétérogénéité des sols et des réseaux hydrogéologiques (Lemke et autres, 2007). Les thermokarsts sont le fruit d'une augmentation des températures et d'une instabilité grandissante des sols. Les cicatrices laissées par un glissement de terrain indiquent également la présence d'eau en grande quantité (Allard and Lemay, 2012).



Figure 3.2 : Paysage présentant une combinaison de pingos et de lacs thermokarsts, Nunavik (tirée de Allard and Lemay, 2012, p. 29)

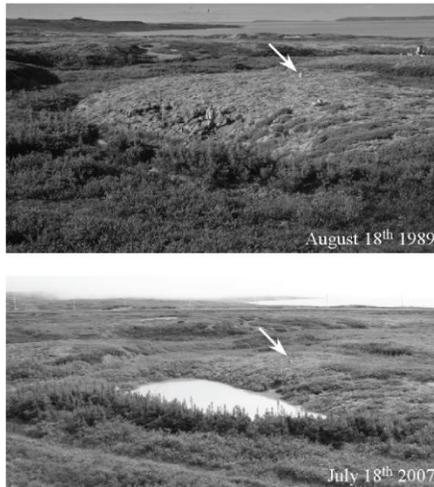


Figure 3.3 : Dégel d'un pingo et lac thermokarst qui en résulte. La flèche indique une personne debout (tirée de : Fortier and Aubé-Maurice, 2008, p. 458)

Les grandes plaines au relief irrégulier et qui présentent un ou plusieurs de ces éléments indicateurs d'instabilité devraient, autant que possible, être évitées pour le choix d'un tracé. Dans un contexte de changements climatiques et à cause des quantités importantes de glace qu'ils contiennent, ces sols perdent leurs capacités structurantes et fonctionnelles, et ont le potentiel d'entraîner des investissements majeurs en entretien pour les infrastructures qui y seraient assises (Doré et Beaulac, 2007). Les images satellitaires et les photographies aériennes permettent de les identifier aisément et donc d'en faire la cartographie pour que le choix du corridor et du tracé en tienne compte.

3.2 Hydrologie et conditions hydrogéologiques

Dans le choix du tracé d'une emprise routière, les conditions hydrologiques et hydrogéologiques revêtent une importance capitale puisqu'elles influencent la température du sol. En effet, à cause de l'énergie latente contenue dans l'eau, les sols à proximité des cours d'eau ont des températures plus élevées (de Grandpré, 2012). Un tracé longeant un cours d'eau est sujet à des instabilités à cause de cette proximité. En contrepartie, si le pergélisol a complètement disparu de la rive et en supposant que le climat demeure constant, le sol est stable thermiquement et une emprise routière peut être envisagée.

Si les réseaux hydrologiques sont faciles à cartographier par le biais d'images satellitaires à moyenne et haute résolution, il en est tout autre pour les réseaux hydrogéologiques. Le déplacement de l'eau entre la surface du sol et le dessus du pergélisol est assurément plus complexe à établir. Tout comme les cours d'eau, l'eau souterraine transporte de l'énergie et la libère dans son environnement.

La vitesse de déplacement de l'eau souterraine est influencée par le type de sol. Naturellement, l'eau se déplace plus rapidement dans un milieu grossier, par exemple du sable ou du remblai,

que dans un milieu où le matériel est fin comme de l'argile ou du silt. Dans le cas d'une emprise routière, le remblai en place participe à augmenter la vitesse de déplacement de l'eau souterraine, phénomène qui libère une quantité substantielle d'énergie. Récemment, une étude a soulevé la possibilité que la direction de l'eau souterraine soit un élément critique. En effet, une route qui suivrait la direction de l'eau souterraine serait moins affectée qu'une route dont le tracé serait perpendiculaire. Cela s'expliquerait par le changement de vitesse de déplacement de l'eau lorsqu'elle traverse l'emprise. Des études supplémentaires semblent cependant requises pour confirmer cette hypothèse. (de Grandpré et autres, 2012)

Toutefois, la direction et la vitesse de l'eau souterraine ne sont pas un élément qu'il est facile d'estimer. Des facteurs comme le réseau hydrographique, la topographie et le type de sol permettent une proposition grossière, mais seule une étude hydrogéologique révèle les détails de ce mouvement souterrain (Fetter, 2001). Ainsi, il est plus difficile pour l'eau souterraine que pour les réseaux de surface d'effectuer la cartographie à grande échelle. Il est cependant possible en utilisant les données des facteurs mentionnés plus haut, d'effectuer une modélisation qui pourrait se transposer sur une carte.

3.3 Topographie

Dans le nord comme dans le sud, la question topographique est un élément crucial à considérer dans le choix d'un tracé afin de minimiser les dénivelés et réduire le gradient des pentes. Puisque certaines plaines peuvent présenter des terrains de thermokarsts qu'il importe d'éviter, des routes à flanc de montagne peuvent être envisagées. Comparativement aux conditions hydrogéologiques, la topographie est un élément facile à cartographier notamment parce que les bases de données sont facilement accessibles.

Les paysages escarpés entraînent certains défis. Par exemple, les pentes produisent une instabilité qui se concrétise parfois en détachement localisé de la couche active, une sorte de glissement de terrain (Joy Hassol, 2004; Lemke et autres, 2007). Ce phénomène est notamment amplifié par le mouvement de l'eau souterraine (Nelson et autres, 2002).

D'ailleurs, la topographie influence directement les réseaux hydrologiques et hydrogéologiques ainsi que le type de sol en place. Là où les pentes sont fortes, le sol naturel est souvent très mince et la roche-mère située non loin de la surface (Woo et autres, 2008). À cause de son relief escarpé, ce type de topographie engendre cependant des difficultés au niveau de la construction, par exemple à l'étape du nivellement. Dans les vallées, les pentes sont habituellement modérées. En tant que zone de transition, les vallées présentent une variété de phénomènes hydrologiques :

« fonte des neiges, précipitations, développement de la glace interstitielle dans le sol, évaporation, infiltration, écoulement d'eau latéral provenant des zones adjacentes et écoulement de surface et souterrain » (de Grandpré, 2012).

Ces phénomènes se traduisent en un réseau complexe de zones de remplissage et de déversement dont le tracé d'une route doit tenir compte pour épargner, à titre d'exemple, qu'elle soit inondée périodiquement (Woo et autres, 2008). Enfin, les zones à faible pente sont les plaines ou les tourbières, qu'il importe particulièrement d'éviter lorsqu'elles sont saturées d'eau et qu'un pergélisol est subsistant (Woo et autres, 2008).

3.4 Changements climatiques

Certaines régions sont plus susceptibles aux changements climatiques à cause des grands systèmes climatiques et de leur position par rapport aux océans. Puisque le réchauffement climatique a un lien direct sur le régime thermique du pergélisol, ces régions présentent un risque plus important pour la localisation d'une route.

Au Québec, une modélisation a été réalisée par le consortium Ouranos afin de prévoir les augmentations de température vers l'horizon 2050 en se basant sur les données climatiques historiques de 1971 à 2000 (Allard and Lemay, 2012). Le résultat de cette modélisation combine six modèles de circulations globales qui considèrent chacun quatorze variables climatiques (Allard and Lemay, 2012). Cela s'illustre à travers une carte représentant la moyenne de ces modèles pour l'augmentation de la température annuelle (Allard and Lemay, 2012). Comme le témoigne la figure 3.4, le réchauffement sera plus marqué au nord-ouest. On parle d'augmentation variant entre 2.4 et 3.4 °C pour l'ensemble des régions.

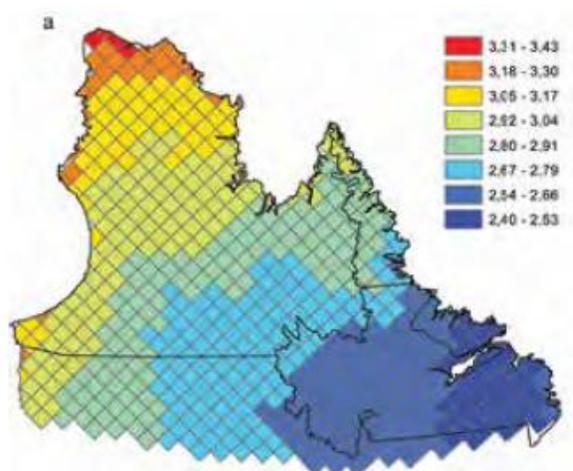


Figure 3.4 : Changements projetés dans la température annuelle. Moyenne selon six modèles de circulation globale (tiré de : Allard and Lemay, 2012, p. 81)

Évidemment, ce type de carte est complexe à produire et requiert la participation de nombreux experts provenant de divers domaines. Cependant, des organismes comme Ouranos au Québec

sont responsables d'effectuer ce type de simulation (Allard and Lemay, 2012). Leurs résultats peuvent alors facilement être combinés à la cartographie spécifique élaborée dans le cadre d'une ÉIE.

3.5 Feux de forêt

Le dernier élément d'importance à considérer en est un de grand dynamisme : les feux de forêt. Bien qu'ils ne soient pas pertinents dans l'extrême nord, les feux de forêt touchent des zones où le pergélisol sporadique et discontinu existe. Les zones ayant été victimes d'un feu de forêt au courant des dernières années peuvent constituer une avenue intéressante pour le choix d'un tracé. Par la chaleur dégagée lors du feu, le sol subit une hausse des températures (Joy Hassol, 2004). Par après, puisqu'une portion importante de la couverture végétale a brûlé, le sol sera réchauffé davantage par les rayons du soleil (Joy Hassol, 2004). Conséquemment, le pergélisol peut avoir complètement disparu d'un territoire qui aujourd'hui, étant soumis au réchauffement climatique, ne permettra pas son rétablissement.

Puisque le nord du Québec est situé dans la « zone de protection restreinte », aucune intervention visant à éteindre les feux n'est entreprise à moins que ces derniers ne mettent en péril l'intégrité des communautés ou des infrastructures (Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU), 2012). En fait, les forêts situées au nord ont peu de valeur marchande. Par conséquent, la SOPFEU n'en fait pas le suivi rigoureusement (SOPFEU, 2012). Quant à lui, le ministère des Ressources naturelles (MRN) tient, sur son site internet, une carte des feux de forêt déclenchés dans l'année courante au sud du 53^e parallèle (MRN, 2013). Si le MRN acquiert des données similaires pour la portion du Nord-du-Québec, l'obtention de ces données couvrant les années antérieures pourrait permettre de réaliser une cartographie cumulative. Dans tous les cas, une analyse des photographies aériennes permet également de cerner les zones ravagées au courant des dernières années (Joy Hassol, 2004).

3.6 Cartographie des éléments du milieu

L'élaboration d'une carte superposant les éléments présentés dans les dernières sections peut s'avérer très utile dans le choix d'un corridor ou d'un tracé à privilégier. En effet, grâce à des logiciels de système d'information géographique, il est possible de combiner les différentes données acquises en plusieurs couches sur une même carte (Allard and Lemay, 2012). Alors que certaines données comme la topographie et le réseau hydrologique de surface sont relativement simples à obtenir, ce n'est pas le cas pour les conditions souterraines. Acquérir les données souterraines pour le sol et l'eau devient alors le principal défi.

Pour inférer sur les conditions souterraines déterminantes au niveau de la stabilité du pergélisol, soit le type de sol et son contenu en glace, des outils technologiques ont été développés au courant des dernières années. Évidemment, la réalisation de forages géotechniques aménagés

en puits d'observation ou les tranchées exploratoires constituent des méthodes classiques qui ont fait leurs preuves (Allard and Lemay, 2012). Toutefois, le transport de l'équipement spécialisé volumineux et l'analyse des échantillons entraînent en terrain nordique des coûts et des difficultés particulières. De plus, les résultats obtenus ne sont que ponctuels, à l'endroit du sondage, et ne reflètent pas nécessairement la situation du pergélisol qui prévaut aux alentours.

Des technologies non intrusives permettent aujourd'hui d'acquérir des données d'utilité comparable directement de la surface. D'abord, un radar portatif qui pénètre le sol connu sous le nom de GPR (*ground-penetrating radar*) permet d'établir les profondeurs des différentes couches de matériel qui composent le sol (Fortier et autres, 2011). Les intrusions massives de glace sont également repérées (Fortier et autres, 2011). La technique de tomographie de la résistivité électrique (ERT) permet quant à elle de recréer les conditions sous-jacentes en trois dimensions à partir d'une accumulation de plusieurs couches (Fortier et autres, 2011). Puisque l'instrument nécessaire à la collecte de données se transporte relativement facilement, ces technologies encouragent l'acquisition de connaissances sur les conditions de sol. Par contre, les modèles qui en émergent ne sont pas toujours très précis (Fortier et autres, 2011). Ces technologies peuvent certainement avoir leur utilité pour compléter l'acquisition de données ou pour préciser l'état de certaines portions de la route jugées plus à risque. Elles sont toutefois plus difficiles à être utilisées à grande échelle puisqu'elles demandent tout de même d'effectuer les lectures sur le terrain afin de valider les informations obtenues (de Grandpré, 2012).

Au Québec, une équipe du Centre d'études nordiques affilié à l'Université Laval a réalisé une cartographie précise pour le compte de la petite municipalité de Salluit située tout au nord du Nunavik. Dans un premier temps, les images satellitaires et les photographies aériennes procurent des renseignements essentiels. Ensuite, les méthodes non intrusives discutées plus haut sont utilisées pour couvrir une large superficie. Enfin, la validation est assurée par des méthodes traditionnelles intrusives que sont les forages et les tranchées exploratoires. La carte présentée à la figure 3.5 a été produite à partir des investigations réalisées par le biais de nombreuses techniques. Les zones en rouge indiquent que le terrain ne convient pas à la construction. Les zones en jaune indiquent que la construction d'infrastructure est possible, mais conditionnellement à l'application de mesures d'adaptation. Finalement, les zones en vert indiquent que le terrain convient à la construction. La figure en taille supérieure ainsi que la légende complète se trouvent à l'Annexe I. (Allard and Lemay, 2012)

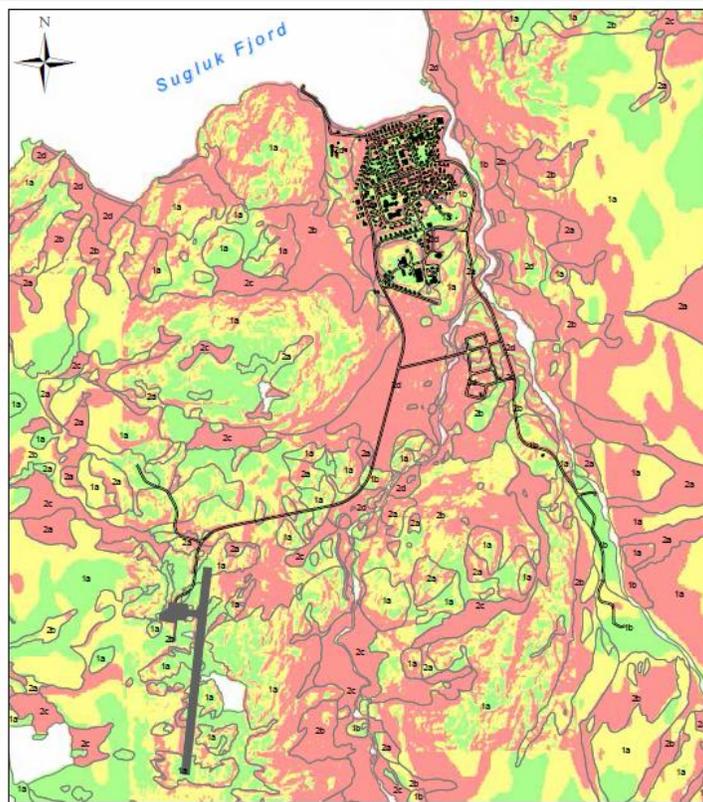


Figure 3.5 : Risques associés au développement d'infrastructures dans la municipalité de Salluit (tirée de : Allard and Lemay, 2012, p. 190)

Cette carte permet dorénavant d'orienter le développement de la petite ville dans des secteurs qui sont moins susceptibles d'être affectés par les changements climatiques. S'il est désormais possible de produire avec précision un tel outil de développement, il faut cependant garder en tête que des ressources humaines et monétaires importantes sont nécessaires pour sa réalisation. (Allard and Lemay, 2012)

3.7 Résumé

Des éléments du milieu naturel influencent le régime thermique du pergélisol et peuvent favoriser son instabilité. Le type de sol et son contenu en glace, l'hydrologie, l'hydrogéologie et la topographie, doivent être étudiés par le promoteur d'un projet. Les changements climatiques et les feux de forêt ont aussi leurs conséquences sur le régime thermique du pergélisol. Ces éléments doivent être cartographiés afin que les caractéristiques révélatrices d'un pergélisol instable deviennent des zones à éviter pour le choix du tracé (Desjarlais et autres, 2004). Par exemple, les plaines de dépôts argileux riches en glace et les sols polygonaux doivent être évitées (ATC, 2010).

