



UNIVERSITÉ
LAVAL

Aujourd'hui Québec, demain le monde.

Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptation

Rapport final, version finale

Rédigé par

**Guy Doré
et
Isabelle Beaulac**

Rapport GCT-2007-14

remis au
Ministère des Transports du Québec

Novembre 2007

Table des matières

Table des matières.....	1
Table des matières.....	2
Liste des FIGURES:	3
Liste des TABLEAUX:.....	4
1 Introduction.....	5
2 Rappel des principaux mécanismes de dégradation et sommaire des techniques de protection relevées dans la littérature	7
2.1 Mécanismes de dégradation du pergélisol	7
2.2 Techniques de protection	10
2.3 Méthodes de forage des sols gelés.....	11
3 Identification des infrastructures de transport vulnérables au dégel du pergélisol au Nunavik	15
4 Techniques de protection ayant un potentiel d'application au Nunavik.....	24
4.1 Approche générale proposée.....	24
4.2 Description des techniques	27
4.2.1 Remblai à convection d'air	27
4.2.2 Drain de chaleur.....	28
4.2.3 Surface réfléchissante	29
4.3 Évaluation de l'efficacité des techniques de protection.....	30
5 Élaboration d'une stratégie de gestion et d'intervention sur les infrastructures de transport du Nunavik.....	33
5.1 Stratégie de gestion.....	33
5.1.1 Identification des secteurs sensibles au dégel du pergélisol	34
5.1.2 Caractérisation des secteurs vulnérables au dégel du pergélisol	34
5.1.3 Analyse économique des solutions applicables	35
5.1.4 Mise en œuvre de la stratégie: plan d'action	36
5.2 Stratégie d'intervention.....	36
RÉFÉRENCES	46
Annexe 1: Évolution des tassements sur les pistes et chemins d'accès du Nunavik	47

Liste des FIGURES:

Figure 1: Enfouissement d'une route dans un thermokarst (Elliot Highway, Alaska) et présence d'ondulations sur la route d'accès à l'aéroport de Umiujaq (Nunavik)	8
Figure 2: Glace massive (tunnel de pergélisol, Alaska) et Thermokarst le long de la route de l'Alaska, Yukon.	9
Figure 3: Coins de glace dans le tunnel de pergélisol (Alaska) et sillon de coins de glace aux abords de la piste d'Akulivik (Nunavik).....	9
Figure 4: Mécanisme de dégradation associé à la géométrie du remblai (Goering, 2004).....	10
Figure 5: Fissures longitudinales dans l'accotement sur l'Elliot Highway (Alaska) et rotation des épaulements sur Farmer's Loop Road (Fairbanks, Alaska)	10
Figure 6: Principe de la stabilisation thermique	25
Figure 7: Remblai à convection d'air et drain de chaleur	28
Figure 8: a) État d'une section avec surface réfléchissante 30 ans après sa construction (site expérimental CRREL, Alaska) et b) installation d'une section d'essai sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit en 2006.....	29
Figure 9: Béton bitumineux de couleur pâle pouvant être utilisé pour les surfaces réfléchissantes (Mexasphalt, Shell).....	30
Figure 10 : Installation de la section expérimentale de drain thermique à côté de la section de remblai à convection (à gauche sur la photo) sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq à l'été 2007.	33
Figure 11: Correction du drainage	38

Liste des TABLEAUX:

Tableau 1 :Méthodes de forage applicables aux sols gelés.....	12
Tableau 2: Méthodes d'échantillonnage applicables aux sols gelés	13
Tableau 3: Synthèse de la condition des pistes et chemins d'accès et recommandations	17
Tableau 4: Sensibilité du sol d'infrastructure au dégel du pergélisol.....	35
Tableau 5: Stratégie d'intervention: Pistes d'atterrissage non-revêtues	39
Tableau 6: Stratégie d'intervention: Chemins non-revêtus	40
Tableau 7: Stratégie d'intervention: Chemins revêtus	40

1 Introduction

Comme le Nunavik n'est pas accessible par voies terrestres, soit par la route soit par la voie ferrée, le transport aérien est essentiel pour assurer le lien entre les quatorze villages et la civilisation. Les pistes des aéroports constituent donc des axes de communication essentiels au développement socio-économique de la population inuite. Ces axes de communication permettent le déplacement des personnes et des marchandises de même que la dispense de services. Il est donc important que les infrastructures de transport actuelles et futures permettent un déplacement sécuritaire et confortable des usagers.

La construction d'infrastructures de transport dans des conditions de pergélisol affecte inmanquablement le régime thermique du sol gelé ce qui peut causer une dégradation du pergélisol sur lequel est fondé l'ouvrage. Si le sol d'infrastructure est constitué de pergélisol riche en glace, sa dégradation entraînera une perte importante des capacités structurale et fonctionnelle de la chaussée dans un contexte de changements climatiques. Par ailleurs, des chaussées qui ont toujours été stables commencent maintenant à montrer des signes d'instabilité en raison du réchauffement climatique qui affecte la température du pergélisol. Cette situation devient un important problème d'ingénierie pour les infrastructures de transport nordiques. Plusieurs techniques visant à protéger les infrastructures sensibles au dégel du pergélisol ont été développées et expérimentées. Malheureusement, bien peu de ces techniques ont été adoptées dans la pratique en raison de problèmes associés au coût élevé de ces techniques ainsi qu'à plusieurs difficultés liées à la mise en œuvre, à l'entretien et à l'opération sécuritaire de ces techniques.

Ce projet vise à évaluer l'ampleur des problèmes de comportement qui se sont manifestés depuis la construction des pistes et leur évolution possible durant les 15 prochaines années sur les pistes du Nunavik. Il vise également à proposer au ministère des transports du Québec des scénarios d'adaptation réalistes pour assurer la stabilité des pistes.

Les objectifs spécifiques du projet de recherche réalisé étaient les suivants:

- Faire le bilan de la performance des pistes depuis leur construction
- Identifier les pistes sensibles au dégel du pergélisol et déterminer les risques de dégradation prévisibles pour les 15 prochaines années
- Identifier les solutions d'adaptation ayant un potentiel d'application intéressant pour le Nunavik
- Proposer une méthode de suivi des pistes et des routes d'accès dans un contexte d'instabilité du pergélisol causé par le réchauffement climatique
- Déterminer le bénéfice associé à l'application des solutions identifiées
- Identifier les actions requises pour assurer un rendement structural et fonctionnel adéquat pour les pistes.

Il est important de noter que le projet impliquait également une évaluation du potentiel de consolidation des sols sous les infrastructures de transport sensibles au dégel du pergélisol. Cette partie du projet n'a pas pu être réalisée car il n'a pas été possible de récupérer des échantillons intacts de sols gelés.

Les résultats attendus comportaient un bilan de l'information géotechnique sous les infrastructures aéroportuaires au Nunavik et l'identification des sites à risques de déformations accélérées qui pourraient éventuellement poser des problèmes de sécurité. Le projet devait également permettre de déterminer la meilleure méthode d'investigation pour connaître l'épaisseur du sol gelé, l'adaptation nécessaire des méthodes de forage pour recueillir des échantillons intacts de sol gelé et des méthodes d'essais pour évaluer le comportement du pergélisol lors de sa fonte. Ces éléments sont incontournables pour une gestion efficace des infrastructures aéroportuaires au Nunavik.

2 Rappel des principaux mécanismes de dégradation et sommaire des techniques de protection relevées dans la littérature

Les mécanismes de dégradation affectant le pergélisol ont été répertoriés dans le cadre d'une importante revue de littérature réalisée dans la première phase de ce projet. L'information répertoriée peut être consultée dans le rapport « Beaulac et Doré., 2005a ». Les principales idées tirées de cette synthèse sont résumées dans les prochaines sections.

2.1 Mécanismes de dégradation du pergélisol

Il existe différents mécanismes de dégradation du pergélisol pouvant avoir des répercussions sur la condition des pistes et des routes d'accès. Il y a les dégradations induites par le remblai et les dégradations résultant du réchauffement climatique.

Le régime thermique est influencé par la température de l'air, les caractéristiques de surface, la géométrie du remblai et le drainage. Le principale problème lié à la dégradation du pergélisol est le tassement. Celui-ci peut être généralisé s'il est associé à la dégradation d'un dépôt uniforme riche en glace. Le tassement peut également être aléatoire ou différentiel s'il est associé à la composition hétérogène des sols et à la variabilité de la teneur en glace dans les sols. Par exemple, les problèmes de tassement peuvent s'observer par le déplacement des infrastructures de drainage (ex. ponceau) ou par la création d'ondulations inégales due à des tassements différentiels. Il est possible d'observer ces phénomènes à la figure 1.



Figure 1: Enfoncement d'une route dans un thermokarst (Elliot Highway, Alaska) et présence d'ondulations sur la route d'accès à l'aéroport de Umiujaq (Nunavik)

Le tassement peut être aussi localisé. Il est la conséquence de la dégradation de la glace massive localisée et de coins de glace. Le tassement localisé est souvent associé à un effondrement (thermokarst) qui peut donner lieu à la création d'un lac thermokarstique si l'eau provenant de la fonte de la glace localisée ne peut se drainer due à la présence d'un sol imperméable ou de glace sous-jacente. À la figure 2, il est possible d'observer de la glace massive située dans le tunnel de pergélisol du Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) en Alaska. Sur cette même figure, il est possible de voir un thermokarst de même que les déchirures engendrées par l'effondrement à la surface de roulement sur les côtés du thermokarst.

