

Expérimentations de techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures du Nunavik : aéroport de Tasiujaq



Ficheur Alban, Doré Guy
Québec City, Québec, Canada
Département de génie civil – Université Laval, Québec City, Québec, Canada

ABSTRACT

Three mitigation techniques, an air convection embankment, an embankment with an integrated heat drain and an embankment with gentle slope, have been implemented in the shoulder of the Tasiujaq airfield. The purpose of this study is to validate through testing in real operating conditions, their respective performance. Those techniques increase heat extraction from the soil and thus preserve integrity of permafrost existing under the runway. This paper presents results for the first two years of monitoring.

RÉSUMÉ

Trois techniques de mitigation, un remblai à convection d'air, une section à drain thermique et une section à pente adoucie, ont été mises en place dans l'épaule du remblai de la piste d'aéroport de Tasiujaq afin de valider, par des essais en conditions réelles d'exploitation, leurs efficacités respectives. Ces trois techniques favorisent l'évacuation de la chaleur contenue dans le sol, afin de préserver l'intégrité du pergélisol présent sous la piste. Cette étude présente les résultats des deux premières années d'exploitation.

1 INTRODUCTION

Le territoire du Nunavik se trouve dans la région du Québec (Canada), au-delà du 55^{ème} parallèle ; les différents villages inuits de la région ne sont accessibles ni par voie routière ni par voie ferroviaire. Quelques liaisons par transport maritime sont effectuées chaque année à l'été, mais il s'agit principalement de ravitaillement en machineries, matériau de construction et produits pétroliers. La majeure partie du ravitaillement s'effectue par transport aérien. Les pistes d'aéroport constituent donc des infrastructures essentielles à la subsistance et au développement des communautés inuites. Elles permettent le déplacement des personnes, le transport des marchandises et la dispense de services. Il est donc vital de maintenir les infrastructures en bon état d'opération.

Au moment de la construction des aéroports dans chacun des villages inuits du Nunavik, entre 1984 et 1992, la pratique était de considérer le climat stable. Effectivement dans les trois décennies précédant la construction la tendance était à une légère baisse. Depuis 1992, le climat s'est mis à se réchauffer (Allard et al., 2007), atteignant maintenant des valeurs élevées qui affectent inmanquablement le régime thermique du sol. Le climat se réchauffant, l'épaisseur de mollisol augmente, provoquant la fonte de la glace contenue dans le sol ; ce qui entraîne des tassements et donc une perte des capacités structurale et fonctionnelle des infrastructures sus-jacentes.

Le village de Tasiujaq se situe dans la baie d'Ungava, à quelques kilomètres au-delà de la limite des arbres, en zone de permafrost discontinu. Il est l'un des villages les plus affectés au Nunavik car l'on y retrouve différents mécanismes de dégradation du pergélisol qui se combinent. La structure du remblai et son orientation vis-à-vis des vents dominants créent un enneigement différentiel qui réchauffe le sol localement (Allard et al., 2007). De plus, l'affaissement des talus, combiné au mauvais drainage en bordure de piste est responsable d'accumulation d'eau en pied de talus ; l'écoulement de l'eau réchauffe inmanquablement le sol. A cause de ces phénomènes, la piste se dégrade, ce qui peut causer une gêne pour le trafic aérien. Plusieurs tassements différentiels et fissures longitudinales ont été observés dans toute la longueur de la piste (Beaulac et al., 2006 ; Allard et al., 2007). L'une d'elles faisait 35m de longueur et jusqu'à 30cm de profondeur en juillet 2004.

Jusqu'à présent, l'entretien régulier de la piste permet d'assurer un bon état de l'infrastructure mais il est essentiel de développer des méthodes efficaces et peu coûteuses qui pourront être appliquées à l'ensemble des villages du Nunavik. L'objectif de cette étude est de tester en conditions réelles d'exploitation des techniques de mitigation de la fonte du pergélisol.

2 SOLUTIONS DE MITIGATION

En septembre 2007, un site d'essai a été construit le long de la face orientée sud-est de la piste de l'aéroport de

Tasiujaq. Le site, d'une longueur totale de 200m, se compose d'une section de référence et de trois sections expérimentales : un remblai à pente adoucie, un remblai à convection d'air et un remblai comprenant un drain thermique. Chaque section est instrumentée par des thermistances afin de mesurer le régime thermique des remblais et du sol naturel sous-jacent. Dans ce paragraphe sont décrits les principes théoriques de ces sections (Doré et al., 2007).

