

# Auscultation et investigations du pergélisol sous les infrastructures du ministère des Transports du Québec au Nunavik : vers une stratégie d'adaptation



Maude Boucher & Gilles Grondin

Service de la géotechnique et de la géologie – MTQ, Québec, Québec, Canada

Anick Guimond

Bureau de la coordination du Nord-du-Québec – MTQ, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

## ABSTRACT

Climate changes have an effect on MTQ airport infrastructures in Nunavik. Permafrost thaw causes important differential settlements of embankments and water accumulations appears at the embankment toe. In 2004, the inspection of the infrastructures led to a program of follow-up with instrumentation in vulnerable areas. Geophysics and drillings campaigns allowed improving permafrost characterization and an important thaw was revealed at the embankment toe. Permafrost behaviour to thaw will be evaluated on frozen intact samples. The experiment of adaptation techniques and all the gathered data will serve to develop a strategy of adaptation for each infrastructure.

## RÉSUMÉ

Les changements climatiques touchent les infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik. La fonte du pergélisol engendre des tassements importants sur les remblais et des accumulations d'eau se forment à leur pied. En 2004, l'inspection des infrastructures a mené à un programme de suivis avec instrumentation aux endroits vulnérables. Des relevés géophysiques et des forages ont permis de mieux caractériser le pergélisol et un dégel important au pied des remblais a été noté. Le comportement du pergélisol au dégel sera évalué sur des échantillons intacts gelés. L'expérimentation de techniques d'adaptation et toutes les données recueillies serviront à développer une stratégie d'adaptation pour chaque infrastructure.

## 1 INTRODUCTION

Au cours des dernières années, les changements climatiques au Nunavik ont affecté plusieurs des treize infrastructures de transports du ministère des Transports du Québec (MTQ) au Nunavik.

Avec l'ensemble des données recueillies dans le cadre des travaux de suivi et de recherche réalisés depuis 2004, le MTQ vise à développer une stratégie d'adaptation spécifique à chacune des infrastructures touchées par le dégel du pergélisol afin de contrer ou réduire l'impact des changements climatiques.

## 2 CONTEXTE

Le Nunavik est composé de quatorze communautés inuites et comptait en 2009, 11 553 habitants (Institut de la statistique du Québec, avril 2010). Les villages nordiques sont reliés entre eux et avec le réseau routier du sud du Québec seulement par les voies maritimes et aériennes. Treize des infrastructures aéroportuaires de cette région, composées d'une piste d'atterrissage et généralement d'une route d'accès au village, appartiennent au MTQ, soit toutes à l'exception de Kuujuaq (figure 1). L'exploitation est effectuée par l'Administration régionale Kativik (ARK) tandis que les travaux d'amélioration et de réparation sont régis par le Bureau de coordination du Nord-du-Québec du MTQ.

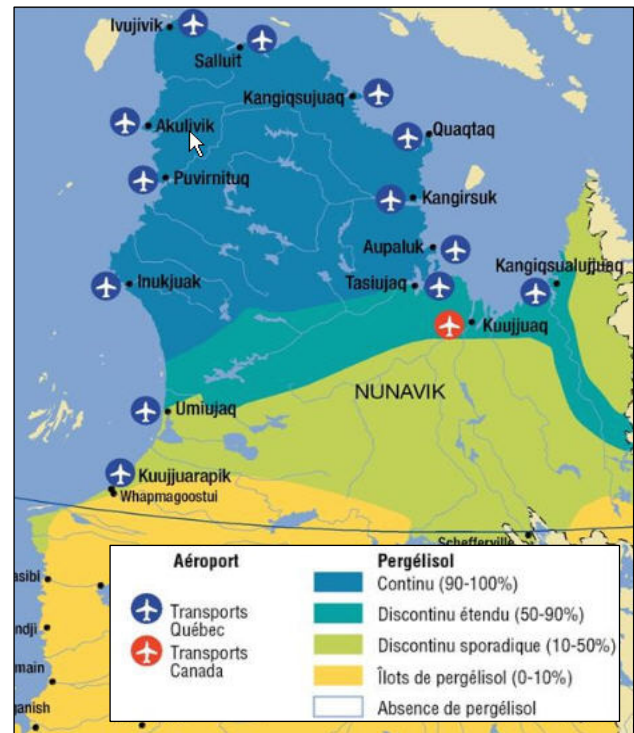


Figure 1. Carte du pergélisol au Québec (Ressources naturelles Canada, Transports Québec, Service de la géomatique)

Les pistes d'atterrissage du MTQ ont pour la plupart une longueur d'environ 1,1 km et sont en gravier. Les routes d'accès ont quant-à-elles été recouvertes d'enrobé. Neuf infrastructures aéroportuaires sont localisées dans la zone de pergélisol continu (90-100%), deux dans la zone de pergélisol discontinu étendu (50-90%) et deux dans la zone de pergélisol discontinu sporadique (10-50%) (figure 1).

Lors de la conception et de la construction des ouvrages aéroportuaires du Nunavik entre 1984 et 1991, le pergélisol était considéré comme un sol de fondation stable. De plus, sans perspective de réchauffement climatique, aucune mesure de protection du pergélisol face à son dégel n'avait été envisagée.