Pour effectuer la cartographie, les photographies aériennes et les images satellitaires peuvent d'abord être utilisées. Ces technologies permettent d'obtenir des informations sur l'hydrologie et les feux de forêt. Elles permettent aussi l'identification des éléments indicateurs de pergélisol

riche en glace (pingos, palsas, polygones de coins de glace). Aussi, les bases de données peuvent être utilisées pour acquérir des informations sur la topographie et les changements climatiques. Ensuite, des méthodes non intrusives sur le terrain peuvent être utilisées pour acquérir des informations souterraines sur l'état des sols et de l'eau. Enfin, une validation des données souterraines par des technologies classiques demeure essentielle pour confirmer les résultats obtenus.

Bien que ces technologies soient efficaces théoriquement, elles sont coûteuses et peuvent être difficiles à mettre en place pour des ouvrages d'envergure, décourageant ainsi les promoteurs de les utiliser à grande échelle (Doré et Beaulac, 2007). Toutefois, ces investissements peuvent être extrêmement avantageux puisqu'ils réduisent les coûts d'entretien et même le risque que la route soit repositionnée suite à d'importantes problématiques liées à la fonte du pergélisol (ATC, 2010).

À partir d'une bonne cartographie, le promoteur du projet peut effectuer un choix éclairé en optant pour le tracé de moindre impact. Cependant, même si le tracé se situait sur un sol peu susceptible d'être affecté par les changements climatiques, l'infrastructure elle-même affecte sa stabilité.

4 IMPACTS SUR LA STABILITÉ THERMIQUE DU PERGÉLISOL

L'évolution du pergélisol dans une situation de changement climatique affecte la construction et l'entretien des routes puisque le sol devient instable. Comme il a été discuté au chapitre trois, certaines caractéristiques des éléments naturels, par exemple un contenu élevé en eau, le rendent plus vulnérable au réchauffement climatique. Cependant, la construction de l'infrastructure, son utilisation et son entretien contribuent également à affecter le régime thermique du pergélisol (Doré et Beaulac, 2007). À elles seules, ces activités génératrices d'impacts ont la capacité d'influencer les températures du sol et doivent conséquemment être identifiées dans le cadre des ÉIE. Donc, il y a deux relations qui doivent être considérées : (1) les impacts des changements climatiques sur la stabilité du pergélisol et (2) les impacts des activités liées au projet routier sur la stabilité du pergélisol.

L'outil privilégié dans l'ÉIE pour illustrer les relations causales entre les activités génératrices d'impact et les composantes de l'environnement est la matrice des impacts appréhendés. Cette matrice permet d'identifier rapidement l'ensemble des impacts d'un projet. Évidemment, les impacts des projets routiers sont variés, et les sources d'impact et composantes de l'environnement à prendre en compte nombreux. Cependant, pour répondre à l'objectif de l'essai à savoir de créer une matrice d'impacts qui considère pleinement la vulnérabilité du pergélisol dans les projets de construction routière, seules les activités créant un impact au niveau de la stabilité thermique du pergélisol seront traitées. La matrice élaborée à la fin de ce chapitre n'est donc qu'une portion d'une matrice qui devrait être développée dans le cadre d'un projet réel. Cependant, pour bien traiter les deux relations mentionnées plus haut, il a été nécessaire d'ajouter un deuxième niveau à la matrice. Ainsi, la matrice contient à la fois les relations causales entre les activités génératrices d'impacts et les composantes de l'environnement, dont le régime thermique fait partie, et dans un deuxième niveau, la relation causale entre les changements climatiques et le régime thermique du pergélisol. Qu'elle soit issue de l'une ou l'autre de ces relations, une modification du régime thermique du pergélisol entraîne les mêmes conséquences observables sur les routes.

Premièrement, ce chapitre présente l'ensemble des activités génératrices d'impact. Certaines ayant été étudiées plus largement et ayant des impacts plus spécifiques sont présentées avec beaucoup plus de détails. Deuxièmement, les conséquences directes et indirectes de la modification du régime thermique du pergélisol sur les routes sont illustrées au moyen de quelques photographies. Troisièmement, les informations colligées se regroupent pour former la matrice des impacts appréhendés, outil de synthèse par excellence pour la compréhension des relations causales entre l'exécution d'un projet routier et, dans ce cas-ci, la perte de stabilité du pergélisol.

4.1 Activités génératrices d'impact

Les sources d'impacts sont les différentes activités qui, lors de la réalisation d'un projet, ont le potentiel de créer un impact sur l'environnement. Non seulement les activités liées à l'utilisation de l'infrastructure doivent être considérées, mais bien toutes celles qui s'enchaînent de la conception jusqu'à la fin de vie de l'ouvrage (Derksen et autres, 2012).

Pour l'identification des activités génératrices d'impact, plusieurs sources d'information ont été consultées en plus de la traditionnelle revue de la littérature scientifique. Divers documents des ÉIE sur des projets déjà réalisés, tels que le lien routier récemment établi entre Inuktituk et Tuktuyaktuk, et la Directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet routier, valide pour le sud du Québec, ont permis de révéler certaines activités qui ont été moins étudiées par la communauté scientifique.

4.1.1 Remblai

La présence du remblai est certainement un des éléments critiques en ce qui a trait à la dégradation du pergélisol sous les infrastructures routières (de Grandpré, 2012). Uniquement lors de son implantation, à cause de la compaction du sol et de la circulation de véhicules lourds, le remblai perturbe l'équilibre thermique du sol (Boucher et autres, 2010; de Grandpré et autres, 2010). Son développement en hauteur a également un impact majeur, mais sera traité en combinaison à la question du déneigement puisque ces éléments sont intimement liés. C'est la composition granulométrique du remblai, différente de celle du sol, qui a l'impact le plus important.

Le remblai est un lit de pierre de tailles variables qui sert de base à la route en assurant le nivelage du terrain. Une couche d'asphalte ou de béton peut y être apposée ou non. La granulométrie du remblai, c'est-à-dire la taille du matériel utilisé, est généralement bien différente de celle du matériel naturel en place. Ainsi, un remblai composé de petites pierres de tailles différentes peut être apposé sur un sol composé de silt argileux. Lorsque le pergélisol se réchauffe et que le sol s'affaisse localement, le remblai occupe l'espace laissé vacant et se retrouve sous le niveau du sol naturel situé de part et d'autre de la route (de Grandpré et autres, 2010). Lorsque cela se produit, la différence de granulométrie a un impact très important au niveau du transport de l'eau souterraine, qui dans sa forme liquide est un vecteur d'énergie (de Grandpré et autres, 2010).

En comparaison avec un sol naturel, le matériel granulaire (sable grossier ou gravier) qui compose le remblai possède de plus grands espaces entre chacune des particules, créant un chemin préférentiel pour l'eau (de Grandpré et autres, 2010). Sa conductivité hydraulique, c'est-à-dire la vitesse avec laquelle l'eau s'y déplace, est beaucoup plus grande, trois fois plus importante que le silt par exemple (de Grandpré et autres, 2010). Des vitesses oscillant entre 1 et

10 mètres par jour sont observées (de Grandpré, 2012). La présence de remblai modifie ainsi les conditions hydrogéologiques naturelles du milieu (de Grandpré et autres, 2010). Lorsque l'eau souterraine circule perpendiculairement à la route, elle « transfère alors une portion importante d'énergie au remblai sous la route, ce qui a pour effet d'augmenter la température du sol dans le remblai et les sols naturels ou remaniés sous-jacents » (de Grandpré et autres, 2010). En mesurant de manière continue la température de l'eau souterraine pour une année complète de chaque côté d'une route située à Beaver Creek (Yukon), de Grandpré et autres (2010) ont d'ailleurs noté une différence variant entre 2 et 4 °C. Cette différence illustre directement l'énergie qui a été transférée par convection au sol sous la route.

Toutefois, les modèles démontrent que cette énergie contribue davantage à augmenter la profondeur de la couche active qu'à réchauffer le pergélisol (de Grandpré, 2012). Ainsi, pour ce même site, la couche active s'est approfondie de deux mètres au courant d'un été seulement (de Grandpré, 2012). Cela s'explique par un phénomène physique discuté précédemment : l'énergie importante nécessaire au changement de phase entre la glace et l'eau contribue à maintenir la température du sol proche du point de congélation durant une période de temps prolongée (de Grandpré, 2012). Bref, la couche active devient de plus en plus profonde jusqu'à ce que le pergélisol ne cesse d'exister.

Ainsi les résultats d'études récentes démontrent l'impact de la présence du remblai sur le mouvement de l'eau souterraine et par conséquent sur la stabilité du pergélisol. Bien que cette réalité ne soit pas toujours considérée dans la conception des remblais, elle crée des conséquences mesurables même sur un court laps de temps (de Grandpré et autres, 2010).

4.1.2 Revêtement

Les routes peuvent être revêtues d'asphalte ou de béton, ou être laissées telles quelles avec une surface en matériel granulaire. Le revêtement crée un impact principalement au niveau de l'absorption de l'énergie solaire. En effet, à cause d'un phénomène connu sous le nom d'albédo, les surfaces foncées comme les routes absorbent plus d'énergie solaire que les surfaces pâles, qui reflètent une portion importante des reflets du soleil (de Grandpré et autres, 2010). Qu'il soit constitué d'asphalte, de bitume ou de matériel granulaire, le revêtement des routes contribue à alimenter le flux d'énergie qui pénètre dans le sol et, par conséquent, participe à l'augmentation des températures du pergélisol. Les conséquences sont toutefois plus importantes lorsqu'il s'agit d'asphalte ou de bitume (Doré et Voyer, 2010).

Le revêtement influence également le ruissellement. À l'inverse d'un revêtement d'asphalte ou de bitume, un revêtement de matériel granulaire permet à l'eau de s'infiltrer directement sous la route. Dans le cas des surfaces d'asphalte ou de béton, l'eau s'infiltré également, mais à l'endroit des talus. L'eau des précipitations transmet un apport de chaleur supplémentaire au remblai qui contribue à dégrader le pergélisol (de Grandpré, 2012).

4.1.3 Déboisement

À l'étape de la construction d'une route, le déboisement est nécessaire sur une emprise souvent plus large que la route elle-même. En éliminant la couche isolante que constitue la végétation en place, les rayons du soleil réchauffent dorénavant le sol mis à nu, ce qui a pour effet d'augmenter les températures du sol (de Grandpré, 2012). Cela se traduit par une augmentation de la profondeur de la couche active (de Grandpré, 2012). L'impact peut être assez important pour déstabiliser le sol avant même l'installation du remblai (Nelson et autres, 2002). Des efforts supplémentaires de nivellement sont alors requis (Nelson et autres, 2002).

4.1.4 Bacs d'emprunt

Afin de combler les besoins en matériel granulaire, soit du sable grossier ou de la pierre, le recours à de nouveaux bacs d'emprunt ou carrières est essentiel dans les projets routiers, d'autant plus que ces derniers sont situés en régions éloignées. Cette activité a, elle aussi, d'importants impacts sur le pergélisol, et ce, à l'extérieur de l'emprise de la route.

Lorsque la carrière est située dans un pergélisol riche en glace, ce dernier est susceptible de subir d'importants changements, d'abord par l'élimination de la végétation en surface (BERE, 2013). Ensuite, les pentes qui sont formées tout autour de l'excavation, même si elles sont faibles, permettent l'intrusion de chaleur latéralement et deviennent instables, produisant des affaissements (BERE, 2013). À long terme et principalement à cause des changements climatiques, les besoins de matériel granulaire pour l'entretien de la route prennent de l'ampleur, entraînant une pression supplémentaire sur les carrières (BERE, 2013).

4.1.5 Aménagements hydrologiques

En contribuant à la fonte du pergélisol, les changements climatiques induisent des modifications aux réseaux hydriques et hydrogéologiques (de Grandpré, 2012; Throop et autres, 2012). Comme il a été discuté au point 4.1.1, le remblai mis en place joue également un rôle prépondérant. Les aménagements hydrologiques, comme les fossés de drainage, les ponceaux et les ponts, doivent par conséquent être construits pour soutenir les changements hydrologiques qui seront vraisemblablement observés (BERE, 2013). Puisque l'ampleur de ces changements est difficile à évaluer, il est possible que les infrastructures soient insuffisantes (BERE, 2013).

Lorsque c'est le cas, on observe localement des accumulations d'eau importantes dans les dépressions des fossés de drainage causées par la fonte de la glace du pergélisol (Allard et autres, 2007). La stagnation d'eau dans ces dépressions constitue un apport additionnel de chaleur qui accélère le dégel du pergélisol, entraînant par la suite des instabilités de surface (Grondin et autres, 2005; Allard et autres, 2007). La figure 4.1 illustre plusieurs problématiques liées aux réseaux hydrologiques et hydrogéologiques le long d'une piste d'atterrissage au Nunavik. Ainsi, sur une très courte distance, les impacts constatés sont variés.

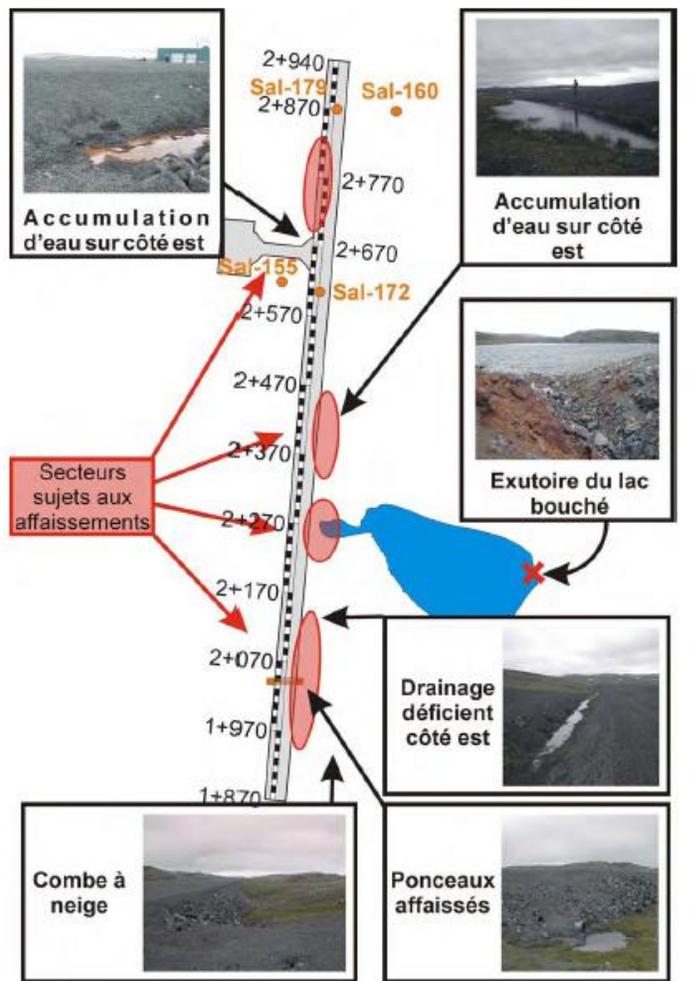


Figure 4.1 : Exemples de problématiques liées aux aménagements hydrologiques inadéquats sur une piste d'atterrissage au Nunavik (tirée de Allard et autres, 2007, p. 83)

4.1.6 Dénéigement

Le déneigement des routes est une autre activité qui, par l'accumulation de neige au pied des talus, contribue au réchauffement du pergélisol. En plus du déneigement, le développement vertical du remblai constitue un obstacle sur lequel s'accumule la neige soufflée par le vent (Grondin et autres, 2005). Plus le remblai est haut, plus il tend à bloquer la neige. L'ampleur de cet impact peut être, à court et moyen terme, plus important que les changements climatiques sur le régime thermique du pergélisol (Allard et autres, 2007).

De part et d'autre de la route, le remblai devient de plus en plus mince et la neige s'y accumule durant la saison hivernale (Doré et Beaulac, 2007). Agissant comme une couche isolante, la neige prévient les températures glaciales de l'hiver de se propager en profondeur, ce qui fait que la couche active demeure assez épaisse (Boucher et autres, 2010; Allard and Lemay, 2012). Lorsque vient le printemps, la neige fond et crée des accumulations d'eau en bordure de la route. Par son infiltration dans le remblai, cela a pour effet d'accentuer le dégel du pergélisol (Boucher

et autres, 2010). À l'été, les accumulations qui demeurent en place absorbent une quantité importante d'énergie qui est transférée progressivement dans le sol (Allard and Lemay, 2012). À cause de ces phénomènes, le dégel du pergélisol est d'abord noté au pied du remblai puis directement sous la route, l'épaisseur du remblai agissant pour prévenir du réchauffement estival (Boucher et autres, 2010).

