

**Nouvelle approche de planification et de gestion des infrastructures
aéroportuaires du ministère des Transports du Québec au Nunavik dans un
contexte de changements climatiques : Vers une stratégie d'adaptation**

Guimond, Anick, géographe, M.Env.,
Coordonnatrice des projets de recherche infrastructures
nordiques et changements climatiques
Bureau de la coordination du Nord-du-Québec
Ministère des Transports du Québec

Grondin, Gilles, ing., MSc.A.,
Chef du secteur de la mécanique des sols
Service de la géotechnique et de la géologie
Ministère des Transports du Québec

Maude Boucher, ing., M.Sc.,
Service de la géotechnique et de la géologie
Ministère des Transports du Québec

Exposé préparé pour la séance « Faire face aux changements climatiques : les
bonnes pratiques » du congrès annuel de 2010 de l'Association des transports
du Canada à Halifax (Nouvelle-Écosse)

RÉSUMÉ

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) est propriétaire de 13 infrastructures aéroportuaires au Nunavik depuis 1984. Neuf de ces infrastructures sont construites sur du pergélisol ayant une teneur en glace importante, ce qui les rend très sensibles au réchauffement climatique. Présentement, on observe des dégradations importantes sur les infrastructures qui sont liées au dégel du pergélisol. Lors de la conception et de la construction des ouvrages, aucune mesure de protection du pergélisol n'a été prise étant donné qu'on prévoyait un contexte de climat stable.

Or, les changements climatiques (CC) observés actuellement au Nunavik démontrent que les températures sont à la hausse. Également, les scénarios climatiques indiquent que les températures et les précipitations devraient augmenter dans le futur. Ces phénomènes accentueront davantage l'ampleur et la vitesse à laquelle les dégradations se produisent sur les infrastructures vulnérables, ce qui oblige le MTQ à modifier son approche de conception et d'entretien des ouvrages pour tenir compte des facteurs liés aux CC afin de contrer ou réduire leurs impacts.

Les différentes étapes de la démarche consistent à relever les différents types de dégradations observées sur les infrastructures, à instrumenter les sites représentatifs pour connaître l'évolution des températures du pergélisol et des dégradations, à caractériser le pergélisol, à prédire et à quantifier l'ampleur des dégradations à anticiper dans un contexte de CC afin de vérifier si elles peuvent engendrer des enjeux de sécurité, et finalement à expérimenter des techniques d'adaptation.

Suite à l'ensemble des connaissances acquises dans le cadre de ces travaux et de ces recherches, le Ministère sera notamment en mesure de quantifier l'ampleur des impacts à anticiper sur ses infrastructures nordiques et développera une stratégie d'adaptation pour chaque infrastructure. Ces stratégies privilégieront soit un entretien plus fréquent et adapté et/ou la mise en place de techniques d'adaptation. Le choix des solutions d'adaptation sera réalisé à partir d'une analyse coûts-bénéfices et prendra en compte à la fois la sécurité des ouvrages et les contraintes techniques et environnementales. Ces solutions d'adaptation viseront soit à réduire l'accumulation de neige et à éloigner l'eau du pied de remblai ou soit à refroidir le remblai pendant l'hiver.

La stratégie d'adaptation en préparation pour la piste d'atterrissage d'Akulivik est un bon exemple où le MTQ a dû modifier son approche de planification traditionnelle et concevoir, avec l'aide d'une équipe de travail multidisciplinaire, une solution pour cette infrastructure face aux CC.

Parallèlement, une revue des méthodes d'entretien hivernal avec une formation adéquate du personnel affecté à ces opérations doivent être réalisées. La formation de la main d'œuvre et d'ingénieurs qualifiés pour intervenir sur des infrastructures en région pergélisolée est essentielle pour assurer le succès de la démarche d'adaptation des infrastructures de transport à long terme.

1.0 CONTEXTE

Le territoire du Nunavik est la partie la plus septentrionale du Québec et est situé au nord du 55^e parallèle. En 2009, 11 553 habitants, répartis dans 14 villages nordiques occupaient le territoire du Nunavik (1). Comme l'ensemble des communautés ne sont pas reliées entre elles et vers le réseau de transport terrestre du sud du Québec, elles sont desservies par 14 infrastructures aéroportuaires (pistes d'atterrissage et routes d'accès), dont 13 sont propriétés du ministère des Transports du Québec (MTQ) (figure 1). La plupart des pistes d'atterrissage du MTQ ont une longueur de 3 500 pieds et sont en gravier. Quant aux routes d'accès, elles ont toutes été pavées de 2003 à 2009.

L'exploitation des infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik est effectuée par le département des transports de l'Administration régionale Kativik (ARK). Les travaux d'amélioration et de réhabilitation sont toutefois sous la gestion du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec du MTQ.