Depuis le début des années 2000, des signes de dégradations importantes ont été observés sur cinq routes d'accès et neuf pistes d'atterrissage, le tout réparti dans dix des treize villages du Nunavik où il y a des infrastructures de transports appartenant au MTQ (Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk, Tasiujaq et Kangiqsualujjuaq).



Figure 2. Tassements en bordure du remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq



Figure 3. Tassements sur toute la largeur de la route d'accès d'Umiujaq

Les signes de dégradation constatés sont des tassements différentiels importants particulièrement en bordure des remblais (figure 2), mais parfois localisés sur toute la largeur (figure 3). Des perturbations du système de drainage en pied de remblai sont également observées (figure 4). En effet, des mares d'eau parfois importantes se sont formées dans les fossés au pied des remblais. Finalement, un glissement de la couche de molisol est également survenu à proximité d'une route d'accès.



Figure 4. Perturbation du système de drainage de la piste d'atterrissage de Salluit

### 3 TRAVAUX DE SUIVI

Suite à l'annonce de certains signes de dégradation, le MTQ a fait une inspection détaillée de toutes ses infrastructures aéroportuaires du Nunavik en 2004. Neuf des treize pistes et/ou routes d'accès se sont alors avérées affectées par les changements climatiques.

Pour assurer un suivi du comportement des infrastructures aéroportuaires du Nunavik touchées par le dégel du pergélisol, le MTQ a élaboré un programme d'inspection biennuel et d'instrumentation afin de suivre les tassements et le régime thermique. L'évolution des signes de dégradation a ainsi été suivie au cours des années.

#### 3.1 Inspection sur le terrain

Chaque année, un relevé visuel des infrastructures aéroportuaires permet de faire des observations sur l'apparition ou l'agrandissement de dépressions ou de fissures sur le remblai, les conditions de drainage, l'état des ponceaux, les accumulations d'eau ou de neige en pied de remblai, l'écoulement d'eau sous le remblai, l'état des coins de glace passant sous les remblais ou le développement de thermokarst, l'érosion thermique de ceux-ci, etc.

L'inspection visuelle permet de relier entre elles ou non les perturbations du terrain naturel et les dégradations observées sur l'infrastructure. Finalement,

il est prévu de faire une auscultation plus poussée des coins de glace à l'été 2011 afin de vérifier leur largeur et d'évaluer l'impact de leur érosion thermique.

### 3.2 Suivi des tassements

Des plaques de tassements ont été installées à des endroits critiques où des dépressions importantes avaient été observées dans les remblais afin de suivre l'évolution des tassements dus au dégel du pergélisol.

Par exemple, des tassements de 7 cm ont été mesurés sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq entre 2005 et 2006, laissant une dépression localisée. Sur cette même période, des tassements différentiels de 6,3 cm se sont produits sur la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq. L'été 2005 a toutefois été un des plus chauds de la décennie. En 2009, deux dépressions importantes de 10 cm de profondeur et de courte longueur d'onde se sont formées au cours de l'été sur la route d'accès à Akulivik.

### 3.3 Suivi du régime thermique

La remise en état et l'automatisation de thermistances existantes depuis la construction des infrastructures aéroportuaires et l'installation de nouvelles thermistances ont permis de suivre l'évolution de la température du pergélisol sous les pistes d'atterrissage depuis 1987 (figure 5). À Akulivik, un réchauffement d'environ 5°C du pergélisol est notable directement dans le till sous le remblai d'environ 2 m d'épaisseur. Ce réchauffement semble s'être accéléré au cours des dernières années.

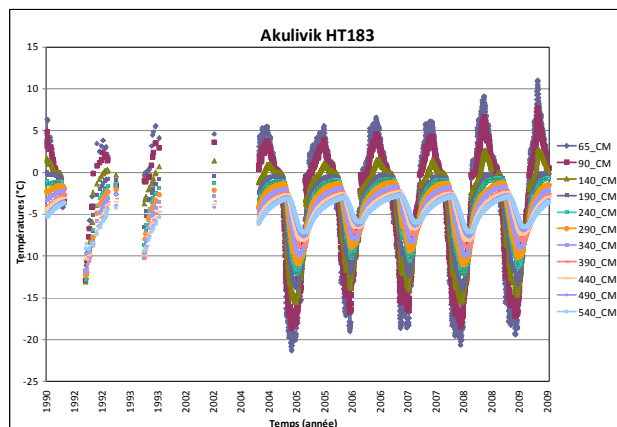


Figure 5. Exemple de températures du sol à Akulivik (Sarrazin et al., 2010).

La tendance générale observée sur tous les sites aéroportuaires du Nunavik instrumentés est une augmentation de l'épaisseur du sol qui dégèle chaque année, particulièrement au pied des remblais où il y a accumulation importante de neige (Sarrazin et al., 2010). L'analyse du régime thermique en profondeur indique également une augmentation des températures.

## 4 CARACTÉRISATION DU PERGÉLISOL

Afin d'améliorer les connaissances sur les conditions du pergélisol et le comportement des infrastructures de transport aux changements climatiques, plusieurs travaux d'auscultation ont été faits depuis 2003.