4.1.7 Zones de stockage des matériaux granulaires

Une fois la route en exploitation, l'entretien se doit d'être rigoureux et régulier puisque la fonte du pergélisol se traduit par une surface hétérogène marquée de dépressions et de fissures. Ces conséquences seront d'ailleurs traitées plus en détail à la section 4.2.

Pour la remise en état de la route, les besoins en matériaux granulaires peuvent s'avérer importants. Des zones d'empilements sont donc à prévoir à proximité de la route pour en faciliter la réfection (BERE, 2013). Ces zones, un peu comme le fait le remblai, influencent le régime thermique du pergélisol en agissant comme isolant et en modifiant les réseaux de circulation de l'eau souterraine (de Grandpré et autres, 2010).

4.1.8 Activités de moindre impact

Les activités listées précédemment ont été identifiées à partir de la revue de la littérature scientifique et des documents d'ÉIE consultés. La lecture de la Directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet de route dans le Québec méridional a toutefois soulevé quelques activités qui méritent d'être discutées. Si ces activités ne sont pas spécifiquement étudiées pour les régions nordiques, il est possible que ce soit parce que leurs impacts sont de moindre importance. Quoi qu'il en soit, le présent travail ne vise pas à quantifier la magnitude des impacts, puisqu'elle peut certainement varier selon les particularités de chaque projet. C'est au promoteur, à l'intérieur du processus d'ÉIE, que revient la tâche de le faire. Certaines activités jugées de moindre impact sont donc soulevées avec les effets qu'il est théoriquement possible d'associer.

À l'étape de la construction, le nivellement, qui peut comporter l'ajout ou l'enlèvement de sols naturels modifie le profil thermique du sol puisque la couche active atteint une profondeur différente (Allard et autres, 2007). Les activités de compaction, via la circulation de véhicules lourds, perturbent également le régime thermique du sol en modifiant sa porosité (Boucher et autres, 2010). Évidemment, les caractéristiques hydriques et hydrogéologiques s'en trouvent affectées puisque la capacité d'infiltration du sol naturel est diminuée (de Grandpré et autres, 2010).

La présence et la localisation de panneaux de signalisation sont également susceptibles de produire, localement, un impact sur le pergélisol. En reflétant la lumière du soleil vers certaines zones précises de manière récurrente, les panneaux de signalisation contribuent à augmenter

dans ces zones l'absorption d'énergie dans le sol, ce qui indirectement contribue à modifier son régime thermique.

À l'étape de l'exploitation, le transport de matériaux et matières premières par des camions lourds génère des impacts sur le pergélisol. Dans le sud du Québec, les camions voient leurs capacités de chargement diminuées en période de dégel pour éviter les effets de compaction lorsque le sol n'est pas stable thermiquement. Dans le nord, les périodes de dégel sont théoriquement plus longues puisque le sol gèle plus en profondeur. La fréquence de la circulation automobile et le poids des véhicules favorisent ainsi les instabilités du pergélisol, ce qui peut se concrétiser en l'apparition de fissures et d'affaissements. (MTQ, 2013)

Enfin, l'utilisation d'abrasifs, lorsqu'il s'agit de sels de déglacage, contribue à entraîner de l'énergie dans le système. Cet apport de chaleur est fait via la transformation de la glace en eau, qui ruisselle ensuite vers le talus de la route. Les sels de déglacage, utilisés pour la sécurité routière, sont requis principalement pour les routes asphaltées et non pas celles recouvertes de matériel granulaire. (Ramakrishna et Viraraghavan, 2005)

4.2 Conséquences observables

En combinaison avec les changements climatiques, les activités décrites précédemment dégradent le pergélisol, ce qui a des conséquences observables pour la construction et l'entretien des routes. Ces conséquences ont trois formes, soit l'affaissement, les fissures et les glissements de terrain. Ce sont les conséquences directes de la dégradation du pergélisol. À leur tour, ces conséquences ont des impacts, à savoir la diminution du confort et de la sécurité routière. Ce sont les conséquences indirectes.

4.2.1 Affaissements

L'affaissement, aussi connu sous le nom de tassement ou dépression, est un phénomène qui s'explique par une réalité physique bien connue (Doré et Beaulac, 2007). Sous forme de glace, l'eau a un volume supérieur de 9 % que sous forme liquide (de Grandpré, 2012). Cela explique notamment le phénomène des pingos et palsas, ces collines soulevées par des amoncellements de glaces (de Grandpré, 2012). À l'inverse, lorsque l'eau passe d'un état solide vers un état liquide, le volume diminue et un affaissement se produit (de Grandpré, 2012). Le sol qui auparavant pouvait être considéré aussi solide que du béton se déforme, se ramollit, et perd toutes ses capacités structurantes (Allard and Lemay, 2012).

Les affaissements peuvent être plus ou moins profonds selon les volumes de glace qui sont en jeu. La figure 4.2 présente un affaissement soudain et de grandes envergures. Lorsque le sol s'affaisse sous une emprise routière, cette dernière est nécessairement endommagée, et cela se répète à long terme (Buteau et autres, 2010).



Figure 4.2 : Affaissement d'un remblai routier en Alaska (tirée de : Voyer, 2009, p. 51)

Dans le pergélisol, les volumes de glace sont disposés de façons hétérogènes. Ainsi, lorsqu'ils fondent, les affaissements sont notés sporadiquement dans le temps et dans l'espace, laissant place à une chaussée qui présente de nombreuses distorsions (Grondin et autres, 2005).

La figure 4.3 illustre l'évolution d'un affaissement au centre d'une route située au Yukon. Les photographies ont été prises trois années consécutives. Ainsi, les mesures effectuées révèlent un affaissement d'environ 40 centimètres par année pour cette portion, malgré le fait que des activités de remblayage aient eu lieu.



Figure 4.3 : Évolution sur trois années d'une dépression au centre d'une route au Yukon (tirée de : de Grandpré, 2012, p. 112)

Le phénomène de l'affaissement est assez répandu dans le nord du Québec. Dans une étude réalisée en 2005 et qui porte sur l'état des douze pistes d'atterrissage au Nunavik sous la responsabilité du MTQ, seules deux installations ne présentaient aucun signe d'affaissement (Grondin et autres, 2005). La première parce qu'elle est située directement sur le roc et la seconde parce qu'elle avait subi un reprofilage complet quelques années auparavant (Grondin et autres, 2005). La figure 4.4 témoigne d'ailleurs de la rapidité avec laquelle l'affaissement se développe.



Figure 4.4 : Évolution des affaissements sur la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq entre 2004 et 2005 (tirée de : Guimond et autres, 2008, p. 32)

L'affaissement peut également être beaucoup plus étendu. Dans la carrière représentée à la figure 4.5, l'élimination de la végétation de surface et l'excavation de matériel a conduit à cet affaissement.



Figure 4.5 : Affaissement du pergélisol dans un banc d'emprunt du Territoire du Nord-Ouest (tirée de : BERE, 2013, p.154)

4.2.2 Fissures

La deuxième conséquence facilement repérable qui témoigne du réchauffement du pergélisol est l'apparition de fissures. À cause du remblai et de l'accumulation de neige, la couche active s'établit plus en profondeur en bordure des routes en comparaison avec la portion centrale de la route (Doré et Beaulac, 2007). Il y a donc une perte de capacité portante à cet endroit, ce qui cause un mouvement vers l'extérieur du remblai situé de part et d'autre de la route. La figure 4.6 illustre clairement ce mouvement appelé « rotation des épaulements » (Doré et Beaulac, 2007).

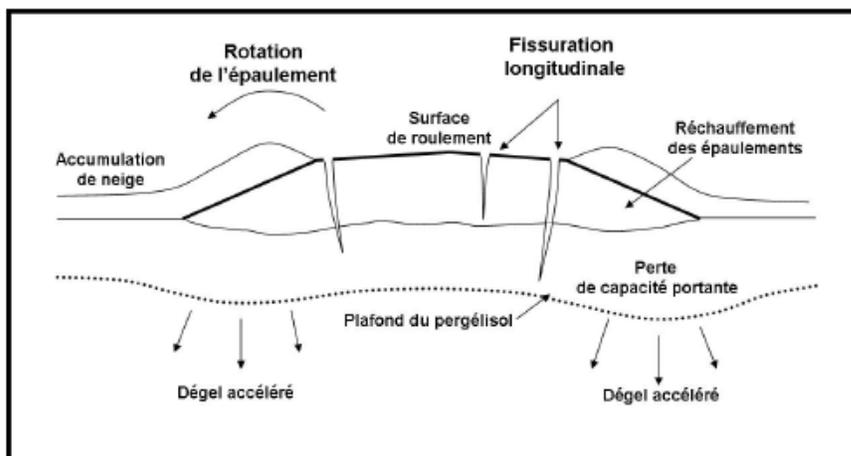


Figure 4.6 : Mécanisme de rotation de l'épaulement après le dégel du pergélisol en bordure de route (tirée de : Doré et Beaulac, 2007, p. 10)

Le résultat de ce mouvement est que des fissures longitudinales, c'est-à-dire parallèles au sens de la route, apparaissent dans les talus et sur la surface de roulement (Doré et Beaulac, 2007; de Grandpré et autres, 2010). Ces fissures sont facilement observables dans les photographies de la figure 4.7 prises sur différents tronçons d'une route en Alaska (Doré et Beaulac, 2007).



Figure 4.7 : Exemples de fissures longitudinales dans l'accotement et sur la chaussée causées par une rotation de l'épaulement (tirée de : Doré et Beaulac, 2007, p.10)

4.2.3 Glissements de terrain

En territoire nordique, les glissements de terrain s'expliquent par des principes similaires à ceux observés plus au sud. La principale différence réside dans le fait que c'est toute la couche active qui se détache, principalement lorsque le pergélisol est riche en glace (Allard and Lemay, 2012). Ces glissements de terrain sont souvent appelés « détachements de la couche active » en milieu de pergélisol (Allard and Lemay, 2012). Comme le témoigne la figure 4.8, les détachements de la couche active du pergélisol peuvent être assez larges.

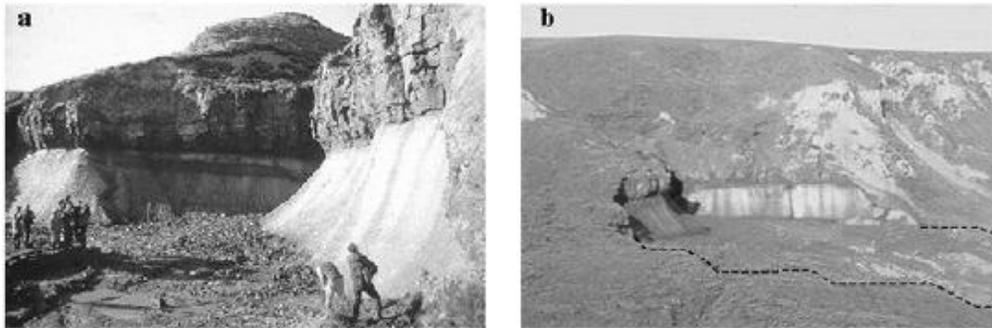


Figure 4.8 : (a) Pergélisol riche en glace, et (b) Détachement de la couche active (tirée de : Nelson et autres, 2002, p. 205)

Comme en régions tempérées, les glissements de terrain peuvent entraîner des désastres majeurs si les infrastructures se trouvent à proximité (Nelson et autres, 2002). À titre d'exemple, un détachement de la couche active a fait une vingtaine de morts en Russie en 1966 (Nelson et autres, 2002).

Les détachements de la couche active peuvent survenir à tout moment, mais les probabilités sont plus grandes vers la fin de l'été quand la couche active atteint un maximum de profondeur (Allard and Lemay, 2012). Si la couche active s'introduit dans le pergélisol, les probabilités augmentent également (Allard and Lemay, 2012). Spécifiquement, lorsque le sol dégèle à l'interface entre la couche active et le pergélisol, l'eau devenue liquide contribue à rendre la portion supérieure du sol moins solide. Le glissement de terrain se produit lorsque cette couche givée d'eau se détache et glisse sur la surface parfaitement dure qu'est le pergélisol demeuré gelé (Allard and Lemay, 2012).

4.2.4 Conséquences indirectes : dégradation du confort et de la sécurité

Les affaissements, les fissures et les glissements de terrain causés par la fonte du pergélisol ont des conséquences indirectes au-delà des coûts d'entretien qu'ils entraînent (Allard and Lemay, 2012). Ces conséquences affectent le milieu humain, qui fait partie des composantes de l'environnement à étudier lors d'ÉIE. Alors que les détachements induisent des risques au niveau de la sécurité des usagers de la route, les fissures et affaissements créent une dégradation du confort (Richard et autres, 2009). Précisément, ce sont les longues ondulations, entre 5 et 20 mètres, qui ont le plus d'impact sur le confort des usagers puisqu'elles produisent des oscillations à même l'habitacle du véhicule (Richard et autres, 2009). Les distorsions hétérogènes de la surface, comme les fissures et les dépressions mineures, causent quant à elles des vibrations qui diminuent la sécurité routière (Richard et autres, 2009).

4.3 Développement de la matrice des impacts appréhendés

Les activités décrites dans la section 4.1 ont un impact sur une ou plusieurs composantes de l'environnement. Dans le cadre des ÉIE, ces relations causales sont représentées à l'aide d'un outil, soit la matrice des impacts appréhendés (André et autres, 2010). Théoriquement, la matrice regroupe toutes les activités engendrées par un projet de sa conception à la fermeture ainsi que les composantes de l'environnement (eau, air, sol, faune, flore, milieu humain). L'impact marqué dans la matrice indique qu'une conséquence peut être observée. Les conséquences directes et indirectes discutées à la section 4.2 sont le résultat d'une modification du régime thermique du pergélisol. Cette modification peut à la fois être originaire des activités liées à la construction de la route, mais aussi des changements climatiques. Pour que la matrice soit complète, elle doit témoigner de ces deux relations.

D'abord, le défi de l'intégration des changements climatiques dans la matrice est discuté. Puis, un schéma logique présentant l'ensemble des relations qui existent est présenté. Ensuite, l'option de la matrice à deux niveaux pour tenir compte de la question des changements climatiques est proposée. Enfin, la matrice des impacts appréhendés est présentée.

4.3.1 Changements climatiques

Il est accepté dans la littérature scientifique que les changements climatiques observés sont, au moins en partie, le résultat de l'activité humaine depuis le début de l'ère industrielle (Lemke et autres, 2007). Ces changements climatiques ont des conséquences directes et indirectes sur plusieurs composantes de l'environnement, dont le pergélisol. Intuitivement, il est normal d'inclure la question des changements climatiques comme une source d'impact dans la matrice.

Cependant, les directives qui ont été consultées proposent plutôt de l'inclure comme une composante de l'environnement (ACEE, 2012; BERE, 2013). En l'intégrant ainsi, le promoteur se questionne sur les activités du projet qui auront un impact sur la composante « changements climatiques » et non des impacts des changements climatiques sur les autres composantes de l'environnement. Comment intégrer à la matrice les impacts qu'ont les changements climatiques sur les routes via la fonte du pergélisol?

Le Comité fédéral-provincial-territorial sur le changement climatique et l'évaluation environnementale (CFCCEE) a d'ailleurs soulevé la difficulté d'incorporer les changements climatiques aux ÉIE (CFCCEE, 2003). Leur proposition, présentée à l'Annexe II, ne prévoit pas de traiter la question par le biais de la matrice des impacts, mais plutôt selon un processus distinct.

Dans le cadre de cet essai, l'objectif était de produire une matrice contenant l'ensemble des impacts sur la stabilité du pergélisol. Il a donc été nécessaire de chercher une solution pour l'intégration adéquate des changements climatiques dans la matrice. Pour visualiser l'ensemble

des relations en jeu et pour une meilleure compréhension, l'élaboration d'un schéma logique est devenue nécessaire.

4.3.2 Schéma logique

La matrice est un outil efficace pour analyser les relations directes entre deux éléments. Lorsque plusieurs types de relations, dont des relations indirectes, doivent être représentées, elle n'est plus aussi efficace. La figure 4.9 présente un schéma logique qui illustre l'ensemble des relations qui ont été identifiées comme liées au régime thermique du pergélisol. Toutes ces relations doivent être comprises dans la matrice.