2.1 Section de référence

La section de référence permet de comparer les régimes thermiques mesurés dans les trois sections comportant des techniques de mitigation avec une section existante du remblai de la piste d'aéroport.

2.2 Section à pente douce

Le remblai actuel de la piste, qui possède une pente 2H : 1V (30 degrés), a été modifié de manière à avoir une pente adoucie 8H : 1V (Figure 1). L'objectif est de réduire les turbulences liées au vent afin de minimiser l'accumulation de neige au pied de la pente. En réduisant ou en éliminant l'effet isolant de l'accumulation de neige, l'extraction de chaleur augmente pendant les mois d'hiver, réduisant ainsi le risque que le pergélisol fonde pendant l'été suivant.



Figure 1. Construction du remblai à pente douce

2.3 Section de remblai à convection d'air

Le remblai à convection d'air nécessite l'utilisation d'un matériau granulaire grossier et poreux, pour constituer le nouvel épaulement de la piste. La haute perméabilité d'un tel matériau favorise la formation de cellules de convection dans ses pores au cours des mois d'hiver. Pendant ces mois, l'instabilité des masses d'air due aux gradients de densité est conséquente (Goering, 1996; Saboundjian et Goering, 2003; Goering et Kumar, 1996). L'air dans les pores de la partie supérieure du remblai refroidit et sa forte densité le fait descendre poussant vers le haut l'air plus chaud qui se trouve alors dans 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

(Saboundjian et Goering, 2003). Pendant les mois d'été, l'air chaud reste dans la partie supérieure du remblai et les mouvements de convection n'ont pas lieu (Goering, 1996; Goering et Kumar, 1996).

Le système de remblai à convection d'air, tel que proposé par Goering a été modifié pour l'expérimentation à Tasiujaq sur la base de tests en laboratoire et de simulations numériques (Jorgensen et al., 2007). Un système de ventilation a été ajouté au matériau convectif afin de favoriser la pénétration de l'air froid dans le bas de la section et l'extraction de chaleur dans sa partie supérieure (Figure 2). Cette modification doit favoriser un mouvement convectif unidirectionnel plus efficace que les mouvements convectifs dans les pores d'un système clos. Cette modification est plus adaptée au contexte nordique pour lequel l'accumulation de neige sur les remblais est forte, empêchant alors l'extraction de chaleur pendant l'hiver.



Figure 2. Installation du système de ventilation dans le remblai à convection d'air

2.4 Section à drain thermique

Le drain de chaleur est une innovation développée par le groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval afin de protéger les épaulements des remblais (Beaulac et al., 2006). 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 consistant l'accotement. Le géocomposite est composé d'un noyau en plastique recouvert par des couches de géotextiles. D'une épaisseur totale de 25 mm, il permet la circulation libre de l'air. Il s'agit d'une méthode permettant l'extraction de chaleur dans les remblais pendant l'hiver. Une prise d'air est installée au pied du remblai afin de permettre la création d'un mouvement ascensionnel de l'air dans la membrane (Beaulac et al., 2006).

Ce mouvement de l'air, aussi appelé effet cheminée, sera provoqué par sa densité plus faible en raison d'une différence de température. La chaleur est tout d'abord transférée au drain thermique par conduction puis est expulsée du remblai par convection au sein de la membrane (Figure 3). En somme, cette membrane doit permettre l'extraction efficace de chaleur du remblai afin de prévenir la fonte du pergélisol.

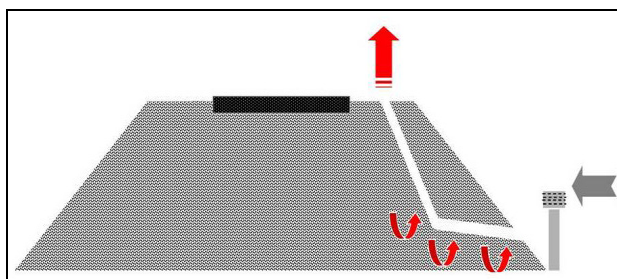


Figure 3. Drain thermique placé dans l'épaule de la piste

3 DONNEES THERMIQUES

3.1 Régimes thermiques des différentes sections

La mise en place des sections et de l'instrumentation correspondante a été réalisée de manière à minimiser les perturbations du régime thermique du sol. L'ensemble de l'excavation et du remblayage ont été réalisés dans un délai de 36 heures. Les effets de ces perturbations se sont fait sentir jusqu'à la fin du premier hiver (Doré et al., 2008).