Des relevés géophysiques et des forages avec prélèvement d'échantillons non gelés et gelés ont permis d'identifier localement l'épaisseur de dépôt meuble, la teneur en glace et certaines propriétés mécaniques des sols. Le comportement du pergélisol au dégel a également été évalué en laboratoire sur des échantillons intacts gelés.

### 4.1 Relevés géophysique

En premier lieu, une campagne géophysique a été menée afin de déterminer le profil du socle rocheux afin de cibler les meilleurs endroits pour réaliser des forages. De plus, les techniques utilisées devaient permettre à identifier la profondeur de gel. Des relevés de sismique réfraction et de GPR (Ground Penetrating Radar) ont donc été réalisés en 2005 et 2006 ainsi que des relevés MASW (Modal Analyses of Surface Waves) en 2009.

À certains endroits, le plafond du pergélisol a bien été identifié à l'aide de la sismique réfraction, mais cette technique semble donner de mauvais résultats dans les argiles gelées. À Tasiujaq, le contact avec le dépôt argileux présent à 10-15 m de profondeur a été interprété comme le socle rocheux.

L'expérimentation du GPR au Nunavik a révélé que la précision de cette technique varie beaucoup. Elle n'est efficace que sur quelques mètres sous la surface ou même, à certains endroits, la technique est totalement inopérante puisqu'il n'y a pas de contraste entre le sol et le roc.

Les relevés au MASW ont été faits en bordure de la piste de Puvirniq. Les résultats obtenus ont donné une assez bonne corrélation avec les forages réalisés et met particulièrement en évidence le dégel plus profond du pergélisol en pied de remblai (figure 6).

Les différentes techniques géophysiques utilisées ont bien montré que les relevés géophysiques dans le pergélisol doivent toujours être complétés par des forages réalisés au même endroit.



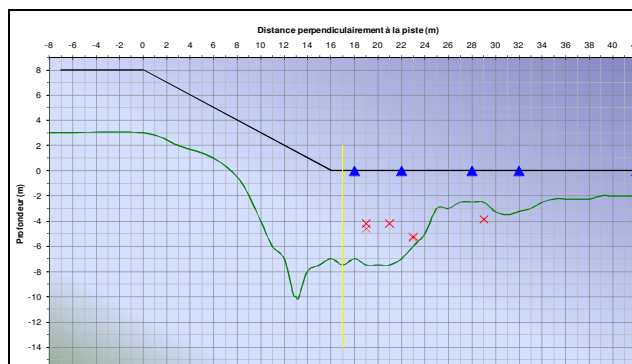


Figure 6. Profil (vert) du plafond de gel déterminé au MASW sur la piste à Puvirnituq (Doré et Verreault, 2010)

#### 4.2 Forages

La réalisation de forages au roc ou jusqu'à 15 m a permis de révéler la stratigraphie des sols et d'évaluer la profondeur de gel. Des échantillons intacts gelés et non gelés ont été prélevés lors des forages. Malgré une bonne planification des systèmes de prélèvement des échantillons gelés et de refroidissement, plusieurs problèmes rencontrés lors des forages ont limité la qualité et le nombre d'échantillons. Le prélèvement d'échantillons intacts est difficile en présence de gravier et cailloux avec peu de particules fines.

Les résultats des forages ont généralement démontré un dégel très important au pied des remblais comparativement à la couche active sous le remblai et dans la toundra à plus de 30 m de la piste. Ce dégel plus marqué est principalement dû à la perturbation créée par l'impact de la construction des remblais.

#### 4.3 Essais en laboratoire

En laboratoire, des essais conventionnels de teneur en eau, salinité, granulométrie et limite de consistance sont réalisés sur les échantillons prélevés.

Des analyses non destructives sont également faites sur les échantillons gelés par imagerie médicale (scanneur tomodynamique). Une image numérique de la cryostructure du pergélisol est ainsi obtenue et le volume occupé par le sédiment, la glace et l'air peut être estimé pour l'ensemble de l'échantillon.

Ensuite, des essais de fluage et de consolidation au dégel permettent d'étudier le comportement du pergélisol au dégel en laboratoire. L'analyse préliminaire des essais de fluage a mené à un abaque préliminaire qui permet d'évaluer le taux de déformation annuel au fluage en fonction de la contrainte appliquée et de la température. Les essais de consolidation visent quant-à-eux à élaborer une relation approximative directe entre la teneur en eau d'un sol défini et le tassement associé. Le tout permettra d'évaluer l'impact de la progression du front de dégel sous les pistes d'atterrissage du Nunavik (Allard et al., 2009).

#### 4.4 Cartographie

Une cartographie détaillée des dépôts de surface pré-construction est planifiée pour chacune des neuf infrastructures aéroportuaires ciblées par l'étude. Cette cartographie, qui inclura les résultats de forages et d'essais en laboratoire, permettra de délimiter les zones susceptibles aux tassements.

### 5 TECHNIQUES D'ADAPTATION EXPÉRIMENTÉES

L'expérimentation de méthodes de mitigation des effets du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport au Nunavik a fait l'objet de plusieurs projets de recherches (Beaulac et Doré, 2006; Doré et Verreault, 2010; Doré et Voyer, 2010; Ficheur et Doré, 2009;).