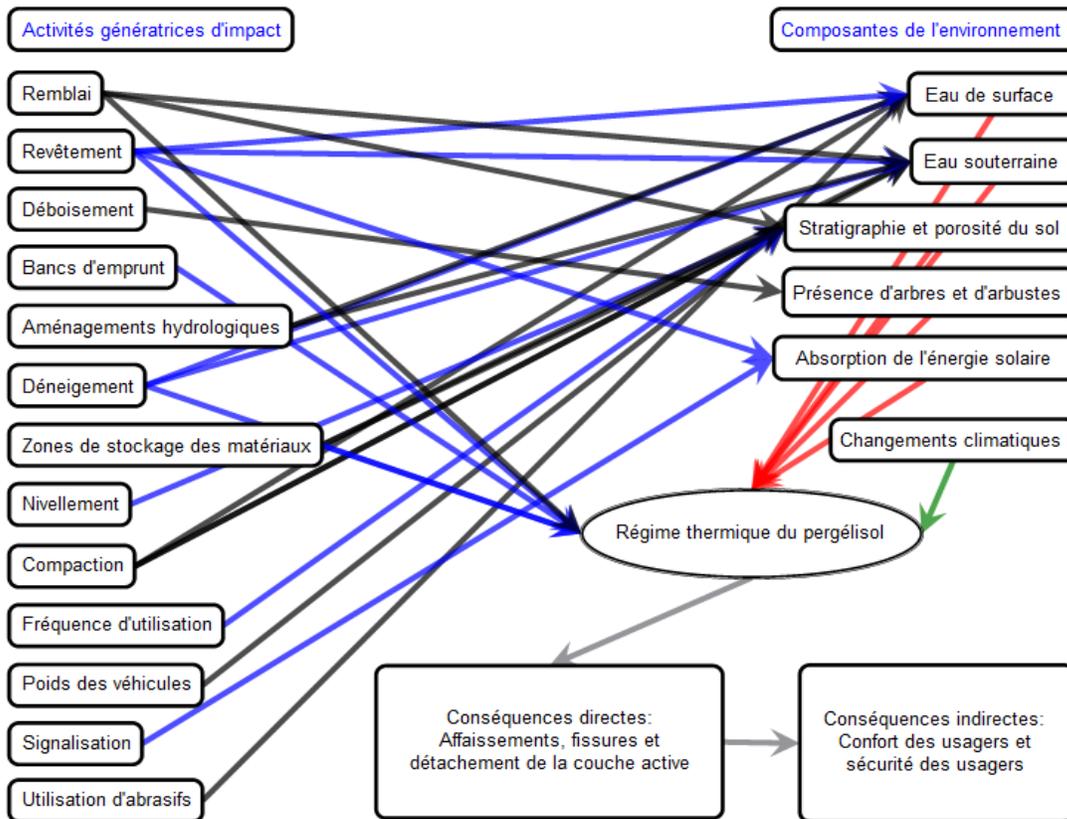


Figure 4.9 : Schéma logique du régime thermique du pergélisol

Les activités génératrices d'impact, listées du côté gauche, sont reliées à différentes composantes de l'environnement, listées du côté droit, selon les impacts qui ont été décrits à la section 4.1. Les flèches sont de couleur bleue ou noire simplement pour faciliter la lecture lorsqu'elles deviennent denses. Si on prend l'exemple du remblai, il a un impact direct sur l'eau souterraine, la stratigraphie et la porosité du sol, ainsi que sur le régime thermique. Toutefois, les composantes de l'environnement affectées par les activités ont elles aussi un impact sur le régime thermique du pergélisol. Cette relation indirecte est indiquée par les flèches rouges. Dans

la colonne des composantes de l'environnement, on retrouve les changements climatiques. Bien que les activités génératrices d'impact affectent également les changements climatiques, c'est l'effet des changements climatiques sur la stabilité du pergélisol qui constitue l'impact majeur. La relation est indiquée par une flèche verte. Les conséquences directes et indirectes qui résultent de la modification du régime thermique du pergélisol sont aussi représentées.

Ce sont les relations établies par les flèches rouges et vertes qui ne peuvent pas être traduites par une matrice d'impact classique. La matrice peut toutefois être améliorée pour prendre en compte ces relations.

4.3.3 Matrice à deux niveaux

Pour que la matrice représente adéquatement les relations complexes qui existent entre les activités liées à la construction d'une route, les composantes de l'environnement et les changements climatiques, une adaptation a été faite par rapport à une matrice classique (Pelletier, 2012). Un deuxième niveau a été ajouté. Dans ce niveau, on retrouve encore des composantes de l'environnement, mais qui sont affectées indirectement par les activités listées. Le régime thermique du pergélisol est nommé puisque par exemple, une modification à la végétation (déboisement) entraîne indirectement le réchauffement du pergélisol. Aussi, les composantes que sont le confort et la sécurité des usagers sont présentes puisqu'elles sont affectées indirectement par le réchauffement du pergélisol.

Comme le suggéraient les directives, les changements climatiques ont également été inscrits dans les composantes de l'environnement (ACEE, 2012; BERE, 2013). L'impact direct qu'ont les changements climatiques sur le régime thermique du pergélisol est établi. La matrice du tableau 4.1, qui contient les activités sources d'impact et les composantes de l'environnement de la matrice finale présente les liens logiques entre les divers éléments.

Tableau 4.1 : Matrice à deux niveaux illustrant les relations d'impacts directs et indirects

		Composantes de l'environnement						
		Stratigraphie et porosité du sol	Régime thermique du pergélisol	Absorption de l'énergie solaire	Eau de surface	Eau souterraine	Présence d'arbres et d'arbustes	Changements climatique
Sources d'impact	Remblai							
	Revêtement							
	Déboisement						X	
	Bancs d'emprunt							
	Aménagements hydrologique							
	Nivellement							
	Compaction							
	Fréquence d'utilisation							
	Poids des véhicules							
	Signalisation							
	Utilisation d'abrasifs							
	Déneigement		X					
	Zones de stockage des matériaux							

Légende:
 Impact: X
 Impact direct: → (bleu)
 Impact indirect: → (rouge)

2e Niveau:

		Composantes de l'environnement						
		Stratigraphie et porosité du sol	Régime thermique du pergélisol	Absorption de l'énergie solaire	Eau de surface	Eau souterraine	Présence d'arbres et d'arbustes	Changements climatique
							X	X
	X							
	X							

4.3.4 Matrice des impacts appréhendés

De manière générale, une matrice est créée en présentant dans un tableau une liste de toutes les activités susceptibles de générer un impact et une liste de toutes les composantes de l'environnement. Un travail de recherche doit ensuite être fait pour déterminer si un impact est possible entre chaque activité et chaque composante de la matrice. Lorsqu'un impact est possible, un « X » est placé dans la matrice et l'impact est décrit, soit brièvement dans la matrice ou avec plus de détails dans le texte. Les composantes qui ne sont affectées par aucune activité peuvent ensuite être retirées. (André et autres, 2010)

Le développement de la matrice des impacts appréhendés s'est fait parallèlement à la revue de la littérature. Lorsque toutes les activités génératrices d'impact et toutes les composantes de l'environnement ont été identifiées et avec l'aide du schéma logique réalisé, les impacts ont été marqués. La justification derrière chacun de ces impacts se trouve dans la section 4.1.

La matrice permet de saisir rapidement l'étendue des conséquences sur la stabilité du pergélisol qu'engendre un projet routier. En effet, la matrice permet de constater les effets cumulatifs qu'ont plusieurs activités sur une même composante. Par exemple, le type de revêtement et la signalisation ont un impact direct sur l'absorption de l'énergie solaire. Ensemble, les effets se combinent et les conséquences deviennent plus importantes. Dans le cas du régime thermique du pergélisol, les effets de nombreuses activités s'additionnent aux changements climatiques pour créer un impact majeur.

Tableau 4.2 : Matrice des impacts appréhendés d'un projet routier et des changements climatiques sur le régime thermique du pergélisol

		Composantes de l'environnement						
		Stratigraphie et porosité du sol	Régime thermique du pergélisol	Absorption de l'énergie solaire	Eau de surface	Eau souterraine	Présence d'arbres et d'arbustes	Changements climatiques
Sources d'impact	Remblai	X	X			X		
	Revêtement		X	X	X	X		
	Déboisement		X				X	
	Bancs d'emprunt	X	X				X	
	Aménagements hydrologiques		X		X	X		
	Nivellement	X	X					
	Compaction	X			X	X		
	Fréquence d'utilisation	X						
	Poids des véhicules	X						
	Signalisation			X				
	Utilisation d'abrasifs				X			
	Déneigement		X		X	X		
	Zones de stockage des matériaux	X	X			X		
		Composantes de l'environnement						
		X		X	X	X	X	Régime thermique du pergélisol
			X					Sécurité des usagers
			X					Confort des usagers

Lorsque l'ensemble des impacts est décrit, une matrice des impacts potentiels est créée à partir de la première afin que l'évaluation exhaustive des impacts ne s'applique qu'à ceux qui affectent les éléments valorisés dans le projet. Dans le cas où le pergélisol est un élément valorisé, c'est-à-dire un élément à protéger spécifiquement, les activités et les composantes listées dans la matrice du tableau 4.2 devraient se retrouver dans les matrices des impacts potentiels pour un projet de route. En évaluant les impacts, le promoteur du projet déterminera si des mesures d'atténuation doivent être mises en place.

4.4 Résumé

Deux relations ont été étudiées : (1) les impacts des changements climatiques sur la stabilité du pergélisol et (2) les impacts des activités liées au projet routier sur la stabilité du pergélisol. Les activités influencent directement le régime thermique du pergélisol ou indirectement via des composantes de l'environnement. Plusieurs activités ont été décrites. Certaines semblent avoir un impact plus important. À ce titre, le remblai, le déneigement et les aménagements hydrologiques retiennent une plus grande attention dans le milieu scientifique. Avec les changements climatiques, ces activités ont des conséquences observables, à savoir les affaissements, les fissures et les glissements de terrain. La diminution du confort et de la sécurité des usagers sont quant à elles des conséquences indirectes du réchauffement du pergélisol.

À partir des activités génératrices d'impact et des composantes de l'environnement qui sont affectées par ces activités, il est possible de créer une matrice des impacts appréhendés. Afin d'intégrer les changements climatiques à cette matrice, le format classique de l'outil a dû être modifié. Une matrice à deux niveaux a été élaborée. Cette matrice permet d'illustrer l'ensemble des relations causales directes et indirectes entre les changements climatiques, les activités génératrices d'impact et les composantes de l'environnement.

Les relations directes précisées dans la matrice ont toutes les mêmes conséquences directes sur la route. Afin de diminuer ces conséquences, si elles sont jugées inacceptables pour la poursuite du projet, le promoteur doit opter pour des mesures d'atténuation.

5 MESURES D'ATTÉNUATION

Le chapitre précédent a mis en lumière les conséquences négatives qu'ont les activités liées à l'établissement d'une route et les changements climatiques. Les affaissements, les fissures et les détachements de la couche active nuisent à la sécurité et au confort des usagers de la route. Il est toutefois possible de pallier à ces problématiques grâce à des techniques développées spécifiquement pour le climat nordique.

Dans le contexte d'une ÉIE, les mesures d'atténuation visent à minimiser les effets négatifs observables sur l'environnement. Selon le processus établi, après avoir évalué les impacts par une analyse rigoureuse, les impacts jugés inévitables et trop importants doivent être réduits ou éliminés (BERE, 2013). C'est à ce moment que les mesures d'atténuation entrent en jeu. Elles permettent de réduire l'importance des impacts négatifs afin que le projet se réalise.

Dans ce chapitre, différentes mesures d'atténuation visant à éviter les bouleversements dans le régime thermique du pergélisol sont présentées. Dans la deuxième section, le cadre décisionnel que doit respecter le promoteur est présenté. Bien que l'efficacité de certaines de ces méthodes ait été prouvée au Québec, les coûts engendrés par leur mise en place à grande échelle constituent un aspect limitatif à leur implantation. La question économique ouvre alors la voie à l'application progressive des mesures d'atténuation selon les observations et les réalités du terrain.

5.1 Mesures d'atténuation

Les mesures d'atténuation applicables dans le cadre d'un projet routier ont pour la plupart été développées en Alaska par le département des transports (*Alaska Department of Transportation and Public Facilities*) et par l'Université d'Alaska (Doré et Beaulac, 2007). Depuis quelques décennies, plusieurs techniques ont été élaborées scientifiquement et testées sur un terrain affecté depuis longtemps déjà par les changements climatiques (Lachenbruch and Marshall, 1986; Voyer, 2009). L'application des techniques de construction vise à minimiser les effets de la route sur le régime thermique du pergélisol sous-jacent.

Plusieurs moyens permettent d'obtenir ce résultat. Les techniques d'atténuation sont divisées en quatre catégories : (1) techniques visant à réduire l'entrée de chaleur, (2) techniques visant à extraire la chaleur des remblais, (3) techniques visant à adapter le remblai, et (4) autres techniques visant à conserver le régime thermique du pergélisol (Doré et Beaulac, 2007). Chacune de ces catégories fait l'objet d'une section distincte où plusieurs techniques sont décrites.

5.1.1 Techniques visant à réduire l'entrée de chaleur

La première catégorie de techniques a pour objectif de diminuer l'énergie qui entre dans les remblais et qui ultimement, augmente les températures du pergélisol et l'épaisseur de la couche

active. À ce titre, les trois techniques suivantes sont présentées : isolation thermique, pare-soleil ou pare-neige et surface réfléchissante.

Isolation thermique - Cette première technique vise à isoler le pergélisol des températures chaudes de l'été. De manière générale, elle consiste à augmenter de l'épaisseur du remblai. Par conséquent, la couche active se développe à l'intérieur du remblai et le plafond du pergélisol remonte vers la surface sous l'emprise de la route (Allard et autres, 2007). Cette technique fonctionne bien lorsque le pergélisol est froid (température moyenne du sol inférieure à 1°C) puisque la couche active est généralement peu profonde. Par contre, pour un pergélisol près de 0°C où la couche active est très épaisse, la hauteur de remblai nécessaire au bon fonctionnement de la technique peut être importante, rendant la technique moins appropriée (Ficheur, 2011). Un remblai développé en hauteur entraîne également une plus grande accumulation de neige au pied des talus, ce qui n'est pas souhaitable pour conserver le pergélisol (de Grandpré, 2012). De plus, puisque l'épaisseur du remblai est beaucoup plus faible de part et d'autre de la route, l'efficacité de la technique s'en retrouve automatiquement diminuée (Ficheur, 2011). Durant l'été, cette technique diminue la quantité de chaleur qui entre dans le sol. Cependant, durant la saison hivernale, l'isolation se traduit par une plus petite quantité de chaleur évacuée. Par conséquent, les gains réalisés durant la période estivale doivent surpasser les pertes absorbées durant l'hiver pour que la technique demeure efficace (Ficheur, 2011).

Pare-soleil et pare-neige - Cette deuxième technique prévoit l'installation d'immenses écrans surélevés, le long des talus. En été, les écrans reflètent les rayons du soleil alors qu'en hiver ils interceptent la neige. L'espace entre le sol et l'écran assure une bonne circulation d'air et évite l'effet d'isolation (Ficheur, 2011). Bien que l'efficacité de cette technique soit démontrée, sa mise en œuvre demande des investissements majeurs (Ficheur, 2011). L'installation doit notamment être combinée à des glissières de sécurité visant à empêcher les sorties de route dont les conséquences peuvent être pires à cause de l'installation (Ficheur, 2011). De plus, les forts vents peuvent soulever et briser les écrans, ce qui peut nécessiter des coûts d'entretien importants (Ficheur, 2011).

Surface réfléchissante - Cette troisième technique consiste simplement à augmenter l'albédo de la surface de la route afin de refléter au maximum la lumière du soleil (Guimond et autres, 2008). En appliquant un revêtement pâle, comme de la peinture blanche, l'effet sur l'entrée de chaleur dans le remblai est important comme le témoignent les photographies de la figure 5.1 (Doré et Beaulac, 2007). Trente ans après l'application de la peinture, la route, visiblement non entretenue, est en bien meilleur état là où la peinture avait été appliquée (Voyer, 2009).