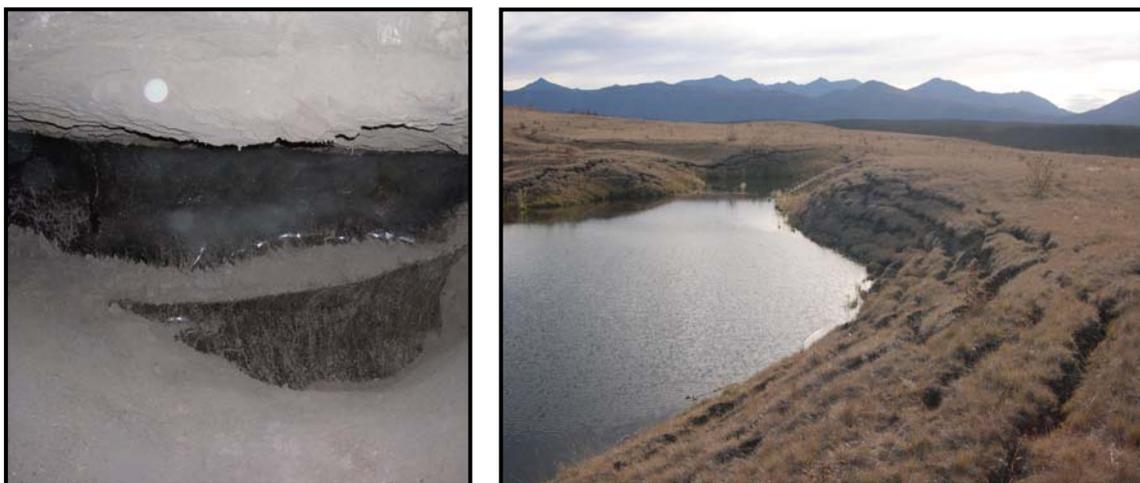


Figure 2: Glace massive (tunnel de pergélisol, Alaska) et Thermokarst le long de la route de l'Alaska, Yukon.

Les coins de glace sont des masses de glace verticales qui sont plus larges au sommet (1 cm à 3 m) qu'au bas et qui ont une hauteur de 1 à 10 m (Ladanyi et Andersland, 1994). Ils se forment à partir de fissures de retrait thermique et croissent en volume par expansion de l'eau lors du gel (Dysli, 1991). Il est possible d'observer à la figure 3 un coin de glace dans le tunnel de pergélisol en Alaska. À la surface, un coin de glace est représenté par une fissure accompagnée d'un bourrelet de chaque côté (figure 3). Souvent, ces fissures à la surface créent des polygones et les coins de glace forment la limite de ces polygones.



Figure 3: Coins de glace dans le tunnel de pergélisol (Alaska) et sillon de coins de glace aux abords de la piste d'Akulivik (Nunavik)

Le dernier mécanisme de dégradation est associé à la géométrie du remblai. Les deux phénomènes associés à ce mécanisme de dégradation sont la rotation et le glissement des épaulements des remblais associés au bilan thermique défavorable sous les talus de remblais. Les problèmes les plus importants surviennent sous le pied des talus où l'épaisseur de remblai est faible et l'accumulation de neige est importante en hiver causant un réchauffement des épaulements (Esch, 1996). Sous les épaulements, il y a alors perte de capacité portante qui a pour conséquence la création de fissures longitudinales dans les accotements et la rotation des épaulements. La figure 4 (Goering, 2004) et la figure 5 expliquent bien ces deux phénomènes.

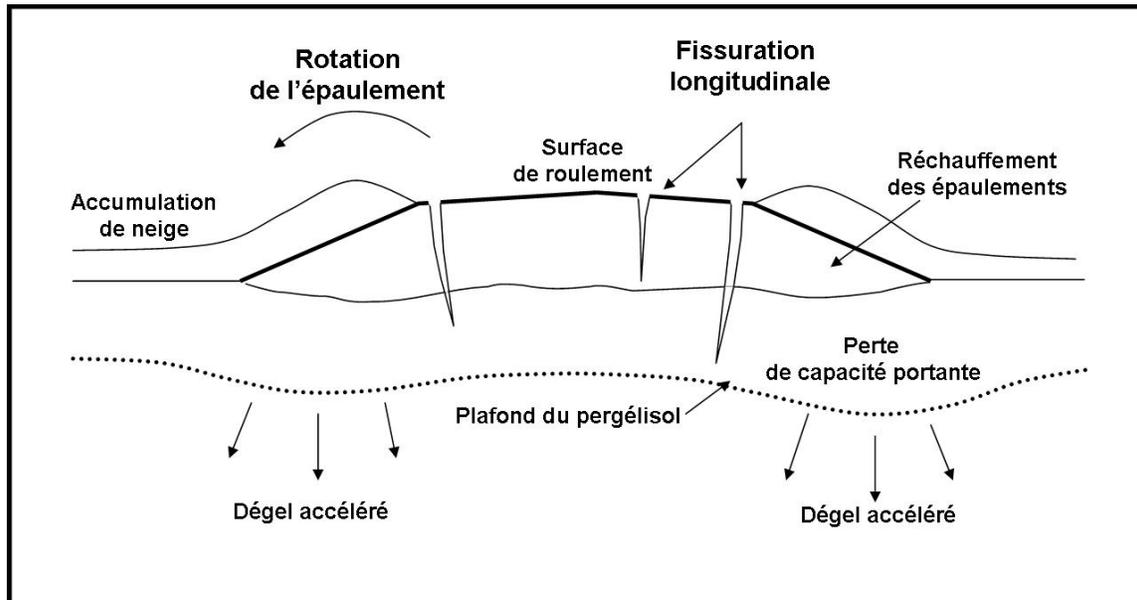


Figure 4: Mécanisme de dégradation associé à la géométrie du remblai (Goering, 2004)



Figure 5: Fissures longitudinales dans l'accotement sur l'Elliot Highway (Alaska) et rotation des épaulements sur Farmer's Loop Road (Fairbanks, Alaska)

2.2 Techniques de protection

Depuis les années 60, plusieurs techniques de protection du pergélisol ont été expérimentées. Plusieurs ont été développées et expérimentées en Alaska notamment

par le département des transports (ADOTPF) et par l'Université d'Alaska – Fairbanks (UAF). Pour différentes raisons, plusieurs de ces méthodes ont été abandonnées mais certaines sont toujours utilisées. Les méthodes inventoriées dans le premier rapport ont été classifiées en trois grandes catégories :

- les méthodes visant à réduire l'entrée de chaleur dans les remblais,
 - isolation thermique,
 - surface réfléchissante,
 - pare-soleil ou pare-neige,
- les méthodes visant à extraire la chaleur des remblais,
 - thermosyphons,
 - conduits de ventilation,
 - remblai à convection d'air,
- les méthodes visant à adapter le remblai
 - géotextiles,
 - géogrilles,
 - bermes,
- autres méthodes,
 - dégel provoqué,
 - enlèvement et remplacement,
 - entretien intensif,
 - enlèvement de la neige sur les talus,
 - utilisation de surfaces non revêtues.

Les techniques surlignées sont celles ayant un potentiel intéressant pour les infrastructures de transport du Nunavik en raison de l'efficacité démontrée lors d'essais antérieurs de ces techniques ainsi qu'en raison de leur applicabilité dans le contexte des villages isolés du Nunavik.

2.3 Méthodes de forage des sols gelés

La revue de littérature a également permis de faire une synthèse des techniques de forage adaptées pour le pergélisol. La revue a permis de constater que peu de méthodes de forage ont une bonne capacité de récupération de la glace. La méthode la plus polyvalente et généralement la plus utilisée est la tarière mécanique, particulièrement celle à tige creuse. Le forage permet d'obtenir des sols gelés non

remaniés de haute qualité. La méthode du tube Shelby modifié peut être également une bonne alternative. Les tableaux 1 et 2 font la synthèse de l'équipement disponible pour le forage et l'échantillonnage des sols gelés.

Tableau 1 : Méthodes de forage applicables aux sols gelés

Méthodes de forage	Sol	Avantages	Désavantages
Perforateur rotatif	Grossier	Disponibilité de l'équipement Peu d'opérateurs nécessaires Fluides de forages ne sont pas requis	Détérioration possible des matériaux grossiers Contamination par l'eau souterraine Affaissement du trou Faible récupération de la glace
Tarière à vis	Grossier	Faibles coûts	Faible récupération de la glace
Tarière à vis à mèche creuse	Grossier	Utilisable pour différentes conditions du sol	Nécessite de gros bâtis Faible récupération de la glace (fonte) Difficile de traverser les gros cailloux, rochers et les matériaux gelés denses
Marteau à percussion	Grossier	Échantillons en continu Tubage prévient la contamination de l'échantillon	Difficile de briser les gros cailloux Faible récupération de la glace Transporteur lourd et de grande taille nécessaire Bouchage du système dans les sols fins
Vibratoire	Grossier	Possibilité de briser les gros rochers Échantillons en continu Taux élevé de production	Fracturation de la glace Endommagement de l'échantillon Nécessité de tirer une tige pour récupérer l'échantillon Affaissement du trou si il y a présence d'eau souterraine
Rotatif	Grossier	Taux élevé de production Appareillage léger requis	Faible récupération de la glace
À jet	Grossier	Équipement léger et portable Taux élevé de production Facilité d'obtention de données non coûteuses pour les sites difficiles d'accès	Remaniement de l'échantillon Difficile de traverser les gros cailloux Nécessite l'utilisation de fluides de forage Besoin d'opérateurs expérimentés
Foreuse	Fin	Méthode efficace	Faible récupération de la glace
Tête à lame avec air	Fin	Taux élevé de production	Le sol peut boucher le trou Parfois des difficultés de récupération des échantillons

La compagnie Québécoise Techmat a développé une technique de forage et d'échantillonnage pour les sols gelés (Bouchard et coll., 2001). La technique implique l'utilisation de carottiers à triple enveloppe de calibre PWL de 1,0 m de longueur permettant de récupérer un échantillon de 83 mm de diamètre. Le procédé utilise un fluide de refroidissement spécial constitué d'eau, d'antigel et d'agents thixotropiques (bentonite, polymère). À partir d'un appareil de chauffage compact et léger pour l'eau des piscines, la compagnie a développé un appareil de réfrigération en inversant le fonctionnement de base de l'appareil. Le système fonctionne par ailleurs en

circuit fermé de façon à récupérer le fluide à sa sortie du forage et à le recycler. La méthode a permis de prélever des échantillons intacts du noyau des ouvrages KA-03, KA-04 et KA-05 du complexe La Grande au Québec. La récupération totale de l'échantillonnage a été de 95 % et la qualité des échantillons a été excellente selon la compagnie. La méthode semble donner des résultats très satisfaisants, tant sur le plan de la performance, de la protection de l'environnement et du contrôle des paramètres de forage visant à protéger l'intégrité des ouvrages. Elle implique cependant un équipement lourd et relativement coûteux à mobiliser.