Dans cette région arctique du Québec, on retrouve trois zones de pergélisol, soit la zone de pergélisol continue (90-100%) où l'on retrouve neuf infrastructures aéroportuaires, la zone discontinue étendue (50-90%) ainsi que la zone discontinue sporadique (10-50%) où l'on retrouve deux infrastructures chacune (figure 1).

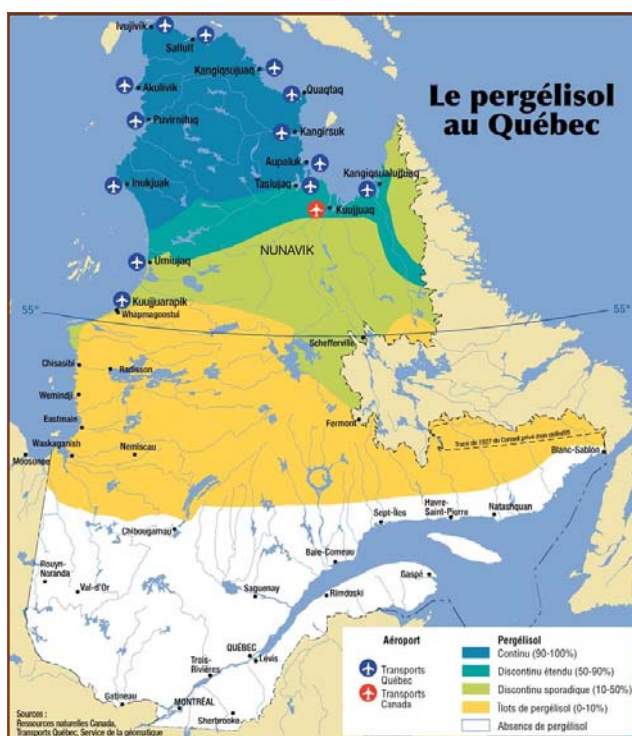


Figure 1 : Les aéroports du MTQ au Nunavik et le pergélisol au Québec

Entre 1984 et 1991, lors de la conception et de la construction des ouvrages aéroportuaires du Nunavik, le pergélisol était considéré comme une fondation stable et on n'anticipait pas une période de réchauffement climatique. Compte tenu de ce contexte, aucune mesure de protection particulière du pergélisol visant à minimiser les effets de son dégel n'avait alors été mise en place. De plus, aucune évaluation des impacts de la construction de remblais sur le pergélisol n'avait été réalisée à ce moment.

Depuis le début des années 2000, on observe des dégradations importantes liées au dégel du pergélisol sur neuf des treize infrastructures du MTQ (figure 1, cinq routes d'accès : Umiujaq, Akulivik, Salluit, Tasiujaq & Kangiqsualujjuaq et huit pistes d'atterrissage : Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituaq, Akulivik, Salluit, Quaқтаq, Kangirsuk & Tasiujaq). Les dégradations observées sur les pistes d'atterrissage et les routes d'accès sont principalement:

- Des tassements en bordure des remblais de l'infrastructure engendrant de la fissuration au sommet du remblai (figure 2);
- Des tassements localisés sur toute la largeur de l'infrastructure (figure 3);
- Perturbation du système de drainage en pied de remblai engendrant le raidissement des pentes du remblai (figure 4).



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



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



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

Outre le réchauffement climatique qui contribue à l'épaississement de la couche active du pergélisol, et occasionne ainsi des impacts sur les infrastructures du MTQ au Nunavik, nous avons également constaté que deux autres facteurs contribuent à accélérer ce dégel :

- Échange thermique dû à l'écoulement de l'eau sous le remblai ou aux mares d'eau stagnantes en pied de remblai;
- L'accumulation naturelle et mécanique de neige au pied de remblai qui isole le sol durant l'hiver emprisonnant ainsi la chaleur dans le sol.

Or, les changements climatiques (CC) observés actuellement au Nunavik démontrent que les températures moyennes annuelles sont à la hausse depuis le début des années 2000 et qu'au Nunavik, entre 1990 et 2007 les températures atmosphériques moyennes annuelles ont augmenté de 3,5°C. Cette hausse des températures est cinq à sept fois plus rapide que la hausse moyenne planétaire durant ces mêmes années selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Également, les projections de changements de température au Nunavik sur un horizon de 2050 indiquées dans le tableau 1, produites par le Consortium Ouranos en 2010 (5), indiquent que les températures pourraient augmenter de 1,6 à 2,8°C en été et de 4,5 à 6,5°C en hiver. Quant aux projections réalisées pour les précipitations à ce même moment, elles indiquent également une augmentation, soit de 16,8 à 29,4% pour les précipitations hivernales et de 3,0 à 12,1% pour celles estivales sur le même horizon.