La présence de remblais de hauteur variable influence le régime thermique du pergélisol sous et à proximité de ceux-ci. En effet, le remblai et l'accumulation de neige sur la pente latérale et au pied du talus isolent le sol et empêchent le froid d'y pénétrer pendant la période hivernale. Le front du pergélisol ne s'élève donc pas autant qu'en condition naturelle. De plus, en période chaude, d'autres facteurs accentuent le dégel du pergélisol, par exemple l'accumulation d'eau au pied du remblai et le caractère conducteur du remblai.

Des méthodes de mitigations connues et nouvellement développées ont été expérimentées à différents endroits au Nunavik afin de déterminer leur efficacité et, le cas échéant, de procéder à des améliorations selon les conditions locales rencontrées.

#### 5.1 Remblai routier pavé - Salluit

Des techniques d'adaptation visant à minimiser les effets du dégel du pergélisol ont été expérimentées sur la route d'accès à Salluit. Ce projet visait à développer un modèle numérique à partir de données thermiques pour une chaussée réelle et de tirer des conclusions sur la performance de techniques de protection du pergélisol pour le cas de remblais routiers revêtus (Beaulac et Doré, 2006; Doré et Voyer, 2010).

Le site expérimental était composé de six sections présentant des combinaisons différentes entre la chaussée conventionnelle (enrobé bitumineux), la surface réfléchissante, le remblai conventionnel, le remblai à convection d'air et le drain thermique (figure 7). La mise en place d'instrumentation a permis de mesurer le régime thermique dans chacune des sections entre juillet 2006 et février 2008.

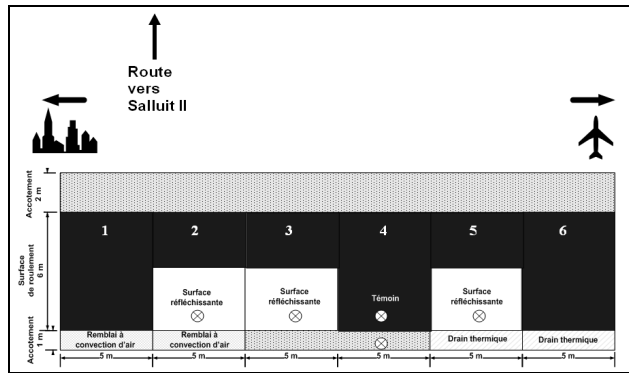


Figure 7. Vue en plan du site d'essais sur la route d'accès à Salluit (Doré et Voyer, 2010)

Le **remblai à convection** d'air est une méthode de mitigation qui permet d'extraire la chaleur des remblais pendant l'hiver (figure 8). Il s'agit d'une méthode assez simple de réalisation et facile d'entretien.

Le **drain thermique** a été innové par le *Groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval* à Québec. Cette technique permet l'extraction de chaleur du remblai pendant l'hiver à l'aide d'un géocomposite drainant à forte perméabilité installé entre le remblai de la piste et le remblai de l'accotement (figure 8). Le géocomposite doit être importé dans les villages nordiques, ce qui engendre des coûts supplémentaires.

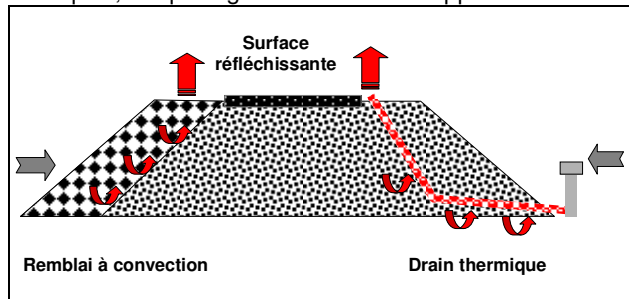


Figure 8. Principe du remblai à convection et du drain thermique (Doré et Voyer, 2010)

La **surface réfléchissante** a été réalisée en appliquant une couche de peinture blanche sur l'enrobé. Celle-ci visait à réduire l'entrée de chaleur dans le remblai qui est favorisée par un enrobé foncé. Cette technique implique des coûts importants à l'application et pour l'entretien.

Les résultats obtenus révèlent une efficacité mitigée des différentes techniques. La hauteur insuffisante des systèmes de protection qui ne permet pas d'initier le mouvement convectif, l'écoulement d'eau sous la section de drain thermique qui peut possiblement annuler l'effet de refroidissement et la dégradation rapide des surfaces réfléchissantes peuvent expliquer le peu d'effet des techniques utilisées sur le régime thermique des planches expérimentales. Un refroidissement de la partie supérieure du remblai a tout de même été observé au début de l'expérimentation.

La pauvre qualité des données est en partie explicable par des contraintes naturelles, climatiques, instrumentales, conceptuelles ou anthropiques qui n'ont pas nécessairement été identifiées ou bien évaluées lors de la réalisation des planches expérimentales. De plus, une mise à niveau des sites a dû être faite après seulement une année. Finalement, suite à plusieurs difficultés rencontrées et qui nécessitaient une intervention majeure, le MTQ a mis fin à ce projet après la seconde année afin de se concentrer sur les futurs projets de Tasiujaq et Puvirnituk.