Tableau 2: Méthodes d'échantillonnage applicables aux sols gelés

Méthodes d'échantillonnage	Sol	Fluides	Avantages	Désavantages
À la main	Grossier		Simple, peu dispendieux, quantité importante d'échantillons	Faible récupération de la glace
Cuillère fendue	Grossier		Possibilité d'obtenir de gros échantillons	Difficulté d'obtenir des échantillons dans le gravier et la roche Pénétration du sol difficile Faible récupération de la glace (sauf dans un cas) Équipement endommagé par les sols à grains grossiers
Carottage réfrigéré	Grossier	Air	Pas de contamination de l'échantillon Acceptable pour l'environnement	Si la température est > 0°C, air a tendance à faire fondre la glace Les silts peuvent boucher la tête Poids de l'équipement Nécessité de dégeler le compresseur
		Eau	Acceptable pour l'environnement	Faible récupération de la glace Lavage des fines de l'échantillon Eau gèle en hiver
		Boue et saumures	Acceptable pour l'environnement	Faible récupération de la glace Corrosion de l'équipement
		Glycol	Acceptable pour l'environnement	Faible récupération de la glace
		Produits pétroliers	Récupération de la glace excellente Carottage peut même être réalisé en été	Inacceptable pour l'environnement Possibilité d'incendie
Cuillère fendue	Fin		Indication du degré de sensibilité à la température des liens glace-sol dans le matériau	Échantillons toujours remaniés Faible récupération de la glace
Shelby Tube modifié	Fin		Récupération de la glace excellente	Processus long
Tarière mécanique à mèche creuse	Fin		Échantillons gelés non remaniés de très bonne qualité	Ce ne sont pas toutes les installations de forage qui peuvent utiliser l'équipement pour prendre des échantillons

La revue de la documentation sur les méthodes de forage et d'échantillonnage des sols gelés a mis en évidence la difficulté d'obtenir l'information essentielle sur les sols gelés, à savoir : leur nature, leur contenu en glace et leur potentiel de consolidation au dégel. Les méthodes répertoriées sont soit inefficaces ou très coûteuses, si l'on désire obtenir des échantillons de sol intact avec une bonne récupération de la glace. De plus, la caractérisation du comportement en consolidation au dégel des sols implique le maintien des échantillons à l'état gelé lors du transport vers un laboratoire permettant la mesure de ce comportement. Il est donc difficile de caractériser efficacement le pergélisol sous les ouvrages d'envergure que constituent les routes et pistes d'atterrissage. Ce problème a été particulièrement marqué lors de la construction des pistes et chemins d'accès dans les années 1980-1990. Aucune des études réalisées à cette époque n'avait permis d'obtenir de l'information sur les caractéristiques et propriétés des sols gelés sous les pistes et routes d'accès étant donné que les forages s'étaient limités à la couche active. Encore aujourd'hui, on ne dispose que de très peu d'information à ce sujet.

Suite à ce constat, le groupe de recherche en ingénierie des chaussées a entrepris un projet en collaboration avec le département de génie mécanique de l'Université Laval en vue du développement d'un carottier-œdométrique permettant de déterminer « in-situ » les caractéristiques mécaniques du pergélisol lors du dégel. Le carottier, qui en est présentement au stade de la conception, devra :

- pouvoir être opéré à l'aide d'une foreuse légère et portative pour faciliter l'accès aux sites d'investigation,
- faciliter le maintien de la condition gelée du sol lors du forage,
- pouvoir induire le dégel de l'échantillon à l'intérieur du carottier,
- pouvoir induire la consolidation de l'échantillon sous un niveau de charge équivalent à l'état de contrainte anticipé sous l'ouvrage à construire.
- permettre la récupération de l'échantillon consolidé pour caractérisation et classification du sol.

Cet outil devrait permettre d'obtenir l'information minimale requise pour l'étude des sols gelés sous les infrastructures existantes ou le long de nouveaux corridors prévus pour des infrastructures de transport. Le carottier aura cependant vraisemblablement des limitations dans certaines conditions notamment dans les graviers grossiers et tills glaciaires dont la caractérisation constitue un défi important.

3 Identification des infrastructures de transport vulnérables au dégel du pergélisol au Nunavik

La deuxième phase du projet visait à identifier les pistes et chemins d'accès montrant des signes de dégradation liés au dégel du pergélisol et à les documenter. L'information détaillée recueillie au cours de cette partie de l'étude est disponible dans le rapport « Beaulac et Doré., 2005b). Les prochaines sections résument les principales conclusions de ce rapport.

La liste des infrastructures jugées vulnérables au dégel du pergélisol a été établie en considérant la condition actuelle de l'infrastructure et les problèmes qui ont été répertoriés lors de différentes visites sur le terrain par plusieurs intervenants. Par ailleurs, l'identification des infrastructures sensibles au dégel du pergélisol prend en considération l'impact d'un changement climatique sur la condition future des pistes. Les problèmes répertoriés conduisant à la classification d'une infrastructure vulnérable au dégel du pergélisol sont : affaissements accompagnés d'une accumulation d'eau en pied de talus, présence de fissures, présence de coins de glace, présence de sols riches en glace associée à une zone de déblai et tassements qui peuvent être mesurés par l'épaisseur de granulats MG-20b.

Les infrastructures aéroportuaires les plus problématiques ayant besoin d'une attention particulière sont (Identifiées en rose dans le tableau 3) :

- Kangirsuk (piste)
- Salluit (piste et chemin d'accès)
- Tasiujaq (piste)

Les infrastructures aéroportuaires qui sont à surveiller pour le moment sont (Identifiées en jaune dans le tableau 3):

- Akulivik (piste)
- Inukjuak (piste)
- Puvirnituaq (piste)
- Umiujaq (piste et chemin d'accès)
- Quaqtuaq (piste)
- Aupaluk (piste)

Les infrastructures aéroportuaires considérées stables sont :

- Ivujivik
- Kangiqsualujjuaq
- Kangiqsujuaq
- Kuujjuarapik

Le tableau 3 présente une synthèse de la condition des infrastructures aéroportuaires et les recommandations des travaux à faire pour chacune des pistes.

Tableau 3: Synthèse de la condition des pistes et chemins d'accès et recommandations

AÉROPORT	CONDITION ET ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES	TRAVAUX RÉALISÉS	RECOMMANDATIONS ADDITIONNELLES
Akulivik	<p>Effet du dégel du pergélisol : Important</p> <p>Superficie affectée : Faible (problèmes concentrés en bordure nord de piste, moitié est, dans le secteur des déblais de till)</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : modéré (16 à 40 mm/an; moyenne= 28 mm/an)</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : Inconnue</p> <p>Évolution prévisible : Piste probablement instable à long terme. Risque d'évolution des dégradations sous la piste</p>	<p>Régimes thermiques suivis depuis 1990 (mesures manuelles) et 2004 (mesures automatisées) par le CEN (Allard et al., 2007).</p> <p>Des levés de géoradar ont également été réalisés et sont décrits par le CEN (Allard et al., 2007).</p> <p>Des plaques de tassement ont été installées et sont suivies par le MTQ depuis 2005.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Piste à surveiller • Activité thermokarstique à surveiller dans le till • Évolution des coins de glace à surveiller • Déterminer épaisseur et caractéristiques des tills riches en glace
Aupaluk	<p>Effet du dégel du pergélisol : Peu important</p> <p>Superficie affectée : ---</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : ---</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : ---</p> <p>Évolution prévisible : Stable à long terme. Risque faible de mauvais comportement.</p>	<p>Régimes thermiques suivis depuis 1990 (mesures manuelles) et 2004 (mesures automatisées) par le CEN (Allard et al., 2007).</p> <p>Des levés de géoradar ont été réalisés par Inspection Radar Inc. et sont décrits par la CEN (Allard et al., 2007).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Surveiller la condition des coins de glace • Surveiller les fossés de drainage en fin de piste. Problèmes importants de soulèvement de la clôture à l'endroit du cours d'eau. • Surveiller petite cuvette thermokarstique possiblement active en bordure de la piste, au centre, coté ouest