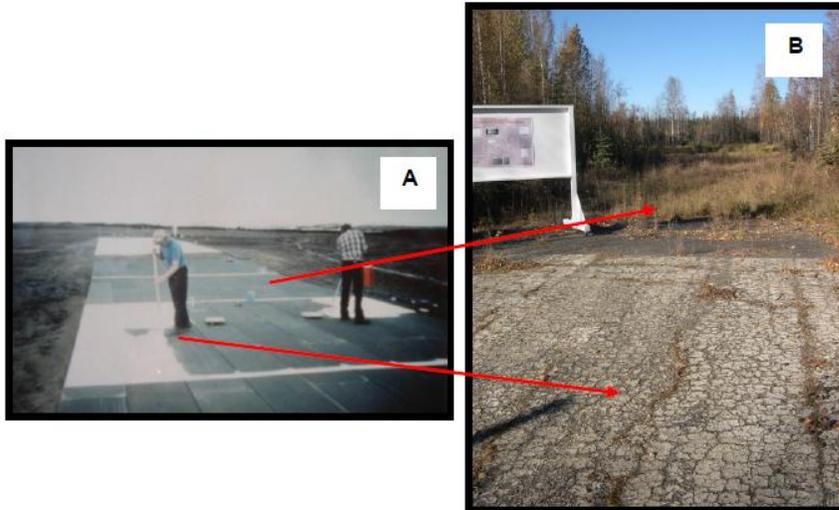


Figure 5.1 : Expérimentation de la surface réfléchissante (a) application (b) état après 30 ans (tirée de : Voyer, 2009, p. 69)

Cette technique est à première vue relativement simple à mettre en place. Cependant, les coûts d'application et d'entretien peuvent devenir importants puisque la peinture s'use rapidement et qu'il peut être nécessaire de la réappliquer périodiquement (Doré et Voyer, 2010). La figure 5.2 présente d'ailleurs un exemple de détérioration de la peinture. Les coûts liés à l'entretien sont toutefois moins élevés que ceux engendrés par la reconstruction de la route. Si des affaissements se produisent et qu'ils sont comblés par du gravier, la circulation de véhicule transporte ces particules sur les surfaces pâles environnantes, réduisant ainsi leurs efficacités (Juneau et autres, 2007). Une autre problématique, soit la diminution de l'adhérence du véhicule, est liée à l'application de peinture blanche. Dans les premières années, cette problématique a diminué son utilisation, mais du sable est maintenant ajouté à la peinture pour conserver une bonne adhérence (Doré et Beaulac, 2007; Doré et Voyer, 2010). Pour contrer notamment le besoin d'entretien important que demande la peinture, des nouveaux produits sont actuellement en développement (Doré et Beaulac, 2007). Par exemple, la compagnie Shell travaille sur un béton bitumineux de couleur pâle (Doré et Voyer, 2010).



Figure 5.2 : Exemple de détérioration de la peinture blanche (tirée de : Doré et Voyer, 2010, p. 54)

Ces premières techniques visent principalement à diminuer l'entrée de chaleur durant l'été. Il est cependant possible de les combiner avec les techniques suivantes qui elles, prévoient l'extraction de la chaleur, ce qui a pour effet de diminuer les températures hivernales (Voyer, 2009).

5.1.2 Techniques visant à extraire la chaleur des remblais

La deuxième catégorie regroupe trois techniques qui consistent à extraire la chaleur des remblais surtout durant l'hiver (Guimond et autres, 2008). Les thermosiphons, les drains de chaleur et les remblais à convection d'air sont discutés.

Thermosiphons - La technique du thermosiphon est en fait la combinaison de tubes fermés descendants dans le remblai et où circule un liquide, et d'un condensateur situé à la surface de la route (Ficheur, 2011). Le liquide froid descend dans le remblai et se réchauffe, créant de l'évaporation. L'élément gazeux remonte vers la surface, où il retrouve sa phase liquide dans le condensateur. L'efficacité de cette technique a été prouvée dans une section du tracé Qinghai-Tibet, mais les coûts d'installations sont majeurs (Ficheur, 2011). Cette technique devient alors plus pertinente pour un usage de construction de bâtiments ou à des localisations sur une route où le pergélisol se révèle très instable.

Drains de chaleur - La technique du drain de chaleur consiste à installer à l'intérieur du remblai un drain fait d'un matériel géocomposite possédant de fortes capacités de drainage pour que l'eau ne s'y accumule pas (Doré et Beaulac, 2007). Fonctionnant comme une cheminée, l'air froid pénètre dans le drain via une prise d'air localisée au pied du remblai (Doré et Beaulac, 2007). Par conduction, l'air chaud circule d'abord entre les particules du remblai pour se rendre au drain (Beaulac and Doré, 2007). Ensuite, l'air froid pousse l'air chaud accumulé qui, par le mécanisme de convection, est expulsé vers le haut (Doré et Beaulac, 2007). La figure 5.3 présente le fonctionnement de cette technique.

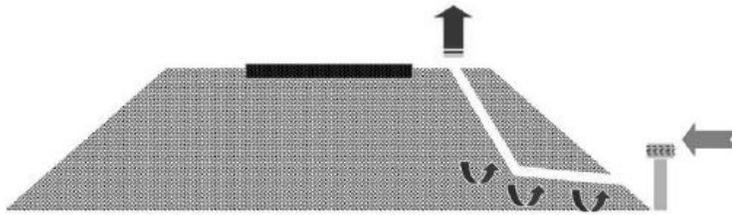


Figure 5.3 : Principe du drain thermique (tirée de : Beaulac et Doré, 2007, p. 2)

Bien que cette technologie ait démontré des résultats positifs, par exemple une diminution de la couche active d'environ 30 %, le coût de transport lié à l'importation de géocomposite sur le terrain demeure important (Doré and Beaulac, 2007).

Remblais à convection d'air - Le remblai à convection d'air est possiblement la technique la plus facile à mettre en place. Le principe est similaire au drain thermique, à l'exception que l'entrée d'air se fait passivement entre les pierres qui composent le remblai. Il s'agit simplement de choisir un matériel de remblai ayant la capacité de bien faire circuler l'air (Allard et autres, 2007). En pratique, cela se traduit par l'utilisation de matériel granulaire ayant des diamètres variant entre quinze et trente centimètres et où peu de particules fines sont présentes (Doré et Beaulac, 2007). Durant la période hivernale, l'air froid et dense pénètre le remblai et descend. Cela crée de petites cellules de convection qui entraînent l'air chaud vers l'extérieur. Ce mouvement est illustré à la figure 5.4.

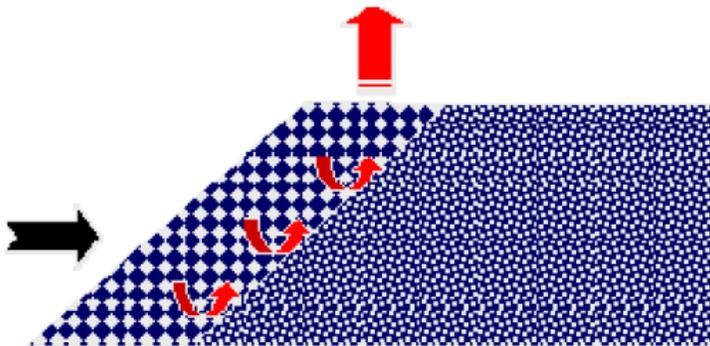


Figure 5.4 : Principe du remblai à convection d'air. La flèche noire représente l'air froid et la flèche rouge l'air chaud expulsé (tirée de : Doré et Voyer, 2010, p.9)

En plus d'être facile à mettre en place, cette technologie requiert peu d'entretien à long terme, un luxe en région nordique (Doré et Beaulac, 2007). Également, puisque les matériaux granulaires sont souvent disponibles sur place, les coûts liés au transport sont diminués (Doré et Beaulac, 2007). La figure 5.5 présente l'installation d'un remblai à convection.



Figure 5.5 : Exemples d'un remblai à convection, (a) Tibet, (b) Alaska (tirée de : Voyer, 2009, p. 61)

Pour ces trois techniques d'atténuation, il est important de mentionner la circulation de machinerie lourde liée à l'installation de la structure perturbe le régime thermique du pergélisol. Le réchauffement qui en résulte peut expliquer que les performances de ce type d'installations soient limitées durant les premières années (Guimond et autres, 2008).

5.1.3 Techniques visant à adapter le remblai

La troisième catégorie de techniques vise l'adaptation du remblai pour qu'il réagisse mieux aux conséquences des changements thermiques du sol en assumant dès le départ que ces conséquences se produiront (Grondin et autres, 2005). Les techniques discutées dans cette section sont l'utilisation de géotextiles, et l'aménagement des bermes et pentes douces.

Géotextiles - Les géotextiles ont plusieurs fonctions et sont largement utilisés dans les travaux de voiries dans le sud du Québec. Ils permettent notamment d'effectuer la séparation entre deux types de matériaux différents. Par exemple, apposer un géotextile entre un sol naturel composé de matériel fin et un remblai constitué de matériel granulaire assure que le matériel situé au-dessus ne s'enfonce pas dans celui du dessous, créant des mouvements à la surface (Ficheur, 2011). Cette technique vise principalement à limiter les tassements.

Bermes - Les bermes, ou les accotements, peuvent être élargies pour permettre au pergélisol de se stabiliser davantage (ATC, 2010). En effet, en optant pour un remblai à convection d'air dans les accotements, cela permet de refroidir le matériel sous la chaussée (Ficheur, 2011). Spécifiquement, cet aménagement permet de limiter la rotation des épaulements à l'origine de fissures longitudinales (Ficheur, 2011). Toutefois, une quantité plus importante de matériel granulaire est nécessaire pour sa réalisation.

Pentes douces - Les pentes douces sont une technique plus largement utilisée qui consiste à adoucir les pentes des talus pour éviter que la neige ne s'accumule à ses pieds (ATC, 2010). En distribuant la neige sur une plus grande superficie, l'effet isolant de la neige se retrouve limité, permettant au gel de pénétrer en profondeur (Guimond et autres, 2008). Pour obtenir de bons résultats, le gradient de la pente doit être d'environ six unités horizontales pour une unité verticale (Doré et Beaulac, 2007; ATC, 2010).

5.1.4 Autres techniques

Cette quatrième et dernière catégorie regroupe d'autres techniques qui peuvent être utilisées pour conserver le régime thermique du pergélisol. Les six techniques suivantes sont présentées : dégel provoqué, enlèvement et remplacement, correction du drainage, utilisation de surfaces non revêtues, surélévation de la route et construction en hiver.

Dégel provoqué - Comme son nom l'indique, cette technique consiste à provoquer intentionnellement le dégel du pergélisol afin d'asseoir la route sur un sol stable thermiquement (Doré et Beaulac, 2007). Pour se faire, il faut d'abord retirer la végétation et installer une mince couche de matériel granulaire (Ficheur, 2011). Ensuite, une couche de surface foncée doit être appliquée pour que le sol absorbe le maximum d'énergie solaire (Ficheur, 2011). Après quelques saisons, le pergélisol disparaît complètement et les affaissements peuvent être consolidés avant d'apposer le remblai (Grondin et autres, 2005; Ficheur, 2011).

Enlèvement et remplacement - Cette technique s'applique au pergélisol riche en glace et prévoit simplement son enlèvement et son remplacement par un matériel non susceptible d'accumuler de grande quantité d'eau (Grondin et autres, 2005). Malgré le fait qu'elle soit très coûteuse, cette technique peut être utilisée localement pour éliminer de la glace massive située à faible profondeur (Ficheur, 2011).

Correction du drainage - Afin de s'assurer que l'eau ne s'accumule pas le long des routes, il convient d'éloigner le fossé tout en s'assurant que la pente soit adéquate pour assurer un bon drainage (Doré et Beaulac, 2007). Des ponceaux surdimensionnés peuvent également être construits spécifiquement pour l'écoulement saisonnier et dans le but de « prévenir les restrictions de débit et de compenser les imprévus dans la conception » (ATC, 2010).

Utilisation de surfaces non revêtues - Bien que les routes revêtues d'asphalte ou de béton augmentent le confort des usagers, il est préférable pour le maintien du pergélisol de favoriser les surfaces en matériel granulaire. D'une part, ces surfaces absorbent moins d'énergie solaire qu'une surface revêtue et d'autre part, elles sont beaucoup plus faciles d'entretien (Doré et Beaulac, 2007).

Surélévation de la route - Dans un cas où le pergélisol est excessivement fragile et que le roc ne se trouve pas à de grandes profondeurs, il est possible de surélever la route à la manière d'un pont (Wei et autres, 2009). Cette technique d'adaptation est utilisée largement pour la construction de bâtiment, mais demeure exceptionnelle pour une route, entraînant des coûts élevés même sur une courte distance (Ficheur, 2011).

Construction en hiver - Une dernière technique d'atténuation consiste à entreprendre la construction uniquement lorsque le sol est bien gelé, c'est-à-dire vers la fin de l'automne et pendant l'hiver. Puisque le lourd équipement mécanique influence la stabilité du pergélisol, les

dommages sont minimisés lorsque la construction a lieu en période hivernale, d'autant plus que la mobilité sur le terrain est facilitée (ATC, 2010).

Dans l'ensemble, les différentes techniques visant à assurer le maintien thermique du pergélisol sont contenues entre autres dans les *Lignes directrices sur le développement et la gestion des infrastructures dans les régions du pergélisol*, document produit par l'ATC (ATC, 2010). Ce document contient toutefois une longue liste de mesures d'atténuation. D'autres sont relevées ici :

- « appliquer les meilleures pratiques de gestion en matière de contrôle de l'érosion et de la sédimentation pour la construction des fossés et les canaux de drainage transversaux;
- accéder aux sources d'emprunt et en transporter les matériaux durant les mois d'hiver;
- exécuter les activités de construction d'été (comme le nivellement et la compaction du remblai et la disposition des matériaux de revêtement) seulement lorsque la route est accessible par le remblai;
- stoker les matériaux de revêtement le long du remblai en hiver pour utilisation en été;
- réduire l'étendue des tranchées à ciel ouvert;
- niveler les pentes pour éviter les effondrements;
- niveler les aires de stockage des matériaux et les aires de travail pour faciliter le drainage;
- remettre en état les sources d'emprunt après la fin des activités de construction en nivelant les pentes pour les harmoniser avec la topographie naturelle et le drainage du secteur environnant;
- installer suffisamment de drains transversaux durant la construction pour prévenir ou atténuer la formation de flaques;
- inspecter et entretenir les ponceaux, au besoin, au printemps et à l'automne » (ATC, 2010).

5.2 Cadre décisionnel

Les technologies visant à mitiger l'impact de la route et des changements climatiques sur le régime thermique du pergélisol existent, mais encore faut-il s'assurer de leur efficacité, et avoir les moyens financiers de les mettre en œuvre et d'en assurer l'entretien (Doré et Beaulac, 2007). Dans la cadre d'une ÉIE, les mesures d'atténuation doivent viser spécifiquement les impacts négatifs jugés inacceptables. Par conséquent, ce n'est probablement pas sur toute la longueur de la route qu'elles devront être appliquées. Aussi, leur application peut varier dans le temps, selon les besoins qui se font sentir. Des décisions quant à l'application de techniques d'atténuation doivent donc être prises par le promoteur du projet.

Dans cette dernière section, l'aspect économique entre en jeu. Une première partie discute de l'applicabilité des techniques proposées dans le contexte québécois. Une deuxième partie synthétise le contexte économique dans lequel les décisions doivent être prises. Puis, l'application des techniques en amont du projet, soit à la conception et à la construction sont discutées. Enfin, l'application de techniques d'entretien et de suivi est discutée. C'est en

combinant une bonne application des techniques avant et pendant l'utilisation de la route que le promoteur sera en mesure de respecter le cadre financier auquel il est attaché.

5.2.1 Applicabilité des techniques proposées

Dans la panoplie des techniques présentées, les coûts varient de même que l'efficacité selon le type de pergélisol rencontré. Par exemple, pour un pergélisol froid et modérément riche en glace, l'isolation thermique par élévation du remblai sera possiblement suffisante. À l'inverse, pour un pergélisol proche de 0°C et très riche en glace, l'enlèvement et le remplacement peuvent s'imposer comme une mesure bien adaptée. Puisque les infrastructures routières dont il est question dans les ÉIE font souvent plusieurs dizaines de kilomètres, les paysages rencontrés varient et les types de pergélisol sont multiples. Ainsi, un même projet peut faire place à plusieurs mesures d'atténuation qui sont adaptées spécifiquement à une portion de la route. De plus, étant donné que certaines techniques sont efficaces à l'été et d'autres à l'hiver, l'utilisation conjointe de certaines d'entre elles donne de meilleurs résultats (ATC, 2010). Le tableau 5.1 révisé l'ensemble des techniques présentées. Il spécifie, s'il y a lieu, les particularités au niveau de l'applicabilité, l'ordre de grandeur des coûts de mise en œuvre, les avantages et les inconvénients.