En plus de permettre l'amélioration du système à drain thermique, les conclusions suivantes ont été tirées suite au projet de Salluit :

- les surfaces expérimentales n'étaient pas suffisamment grandes, elles doivent avoir une longueur minimale de 10 m et couvrir la largeur de la route (7 m);
- l'instrumentation mise en place doit être robuste pour résister aux conditions climatiques et anthropiques de l'arctique;
- la réalisation des sections expérimentales doit être assurée par une équipe expérimentée et un outillage adéquat;
- le suivi de l'état des équipements et leur entretien devraient être assurés par une personne locale.

Certaines recommandations ont également pu être énoncées pour les techniques d'adaptation testées :

- 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;
- les revêtements en enrobé noir conventionnel devraient être évités en présence de pergélisol au profit de surfaces pâles;
- les traitements de surface ou les revêtements minces clairs sont beaucoup plus durables, malgré que plus coûteux, que les surfaces réfléchissantes (peintures).

## 5.2 Remblai piste d'atterrissage en gravier - Tasiujaq

Des techniques d'adaptation visant à minimiser les effets du dégel du pergélisol ont été expérimentées sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq. Ce projet permettra d'évaluer le comportement et la performance de trois systèmes de protection du pergélisol appliqués en situation réelle (Ficheur et Doré, 2009).

Quatre planches d'essais ont donc été construites en bordure de la piste, soit une section témoin, deux sections avec les techniques d'extraction de chaleur, soit le remblai à convection d'air et le drain thermique, et finalement une section à pente douce (8H:1V) visant à

réduire l'accumulation de neige et son effet isolant sur les talus (figure 9). L'instrumentation des sections permet le suivi du régime thermique dans chacune des sections depuis septembre 2007.

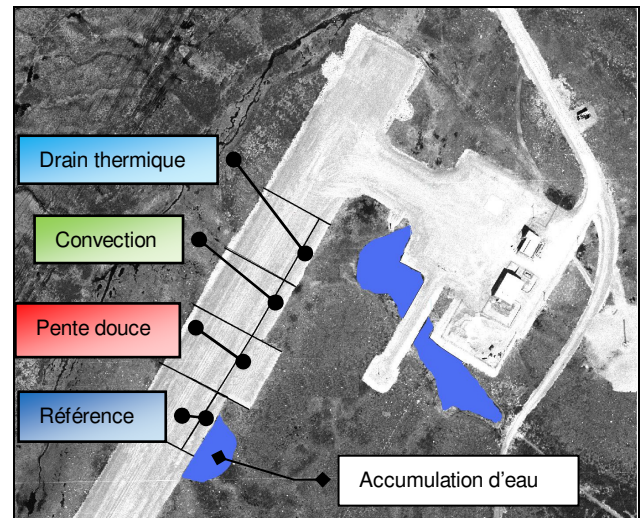


Figure 9. Vue en plan du site d'essai sur la piste d'atterrissage à Tasiujaq et localisation de l'accumulation d'eau (Ficheur et Doré, 2009)

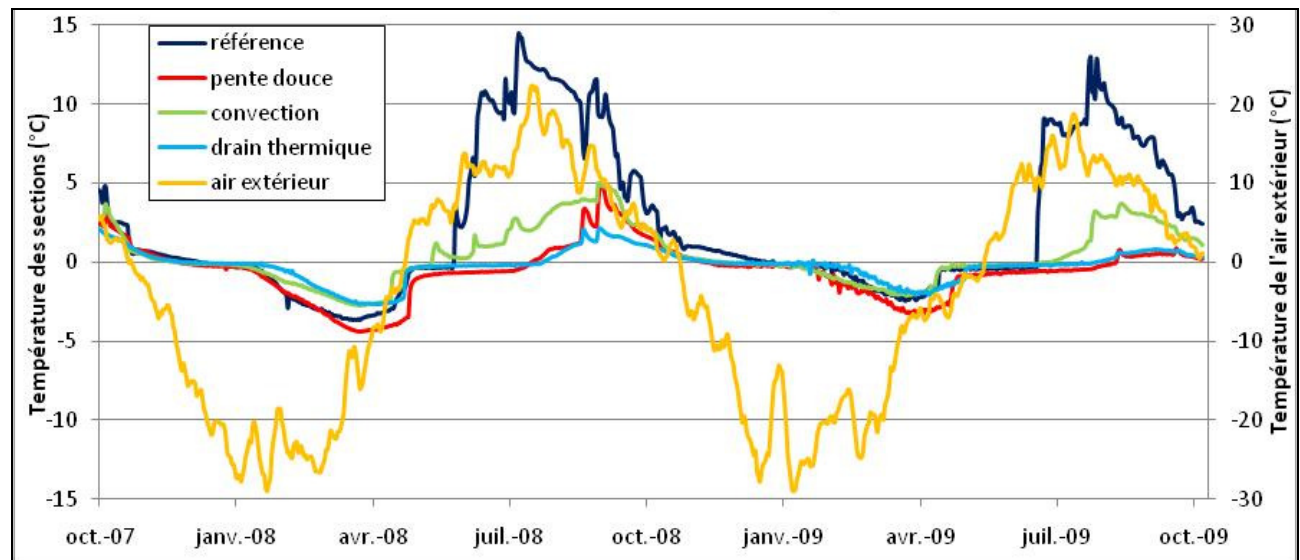


Figure 10. Évolution des températures mesurées par les thermistances localisées le plus près en dessous du contact entre le remblai et le sol naturel (Ficheur et Doré, 2009)