AÉROPORT	CONDITION ET ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES	TRAVAUX RÉALISÉS	RECOMMANDATIONS ADDITIONNELLES
Inukjuak	<p>Effet du dégel du pergélisol : Important</p> <p>Superficie affectée : Modérée (problèmes concentrés en bordure de piste sur une bonne partie de la longueur côté nord-est des deux côtés de la piste).</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : modéré à fort (17 à 50 mm/an; moyenne = 30 mm/an)</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : Inconnue</p> <p>Évolution prévisible : Tassement anticipés à long terme. Risque d'évolution des dégradations sous la piste (affaissements)</p>	Des plaques de tassement ont été installées et sont suivies par le MTQ depuis 2005.	<ul style="list-style-type: none"> • Piste à surveiller • Fossé à corriger des deux côtés de la piste dans la section nord-est.
Ivujivik	<p>Effet du dégel du pergélisol : Aucun</p> <p>Superficie affectée : ---</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : ---</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : ---</p> <p>Évolution prévisible : Stable (roc)</p>		<p>Inspection et entretien régulier</p> <p>Cette piste n'a pas été visitée par notre équipe lors du projet</p>
Kangiqsualujjuaq	<p>Effet du dégel du pergélisol : Aucun</p> <p>Superficie affectée : ---</p> <p>Taux d'évolution : ---</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : ---</p> <p>Évolution prévisible : Stable à long terme</p>		<p>Inspection et entretien régulier</p> <p>Cette piste n'a pas été visitée par notre équipe lors du projet</p>
Kangiqsujuaq	<p>Effet du dégel du pergélisol : Aucun</p> <p>Superficie affectée : ---</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : ---</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : ---</p> <p>Évolution prévisible : Stable (roc)</p>		<p>Inspection et entretien régulier</p> <p>Cette piste n'a pas été visitée par notre équipe lors du projet</p>

AÉROPORT	CONDITION ET ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES	TRAVAUX RÉALISÉS	RECOMMANDATIONS ADDITIONNELLES
Kangirsuk	<p>Effet du dégel du pergélisol : Important vis-à-vis la zone de déblai</p> <p>Superficie affectée : Importante (environ 300m)</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : Les taux de tassement observés ne sont pas disponibles en raison d'un changement de point de référence. Les tassements depuis la construction de la piste excèdent 30 mm par année dans certains secteurs de la zone en déblai.</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : Importante</p> <p>Évolution prévisible : Tassement important anticipé (zone en déblai).</p> <p>Le risque de mauvais comportement à long terme dépend essentiellement de l'épaisseur de la couche riche en glace sous la piste dans la zone en déblai. Selon Allard et al., (2007), cette couche a entre 4,0 m et 5 m d'épaisseur et serait dégelée sur environ 1 à 2 m. Il resterait donc plus de 2 m à dégeler, ce qui entraînera, au taux actuel de dégel, des problèmes de mauvais comportement durant plus de 20 ans (dépendant du taux de réchauffement et des épaisseurs réelles de sol riche en glace)</p>	<p>Régimes thermiques suivis depuis 2005 (mesures automatisées) par le CEN (Allard et al., 2007). Des levés de géoradar et de résistivité ont également été réalisés et sont décrits par la CEN (Allard et al., 2007). Des plaques de tassement ont été installées et sont suivies par le MTQ depuis 2005.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Préciser l'épaisseur de la couche riche en glace et prélever des échantillons intacts par forages profonds sous la piste. • Des informations sur l'efficacité des techniques de protection (Tasiujaq), sur l'épaisseur de la couche riche en glace et sur ses caractéristiques sont nécessaires pour le choix d'une stratégie d'intervention à long terme. Entretemps, l'entretien intensif de la surface est recommandé.
Kuujuarapik	<p>Effet du dégel du pergélisol : Aucun</p> <p>Superficie affectée : ---</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : ---</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : ---</p> <p>Évolution prévisible : Stable à long terme</p> <p>Absence de pergélisol</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Inspection et entretien régulier

AÉROPORT	CONDITION ET ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES	TRAVAUX RÉALISÉS	RECOMMANDATIONS ADDITIONNELLES
Puvirnitug	<p>Effet du dégel du pergélisol : Important (secteur de la vallée argileuse)</p> <p>Superficie affectée : Localisée (secteur de la vallée)</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : faible (5 à 10 mm/an). Il faut cependant noter que les plaques de tassement ne semblent pas avoir été installées dans les dépressions importantes de la piste.</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : inconnue</p> <p>Évolution prévisible : Tassements modérés à long terme qui évolueront probablement sous le centre de la piste</p>	<p>Régimes thermiques suivis depuis 1991 (manuellement) et depuis 2005 (automatisés) par le CEN (Allard et al., 2007)</p> <p>Des plaques de tassement ont été installées et sont suivies par le MTQ depuis 2005.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Piste à surveiller (secteur de la vallée argileuse) • Problèmes d'érosion dans les points bas des dépressions au niveau de la petite vallée : correction de la dépression pour éviter la concentration du ruissellement. • Caractérisation du sol dans la petite vallée (épaisseur, teneur en glace).
Quaqtaq	<p>Effet du dégel du pergélisol : Peu important</p> <p>Superficie affectée : ---</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : ---</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : ---</p> <p>Évolution prévisible : Stable à long terme</p>	<p>Régimes thermiques suivis depuis 1988 avec interruption de 10 ans puis repris en 2004 (mesures automatisées) par le CEN (Allard et al., 2007).</p> <p>Des levés de géoradar et de résistivité ont également été réalisés et sont décrits par la CEN (Allard et al., 2007).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Surveiller les fossés de drainage et la section en déblai • Entretien régulier

AÉROPORT	CONDITION ET ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES	TRAVAUX RÉALISÉS	RECOMMANDATIONS ADDITIONNELLES
Salluit	<p>Effet du dégel du pergélisol : Important (piste) et très important (chemin d'accès)</p> <p>Superficie affectée : Modérée (piste) et importantes (chemin d'accès)</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : modéré à fort (15 à 60 mm/an; moyenne= 30 mm/an)</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : Inconnue</p> <p>Évolution prévisible : Tassement sur la piste important à long terme et chemin instable à long terme avec risque de glissement superficiel</p>	<p>Régimes thermiques suivis depuis 1987 (mesures automatisées) par le CEN (Allard et al., 2007). Des plaques de tassement ont été installées et sont suivies par le MTQ depuis 2005.</p> <p>Trois techniques de protection sont à l'essai sur le chemin d'accès à la piste. Le remblai à convection, le drain thermique et la surface réfléchissante sont utilisés individuellement ou en combinaison sur 6 sections d'essai construites à l'été 2006 puis réparées à l'été 2007. Le suivi devrait durer au minimum pendant trois ans.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Caractériser l'épaisseur et le contenu en glace des sols sensibles au dégel sous la piste et le chemin d'accès • Des informations sur l'efficacité des techniques de protection, sur l'épaisseur de la couche riche en glace et sur ses caractéristiques sont nécessaires pour le choix d'une stratégie d'intervention à long terme sur la piste et la route d'accès. Entretemps, l'entretien intensif de la surface de la piste est recommandé

AÉROPORT	CONDITION ET ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES	TRAVAUX RÉALISÉS	RECOMMANDATIONS ADDITIONNELLES
Tasiujaq	<p>Effet du dégel du pergélisol : Très important</p> <p>Superficie affectée : Toute la piste</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : modéré à très élevé (20- 70 mm/an; moyenne = 35 mm/an).</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : 1,5 m + argile riche en glace à 8m de profondeur</p> <p>Évolution prévisible : Tassements importants anticipés.</p> <p>Le risque de mauvais comportement à long terme dépend essentiellement de l'épaisseur de la couche riche en glace sous la piste. Selon Allard et al., (2007), cette couche a environ 2,0 m de profondeur et est présentement dégelée sur environ le quart de son épaisseur sous la piste. Selon les taux de dégel actuels, cette situation devrait entraîner des tassements durant plus de vingt ans (dépendant du taux de réchauffement et des épaisseurs réelles de sol riche en glace).</p>	<p>Régimes thermiques suivis depuis 1989 par le CEN (Allard et al., 2007)</p> <p>Des relevés d'épaisseur de neige en bordure de la piste ont été réalisés par le CEN (Allard et al., 2007)</p> <p>Des plaques de tassement ont été installées et suivies par le MTQ depuis 2005.</p> <p>Trois techniques de protection sont à l'essai sur la piste de Tasiujaq. Une section avec remblai à convection, une section avec drain thermique et une autre avec pente douce (8H :1V) ont été construites à l'été 2007 et seront suivies pendant trois ans.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Préciser l'épaisseur de la couche riche en glace et prélever des échantillons intacts par forages profonds sous la piste. • Des informations sur l'efficacité des techniques de protection, sur l'épaisseur de la couche riche en glace et sur ses caractéristiques sont nécessaires pour le choix d'une stratégie d'intervention à long terme. Entretemps, l'entretien intensif de la surface est recommandé.

AÉROPORT	CONDITION ET ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES	TRAVAUX RÉALISÉS	RECOMMANDATIONS ADDITIONNELLES
Umiujaq	<p>Effet du dégel du pergélisol : Peu important (piste) et très important (chemin)</p> <p>Superficie affectée : Problème très localisé (piste); faible superficie (chemin)</p> <p>Taux d'évolution des tassements * : Très élevé (63 mm/an)(Chemin).</p> <p>Épaisseur de pergélisol instable : 2 à 3 m d'épaisseur sur environ 50 m de longueur (Bolduc, 2007)</p> <p>Évolution prévisible : Dégradation à prévoir sur encore plusieurs années (= de 10 ans)</p> <p>Chemin d'accès à surveiller. La piste est stable (sauf petite dépression à un endroit en bordure de la piste)</p>	<p>Relevés géophysiques réalisés sur le chemin d'accès (Bolduc, 2007). Une plaque de tassement a été installée et est suivie par le MTQ depuis 2005.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • À surveiller. Considérant que la route n'est présentement pas revêtue et que, selon les travaux de Bolduc et Fortier(Bolduc 2007), les cuvettes de sols ou se produisent les tassements sont presque entièrement dégelées, nous ne croyons pas que la route constitue un cas inquiétant. Il est cependant important de continuer d'en faire le suivi. Cette classification pourrait changer advenant le pavage prochain de la route.

* Les tassements sont mesurés par relevés de nivellement annuels (lorsque possible) sur les plaques de tassement installées par l'Université Laval et le MTQ. Le tassement est la différence d'élévation mesurée pour une plaque pour une période donnée. Le taux d'évolution (mm/an) est le tassement total mesuré divisé par la période de relevés en années.