Tableau 5.1 : Applicabilité et coûts des techniques d'atténuation (inspiré de : Voyer, 2009, p. 57)

Technique	Applicabilité	Coût	Avantages (+) et inconvénients (-)
Isolation thermique	fonctionne bien avec le pergélisol froid	moyen à élevé	(-) nécessite beaucoup de matériel granulaire (-) peut favoriser l'accumulation de neige au pied des talus
Pare-soleil et pare-neige	à éviter dans les régions de forts vents	élevé	(-) problèmes de sécurité et d'entretien lorsqu'il y a de forts vents
Surface réfléchissante	pour les routes recouvertes d'asphalte ou de béton seulement	élevé	(-) manque d'adhérence des pneus (-) besoin d'entretien régulier
Thermosiphons	utilisés surtout pour les cas de dégradation importante	très élevé	(-) nécessite une expertise
Drains de chaleur		moyen	(+) matériel de géocomposite facile à transporter et à installer (-) matériel demeure couteux (-) drain peuvent se bloquer à cause de la neige
Remblai à convection d'air		élevé	(+) matériel granulaire souvent disponible à proximité (+) peu d'entretien après la construction (-) besoin d'une grande quantité de roches
Géotextiles		très élevé	(-) risque de bris des géotextiles (-) efficace surtout pour éviter les affaissements
Bermes	utilisé en combinaison avec des techniques d'extraction d'air	élevé	(-) nécessite plus de matériel granulaire
Pentes douces		moyen	(+) peu d'expertise nécessaire à la mise en place

			(+) peu d'entretien après la construction (-) nécessite plus de matériel granulaire
Dégel provoqué		élevé	(-) nécessite plusieurs saisons avant la mise en place de la route
Enlèvement et remplacement	utilisé surtout pour le pergélisol riche en glace	moyen à élevé	(-) nécessite plus de matériel granulaire
Correction du drainage	fossé de drainage utilisé en combinaison avec les pentes douces	élevé	(-) grande capacité des ponceaux peut se révéler inutile (-) ponceaux peuvent se bloquer : nécessite un bon entretien
Utilisation de surface non revêtue		faible	(+) investissements moins élevés (+) moins d'entretien qu'une surface revêtue (-) moins de confort pour l'utilisateur
Surélévation de la route	utilisé surtout pour les cas de dégradation importante et lorsque le roc est peu profond	très élevé	(-) travaux de mise en œuvre très importants (-) structure nécessite plus d'entretien
Construction en hiver		faible	(+) facilite la mobilité sur le terrain (-) prolonge les délais de construction

Dans le contexte québécois, plusieurs chercheurs définissent les techniques suivantes comme étant les plus adaptées grâce à leur efficacité et leur applicabilité en régions éloignées : surfaces réfléchissantes, drains thermiques, remblai à convection d'air, dégel provoqué, enlèvement et remplacement, et utilisation de surfaces non revêtues (Doré et Beaulac, 2007; Voyer, 2009; Ficheur, 2011).

Au Québec, deux projets pilotes visant l'évaluation de certaines techniques ont vu le jour il y a quelques années (Voyer, 2009; Ficheur, 2011). Ainsi, le drain thermique, la surface réfléchissante, le remblai à convection d'air et l'aménagement de pentes douces ont été testés. Dans le premier cas, les résultats sont mitigés puisque des erreurs techniques ont été commises (Voyer, 2009). Le projet a d'ailleurs été abandonné depuis. Certaines recommandations ont cependant été émises :

- « l'épaisseur minimale de matériau convectif pour le remblai à convection et le drain thermique doit être de 1,5 m;
- les conditions d'enneigement local doivent être connues afin d'assurer une hauteur de conduites de ventilation d'entrée et de sortie d'air suffisante pour éviter l'obstruction en hiver;
- le drainage des remblais doit être conçu pour éviter l'accumulation d'eau en pied de talus et la concentration de l'écoulement par des chemins préférentiels sous le remblai;
- la pente d'installation optimale du drain thermique pour l'efficacité du système et la facilité d'installation est de 1H :1V » (une unité horizontale pour une unité verticale) (Boucher et autres, 2010).

En s'appuyant sur les recommandations de cette première étude, la deuxième est parvenue à démontrer l'efficacité de certaines techniques de mitigation dans le contexte nordique québécois (Ficheur, 2011). En observant la figure 5.6, on note que la pente douce, le remblai à convection et le drain thermique sont tous parvenus à diminuer l'épaisseur de la couche active en comparaison à la section de référence. À ce titre et dans le contexte spécifique de l'étude, c'est le drain thermique qui s'est avéré être le plus efficace.

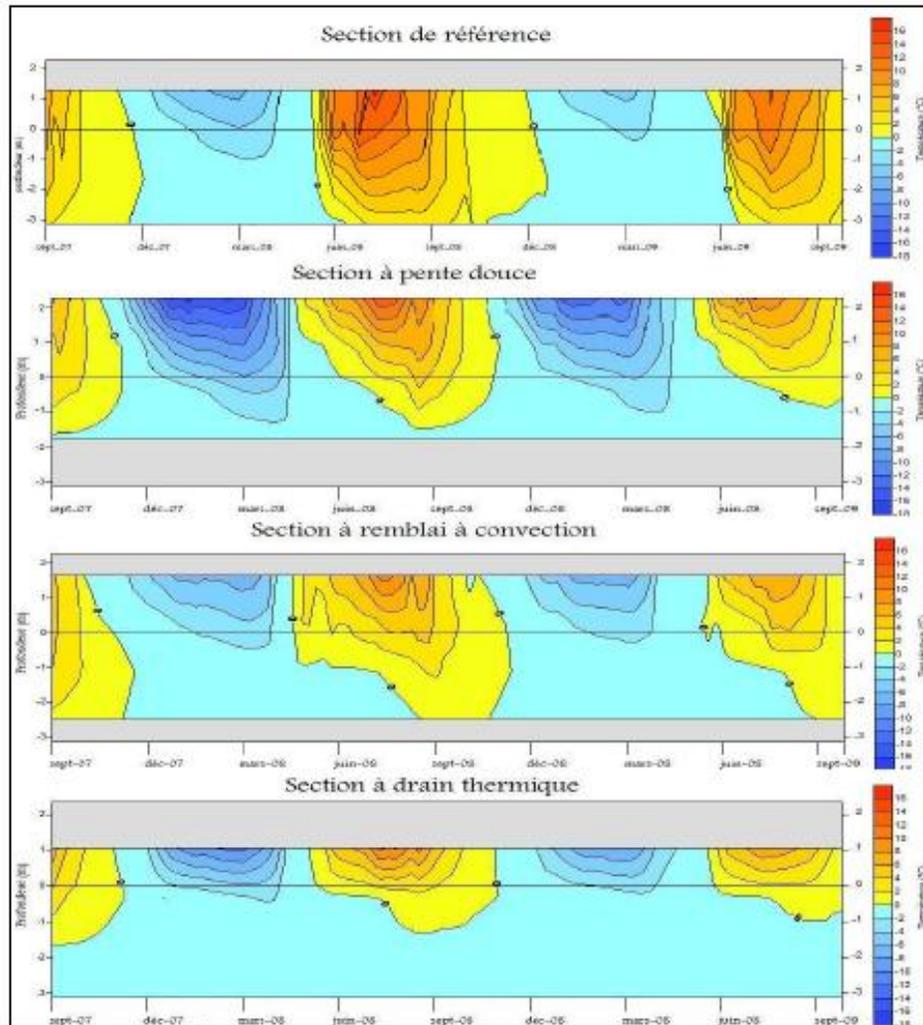


Figure 5.6 : Évolution de la température en fonction de la profondeur pour trois techniques de mitigation et une section de référence, entre septembre 2007 et octobre 2009 (tirée de : Boucher et autres, 2010, p.506)

En somme, une multitude de techniques ont été développés au courant des dernières décennies pour pallier à la fonte du pergélisol sous les infrastructures routières. Bien que ces techniques aient été testées abondamment, notamment en Alaska et en Chine, le Québec ne s'y intéresse que depuis quelques années (Voyer, 2009; Wei et autres, 2009; Ficheur, 2011). Cela explique sans doute le manque d'efficacité et les erreurs techniques notées dans le premier projet pilote. Puisque ces technologies ont démontré leurs efficacités dans le deuxième projet pilote et ailleurs, il est raisonnable de penser qu'elles peuvent être appliquées adéquatement au Québec.

5.2.2 Cadre financier

Pour qu'un grand projet d'exploitation de ressources naturelles soit entrepris, les profits doivent être quantifiables et intéressants. Évidemment, ce n'est pas l'infrastructure routière qui rapporte de l'argent, mais les coûts liés à son installation et son entretien ne doivent pas rendre le projet

déficitaire. Il est donc impensable que sur toute la longueur d'un tracé un ensemble de techniques de mitigation complexes soient établies. Le coût serait beaucoup trop important. Bien que les coûts d'implantation soient relativement faciles à calculer, les coûts d'entretien représentent une plus grande incertitude. Les changements climatiques constituent le risque financier majeur à gérer, puisque leurs impacts peuvent engendrer un entretien plus régulier (BERE, 2013). À l'incertitude des coûts d'entretien s'ajoute l'impact économique d'une route impraticable à cause d'affaissements ou de glissements de terrain majeurs (Fortier et autres, 2011). Aussi, puisque le pergélisol varie beaucoup localement et que sa cartographie avec précision demande des investissements majeurs, il est possible que certaines zones sensibles ne soient pas identifiées à la conception du projet et que des travaux de réparation majeurs soient nécessaires.

Une analyse coût/bénéfice doit alors être réalisée par le promoteur pour s'assurer que les efforts soient mis aux bons endroits (Ficheur, 2011). Malgré cela, des conséquences à des endroits inattendus peuvent survenir dans les années suivant la construction de la route (Grondin et autres, 2005; Boucher et autres, 2010). C'est pourquoi un processus par étape semble tout à fait approprié (Doré et Beaulac, 2007). Ce processus prévoit dans un premier temps l'application de mesures d'atténuation pendant la conception et la construction de la route, et dans un deuxième temps pendant son utilisation (Doré et Beaulac, 2007).

5.2.3 Application des mesures d'atténuation : à la conception et à la construction

Les zones les plus à risque peuvent généralement être identifiées avec les outils technologiques utilisés pour le choix du tracé. Si la route doit absolument les traverser, ces zones devraient faire l'objet de techniques d'atténuation dès l'étape de la conception et durant la construction de l'infrastructure. Cela permet d'éviter les coûts d'entretien et de réparation qui peuvent rapidement devenir importants pour des secteurs très instables (Allard and Lemay, 2012).

Selon le type de pergélisol en place, l'hydrologie, les conditions hydrogéologiques, la topographie et les changements climatiques prévus, le promoteur peut choisir parmi les techniques décrites plus haut, celles qui sont le plus adaptées à chaque tronçon problématique.

Des techniques peu coûteuses et simples d'application, comme le choix d'une pente douce, la correction du drainage et le choix d'une surface non revêtue peuvent également être mis en place dès la conception. À elles seules, ces techniques peuvent permettre d'éviter les conséquences négatives dans des zones où le pergélisol est moyennement sensible.

5.2.4 Application des mesures d'atténuation : entretien et suivi

Lorsque la route est en fonction, les signes de dégradation rapide du pergélisol apparaissent rapidement pour les zones plus sensibles et progressivement pour les autres. Affaissements et fissures sont alors observés.

Pour les zones plus problématiques, le promoteur peut décider d'entreprendre des travaux majeurs et d'appliquer une technique de mitigation éprouvée. La mise en place de pare-soleil et pare-neige, de surfaces réfléchissantes ou de thermosiphons peuvent être envisagées. D'autres techniques comme le drain de chaleur, l'élargissement des bermes et la mise en place d'un remblai à convection d'air nécessitent le réaménagement complet de l'infrastructure. Dans les cas les plus extrêmes, une relocalisation de la route peut être envisageable, signifiant toutefois que des erreurs ont été commises à l'étape du choix du tracé (Doré et Beaulac, 2007)

Pour les autres zones, là où des affaissements et des fissures apparaissent sporadiquement et de manière limitée, un entretien rigoureux est préférable (Fortier and Bolduc, 2008). Les accumulations d'eau en pied de talus indiquent également un réchauffement du pergélisol dû à un mauvais drainage (Doré et Beaulac, 2007). Souvent, l'entretien consiste simplement à recharger de matériel granulaire les dépressions dans la chaussée. La plupart du temps, c'est la seule technique de mitigation qui soit économiquement viable (Fortier and Bolduc, 2008). Le réaménagement ou le nettoyage des installations de drainage peut aussi être nécessaire (Doré et Beaulac, 2007).

Les affaissements pouvant se produire subitement, un suivi régulier est nécessaire pour assurer que l'entretien soit effectué dans les meilleurs délais (ATC, 2010). Bien qu'un suivi puisse être réalisé à l'aide d'images satellitaires à haute résolution, les vérifications sur le terrain doivent être faites pour confirmer les observations et permettre le bon diagnostic de la problématique (ATC, 2010).

5.3 Résumé

Plusieurs techniques d'atténuation ont démontré leur efficacité et certaines ont été testées avec plus ou moins de succès au Québec. Les techniques sont variées et nécessitent divers niveaux d'expertise pour la mise en place. Par exemple, la pente douce ne requiert qu'une quantité supplémentaire de matériel granulaire alors que le thermosiphon demande du matériel spécifique et du personnel qualifié pour son installation.

À cause des coûts importants qu'elles peuvent représenter et des incertitudes liées aux changements climatiques, les techniques d'atténuation ne peuvent réalistement être implantées sur toute la longueur d'une route. Un processus en deux phases est à privilégier.

Dans un premier temps, à l'étape de la conception et de la construction, des choix peu coûteux peuvent être effectués : la mise en place d'une pente douce, la construction en hiver et le choix d'une surface non revêtue. Parallèlement, pour les zones identifiées comme plus sensibles au réchauffement du pergélisol dans le choix du tracé, des options comme le remblai à convection d'air, le drain de chaleur ou le dégel provoqué devraient être envisagés.

Dans un deuxième temps, alors que la route est en fonction, d'autres zones où le pergélisol est instable se révéleront. Pour les zones les plus problématiques, des techniques plus coûteuses peuvent être choisies, notamment l'application de peinture blanche ou l'installation de thermosiphons. Dans le cas des affaissements mineurs, ils doivent régulièrement être comblés par du matériel granulaire. Des visites de suivi doivent toutefois avoir lieu tout au long de la durée de vie de l'ouvrage pour que les mesures d'atténuation appropriées soient mises en place.

Au Québec, l'utilisation de techniques d'atténuation n'a commencé que récemment et lors de projets pilotes isolés. Dans le cadre des nouveaux projets routiers qui verront le jour, il serait intéressant de tester de nouvelles mesures d'atténuation afin d'améliorer l'expertise québécoise dans ce domaine.

CONCLUSION

Le nord du Québec est en pleine transformation. Alors que les changements climatiques modifient le paysage, les promoteurs cherchent de nouvelles opportunités. Avec les ressources énergétiques et minières que ce territoire contient, nul doute que de nouveaux projets donneront lieu à l'établissement de liens routiers au cours des prochaines années. Un défi est cependant lié à la construction de route en milieu nordique : la fonte du pergélisol. Le processus d'évaluation environnementale qui encadre les grands projets est en mesure de prendre cette problématique en compte. L'objectif principal de cet essai était de cerner les composantes de l'environnement, les activités génératrices d'impact et les mesures d'atténuation qui doivent être pris en compte afin d'intégrer adéquatement la fonte du pergélisol aux ÉIE d'un projet routier. Cet objectif a été atteint à travers quatre objectifs spécifiques.

Premièrement, l'importance et l'ampleur des conséquences qu'ont les changements climatiques sur le pergélisol en territoire nordique québécois ont été expliquées. La cartographie des différentes zones de pergélisol a été relevée et les profils de températures applicables au réchauffement du pergélisol québécois furent identifiés. La présence du pergélisol dans le Nord québécois est importante quant à son étendue sur le territoire.

Deuxièmement, les composantes de l'environnement susceptibles d'être prises en compte pour optimiser le choix du tracé d'une infrastructure routière ont été sélectionnées. Le type de sol et son contenu en eau, la topographie, l'hydrologie et les conditions hydrogéologiques, les changements climatiques et les feux de forêt sont autant de composantes qui devront être cartographiées afin d'éviter la localisation sur un sol trop instable. La cartographie devient ainsi un outil des plus pertinents pour le praticien.