Le suivi du comportement thermique des sols a permis d'évaluer l'efficacité des différentes techniques d'adaptation en observant tout d'abord la température au contact remblai/sol naturel (figure 10). En période chaude, la section de référence présente une température supérieure. La section à remblai à convection vient ensuite avec une température plus faible, puis les sections à pente douce et à drain thermique présentent les températures les plus faibles. Le réchauffement accru et soudain de la section de référence au printemps est vraisemblablement dû à un écoulement d'eau sous le remblai (figure 9). Pendant les périodes froides, les différences sections présentent un comportement similaire. Toutefois, la section à pente douce se distingue en refroidissant davantage. L'absence

d'accumulation de neige sur cette section peut expliquer la meilleure pénétration du froid. L'efficacité des techniques est démontrée avec une accumulation moins importante de chaleur au contact du remblai avec le sol.

Les profils thermiques (courbes trompettes) aux mois de mars et septembre 2008 et 2009, soit au moment où le climat est stable et le froid ou la chaleur sont établis dans le sol, donnent une idée de la profondeur de dégel à la fin de l'été et de la température minimale atteinte à l'interface remblai/sol naturel (0 m) (figure 11 et tableau 1). L'influence de l'infiltration d'eau dans le remblai de la section à pente douce est vraisemblablement responsable de l'accumulation de chaleur notable en septembre. Pendant la période estivale, le remblai à convection semble engendrer un réchauffement des sols plus en profondeur que les deux autres techniques d'adaptation.

L'évolution de la température dans le remblai et le terrain naturel peut finalement être évaluée en fonction de la profondeur et du temps (figure 12). Il est ainsi possible de bien observer le réchauffement accru des sols au droit de la section de référence, la bonne pénétration de la chaleur et du froid dans la section à pente douce et le réchauffement en profondeur pour la section à remblai à convection.

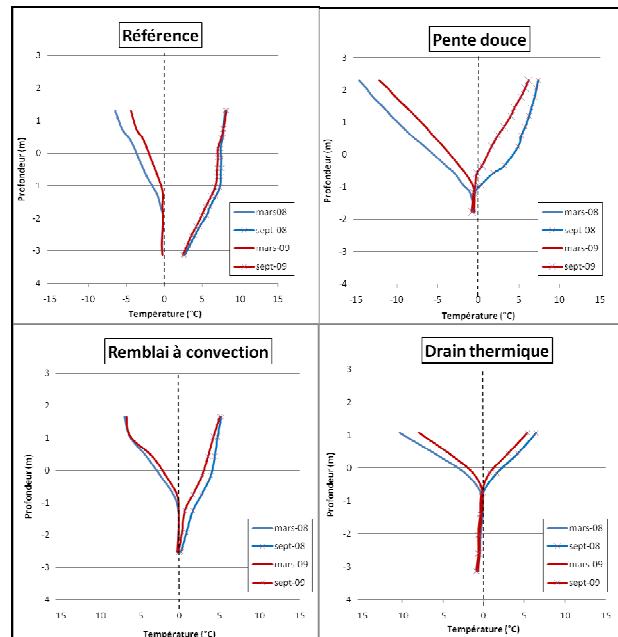


Figure 11. Profils thermiques des valeurs moyennes des mois de mars et septembre 2008 (bleu) et 2009 (rouge) (Ficheur et Doré, 2009)

Les données thermiques recueillies au cours des deux premières années indiquent un comportement prometteur des différentes techniques de protection du pergélisol. Seule la section de référence voit sa profondeur de dégel augmenter. Le suivi des planches d'essais permettra d'améliorer les connaissances.

Tableau 1. Température minimale à l'interface remblai/sol naturel (0 m) et profondeur maximale de dégel pour les quatre sections d'essais (Ficheur et Doré, 2009)

| Section d'essais     | Température minimale à l'interface (°C) |       | Profondeur maximale de dégel (m) |       |
|----------------------|-----------------------------------------|-------|----------------------------------|-------|
|                      | 2008                                    | 2009  | 2008                             | 2009  |
| Référence            | -3,92                                   | -2,79 | -4,2*                            | -4,5* |
| Pente douce          | -5,76                                   | -4,09 | -1,18                            | -0,57 |
| Remblai à convection | -3,15                                   | -2,61 | -3,4*                            | -2,9* |
| Drain thermique      | -3,87                                   | -2,59 | -1,05                            | 0,75  |