4 Techniques de protection ayant un potentiel d'application au Nunavik

La revue de la documentation a permis de répertorier plusieurs techniques applicables pour protéger des remblais nouveaux ou existants construits sur pergélisol instable. Ces techniques sont décrites en détail dans le rapport « Beaulac et Doré., 2005a ». La revue de littérature a permis d'identifier plusieurs techniques applicables pour les infrastructures du Nunavik. Le bilan de la condition de ces infrastructures « Beaulac et Doré., 2005b » a pour sa part permis d'identifier les infrastructures instables et de documenter leur condition. Ces deux sources d'information serviront à préciser les techniques ayant un potentiel d'application pour la préservation des infrastructures du Nunavik.

4.1 Approche générale proposée

Plusieurs techniques de protection contre la dégradation du pergélisol ont été développées en Alaska ainsi que dans plusieurs pays nordiques. Pour plusieurs raisons, notamment, le coût, l'efficacité douteuse, la sécurité des utilisateurs, le niveau d'entretien élevé et autres, peu des méthodes décrites sont présentement utilisées sur une base régulière dans les conditions de pergélisol.

Avant de décrire les méthodes de mitigation proposées, le principe de stabilisation thermique élaboré dans le cadre de ce projet sera d'abord expliqué. Ce principe, illustré à la figure 6, est divisé en deux grandes étapes : la préconsolidation par dégel provoqué (1) et la stabilisation thermique (2). La préconsolidation par dégel provoqué est une étape facultative qui s'applique principalement à des nouvelles constructions ou à des structures existantes dont on souhaite accélérer la stabilisation. La technique s'apparente à la pratique de surconsolidation utilisée en géotechnique pour réduire les risques d'instabilité à long terme d'un remblai construit sur sol compressible. L'approche proposée consiste donc à provoquer l'augmentation de l'absorption de chaleur dans le

remblai dans le but d'accélérer la dégradation du pergélisol. Il s'agit donc d'une consolidation contrôlée sous le remblai. On cherche ainsi à augmenter, en conditions contrôlées, l'épaisseur de la couche active telle qu'elle excède l'épaisseur prédite par un modèle en considérant un réchauffement climatique sur la période de vie utile de l'ouvrage. Dans le cas d'un remblai existant, on peut alternativement considérer la consolidation subie en conditions d'exploitation normales comme étape de consolidation préalable (trait pointillé). Suite à cette consolidation, il est important de hausser le plafond du pergélisol dans la couche dégelée par une technique de protection. Cette étape est la stabilisation thermique.

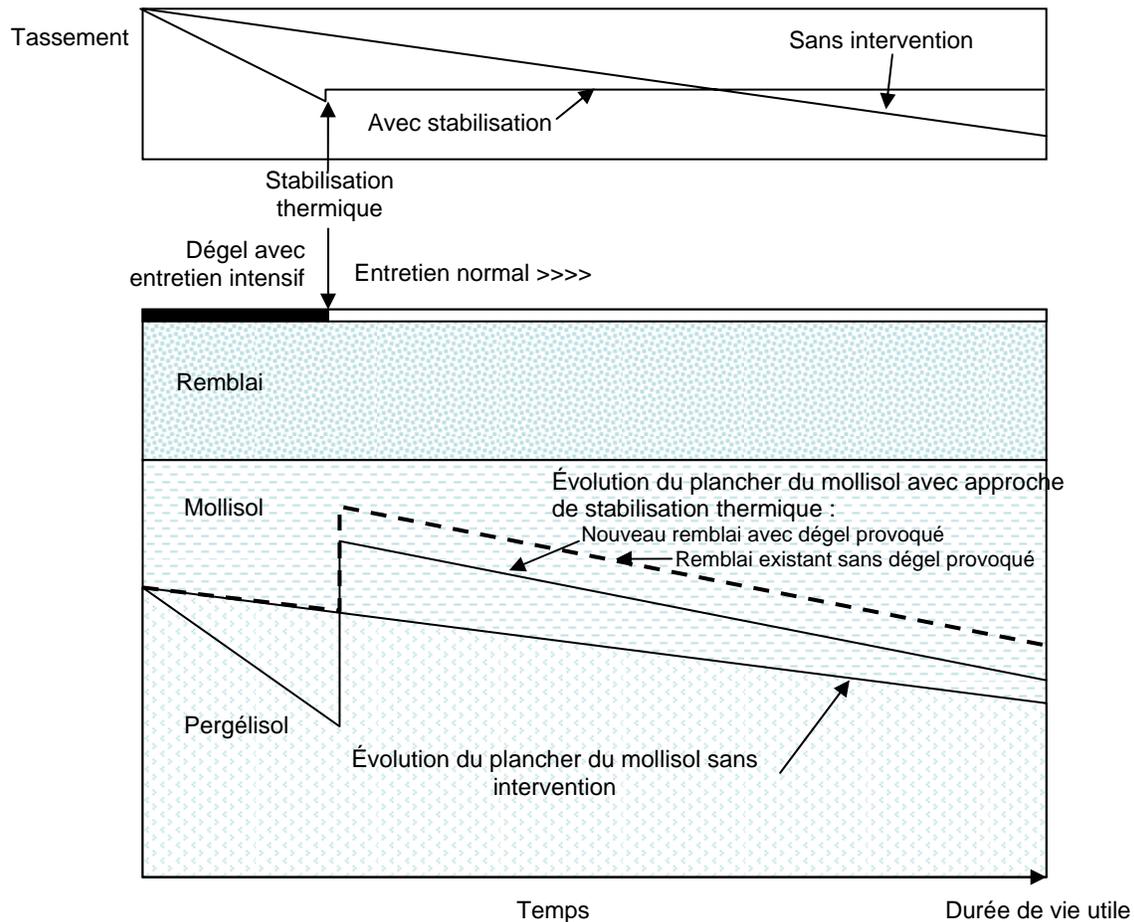


Figure 6: Principe de la stabilisation thermique

Dans le cas d'une chaussée neuve, la préconsolidation par dégel provoqué peut être réalisée en construisant une chaussée thermiquement sous-dimensionnée (par exemple, d'épaisseur relativement faible et ayant une surface absorbant la chaleur). Dans le cas d'une chaussée existante, la préconsolidation peut être obtenue par la pose d'un revêtement ou d'une surface foncée temporaire.

Dans le contexte des pistes et des routes d'accès du Nunavik, les méthodes de stabilisation thermique identifiées comme ayant du potentiel pour la stabilisation thermique des pistes et chemins d'accès sont les suivantes :

- remblai à convention d'air,
- drain de chaleur,
- surface réfléchissante.

Il est important de noter que la stabilisation thermique ne s'applique que dans les secteurs où le réchauffement du remblai entraîne une consolidation importante. Elle implique donc de pouvoir identifier au préalable les secteurs instables. Devant les limitations des techniques d'investigation des tracés en conditions pergélisolées, la construction par étape est une stratégie attrayante pour les infrastructures du Nunavik. Ainsi, la construction d'un remblai ayant une structure adéquate mais sous-dimensionnée sur le plan thermique (structure ne permettant pas de maintenir l'intégrité du pergélisol sous le remblai) a l'intérêt de permettre de réaliser des économies lors de la construction et d'identifier les secteurs à problème lors des premières années d'exploitation du remblai. Pour que cette approche soit viable, il est cependant essentiel de planifier un entretien intensif à court terme et la stabilisation thermique des secteurs instables à moyen terme (< 5 ans).

4.2 Description des techniques

Les techniques retenues sont décrites dans les sections suivantes.

4.2.1 Remblai à convection d'air

Le remblai à convection d'air est une technique de protection visant à extraire la chaleur des remblais (figure 7). Durant l'hiver, cette méthode favorise la formation de cellules de convection dans les pores d'un matériau granulaire grossier et poreux. L'air dans les pores de la partie supérieure du remblai refroidit et sa plus forte densité le fait descendre poussant vers le haut l'air plus chaud de la partie inférieure du remblai. Ce mouvement d'air augmente considérablement l'efficacité du transfert de chaleur entre le pergélisol et l'air durant l'hiver.

Les remblais des pistes du Nunavik ont été construits en utilisant de l'empierrement qui a pu agir comme un matériau de remblai à convection d'air. Le matériau contenait cependant une proportion importante de petites particules ayant pu réduire la dimension des pores et de nuire à l'efficacité de la convection. Cette méthode est intéressante puisqu'elle est peu coûteuse et ne requiert pas d'entretien après sa construction. Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire d'obtenir des roches anguleuses compétentes d'approximativement 15 à 30 cm de diamètre (Goering, Communication personnelle, 2003). Nonobstant l'opinion de M. Goering, nous croyons que les pierres arrondies conviennent aussi bien. Le facteur important à considérer est l'uniformité de la dimension des pierres qui assurera une très grande porosité au matériau de remblai. L'avantage de cette méthode est d'avoir les matériaux déjà en place s'ils sont disponibles, ce qui réduit les coûts de transports. La construction de ce type de remblai est relativement simple comparativement à d'autres méthodes telle que la pose de thermosyphons. Ce principe a par ailleurs été retenu pour un projet expérimental visant la stabilisation de l'épaulement de la piste de Tasiujaq.