Troisièmement, la construction d'une matrice des impacts appréhendés des projets routiers tient compte de la fonte du pergélisol et de ses impacts. Ce type de matrice sous-tend l'élaboration des directives gouvernementales dans le cadre du processus d'examen et d'évaluation des impacts. Dans cet essai, la matrice a été construite sur la base des connaissances scientifiques les plus récentes disponibles et de la Directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet de route. Les impacts des activités associées à la construction des routes sur les composantes de l'environnement ont été décrits. Puisque les changements climatiques contribuent au même titre que les activités à réchauffer le pergélisol tout en subissant les activités, un deuxième niveau d'interaction a été inséré dans la matrice afin de prendre en compte les relations directes et indirectes. Le promoteur qui inclura les coordonnées formant la matrice élaborée s'assurera que l'ensemble des impacts traitant de la fonte du pergélisol soit considéré.

Quatrièmement, des mesures d'atténuation applicables à la réalité québécoise ont été retenues sur la base des travaux réalisés ou de recherches scientifiques non seulement au Québec, mais

aussi ailleurs dans d'autres environnements nordiques. Certaines mesures comme le profilage du sol en pente douce ou le choix d'un recouvrement de matériel granulaire sont d'une application facile et non coûteuse alors que d'autres nécessitent une expertise particulière et entraînent des coûts importants. Ces techniques seront utilisées pour stabiliser les zones là où le pergélisol est particulièrement sensible au réchauffement. À cause du cadre financier serré que les promoteurs doivent respecter, il sera souvent nécessaire d'adopter des techniques complexes uniquement aux endroits les plus sensibles à l'étape de la construction. Dans une deuxième phase, après un suivi des conséquences du réchauffement du pergélisol sur l'infrastructure, des techniques plus appropriées pourront être mises en place localement.

La grande variabilité des conditions de pergélisol et les difficultés techniques et financières associées à l'acquisition des données et à l'amélioration des informations scientifiques rendent peu probable l'identification de toutes les zones sensibles et des variations locales. C'est ainsi que des mesures d'atténuation devront également être réservées pour la période d'exploitation de la route. Le choix des mesures d'atténuation, non seulement est-il contraint par un cadre financier serré, mais encore faut-il qu'il distingue les actions pertinentes à l'étape de la conception et à l'étape de l'exploitation et l'entretien. On comprendra que les effets des changements climatiques varieront avec le temps et le rythme des changements est susceptible de varier sur de longues périodes.

Ce n'est pas sans difficulté que l'objectif général et les objectifs spécifiques de l'essai ont été atteints. Certaines difficultés ont été rencontrées au moment de la collecte d'information. Très peu d'ÉIE ont été réalisées sur les projets routiers en territoire nordique. Au Québec, aucune ÉIE n'a pour objet une route sur une longue distance à l'exception de l'accès à la mine Raglan. De même, les rapports des programmes de suivi à long terme sur l'état des routes sont difficiles à obtenir. Ils sont inexistantes ou encore, les projets pilotes n'ont été réalisés que de manière sporadique. En pratique, la grande majorité des informations a été tirée de la littérature scientifique et adaptée dans la mesure du possible au contexte d'une ÉIE.

La construction de routes sur le pergélisol et l'application de la procédure d'évaluation et d'examen des impacts ouvrent de grands champs d'exploration scientifique. Deux sujets ressortent quant à leur pertinence et importance. D'abord, les praticiens ont besoin d'outils non intrusifs d'acquisition de données, comme le GPR et l'ERT, pour améliorer la connaissance du pergélisol sans pour autant crever les budgets. L'utilisation des outils non intrusifs dont les résultats sont fiables permettrait d'effectuer un meilleur choix quant à la localisation du tracé et de réduire ainsi les impacts à la source. De même les coûts d'entretien pourraient être diminués. Puis le deuxième champ d'exploration scientifique traite de la validation des diverses techniques d'atténuation. Les autorités devraient développer un programme de recherche sur l'efficacité à court et moyen terme des mesures d'atténuation et de leur efficacité compte tenu de la variation

des conditions du pergélisol. Un tel programme permettrait d'adapter les techniques aux réalités québécoises, d'augmenter l'expertise des professionnels et finalement d'améliorer l'efficacité des techniques.

Certaines conclusions de ce travail pourraient être transférables à des projets d'équipements linéaires comme les chemins de fer ou la construction des pistes d'aéroports en milieu nordique. Notre hypothèse est que les composantes de l'environnement dont il faudra tenir compte sont probablement très similaires à celles d'une route. Quant au choix des techniques d'atténuation, il pourra s'appliquer tant à l'un ou à l'autre de ces projets. En fait, il faut améliorer notre connaissance scientifique du territoire nordique et développer des outils pour adapter les méthodes de construction et d'entretien aux conditions climatiques qu'on y retrouve.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Allard, M. and Lemay, M. (2012). Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization. *In ArcticNet Inc. ArcticNet*. http://www.arcticnet.ulaval.ca/media/iris_reports-fr.php (Page consultée le 6 février 2013).
- Allard, M. et Seguin, M.K. (1987). Permafrost in northern Quebec: state of knowledge and research needs. *Geographie Physique et Quaternaire*, vol. 41, n° 1, p. 141-152.
- Allard, M., Baolai Wang et Pilon, J.A. (1995). Recent cooling along the southern shore of Hudson Strait, Quebec, Canada, documented from permafrost temperature measurements. *Arctic & Alpine Research*, vol. 27, n° 2, p. 157-166.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P. et Tarussov, A. (2007). L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. *In Ouranos. Publications - Ouranos*. <http://www.ouranos.ca/fr/publications/resultats.php?q=perg%C3%A9lisol&t=#rs> (Page consultée le 5 février 2013).
- André, P., Delisle, C.E., Révêret, J.-P. (2010) *L'évaluation des impacts sur l'environnement*. 3^e Édition, Montréal, Presses internationales Polytechniques, 398 p.
- Anonyme (2013). Plan nord. *In Le Devoir. Plan nord*. <http://www.ledevoir.com/plan-nord> (Page consultée le 16 janvier 2013).
- ATC (2010). Dossier d'information sur le développement et la gestion des infrastructures de transports dans les régions du pergélisol. *In ATC. Centre des ressources*. <http://www.tac-atc.ca/francais/centredesressources/information.cfm> (Page consultée le 6 février 2013).
- Beaulac, I. and Doré, G. (2007). Development of a new heat extraction method to reduce permafrost degradation under roads and airfields. *In Anonyme, Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering*. p. 47.
- BERE (2013). Rapport définitif de la Commission sur l'examen de substitution des répercussions environnementales du projet routier d'Inuvik à Tuktoyaktuk. *In ACEE. Projet routier d'Inuvik à Tuktoyaktuk*. <http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/details-fra.cfm?evaluation=58081> (Page consultée le 4 juin 2013).
- Boucher, M., Grondin, G. et Guimond, A. (2010). Auscultation et investigations du pergélisol sous les infrastructures du ministère des Transport du Québec au Nunavik : vers une stratégie d'adaptation. *In Université de Calgary, Proceedings de la 6e Conférence canadienne sur le Pergélisol et de la 63e Conférence Canadienne de Géotechnique* (p. 500-208), Calgary, octobre 2010. Calgary, Université de Calgary.
- Brown, J. and Romanovsky, V.E. (2008). Report from the International Permafrost Association: State of permafrost in the first decade of the 21st century. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 19, n° 2, p. 255-260.
- Buteau, S., Fortier, R. et Allard, M. (2010). Permafrost weakening as a potential impact of climatic warming. *Journal of Cold Regions Engineering*, vol. 24, n° 1, p. 1-18.
- Canada. Agence canadienne d'évaluation environnementale (2012). Rapport d'étude approfondie - Prolongement de la route 167 nord vers les Monts Otish. *In Agence canadienne d'évaluation environnementale. Agence canadienne d'évaluation environnementale*. <http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents/54947/54947F.pdf> (Page consultée le 29 novembre 2012).
- Chouinard, C., Fortier, R. et Mareschal, J.C. (2007). Recent climate variations in the subarctic inferred from three boreholes temperature profiles in northern Quebec, Canada. *Earth and Planetary Science Letter*, vol. 263, p. 355-369.

- CFCCEE (2003). Incorporating Climate Changes Considerations in Environmental Assessment: General Guidance for Practitioners. In ACEE. ACEE. <http://www.ceaa-acee.gc.ca/default.asp?lang=En&n=A41F45C5-1> (Page consultée le 16 août 2013).
- de Grandpré, I. (2012). *Impacts de l'écoulement souterrain sur la dégradation du pergélisol*. mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, 221 p.
- de Grandpré, I., Fortier, D. et Stephani, E. (2010). Impact of groundwater on permafrost degradation: implications for transportation infrastructure. In Université de Calgary, *Proceedings de la 6e Conférence canadienne sur le Pergélisol et de la 63e Conférence Canadienne de Géotechnique* (p. 534-540), Calgary, octobre 2010. Calgary, Université de Calgary.
- de Grandpré, I., Fortier, D. et Stephani, E. (2012). Degradation of permafrost beneath a road embankment enhanced by heat advected in groundwater 1. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 49, n° 8, p. 953-962.
- Derksen, C., Smith, S.L., Sharp, M., Brown, L., Howell, S., Copland, L., Mueller, D.R., Gauthier, Y., Fletcher, C.G., Tivy, A., Bernier, M., Bourgeois, J., Brown, R., Burn, C.R., Duguay, C., Kushner, P., Langlois, A., Lewkowicz, A.G., Royer, A. et Walker, A. (2012). Variability and change in the Canadian cryosphere. *Climatic Change*, vol. 115, n° 1, p. 59-88.
- Desjarlais, C., Bourque, A., Décoste, R., Demers, C., Deschamps, P. et Lam, K. (2004). S'adapter aux changements climatiques. In Ouranos. *Ouvrages généraux - Ouranos*. <http://www.ouranos.ca/fr/publications/ouvrages-generaux.php> (Page consultée le 2 novembre 2012).
- Doré, G. et Beulac, I. (2007). Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptation. In MTQ. *Projets de recherche et développement*. http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/projet_recherche/description.asp?NO_PROJ=R535.1P1 (Page consultée le 1 juillet 2013).
- Doré, G. et Voyer, E. (2010). Expérimentation de méthodes de mitigation et des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport au Nunavik : Projet expérimental de Salluit. In Cubiq. *Réseau informatisé des bibliothèques gouvernementales du Québec*. <http://www.cubiq.rihg.gouv.qc.ca/zones/> (Page consultée le 4 juin 2013).
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*, Fourth Edition. Upper Saddle River (New Jersey), Prentice Hall, 598 p.
- Ficheur, A. (2011). *Expérimentation de techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik : aéroport de Tasiujaq*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, 212 p.
- Fortier, R. and Aubé-Maurice, B. (2008). Fast Permafrost Degradation Near Umiujaq in Nunavik (Canada) Since 1957 Assessed from Time-Lapse Aerial and Satellite Photographs. In International permafrost association. *Ninth International Conference on Permafrost*. <http://www.nicop.org/> (Page consultée le 7 juillet 2013).
- Fortier, R. and Bolduc, M. (2008). Thaw settlement of degrading permafrost: a geohazard affecting the performance of man-made infrastructure at Umiujaq in Nunavik. In Université Laval. *Géorisques, géohazards, comptes-rendu de conférences*. <http://www.landslides.ggl.ulaval.ca/geohazard/> (Page consultée le 4 juin 2013).
- Fortier, R., LeBlanc, A.-. et Yu, W. (2011). Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 48, n° 5, p. 720-740.
- Forum des ministres responsables du développement du Nord (2010). L'infrastructure nordique. In Forum des ministres responsables du développement du Nord. *Forum des ministres responsables du développement du Nord : Bibliothèque*. <http://www.focusnorth.ca/french/library.php> (Page consultée le 6 février 2013).

- Grondin, G., Guimond, A. et Doré, G. (2005). Impact du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier du MTQ au Nunavik. *Bulletin Innovation Transport*, n° 24, p. 5.
- Guimond, A., Doré, G. et Grondin, G. (2008). Les changements climatiques et les aéroports au Nunavik : vers l'adaptation. *Bulletin Innovation Transport*, n° 33, p. 29.
- Haltigin, T.W., Pollard, W.H., Dutilleul, P. et Osinski, G.R. (2012). Geometric Evolution of Polygonal Terrain Networks in the Canadian High Arctic: Evidence of Increasing Regularity over Time. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 23, n° 3, p. 178-186.
- International Permafrost Association (2011). Permafrost Distribution. In International Permafrost Association. *What is Permafrost?*. <http://ipa.arcticportal.org/resources/what-is-permafrost> (Page consultée le 16 janvier 2013).
- Jean, M. (2012). *Impact du couvert forestier sur le pergélisol des paises boisées de la région de la rivière Boniface, Québec subarctique*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, 136 p.
- Joy Hassol, S. (2004). *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press édition, New York, 139 p.
- Juneau, S., Pierre, P. et Doré, G. (2007). Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik - Aéroport de Salluit : réparation des sections expérimentales. In MTQ. *Projets de recherche et développement*. http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/projet_recherche/index.asp (Page consultée le 13 juillet 2013).
- Lachenbruch, A.H. et Marshall, B.V. (1986). Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science*, vol. 234, n° 4777, p. 689-696.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H. et Zhang, T. (2007). Observations : Changes in Snow, Ice and Frozen Ground (Chapter 4). In Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (éd.), *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 339-378). Cambridge, Cambridge University Press.
- Nelson, F.E., Anisimov, O.A. et Shiklomanov, N.I. (2002). Climate change and hazard zonation in the circum-arctic permafrost regions. *Natural Hazards*, vol. 26, n° 3, p. 203-225.
- Osterkamp, T.E. et Lachenbruch, A.H. (1990). Thermal regime of permafrost in Alaska and predicted global warming. *Journal of Cold Regions Engineering*, vol. 4, n° 1, p. 38-42.
- Pelletier, J.-P. (2012) *Env 705 Évaluation des impacts, Notes de cours*. Longueuil, Centre universitaire de formation en environnement (CUFE), Université de Sherbrooke, 620 p.
- Québec. MDDEFP (2002). Évaluation environnementale des projets en milieu nordique. In MDDEFP. *Évaluation environnementale des projets en milieu nordique - Vue d'ensemble*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/evaluations/mil-nordique/index.htm> (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Québec. MDDEFP (2012). Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020. In Gouvernement du Québec. *Le Québec en action vert 2020*. http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/strategie-adaptation2013-2020.pdf (Page consultée le 29 novembre 2012).
- Québec. Ministère des Régions (2001). *Politique de développement du Nord-du-Québec*. Bibliothèque nationale du Québec, 48 p.
- Québec. MRN (2013). Bilan hebdomadaire. In Ressources naturelles Québec. *Gros plan sur les forêts*. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/fimaq/feu/fimaq-feu-portrait-bilan.jsp> (Page consultée le 4 septembre 2013).

- Québec. MRNF (2009). Préparer l'avenir du secteur minéral québécois. *In* MRN. *Gros plan sur les mines, stratégie minérale*. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/strategie/index.jsp> (Page consultée le 6 février 2013).
- Québec. MRNF (2011). *Plan Nord, Faire le nord ensemble, le chantier d'une génération*. Québec, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 172 p.
- Québec. MTQ (2005). Plan de transport du Nord-du-Québec : Diagnostic. *In* MTQ. *Transports Québec - Plans de transport - Nord-du-Québec*. http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/plans_transport/nord_quebec (Page consultée le 29 novembre 2012).
- Québec. MTQ (2008). L'environnement dans les projets routiers du MTQ. *In* MTQ. *Ministère des Transports du Québec - Environnement*. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/ministere/ministere/environnement> (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Québec. MTQ (2010). Étude d'impact sur l'environnement et le milieu social du prolongement de la route 167 Nord vers les Monts Otish. *In* ACEE. *ACEE - Évaluation environnementales - Québec*. http://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents_staticpost/54435/50002/Volume_1_Rapport-fra.pdf (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Québec. MTQ (2013). Période de dégel. *In* Transports Québec. *Camionnage*. http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/camionnage/charges_dimensions/période_de_dégel (page consultée le 4 septembre 2013).
- Ramakrishna, D.M. et Viraraghavan, T. (2005). Environmental impact of chemical deicers - A review. *Water, air, and soil pollution*, vol. 166, n° 1-4, p. 49-63.
- Richard, M.J., Doré, G., Vassev, V. et Fradette, N. (2009). Étude des conséquences de la détérioration de l'uni des chaussées sur le comportement des véhicules et la sécurité des usagers de la route. *Revue canadienne de génie civil*, vol. 36, p. 404-513.
- Romanovsky, V.E., Smith, S.L. et Christiansen, H.H. (2010). Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during the international polar year 2007-2009: A synthesis. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 21, n° 2, p. 106-116.
- Schaefer, K., Zhang, T., Bruhwiler, L. et Barrett, A.P. (2011). Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, vol. 63, n° 2, p. 165-180.
- Shields, A. (2012). Coup de frein sur la route du nord québécois. *Le Devoir*, 5 novembre, p. 17.
- Smith, S.L., Burgess, M.M., Riseborough, D. et Nixon, F.M. (2005). Recent trends from Canadian permafrost thermal monitoring network sites. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 16, n° 1, p. 19-30.
- Smith, S.L., Romanovsky, V.E., Lewkowicz, A.G., Burn, C.R., Allard, M., Clow, G.D., Yoshikawa, K. et Throop, J. (2010). Thermal state of permafrost in North America: A contribution to the international polar year. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 21, n° 2, p. 117-135.
- Société suisse de géomorphologie (2009). Le domaine périglaciaire et le pergélisol. *In* Société suisse de géomorphologie. *Géomorphologie de la montagne*. <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/ssgmfiches/pergelisol/3101.php> (Page consultée le 6 février 2013).
- SOPFEU (2013). Rapport annuel 2012. *In* SOPFEU. *SOPFEU*. <http://www.sopfeu.qc.ca/fr/sopfeu/publications/rapports-annuels> (Page consultée le 12 août 2013).