\*Valeurs obtenues par extrapolation

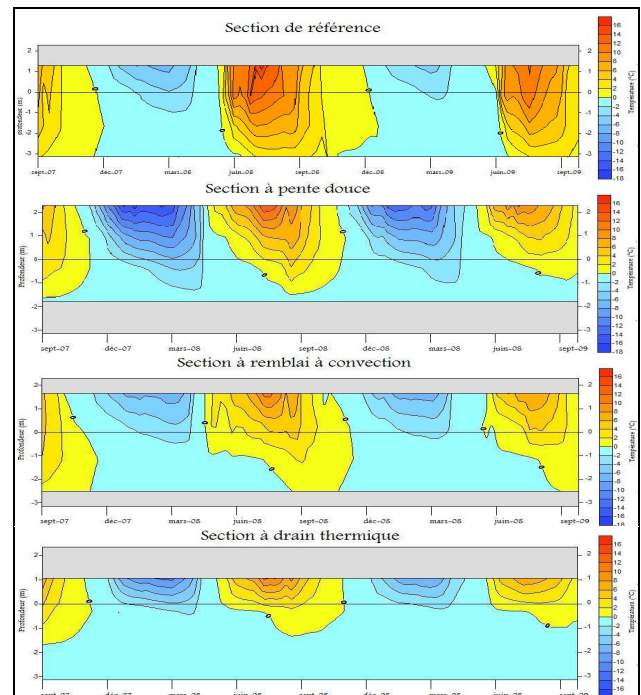


Figure 12. Évolution de la température en fonction de la profondeur et du temps entre septembre 2007 et octobre 2009 (Ficheur et Doré, 2009)

## 6 APPLICATION D'UNE TECHNIQUE - PUVIRNITUQ

Des travaux de stabilisation préventifs ont été réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Puvirnituk lors du prolongement de celle-ci en 2009 (figure 13). Le remblai de 9 m de hauteur ciblé et suivi depuis quelques années subissait des tassements importants. De plus, une instabilité du remblai était à considérer avec le dégel du pergélisol composé d'une argile marine de résistance faible selon les forages.

Les mesures de stabilisation thermique et mécanique incluaient la déviation d'une source d'eau en amont, l'extraction de chaleur au moyen d'un remblai à convection et la stabilisation par la mise en place d'un contrepoids (figures 14 et 15). De plus, l'expérience acquise avec le projet de Tasiujaq a permis d'améliorer la conception des systèmes de ventilation utilisés à Puvirnituk.



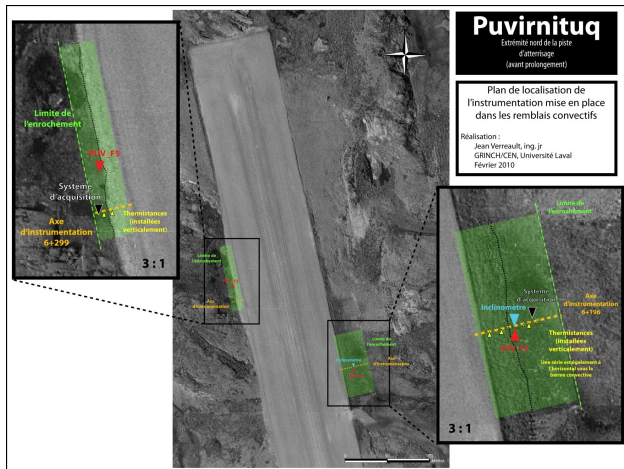


Figure 13. Localisation de la stabilisation à Puvirnituk (Doré et Verreault, 2010)

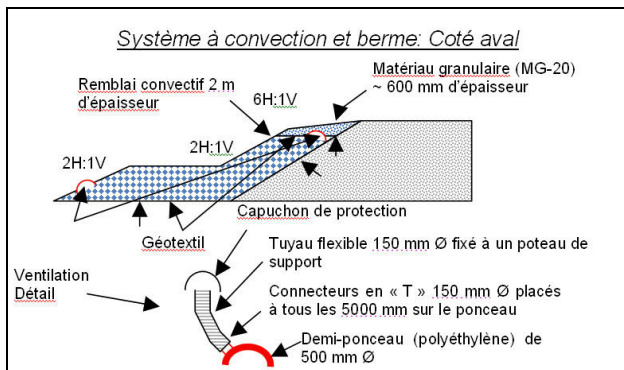


Figure 14. Schéma du système de protection mis en place en bordure de la piste de Puvirnituk (Doré et Verreault, 2010)

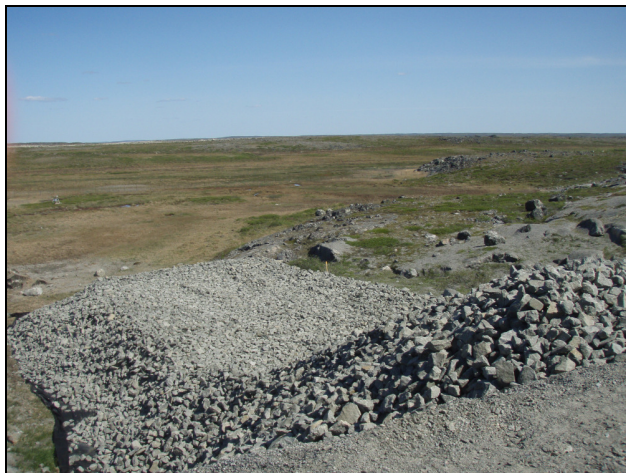


Figure 15. Système de protection en cours de construction en bordure de la piste de Puvirnituk.