Saison		Changement à l'horizon 2020	Changement à l'horizon 2050	Changement à l'horizon 2080
Hiver	Températures	2,4 à 4,0 °C	4,5 à 6,5 °C	5,8 à 9,5 °C
	Précipitations	6,2 à 17,90 %	16,8 à 29,4 %	24,0 à 43,8 %
Printemps	Températures	1,1 à 1,9 °C	1,9 à 3,3 °C	2,8 à 5,4 °C
	Précipitations	2,2 à 11,8 %	6,3 à 19,0 %	12,1 à 29,4 %
Été	Températures	0,9 à 1,7 °C	1,6 à 2,8 °C	2,1 à 3,6 °C
	Précipitations	1,6 à 8,2 %	3,0 à 12,1 %	5,8 à 17,9 %
Automne	Températures	1,2 à 2,3 °C	2,3 à 3,7 °C	2,8 à 4,6 °C
	Précipitations	5,5 à 12,0 %	9,8 à 20,1 %	16,2 à 29,5 %

Tableau 1 : Projections de changements de températures et de précipitations au Nunavik (5).

En plus des impacts liés aux constructions sur pergélisol, ces phénomènes accentueront davantage l'ampleur et la vitesse à laquelle les dégradations se

produisent sur les infrastructures vulnérables, ce qui oblige le MTQ à modifier son approche de conception et d'entretien des ouvrages afin de prendre en compte les facteurs liés aux CC pour contrer et/ou réduire les impacts lorsque possible. À cet effet, une stratégie d'adaptation des infrastructures du MTQ au Nunavik est présentement en élaboration et sera complétée en 2011.

2.0 PROGRAMME D'AUSCULTATION ET DE RECHERCHE MIS EN ŒUVRE

Devant l'ampleur des dégradations observées à cause du dégel progressif du pergélisol, le MTQ a instauré un programme de suivi de ces phénomènes. Parallèlement, il a réalisé des travaux d'investigation afin de mieux caractériser le pergélisol sous ses infrastructures. En même temps, des techniques d'adaptation ont été expérimentées sur deux sites problématiques.

Tous ces travaux de suivi et de recherche ont pour but d'améliorer la compréhension de ces phénomènes afin d'être en mesure de bien planifier les travaux d'entretien ou d'adaptation pour assurer la sécurité des usagers et la pérennité des infrastructures.

2.1 Inspection sur le terrain

Depuis 2004, des inspections techniques sur le terrain sont effectuées à la fin de l'été afin de répertorier et de suivre les impacts liés au dégel sur les infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik. Ces dernières permettent notamment de suivre l'évolution des dépressions existantes et d'inventorier les nouvelles qui surgissent compte tenu que celles-ci sont mesurées à chaque année et font l'objet d'une compilation selon un plan prévu à cet effet. On répertorie également les mares d'eau ainsi que les accumulations de neige en pied de talus en vérifiant si des tassements se produisent dans ces mêmes secteurs.

De plus, pour améliorer notre compréhension du comportement des ouvrages vulnérables, des observations sur l'évolution des thermokarsts et des coins de glace dans le terrain naturel en bordure des infrastructures sont réalisées. Ces observations permettent de vérifier si les dégradations observées dans le terrain naturel affectent ou pourraient affecter l'infrastructure.

2.2 Installation de plaques de tassement

Aux endroits où l'on retrouve des dépressions importantes, des plaques de tassements ont été installées afin de permettre de suivre l'évolution des tassements malgré les travaux d'entretien courants qui peuvent la camoufler. Depuis 2005, certaines dégradations se produisent à un rythme très rapide sur les infrastructures vulnérables. Par exemple, sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq dans la baie d'Ungava, la plaque de tassement installée dans l'accotement indiquait un tassement de 7 cm entre 2005 et 2006. À cet endroit, la dépression est plutôt localisée. Sur la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq dans la baie d'Hudson, les tassements ont atteint une amplitude de 6,3 cm de 2005 à 2006, et les tassements observés sur cette route sont différentiels. Il est

important de noter que l'été 2005 a été un des étés les plus chauds de la décennie. Également, à l'été 2009, sur une section de la route d'accès à Akulivik, deux dépressions atteignant 10 cm de profondeur et de courte longueur d'onde se sont produites. Aucun signe de dégradation majeur n'avait été observé auparavant.

2.3 Suivi du régime thermique du pergélisol

Afin de suivre le régime thermique du pergélisol aux sites vulnérables, des câbles à thermistance ont été mis en place. Un rapport de compilation des données visant à documenter l'évolution de la situation est produit annuellement par le Centre d'études nordiques de l'Université Laval depuis 2005.