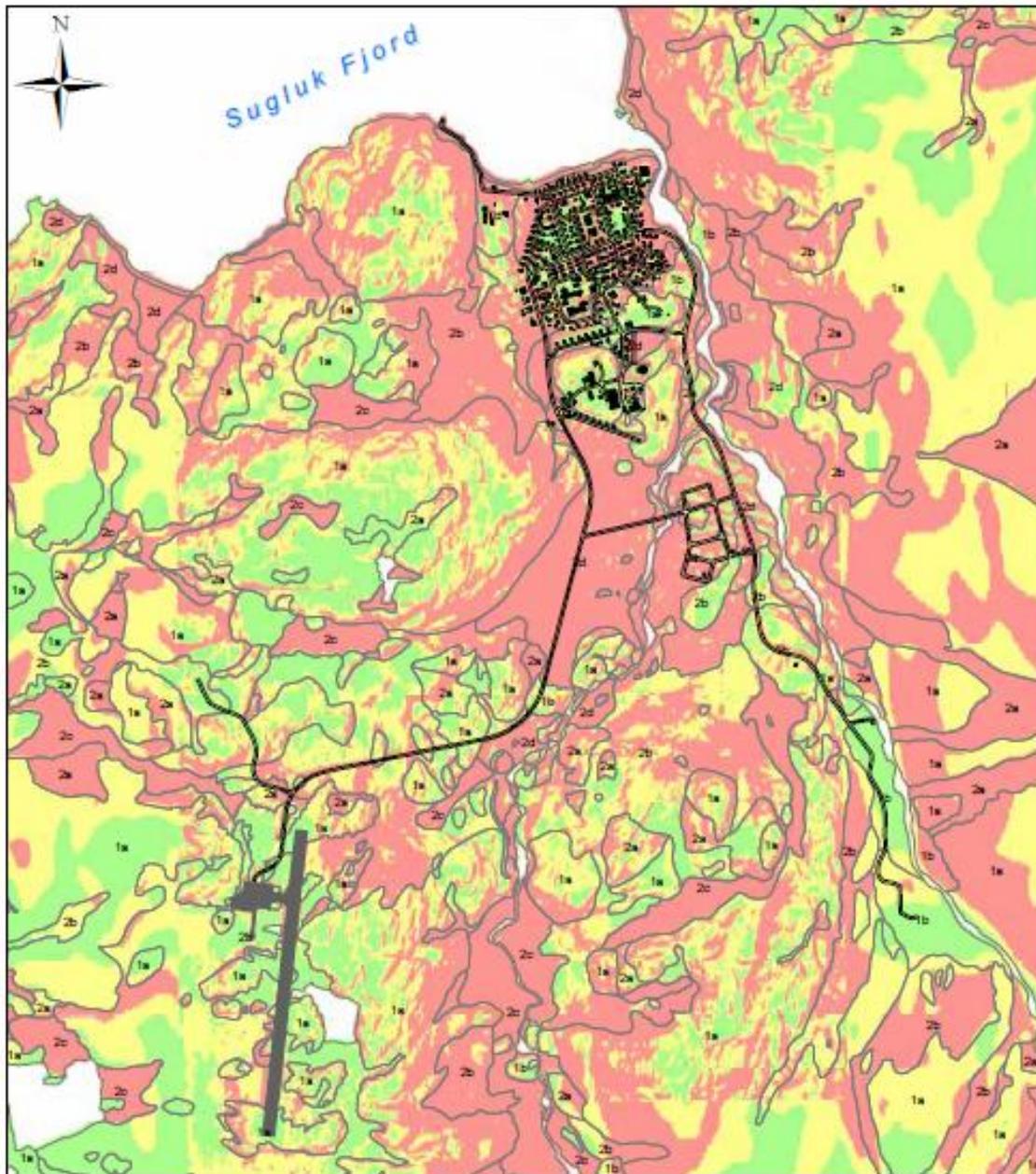
- Throop, J., Lewkowicz, A.G. et Smith, S.L. (2012). Climate and ground temperature relations at sites across the continuous and discontinuous permafrost zones, northern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 49, n° 8, p. 865-876.
- Tremblay, M. et Frugal, C. (2008). Les changements climatiques au Nunavik et au Nord du Québec : l'accès au territoire et aux ressources. In Ouranos. *Publications - Ouranos*. <http://www.ouranos.ca/fr/publications/resultats.php?q=nord&t=#rs> (Page consultée le 6 février 2013).
- Voyer, E. (2009). *Expérimentation de méthodes de mitigation de la dégradation du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik, Nord du Québec*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, 249 p.
- Wei, M., Guodong, C. et Qingbai, W. (2009). Construction on permafrost foundations : Lessons learned from the Qinghai-Tibet railroad. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 59, n° 1, p. 3-11.
- Woo, M., Kane, D.L., Carey, S.K. et Yang, D. (2008). Progress in Permafrost Hydrology in the new Millenium. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 19, p. 237-254.
- Zhang, Y., Chen, W. et Riseborough, D.W. (2008). Transient projections of permafrost distribution in Canada during the 21st century under scenarios of climate change. *Global and Planetary Change*, vol. 60, n° 3-4, p. 443-456.
- Zhao, L., Ping, C.-., Yang, D., Cheng, G., Ding, Y. et Liu, S. (2004). Changes of climate and seasonally frozen ground over the past 30 years in Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China. *Global and Planetary Change*, vol. 43, n° 1-2, p. 19-31.

BIBLIOGRAPHIE

- Alfaro, M.C., Ciro, G.A., Thiessen, K.J. et Ng, T. (2009). Case study of degrading permafrost beneath a road embankment. *Journal of Cold Regions Engineering*, vol. 23, n° 3, p. 93-111.
- Allard, M. and Pollard, W. (2011). Permafrost and climate change in northern coastal Canada. In *Ouranos. Ouranos - Documents scientifiques*.
http://www.ouranos.ca/media/publication/58_RapportAllard-2011.pdf (Page consultée le 29 novembre 2012).
- Almås, A.-., Lisø, K.R., Hygen, H.O., Øyen, C.F. et Thue, J.V. (2011). An approach to impact assessments of buildings in a changing climate. *Building Research and Information*, vol. 39, n° 3, p. 227-238.
- Canada. ACEE (2012). Ébauche de lignes directrices relatives à la préparation d'une étude d'impact sur l'environnement pour une évaluation environnementale réalisée en vertu de la *Loi canadienne sur l'évaluation environnementale* - Projet de mine de minerai de fer Hope Advance - Nunavik, Québec. In *Gouvernement du Canada. Régistre canadien d'évaluation environnementale*. <http://www.ceaa.gc.ca/050/details-fra.cfm?evaluation=80008> (Page consultée le 3 avril 2013).
- Comité consultatif de l'environnement Kativik (2007). Avis sur le développement actuel et futur des infrastructures de transport au Nunavik. In *Comité consultatif de l'environnement Kativik. Comité consultatif de l'environnement Kativik - Position Papers*. <http://www.keac-ccek.ca/documents/memoires-avis/Avis-Routes-2007-f.pdf> (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Comité consultatif de l'environnement Kativik (2012). Recommandations concernant le futur plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques. In *Comité consultatif de l'environnement Kativik. Comité consultatif de l'environnement Kativik - Position Papers*. <http://www.keac-ccek.ca/documents/memoires-avis/avis-2012-04.pdf> (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Comité consultatif pour l'environnement de la Baie James (2007). Portrait et impacts environnementaux connus du changement climatique sur le territoire de la Baie James. In *Comité consultatif pour l'environnement de la Baie James. Comité consultatif pour l'environnement de la Baie James - Publications - Changements climatiques*.
http://www.ccebj-jbace.ca/francais/publications/documents/Rapportchangementsclim_internet.pdf (Page consultée le 29 novembre 2012).
- Comité consultatif pour l'environnement de la Baie James (2010). Vers une évaluation stratégique du Plan Nord, Secteur des transports. In *Comité consultatif pour l'environnement de la Baie James. Comité consultatif pour l'environnement de la Baie James - Publications*.
http://www.ccebj-jbace.ca/francais/publications/documents/AVISduCCEBJEES-PlanNord_000.pdf (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Crowley, M. (2010). Ébauche de document de cadrage relatif à une évaluation environnementale stratégique du secteur des transports sur le territoire de la Baie-James. In *Comité consultatif pour l'environnement de la Baie James. Comité consultatif pour l'environnement de la Baie James - Publications - Plan Nord*. http://www.ccebj-jbace.ca/francais/publications/documents/PlanNord-EEStransports-Rapportfinal-mai2010_000.pdf (Page consultée le 29 novembre 2012).
- David, L., Ilyes, Z. et Baros, Z. (2011). Geological and geomorphological problems caused by transportation and industry. *Central European Journal of Geosciences*, vol. 3, n° 3, p. 271-286.
- Instanes, A. et Anisimov, O. (inconnue). Climate Change and Arctic Infrastructure. In *Anonyme. Permafrost.su*. http://permafrost.su/sites/default/files/Inst&Anis_rev3.pdf (Page consultée le 5 novembre 2012).

- Instanes, B. (2004). Infrastructure : Buildings, Support Systems, and Industrial Facilities. *In Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Scientific Report.* <http://www.acia.uaf.edu/pages/scientific.html> (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Jin, H., Wei, Z., Wang, S., Yu, Q., Lü, L., Wu, Q. et Ji, Y. (2008). Assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the Qinghai-Tibet highway and railway, China. *Engineering Geology*, vol. 101, n° 3-4, p. 96-109.
- Kneisel, C. (2010). The nature and dynamics of frozen ground in alpine and subarctic periglacial environments. *Holocene*, vol. 20, n° 3, p. 423-445.
- Larsen, P.H., Goldsmith, S., Smith, O., Wilson, M.L., Strzepek, K., Chinowsky, P. et Saylor, B. (2008). Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. *Global Environmental Change*, vol. 18, n° 3, p. 442-457.
- Neumann, J.E. et Price, J.C. (2009). Adapting to Climate Change: The Public Policy Response Public Infrastructure. *In Resources for the future. Publications, Resources for the future.* <http://www.rff.org/rff/documents/RFF-Rpt-Adaptation-NeumannPrice.pdf> (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Québec. Ministère de l'Environnement (2005). Directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet de route. *In MDDEFP. MDDEFP - Directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet de route.* <http://www.mddep.gouv.qc.ca/publications/2001/ENV20010207.htm> (Page consultée le 5 novembre 2012).
- Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement dans une partie du Nord-Est québécois*, L.Q.E, c. Q-2, r.24.
- Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement et le milieu social dans le territoire de la Baie James et du Nord québécois*, L.Q.E, c. Q-2, r.25.
- U.S. Arctic Research Commission (2003). Climate Change, Permafrost, and Impacts on Civil Infrastructure. *In U.S. Arctic Research Commission. U.S. Arctic Research Commission - Publications, Other USARC Reports.* <http://www.arctic.gov/publications/permafrost.pdf> (Page consultée le 29 novembre 2012).

ANNEXE 1 : RISQUES ASSOCIÉS AU DÉVELOPPEMENT D'INFRASTRUCTURES DANS LA MUNICIPALITÉ DE SALLUIT (tirée de : Allard and Lemay, 2012)



Construction potential and foundation design adapted to permafrost conditions and slopes

Bedrock and superficial deposits with no or little ice content

- 1a** - Massive bedrock of Precambrian age with a very sparse thin and discontinuous cover of sand, gravel and boulders (III). Active layer depth varies across the terrain from 2.5 to 3.5 m.
 - All types of northern foundations. Adaptations to rugged topography are often necessary.
- Terrain manageable for construction (slope < 7.5°).
 - Terrain manageable for construction but may require significant earthwork (slope between 7.5 and 15°).
 - Terrain unsuitable for construction (slope > 15°).

- 1b** - Layered sand and gravel deposits. Contains pore ice and occasional ice lenses in fine sand and silty layers.
 - Northern foundations on adjustable post and pad or on piles. Buildings with slab-on-grade foundations might need elaborated techniques to retain permafrost in its frozen state (ex.: thermosyphons).
- Terrain manageable for construction (slope < 5°).
 - Terrain manageable for construction but may require significant earthwork (slope between 5 and 10°).
 - Terrain unsuitable for construction (slope > 10°).

Ice-rich permafrost in superficial deposits

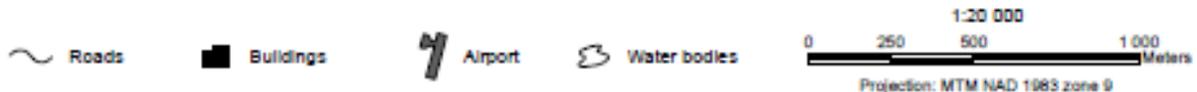
- 2a** - Thin cover of sand, gravel and boulders over bedrock. The thickness of the deposits is generally less than 2 m. Topography is controlled by bedrock. Scattered rock outcrops. Active layer depth varies across terrain from 1.5 to 2.5 m. Thaw settlement of permafrost restricted to the superficial cover. Volumetric ice contents in the surface sediments vary from 15 to 70 %.
 - Deep northern foundations on the underlying bedrock applicable (ex.: Pile foundations). Adjustable post and pad foundations also feasible. Buildings with slab-on-grade foundations need elaborated techniques of terrain preparation (ex.: removal or pre-thaw of frozen sediments and consolidation).
- Terrain manageable for construction (slope < 4°).
 - Terrain manageable for construction but may require significant earthwork (slope between 4 and 8°).
 - Terrain unsuitable for construction (slope > 8°).

- 2b** - Thick cover of sand, gravel and boulders (III) over bedrock. The thickness of the deposits is generally more than 2 m with occasional bedrock outcrops. Estimated maximum depth to bedrock is about 8 m. Frost boils are present and gelifluction lobes occur on slopes. Subject to thaw settlement. Active layer depth varies from 1.5 to 2.5 m across the terrain. Volumetric ice contents vary from 15 to 70 %.
 - Pile foundations feasible but require deeper drill-holes for pile driving. Adjustable post and pad foundations also feasible. Buildings with slab-on-grade foundations need elaborated techniques to retain permafrost in its frozen state (ex.: thermosyphons). Steeper slope sections may be affected by gelifluction and may require specific foundation design.
- Terrain manageable for construction (slope < 4°).
 - Terrain manageable for construction but may require significant earthwork (slope between 4 and 8°).
 - Terrain unsuitable for construction (slope > 8°).

- 2c** - Thick cover of Quaternary sediments, poorly drained with a peat cover. Thickness is more than 2 m and can be as much as 6 m. The deposits are ice rich and a polygonal network of ice wedges is present. Active layer depth varies from 0.5 to 2.5 m.
 - Problematic terrain to be avoided.
- Problematic terrain unsuitable for construction.

- 2d** - Fine-grained sediments of marine origin. Occasionally covered by a thin layer of sand or gravel. Subject to differential thaw settlement and to active layer failures on slopes. Often surface is pitted with frost boils. Active layer thickness varies in the terrain from 0.5 to 1.2 m. Volumetric ice content in the permafrost is constantly above 30% and may be as high as 100%
 - Adjustable post and pad foundations. Buildings with slab-on-grade foundations need elaborated techniques to retain permafrost in its frozen state (ex.: thermosyphons).
- Terrain manageable for construction (slope < 1°).
 - Terrain manageable for construction (slope between 1 and 2°).
 - Terrain unsuitable for construction (slope > 2°).

Infrastructures



ANNEXE 2 : PROCÉDURE POUR INCLURE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LES ÉIE

(tirée de CFCCEE, 2003)