Le choix d'adaptation a dû tenir compte de facteurs techniques, économiques et de sécurité. En effet, une technique facilement réalisable et moins coûteuse,

particulièrement en région éloignée, a été choisie par rapport à d'autres solutions. Ce choix a également réglé le problème d'instabilité éventuel à cet endroit et va permettre de ralentir les tassements anticipés.

Le suivi de la performance du système d'extraction de chaleur permettra de raffiner encore davantage la conception. Finalement, le projet de Puvirnituk vise aussi à déterminer les caractéristiques mécaniques du sol en bordure du remblai afin de raffiner les outils d'évaluation de la stabilité de remblai dans le contexte d'un pergélisol en voie de dégradation (Doré et Verreault, 2010).

## 7 STRATÉGIE D'ADAPTATION DU MTQ

L'ensemble des données recueillies dans le cadre des travaux réalisés depuis 2004, permettra au Ministère de développer une stratégie d'adaptation spécifique à chacune de ses infrastructures.

Les changements climatiques, le réchauffement du pergélisol engendré par la circulation d'eau sous le remblai ou l'accumulation d'eau en pied de remblai et l'isolation du sol par l'accumulation naturelle ou anthropique de neige au pied et sur la pente du remblai ont tous un impact sur l'épaississement de la couche active du pergélisol.

Des interventions à court ou moyen terme, autres que les techniques d'adaptation étudiées, ont été identifiées pour les infrastructures aéroportuaires existantes :

- le suivi des tassements avec resurfaçage;
- l'entretien des fossés en pied de remblai afin d'assurer un bon drainage, particulièrement au printemps;
- le dégagement de neige de la pente et du pied de remblai;
- le comblement des dépressions avec de la tourbe au droit des coins de glace qui traversent la piste pour éviter l'érosion thermique et pour l'isoler;
- l'éloignement du fossé du pied de remblai;
- l'adoucissement de la pente du remblai.

Le choix de la stratégie d'adaptation dépend premièrement des risques associés aux impacts des changements climatiques sur les infrastructures aéroportuaires et leurs utilisateurs. En présence d'un risque, par exemple une instabilité ou un effondrement localisé, des travaux d'urgence ou préventifs sont nécessaires. Si le risque est plutôt faible ou absent, une analyse coûts-bénéfices doit être faite afin de choisir entre la mise en place d'une technique d'adaptation pour minimiser la dégradation des infrastructures ou seulement un suivi avec des travaux d'entretien.

## 8 CONCLUSION

Dans un contexte de changements climatiques, des investigations géotechniques plus complètes sont requises afin de bien caractériser le pergélisol pour anticiper le type et l'ampleur des problèmes à venir, tant pour la conception de nouveaux ouvrages que pour l'entretien des infrastructures existantes. Selon l'ampleur des tassements anticipés, une analyse coûts-bénéfices



doit être réalisée dans un processus décisionnel pour déterminer si l'entretien plus fréquent ou la mise en place d'une technique d'adaptation doit être privilégié.

Les techniques d'adaptation de mise en œuvre facile expérimentées ont démontré une très bonne efficacité pour préserver le pergélisol sous les remblais. Par exemple, le remblai à pente douce s'est avéré une méthode d'adaptation équivalente à d'autres techniques de mise en œuvre plus délicate. Dans le choix d'une ou plusieurs solutions d'adaptation de nombreux facteurs doivent être considérés, comme la main d'œuvre, le coût et la disponibilité des matériaux et des équipements.

Avec les problèmes observés, une revue des méthodes d'entretien hivernale avec une formation adéquate du personnel affecté à ces opérations est requise. Finalement, l'impact des changements climatiques en région pergélisolée a fait ressortir le besoin de ressources humaines qualifiées dans le domaine. Il est donc important que nos universités forment des ingénieurs qui seront aptes à résoudre les problèmes inhérents aux projets de construction en milieu nordique.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs aimeraient remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à cet article soit les équipes du MTQ, en particulier Annick Poirier, et de l'Université Laval, en particulier Guy Doré et Michel Allard.

## REFERENCES

- [http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/profils/region\\_10/regi\\_on\\_10\\_00.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/profils/region_10/regi_on_10_00.htm)
- Allard, M. et al., 2009. Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik, Rapport d'étape 2, Centre d'études nordiques, Université Laval, QC, Canada.
- Doré, G. et Verreault, J., 2010. Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituk, Rapport d'étape 1 (version préliminaire), Université Laval, QC, Canada.
- Doré, G. et Voyer, E., 2010. Expérimentation de méthodes de mitigation et des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik : projet expérimental de Salluit, Rapport final (version préliminaire), Rapport GCT-2009-04, Université Laval, QC, Canada.
- Ficheur, A. et Doré, G. et, 2009. Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik : Aéroport de Tasiujaq, Rapport d'étape 3 (version préliminaire), Rapport GCT-2009-11, Université Laval, QC, Canada.

Sarrazin, D. et al., 2010. Monitoring des thermistances – collecte et interprétation des données : aéroports de Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq, Rapport final, Centre d'études nordiques, Université Laval, QC, Canada.