2.4 Caractérisation du pergélisol

Lors de la conception des infrastructures, des forages ont été effectués afin de caractériser uniquement la couche active du pergélisol, étant donné qu'à cette époque le climat était considéré stable et qu'on ne prévoyait pas une période de réchauffement climatique. Depuis la fin des années 1990, on observe que la couche active du pergélisol s'épaissit à cause des changements climatiques et des modifications physiques des sites (accumulation de neige, drainage dysfonctionnel, etc.). Ces perturbations engendrent des tassements sur certaines infrastructures aéroportuaires et routières au Nunavik.

Depuis 2003, plusieurs travaux de caractérisation du pergélisol ont été réalisés pour déterminer l'épaisseur et la stratigraphie des dépôts meubles, leur teneur en glace et certaines propriétés mécaniques. Les principales méthodes de caractérisation du pergélisol utilisées sont des relevés géophysiques (sismique réfraction et géoradar) et des forages profonds avec récupération d'échantillons intacts.

2.5 Expérimentation de techniques d'adaptation

Afin d'atténuer les effets liés au dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport du MTQ, différentes techniques d'adaptation sont testées sur la route d'accès pavée à Salluit ainsi que sur la piste d'atterrissage gravellée à Tasiujaq. Ces projets expérimentaux sont réalisés en collaboration avec le Groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval (GRINCH). Les techniques en expérimentation sont : le drain thermique (figure 5), le remblai en pente douce (figure 6), le remblai à convection (figure 7) et la surface réfléchissante.

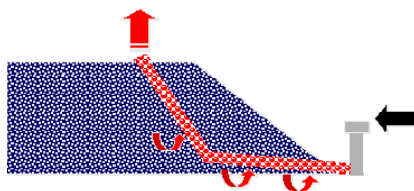


Figure 5 : Drain thermique (4)

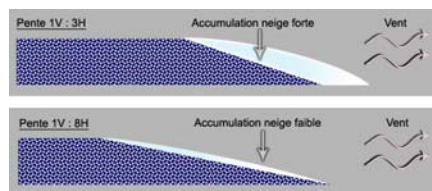


Figure 6 : Remblai en pente douce (4)

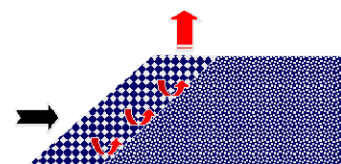


Figure 7 : Remblai à convection (4)

2.5.1 Site expérimental de Salluit

Dans ce projet expérimental réalisé sur la route d'accès pavée à Salluit, la section où une surface réfléchissante a été mise en place n'a pas été très concluante. Le produit testé n'a pas complètement adhéré à la chaussée pour des raisons contextuelles (chaussée souillée par des produits pétroliers lors de la mise en place et technique d'entretien de la municipalité qui n'était pas adaptée à ce type de surface). Malgré le fait que le système d'acquisition de données n'a pas été fonctionnel très longtemps pour l'ensemble des sections, la surface réfléchissante a démontré un refroidissement dans la partie supérieure de la chaussée au début du projet.

La technique du remblai à convection, seule ou combinée à une autre technique, n'a pas été concluante notamment due à la hauteur insuffisante du remblai à convection qui ne permettait pas de créer des cellules de convection. Le chercheur du GRINCH responsable du projet a constaté qu'une hauteur de remblai ayant un minimum de 1,5 m doit être mise en place pour une efficacité certaine.

Pour la section de remblai avec un drain extracteur de chaleur, l'évolution des températures avec le temps présente la même tendance que les températures de l'air (3).

Présentement, différentes leçons ont été tirées de ce projet expérimental (3):

- La longueur des planches expérimentales doit être suffisamment grande (minimum 30 m);
- La hauteur du remblai à convection et à drain thermique doit avoir un minimum de 1,5 m;
- La pente pour l'installation du drain thermique sur le remblai doit être de 1H :1V pour maximiser sa performance;
- Les capteurs de chaleur doivent être constitués de demi-ponceaux et non de tuyaux perforés pour le système de ventilation du remblai à convection et à drain thermique
- L'instrumentation mise en place doit être robuste pour résister au contexte arctique (entretien du réseau local et climat);
- Les conditions d'enneigement des sites doivent être connues afin de s'assurer que les cheminées de ventilation aient une hauteur suffisante pour éviter l'obstruction par la neige;
- Le drainage des sites d'essai doit être bien aménagé afin d'éviter les obstacles physiques qui favorisent l'accumulation d'eau en pied de remblai ou la concentration de l'écoulement à des endroits précis sous le remblai (exemple, tumulus supportant des poteaux électriques qui empiètent dans le fossé);

- Les traitements de surface pâle ou les revêtements minces à partir de bitumes pâles doivent être préférés aux surfaces réfléchissantes;
- Les techniques d'adaptation devraient nécessiter peu d'entretien et une main d'œuvre non spécialisée pour leur mise en œuvre étant donné le contexte nordique.