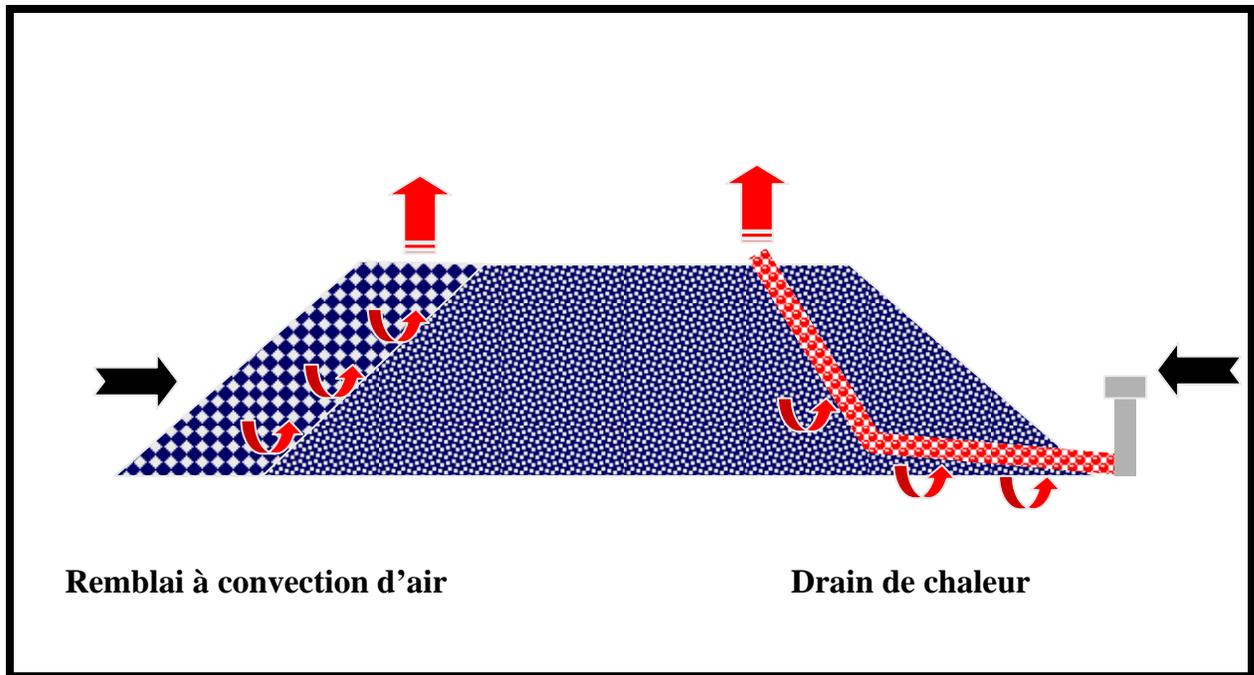


Figure 7: Remblai à convection d'air et drain de chaleur

4.2.2 Drain de chaleur

Le drain de chaleur est une innovation proposée par le groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval. Il s'agit d'une méthode permettant l'extraction de chaleur dans les remblais pendant l'hiver. Le drain de chaleur consiste en un géocomposite drainant à forte perméabilité placé à la limite entre le remblai constituant le centre de la piste et celui constituant l'accotement (figure 7). Une prise d'air sera installée au pied du remblai afin de permettre la création d'un mouvement ascensionnel de l'air dans la membrane. Ce mouvement de l'air, aussi appelé effet cheminée, sera provoqué par sa densité plus faible en raison d'une différence de température. En somme, cette membrane devrait permettre l'extraction efficace de chaleur du remblai par effet de convection.

Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire d'importer le géocomposite. Cette méthode implique certains coûts de transport, mais ils demeurent modestes si on considère le coût de production d'un empierrement ou le coût de certaines

méthodes telles les thermosyphons. Il s'agit d'une méthode relativement simple et facile d'installation comparativement à d'autres méthodes telles que les thermosyphons et les remblais ventilés.

4.2.3 Surface réfléchissante

Cette technique vise à réduire l'entrée de chaleur dans les remblais par l'utilisation de surfaces pâles. Les surfaces réfléchissantes, testées en Alaska, consistent en des surfaces où une couche de peinture blanche a été appliquée sur le revêtement bitumineux noir. Il est possible de remarquer à la figure 8a que la peinture blanche appliquée sur la section expérimentale au site du CRREL à Fairbanks il y a près de 40 ans a subi peu de tassement alors que la section non protégée s'est affaissée et est maintenant recouverte d'eau et de tourbe. Cette technique est présentement à l'essai sur la route d'accès de Salluit (figure 8b).



Figure 8: a) État d'une section avec surface réfléchissante 30 ans après sa construction (site expérimental CRREL, Alaska) et b) installation d'une section d'essai sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit en 2006

Suite à cette étude réalisée par le CRREL, cette technique a prouvé son efficacité. Cependant, cette technique n'est pas actuellement utilisée pour des raisons de sécurité. En effet, la peinture peut réduire considérablement l'adhérence de la surface. La technique implique aussi des coûts importants lors de l'application et de l'entretien. Il peut être nécessaire d'appliquer de la peinture à chaque année puisqu'elle tend à s'user rapidement.

Le développement de nouveaux produits alliant faible absorption de radiation solaire et bonne adhérence permet de reconsidérer cette technique pour la protection de chaussées revêtues. On retrouve ainsi des produits de couleur claire à base de bitume, de ciment, de latex ou d'époxy qui semblent prometteurs pour la réalisation de surfaces de chaussées claires (figure 9).



Figure 9: Béton bitumineux de couleur pâle pouvant être utilisé pour les surfaces réfléchissantes (Mexasphalt, Shell)

Ce type de revêtement pourrait être appliqué sans avoir recours à une paveuse. Les revêtements clairs, en réduisant la température de surface du revêtement, entraînent cependant un risque de givrage différentiel en conditions froides automnales. Ce risque devra être évalué advenant un intérêt important pour ce type de technique de protection.

4.3 Évaluation de l'efficacité des techniques de protection

L'efficacité de deux des techniques proposées a été évaluée de façon sommaire par simulation à l'aide du logiciel d'analyse numérique « TEMP-W ». Les objectifs principaux de cette analyse étaient de simuler le comportement thermique en 1D du drain thermique et des surfaces réfléchissantes dans le contexte actuel de la route d'accès de Salluit afin de déterminer l'efficacité de l'application de ces deux méthodes sur le pergélisol et sur la profondeur de dégel. Le projet visait également l'évaluation de l'efficacité de ces deux techniques de protection du pergélisol dans un contexte de changements climatiques à long terme.

Le rapport « Beaulac et coll., 2006 » donne le détail de cette analyse. Les simulations ont permis d'évaluer l'effet de ces techniques de protection sur le plafond du pergélisol sous les infrastructures de transport afin de diminuer les instabilités liées à l'accumulation de neige sur les talus et aux changements climatiques.

Pour évaluer la performance de chaque technique de protection du pergélisol (drain thermique et surfaces réfléchissantes), ces simulations ont été effectuées en une dimension selon la configuration du chemin d'accès menant à l'aéroport de Salluit. Une structure de chaussée de 2 m représentant le chemin d'accès à Salluit a été utilisée. La structure de chaussée repose sur de l'argile pergélisolée de 15 m de profondeur. Une comparaison a été effectuée entre une section de route sans mesure d'adaptation, dite de référence et une section où chaque technique a été mise en place. Les températures de l'air et du sol ont été tirées de mesures prises par le Centre d'études nordiques sur une période de 3 ans entre 2001 et 2004. Les scénarios de réchauffement climatique ont été fournis par Ouranos.

Le logiciel TEMP/W de Geostudio a été utilisé pour effectuer les simulations. TEMP/W est un modèle numérique qui peut mathématiquement simuler des phénomènes physiques réels de transferts de chaleur à travers un milieu

complètement ou partiellement saturé et à travers un milieu solide gelé ou non gelé. Il s'agit d'une méthode de résolution de problème par éléments finis qui consiste à discrétiser un espace continu en plusieurs petits éléments, qui sont appelés éléments finis. Les équations de transferts de chaleur sont définies à chaque nœud et les propriétés des matériaux nécessaires aux calculs de ces équations sont données par les éléments voisins.

Les résultats de la simulation montrent qu'il est possible d'abaisser significativement la température d'un sol si un drain thermique ou si des surfaces réfléchissantes sont mis en place. Les deux techniques ont démontré un potentiel de réduire l'épaisseur de la couche active par environ 30%.

En réduisant la profondeur de dégel, ces mesures d'adaptation atténueront la formation de dépressions et de fissures sur la surface des chaussées traitées. Contrairement aux pistes non-revêtues où il est possible de corriger facilement des défauts de surface en ajoutant des matériaux granulaires, il n'est pas possible de corriger facilement la surface d'une route asphaltée, d'où l'importance d'utiliser des techniques de protection du pergélisol.

L'efficacité de ces techniques fait présentement l'objet de plusieurs projets. Elles sont d'abord testées en conditions contrôlées en chambre froide à l'aide d'un modèle réduit de remblai qui permet la mesure de l'efficacité des techniques d'extraction de chaleur en comparaison avec une section de référence. Elles font également l'objet d'essais à grande échelle sur le chemin d'accès menant à l'aéroport de Salluit depuis l'été 2006. Cette expérimentation permettra de déterminer de façon plus exacte leur faisabilité technique et économique (coût initial de construction, coût d'entretien, coût de transport, coût de main d'œuvre et de location de la machinerie lourde). De plus, ces tests permettront de recueillir des données et de permettre l'adaptation des simulations numériques pour mieux représenter la réalité. En ayant un modèle numérique reflétant la réalité, il sera alors plus facile d'étudier l'effet de l'utilisation de ces mesures

d'adaptation en contexte de changements climatiques. À l'été 2007, un autre projet a été entrepris sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour évaluer l'efficacité des techniques d'extraction de chaleur ainsi qu'une technique de modification de la pente de talus dans des conditions réelles d'exploitation d'une piste d'atterrissage (Figure 10).



Figure 10 : Installation de la section expérimentale de drain thermique à côté de la section de remblai à convection (à gauche sur la photo) sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq à l'été 2007.

5 Élaboration d'une stratégie de gestion et d'intervention sur les infrastructures de transport du Nunavik

Les prochaines sections décrivent une stratégie d'adaptation proposée pour les infrastructures de transport du Nunavik. La stratégie comporte deux niveaux le premier niveau décrit une stratégie de gestion de ces infrastructures. Le second décrit une stratégie d'intervention qui découle du plan d'action adopté au premier niveau.