2.5.2 Site expérimental de Tasiujaq

Le site expérimental sur la piste d'atterrissage à Tasiujaq a été construit à l'été 2007 (figure 8). Le monitoring de ce projet et visant à valider la performance des techniques testées s'effectuera sur une période de 3 ans, et ce, en collaboration avec Transport Canada. Les résultats préliminaires démontrent une bonne performance des techniques testées. Par exemple, au 1^{er} mars 2009, à la fin de la période de refroidissement hivernale, les sections expérimentales enregistraient des températures plus froides dans le remblai que dans la section témoin. De plus, au niveau du contact remblai/sol naturel (profondeur 0 m), la température de la section à pente douce est de -3°C ; elle est donc $1,5^{\circ}\text{C}$ plus froide que les autres sections (figure 9) (2).



Figure 8 : Site expérimental sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq

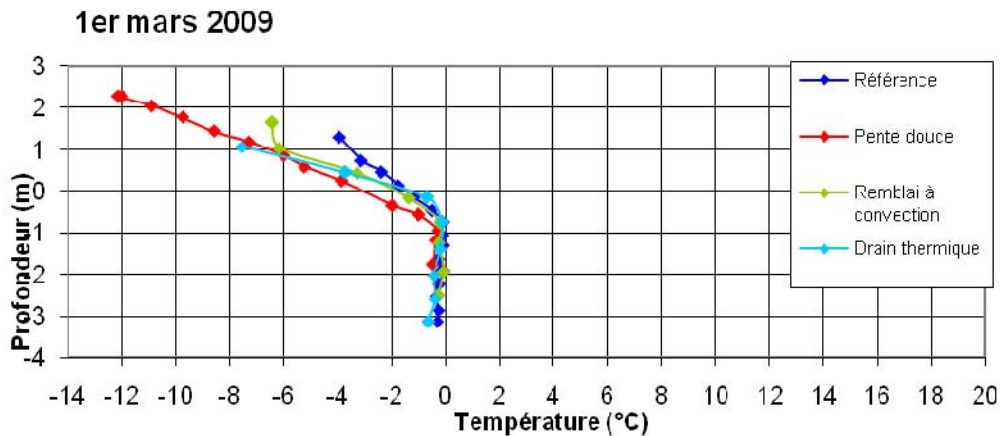


Figure 9: Régime thermique des quatre sections au 1er mars 2009 (2)

En général les systèmes de protection ont démontré un potentiel certain au cours des deux premières années de fonctionnement. La performance observée pendant les deux années d'observation est la suivante :

- La section « pente adoucie » a très bien fonctionné pendant cette période en réduisant la température au niveau du remblai par rapport à la section témoin. Le maximum de dégel, qui était de 1,2 m la première année a diminué jusqu'à 0,6 m la seconde année. Cette section refroidit massivement pendant l'hiver, car le couvert neigeux y est beaucoup plus mince.
- La section « drain thermique » a également donné un bon rendement au cours de la période en réduisant la température au niveau du remblai par rapport à la section témoin. Le maximum de dégel, qui était de 1 m la première année a diminué jusqu'à 0,8 m la seconde année. Le comportement de cette section reste très encourageant.
- La section « remblai à convection » a bien fonctionné mais son efficacité est toujours diminuée par une trop faible capacité d'évacuation de chaleur. La section est très affectée par les vagues de chaleur l'été et dégèle sur la totalité de la profondeur instrumentée.

2.6 Étude aérodynamique

Une étude aérodynamique sur le site aéroportuaire de Tasiujaq sera réalisé afin de documenter la pertinence de mettre en place une clôture à neige qui permettrait de minimiser l'accumulation de neige naturelle en bordure des remblais.

3.0 DÉMARCHE D'AIDE À LA DÉCISION DÉVELOPPÉE PAR LE MTQ POUR L'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES AÉROPORTUAIRES DU MTQ AU NUNAVIK DANS UN CONTEXTE DE CC

Dans le cadre d'une nouvelle approche de planification développée dans un contexte de CC, un groupe de travail multidisciplinaire a été formé afin de mener à bien la réflexion menant au choix d'adaptation pour les différentes infrastructures. Le groupe de travail mis en place comprend des gestionnaires, des techniciens et ingénieurs impliqués dans la réalisation de projet, des ingénieurs spécialisés en géotechnique, des géographes ainsi que des chercheurs en ingénierie des régions froides et en géomorphologie glaciaire.

La démarche globale du MTQ visant à définir des stratégies d'adaptation pour les différentes infrastructures en gravier vulnérables au dégel du pergélisol consiste à :

- Identifier les problématiques et les dégradations sur les infrastructures liées au dégel du pergélisol;
- Anticiper l'ampleur des impacts potentiels à l'aide des résultats des travaux d'auscultation réalisés;
- Évaluer si les impacts anticipés peuvent représenter un risque d'instabilité de remblai ou d'effondrement localisé et si oui, réaliser des travaux de stabilisation ou de prévention dans les délais requis;
- Effectuer une analyse coûts-bénéfices pour déterminer si la mise en place d'une technique d'adaptation doit être préférée à un entretien plus fréquent;
- Finalement, préciser les priorités d'intervention (court, moyen et long terme) pour chaque site et pour l'ensemble des sites (les uns par rapport aux autres).

Plus précisément, une démarche d'aide à la décision visant à permettre d'identifier la ou les solutions d'adaptation pour chacune des infrastructures aéroportuaires a été développée par le Ministère, afin de s'assurer de considérer l'ensemble des facteurs et éléments pertinents pour maintenir les infrastructures sécuritaires dans un contexte de CC (figure 10).

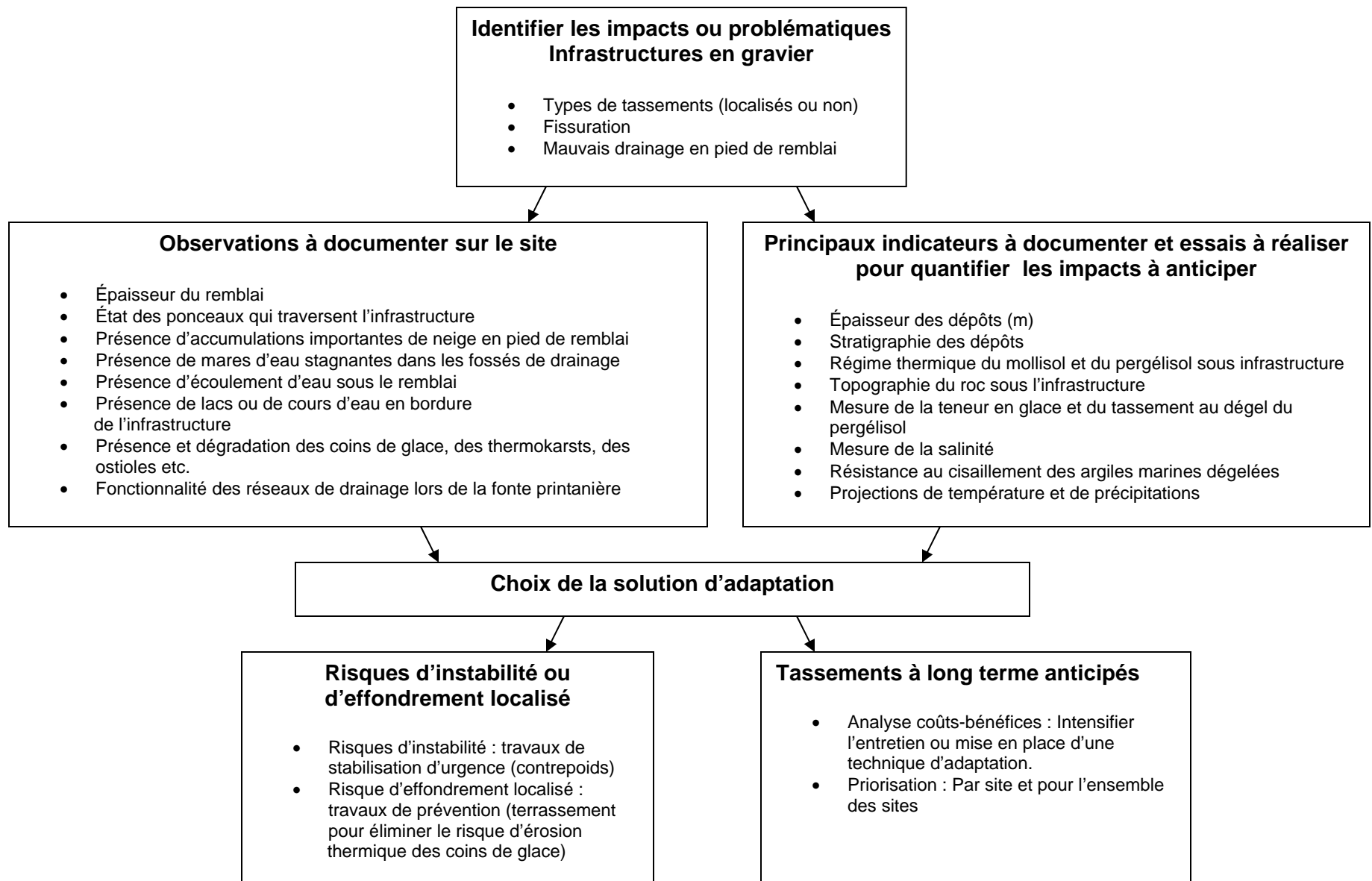


Figure 10 : Démarche d'aide à la décision pour l'adaptation des infrastructures aéroportuaires du MTQ sur pergélisol dans un contexte de changements climatiques