5.1 Stratégie de gestion

La stratégie de gestion comporte un ensemble d'activités permettant l'identification des secteurs instables et l'évaluation technico-économique des

différentes options d'intervention en vue d'établir un plan d'intervention pour les infrastructures du Nunavik. Les activités proposées sont les suivantes :

5.1.1 Identification des secteurs sensibles au dégel du pergélisol

Le ministère des transports du Québec a déjà entrepris de répertorier la condition des pistes et des chemins d'accès par des inspections régulières. L'information recueillie à chaque visite est répertoriée sur des plans détaillés permettant le suivi de la condition des ouvrages.

5.1.2 Caractérisation des secteurs vulnérables au dégel du pergélisol

Les secteurs montrant des signes d'instabilité devraient faire l'objet d'un programme de caractérisation permettant de déterminer la sensibilité du pergélisol au dégel. La caractérisation devrait inclure les activités suivantes :

- Évolution des dégradations

Les taux d'évolution des principaux types de dégradation observés devraient faire l'objet de mesures. Les mesures suivantes sont recommandées :

- tassements (mm/an) mesurés sur des repères d'arpentage (clous pour surfaces en asphalte et plaques de tassement pour chaussées non revêtues)
- évolution de la superficie affectée (m²/an)
- évolution de la fissuration sur chaussées revêtues (m/an)

Ce type de suivi a déjà été entrepris, en partie, par le Ministère des Transports du Québec.

- Caractéristiques du sol d'infrastructure dans les secteurs instables

L'ampleur des problèmes anticipés requiert une caractérisation du sol d'infrastructure qui, sans nécessairement être très détaillée, doit fournir une information sommaire sur l'épaisseur de la couche riche en glace et sur la

distribution de la glace dans la couche. Les évaluations suivantes sont donc recommandées :

- Détermination de l'épaisseur de la couche de sol sous la chaussée par sondages géophysiques et par forage
- Pour être capable d'établir le comportement pour les vingt-cinq prochaines années, une caractérisation de la teneur en glace (ou en eau) du sol, sous le plafond du pergélisol jusqu'à une profondeur minimale de 5 à 10 mètres est recommandée dans le cas où on ne peut atteindre le roc. Cette opération permettra par ailleurs de caractériser et de classer les sols d'infrastructure.

Cette caractérisation des sols d'infrastructure permettra d'établir le niveau de sensibilité du pergélisol au dégel suivant les classes proposées dans le tableau 4.

Tableau 4: Sensibilité du sol d'infrastructure au dégel du pergélisol

	% de glace dans le sol		
Épaisseur de la couche Riche en glace	< 30	30 – 60	> 60
≤1m	Faible	Modérée	Forte
> 1m	Modérée	Forte	Forte

5.1.3 Analyse économique des solutions applicables

L'étape suivante du processus de gestion proposé implique l'analyse technique et économique des solutions applicables à un secteur instable. Cette étape implique d'abord d'identifier les solutions applicables en fonction des caractéristiques du secteur. Ces solutions sont identifiées à la section 4.2 pour trois cas : les pistes d'atterrissage non revêtues, les chemins d'accès non

revêtus et les chemins d'accès pavés. Les solutions applicables peuvent être regroupées en trois catégories principales :

- Entretien régulier ou intensif,
- application d'une ou de plusieurs techniques de stabilisation adaptée au contexte du secteur instable, ou
- relocalisation de la piste ou du chemin d'accès dans les cas où aucune des solutions précédentes ne peut assurer l'opération sécuritaire de l'infrastructure.

Les techniques identifiées devraient faire l'objet d'une analyse économique sur la durée de vie utile de l'ouvrage. Les paramètres à considérer pour cette analyse incluent le coût d'application du traitement aussi souvent que requis durant la vie utile de l'ouvrage pour assurer une opération sécuritaire et un niveau de service adéquat ainsi que le bénéfice qui prendrait la forme d'une économie de coût d'entretien. La connaissance de l'efficacité et de la durée de vie des traitements est un pré-requis pour cette analyse.

5.1.4 Mise en œuvre de la stratégie: plan d'action

L'étape finale de la stratégie de gestion est la mise en place d'un plan d'intervention à long terme.

La stratégie de gestion implique donc une gestion efficace des données de condition des infrastructures ainsi que des données de caractérisation des secteurs instables, une analyse technique et économique des solutions applicables et la mise en œuvre d'un plan d'intervention quinquennal.

5.2 Stratégie d'intervention

La stratégie d'intervention proposée comporte trois tableaux qui visent à assister les ingénieurs dans le choix de méthodes d'intervention adaptées au contexte spécifique d'un

secteur instable. En plus des méthodes décrites dans la section 3.2, les stratégies proposées incluent les techniques suivantes :

- Correction de pentes des talus : Technique visant à réduire les effets de l'accumulation de neige sur les talus du remblai. Ce problème a été identifié dans l'état de connaissances comme étant une des causes majeures de dégradation du pergélisol sous un remblai. Le problème a par ailleurs été documenté par des mesures de température au pied du talus de l'aéroport de Tasiujaq par l'équipe du Centre d'études nordiques (Allard et coll., 2007). Selon des études récentes (Hoove et al.,; Fitzpatrick,), les pentes requises pour minimiser les effets de l'accumulation de neige en bordure d'une piste sont de 6H :1V.
- Correction du drainage : Un des principes importants pour la construction de remblais routiers ou aéroportuaires sur pergélisol est d'éviter toute accumulation d'eau le long de l'ouvrage. Plusieurs pistes et routes d'accès ont été conçues selon des principes de construction utilisés dans les régions de gel saisonnier. On retrouve donc, à plusieurs endroits au Nunavik des fossés aménagés en bordures de remblais. La correction proposée vise à éloigner les fossés des remblais de façon à minimiser les problèmes reliés à l'écoulement d'eau en bordure des remblais. La figure 10 illustre la modification proposée. Cette solution est préconisée pour tous types de remblais construits sur pergélisol sensible au dégel. La pente au pied du talus doit permettre le drainage de l'eau vers le fossé. Dans le cas de la correction d'un drainage existant, le matériau excavé dans le nouveau fossé peut servir au remplissage de l'ancien fossé.

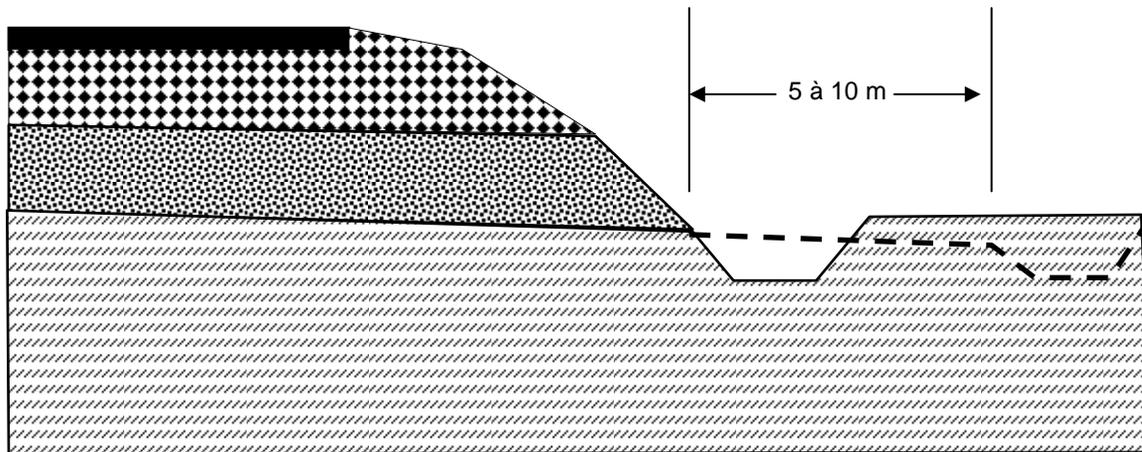


Figure 11: Correction du drainage

- Rehaussement de profil : dans le cas des chemins d'accès non-revêtus, le rehaussement du profil peut s'avérer une solution économique permettant une certaine stabilisation thermique notamment lorsque les tassements surviennent au centre de la structure. Il est souhaitable que l'application d'une telle stratégie fasse l'objet d'un calcul du comportement thermique de la structure afin de maximiser le bénéfice de l'intervention.

Le premier tableau (tableau 5) représente une synthèse de la stratégie d'intervention proposée pour les pistes d'atterrissage et structures connexes (aires de circulation et de stationnement) non-revêtues. Les différentes options d'intervention proposées tiennent compte de la rapidité d'évolution du tassement, de la sensibilité au dégel déterminée à partir du tableau 4 et de la position du secteur dégradé sur la piste. À partir des données recueillies sur les infrastructures du Nunavik depuis 2005, les taux d'évolution sont considérés, sur une base préliminaire, comme étant lents si les tassements sont inférieurs à 20 mm/an et rapides pour des taux observés égaux ou supérieurs à 20 mm/an.

Le second tableau (tableau 6) donne une synthèse similaire applicable aux chemins d'accès non revêtus. Dans ce cas, le rehaussement de profil s'ajoute aux techniques applicables. Le troisième tableau (tableau 7) donne pour sa part une synthèse des stratégies applicables aux chemins d'accès revêtus. Dans ce cas, la surface réfléchissante s'ajoute aux solutions possibles.