3.1 Exemple d'application de la démarche d'adaptation sur la piste d'atterrissage à Akulivik

Le remblai de la piste d'atterrissage à Akulivik est généralement stable sauf pour son extrémité *est* qui est sujette à des tassements. Dans cette zone, les sols naturels sont formés d'un till épais (15 m) qui est sensible au dégel. De plus, le système de drainage n'est plus adéquat car il y a eu formation de mares d'eau en pied de remblai suite au dégel du pergélisol. Afin de ralentir la dégradation du pergélisol sous ce secteur de la piste et de protéger l'infrastructure du MTQ, une intervention s'impose entre les points kilométriques (p.k.) 5+750 et 6+080 (figure 11). À cet endroit, le terrain naturel remonte vers le *nord* et il est recommandé de reprofiler le fossé *nord* en réalisant un déblai/remblai afin d'éloigner le fossé du pied de talus. Le till excavé pour le reprofilage devra être ramené sur la pente actuelle du remblai ce qui permettra de l'adoucir et de l'imperméabiliser. La pente finale recommandée est une pente de 1V:4H. Selon la topographie du secteur et la quantité de matériel déblayé pour éloigner le fossé, la pente sera adoucie sur toute la hauteur du remblai ou en partie seulement.

Au centre de la piste, le terrain naturel en bordure de la piste est moins accentué et le remblai traverse un réseau de coins de glace. Ces coins de glace sont stables et aucun signe d'érosion thermique n'a été observé au cours des dernières années. Par contre, du côté amont de la piste, de l'eau s'accumule en pied de remblai au droit de ceux-ci. Cette eau pourrait éventuellement s'infiltrer sous le remblai et pourrait provoquer l'érosion des coins de glace. Leur dégradation pourrait engendrer alors la formation de dépressions ou même un effondrement localisé à la surface du remblai. Afin de mieux caractériser les coins de glace, une auscultation de ceux-ci est prévue au cours de l'été 2011. Il s'agira alors d'excaver le sol au droit des coins de glace, du côté aval du remblai.

Toujours dans le secteur des coins de glace, la solution d'adaptation préconisée consiste à faire du terrassement du côté *nord* du remblai entre les p.k. 5+550 et 5+750 (figure 11). Le terrassement consiste à construire un remblai d'une hauteur de 1,5 m avec une pente de 1V:6H pour éliminer le ruissellement de surface au droit des coins de glace sous la piste. Il est recommandé d'utiliser un matériel imperméable tel le till disponible sur place ou provenant de l'extérieur du site de l'aéroport. Finalement, un recouvrement de tourbe (récupérée à l'extérieur du site) placé au-dessus du remblai à pente douce permettrait d'isoler celui-ci empêchant ainsi la chaleur de pénétrer l'été tout en laissant pénétrer le froid l'hiver. Cette solution d'adaptation est illustrée à la figure 11.