Tableau 5: Stratégie d'intervention: Pistes d'atterrissage non-revêtues

Tassements	Évolution	Sensibilité au dégel	Position	Action
Oui	Lente	Faible	Centre	1
			Bordure	1
		Élevée	Centre	1
			Bordure	1 – 2 – 3 – 4
	Rapide	Faible	Centre	1
			Bordure	1 – 3 – 4
		Élevée	Centre	2
			Bordure	2 – 3 – 4 – 5
Non				1

- 1- Entretien régulier
- 2- Entretien intensif
- 3- Correction de pentes
- 4- Correction du drainage
- 5- Extraction de chaleur (RC / DT)

Tableau 6: Stratégie d'intervention: Chemins non-revêtus

Tassements	Évolution	Sensibilité au dégel	Position	Action
Oui	Lente	Faible	Centre	1
			Bordure	1
		Élevée	Centre	1
			Bordure	2 – 3 – 4
	Rapide	Faible	Centre	2
			Bordure	1 – 3 – 4
		Élevée	Centre	2 – 6
			Bordure	2 – 3 – 4 – 5
Non				1

6- Rehausser le profil de la chaussée

Tableau 7: Stratégie d'intervention: Chemins revêtus

Tassements	Évolution	Sensibilité au dégel	Position	Action
Oui	Lente	Faible	Centre	1
			Bordure	7
		Élevée	Centre	1
			Bordure	3 – 4 – 5 – 7
	Rapide	Faible	Centre	2
			Bordure	2 – 3 – 4
		Élevée	Centre	2 – 6 – 7
			Bordure	2 – 3 – 4 – 5 – 7
Non				1

7- Surface réfléchissante

CONCLUSION

La revue de littérature a permis l'identification des mécanismes dominants de dégradation des chaussées revêtues construites sur un pergélisol instable. Cette revue a également contribué à identifier de possibles techniques d'adaptation rentables pour contrer la dégradation future du pergélisol sous les infrastructures de transport (Beaulac et Doré, 2005a). Malgré le peu de données disponibles présentement, les techniques que nous considérons intéressantes pour application dans le contexte des infrastructures de transport du Nunavik sont :

- La surface réfléchissante pour les surfaces revêtues.
- Le drain thermique et le remblai à convection pour la protection des épaulements des remblais.

Quelques autres techniques prometteuses ont également été identifiées mais n'ont pas été évaluées au cours de ce projet.

Le bilan de la condition des pistes a été effectué à l'aide de différentes informations provenant des plans tels que construits, des études géotechniques originales, des relevés d'entretien des pistes et bâtiments du MTQ, des mesures de l'épaisseur de granulats MG-20b réalisées à l'été 2004, des photographies aériennes initiales et actuelles, des observations de terrain, des documents sur les aéroports du Nunavik publiés par l'équipe d'Allard en 1994 et 2004, etc.

Le bilan a fait l'objet d'un rapport détaillé décrivant la situation des infrastructures dans tous les villages du Nunavik (Beaulac et Doré, 2005b). Les cas montrant des signes importants de dégradation et nécessitant une attention particulière sont Kangirsuk (piste), Salluit (piste et chemin d'accès) et Tasiujaq (piste). Les cas montrant des signes modérés de dégradation et nécessitant une surveillance sont Akulivik (piste), Inukjuak (piste), Puvirnituaq (piste), Umiujaq (chemin d'accès), et tout projet impliquant la pose d'un revêtement.

Les techniques de protection ayant un potentiel d'application pour les pistes et les chemins d'accès sont les remblais à convection d'air, les drains de chaleur et les surfaces réfléchissantes. Il est à noter que ces méthodes de mitigation ne sont recommandées que pour des sections où il y a des problèmes importants de dégradation du pergélisol. Il a été possible de démontrer de façon sommaire l'efficacité du drain thermique et des surfaces réfléchissantes par modélisation thermique unidimensionnelle (Beaulac et Coll., 2006) en comparant une colonne de sol construite avec une des techniques de protection du pergélisol et une colonne de sol sans ces mesures d'adaptation. Les résultats montrent qu'il est possible d'abaisser significativement la température d'un sol si un drain thermique ou si des surfaces réfléchissantes sont mis en place. Plusieurs techniques soit, le drain de chaleur, le remblai à convection, le talus à pente adoucie et la surface réfléchissante font présentement l'objet d'importants projets expérimentaux sur la route d'accès de Salluit et sur la piste de Tasiujaq. Ces projets, réalisés par le MTQ en collaboration avec l'Université Laval, font l'objet d'un suivi sur un minimum de trois ans pour évaluer l'efficacité de ces techniques en conditions réelles d'exploitation.

Une stratégie globale de protection des chaussées revêtues neuves et existantes construites sur un pergélisol instable est proposée à titre de produit final de ce projet de recherche. La stratégie d'adaptation comporte deux niveaux : la stratégie de gestion et la stratégie d'intervention. Le premier niveau vise à identifier les secteurs instables et à planifier les interventions appropriées suite à une analyse bénéfice-coût des solutions applicables. Le second niveau vise à identifier, à concevoir et à appliquer les solutions adaptées à un contexte spécifique.

La stratégie d'adaptation repose en bonne partie sur l'évaluation de l'efficacité des techniques retenues (drain thermique, remblai à convection et surface réfléchissante) réalisée dans le cadre de projets en cours sur la route d'accès pavée à Salluit et la piste d'atterrissage gravelée à Tasiujaq. Des essais en

laboratoire et des simulations thermiques permettront également d'optimiser les caractéristiques de ces traitements et d'en évaluer l'efficacité. La stratégie repose également sur un suivi de l'évolution des dégradations et sur une caractérisation fiable de la sensibilité du pergélisol dans les secteurs instables. Le suivi de l'évolution des dégradations a été entrepris par le MTQ. Les relevés en cours incluent la cartographie des dégradations et la mesure des tassements. Il serait souhaitable que cette information soit consignée dans une base de données à référence spatiale de façon à pouvoir l'exploiter plus facilement. Des progrès importants restent à faire en ce qui concerne la caractérisation de la sensibilité du pergélisol dans les secteurs instables. La sensibilité a été définie comme étant une combinaison de l'épaisseur de la couche riche en glace et de la teneur en glace dans cette couche. Cette information ne peut être obtenue que par une combinaison de forages et de sondages géophysiques. L'obtention de cette information à coût raisonnable demeure un des grands défis pour la gestion des infrastructures nordiques.

Le principe dominant de la stratégie d'adaptation proposée est la stabilisation thermique. Ce principe peut être comparé à celui de la stabilisation mécanique d'un remblai construit sur un sol compressible. Dans ce cas spécifique, la stabilisation mécanique est atteinte par la consolidation du sol; en d'autres mots, en imposant au sol un niveau de contrainte supérieur au niveau prévu durant la vie du remblai. La stratégie d'adaptation proposée est donc basée sur l'approche suivante :

- a) Faire la conception de remblai routier afin d'obtenir une balance de chaleur nettement positive à l'interface entre le remblai et le sol naturel. Ceci permet l'augmentation de l'épaisseur de la couche active (pré-fonte) produisant ainsi une consolidation et une stabilisation mécanique du sol dégelé
- b) Identifier et entretenir les sections construites sur un pergélisol instable pour une période de 3 à 5 ans.

- c) Stabiliser thermiquement les sections instables en utilisant des techniques de protections appropriées. Concevoir une méthode de stabilisation thermique adéquate réduisant l'épaisseur de la couche active de sol à un niveau tel que le maximum d'épaisseur atteint lors de l'étape de pré-fonte ne sera jamais atteint lors de la vie de la chaussée revêtue.

Lorsque la stratégie est appliquée sur des routes ou pistes déjà existantes, l'approche peut être modifiée ainsi :

- a) Identifier et entretenir les sections construites sur un pergélisol instable pour une période de 3 à 5 ans. Des techniques d'entretien devraient inclure l'utilisation de matériaux de revêtement favorisant la prise de chaleur dans le remblai de la chaussée revêtue (mélanges de revêtement ou traitements de surface forcés).
- b) Stabiliser thermiquement les sections instables.

La stratégie d'adaptation ainsi que les techniques proposées dans cette section du rapport sont considérées comme ayant un potentiel de succès dans un environnement comme celui du Nunavik. Globalement, l'approche générale devrait conduire à des investissements rentables sur les sections de routes et de pistes affectées par la dégradation du pergélisol.

En construisant des chaussées revêtues thermiquement sous-dimensionnées, des économies considérables peuvent être faites durant l'étape de construction. Le fait que la stratégie puisse faciliter l'identification de zone à problème peut également amener des économies concernant le choix d'emplacement. Plus d'investissement peuvent par contre être requis pour l'entretien et pour la stabilisation thermique de certaines zones à problèmes.

La recherche et les travaux de développement sont également requis pour établir des critères et des lignes directrices pour les chaussées thermiquement sous-

dimensionnées ainsi que celles thermiquement stables dans le contexte du Nunavik.

RÉFÉRENCES :

- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D.
Savard, J.P., et A. Tarussov, 2007, L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes.
- Beaulac I., et Doré G., 2005a, Impact du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptation, Rapport de recherche GCT-04-05
- Beaulac I., et Doré G., 2005b, Bilan de la condition des pistes et des chemins d'accès menant aux aéroports du Nunavik, Rapport de recherche GCT-2005-09
- Beaulac I., Langlois A-M., et Doré G., 2006, Évaluation préliminaire de la performance des techniques d'adaptation prometteuses par modélisation en 1D, Rapport de recherche GCT-2006-06
- Bolduc M., 2007, Tassement d'un remblai routier sur pergélisol à Umiujaq, Nunavik : Impact du réchauffement climatique, Rapport de projet de fin d'études, Département de génie géologique, Université Laval
- Bouchard R., Ladet R., et Langlois P., 2001, développement et application d'une méthode de forage de la moraine gelée des noyaux de barrages au moyen d'un fluide réfrigéré, compte rendu de la 54^e conférence canadienne de géotechnique, calgary en 2001

Annexe 1: Évolution des tassements sur les pistes et chemins d'accès du Nunavik