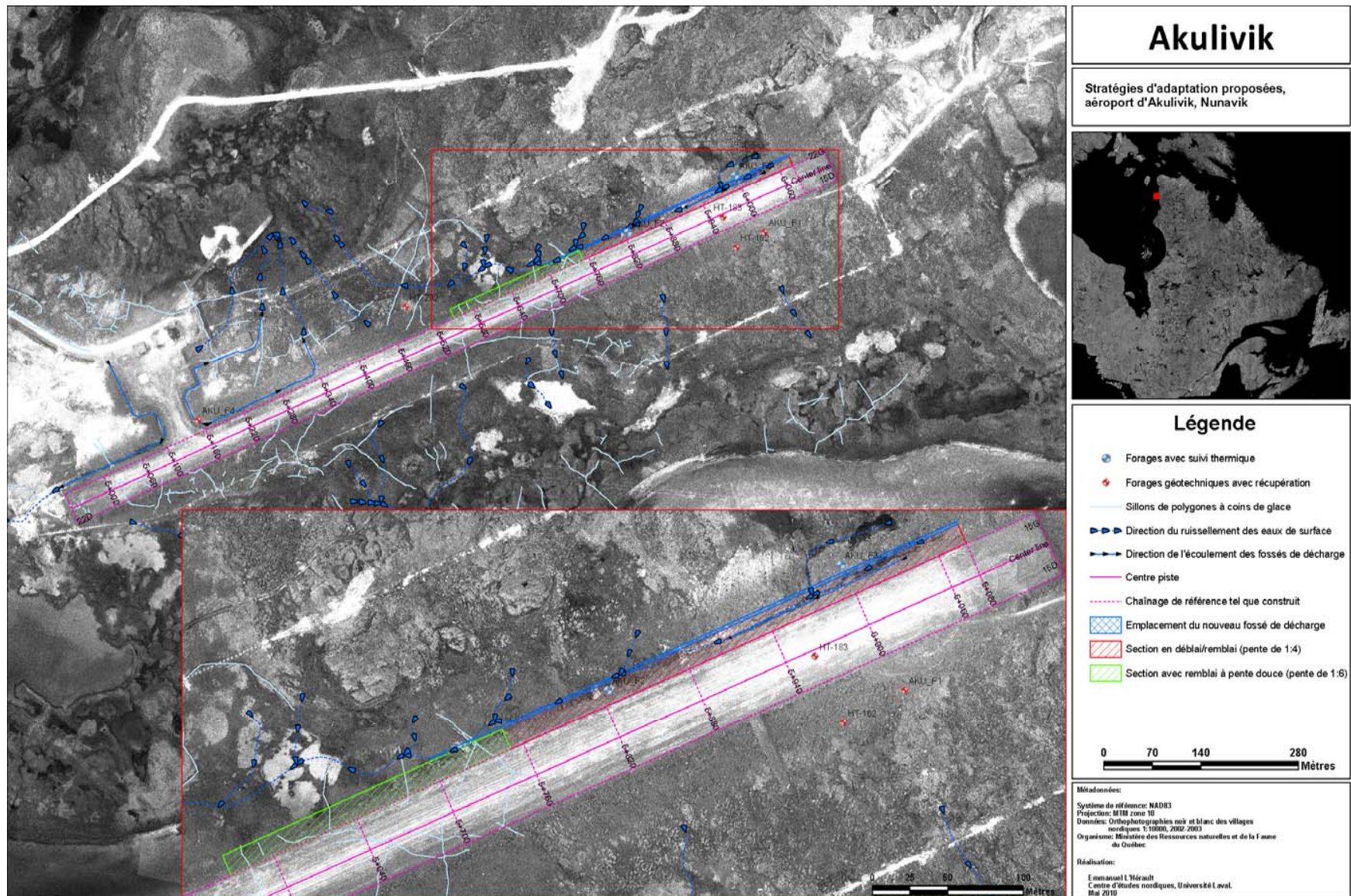


Figure 11 : Stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage à Akulivik (6)

4.0 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. De plus, d'autres études comme une étude aérodynamique peuvent être requises pour bien adresser la problématique d'enneigement et dimensionner une défense appropriée telle une clôture à neige.

Les techniques d'adaptation expérimentées ont démontré que des techniques de mise en œuvre faciles sont très efficaces 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 délicates. 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 hivernal 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 milieux nordiques.

Référence:

1. http://www.stat.gouv.qc.ca/regions/profils/region_10/region_10_00.htm
2. Doré G., Ficheur, A., 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.
3. Doré, G., Voyer, E. 2010, Expérimentation de méthodes de mitigation et des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport au Nunavik : Projet expérimental de Salluit, Rapport final (version préliminaire), Rapport GCT-2009-04, février 2010.
4. Doré, G., 2007, Proposition de recherche, Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik : Aéroport de Tasiujaq.
5. Ouranos., 2010, Savoir s'adapter aux changements climatiques.
6. L'Hérault, E., Mai 2010, Centre des études nordiques.

Tableau :

Tableau 1 : Projections de changements de températures et de précipitations au Nunavik

Figure :

- Figure 1 : Les aéroports du MTQ au Nunavik et le pergélisol au Québec
- Figure 2 : Tassements en bordure du remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq
- Figure 3 : Tassements localisés sur toute la largeur de la route d'accès d'Umiujaq
- Figure 4 : Perturbation du système de drainage de la piste d'atterrissage de Salluit
- Figure 5 : Drain thermique
- Figure 6 : Remblai en pente douce
- Figure 7 : Remblai à convection
- Figure 8 : Site expérimental sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq
- Figure 9: Régime thermique des quatre sections au 1er mars 2009
- Figure 10 : Démarche d'aide à la décision pour l'adaptation des infrastructures aéroportuaires du MTQ sur pergélisol dans un contexte de changements climatiques
- Figure 11 : Stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage à Akulivik