3.1.1 Section de référence

La section de référence (Figure 5.a) qui doit permettre d'évaluer la performance des systèmes de protection est malheureusement perturbée par une accumulation d'eau en pied de talus due au tassement de ce dernier et à un mauvais drainage. Dès que la température de l'air extérieur devient positive, l'écoulement d'eau affecte le régime thermique de la section en le réchauffant en profondeur. La section de référence connaît alors des températures positives en surface du remblai et au niveau de l'écoulement (autour de 1m de profondeur dans le sol naturel), ce qui provoque un réchauffement très rapide de la presque totalité de la section (Figure 4). Au cours de l'été, la poursuite du dégel de la section continue et la totalité de la profondeur instrumentée (3.13m sous le contact remblai / sol naturel) connaît des températures positives. Par extrapolation, le maximum de dégel atteindrait 5m la première année et 4.5m la seconde année. La section de référence est très sensible à la chaleur de l'été : au niveau du contact remblai / sol naturel, le maximum de température est +14.8°C pour l'année 2008 et +13.7°C pour l'année 2009.

Pendant les périodes de froid extérieur, la section ne se refroidit que peu en contrepartie. Au niveau du contact remblai/sol naturel, le minimum de température rencontré est -3.9°C pour l'année 2008 et -2.8°C pour l'année 2009. Ainsi, la section de référence subit fortement l'apport de chaleur en été et ne permet pas une bonne pénétration du froid en hiver.

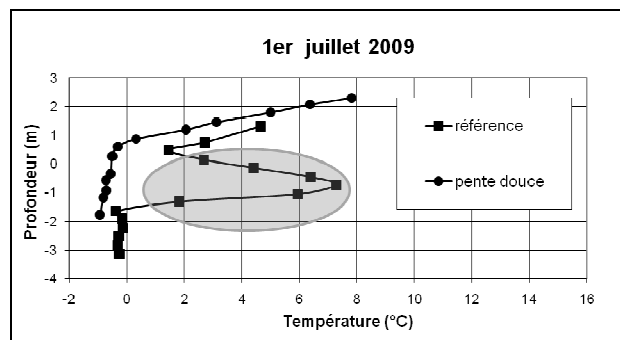


Figure 4. Profils thermiques des sections de référence et à pente douce le 1er juillet 2009.

3.1.2 Section à pente douce

La section à pente douce (Figure 5.b) se distingue par une forte pénétration du froid en hiver et de la chaleur en été. Le maximum de la profondeur de dégel est de 1.2m pour l'année 2008 et 0.6m pour l'année 2009. Au niveau du contact remblai / sol naturel, les extremums de températures la première année sont +6.4°C et -5.8°C ; pour la seconde année, ils valent +2.4°C et -4.3°C. Cette section connaît donc des températures plus froides que la section de référence. L'amélioration du comportement de la section à pente douce entre l'année 2008 et l'année 2009, doit être modulée car les conditions climatiques extérieures diffèrent d'une année à l'autre. En effet, les hivers des 2 années ont été semblables mais l'été de la seconde année a été moins chaud.

L'objectif principal de cette section était de s'affranchir de l'effet isolant du couvert neigeux. En 2007, avant la mise en place de la section, l'épaisseur de neige était proche de 2m (Allard et al., 2007) ; en février 2008, l'épaisseur de neige était presque nulle sur cette section tandis qu'elle était de 1.2m pour les autres sections (Doré et al., 2008). La bonne pénétration du froid pendant les périodes d'hiver confirme l'importance de s'affranchir du couvert neigeux.

3.1.3 Section de remblai à convection d'air

Le régime thermique de la section de remblai à convection (Figure 5.c) a été perturbé lors de la mise en place, car l'excavation est restée longtemps à l'air libre. Au cours des hivers, la pénétration du froid reste faible : le minimum de température au niveau du contact remblai / sol naturel est -3.1°C pour la première année et -2.6°C pour la seconde année. Ces valeurs sont inférieures à celles rencontrées pour la section de référence. Tel que décrit précédemment, un système de ventilation a été installé dans cette section pour créer un écoulement convectif ouvert malgré la présence de neige sur le talus. Cependant, on observe en hiver une accumulation de chaleur proche de la surface du remblai (Figure 6). Une hypothèse susceptible d'expliquer la pauvre performance de la technique est le manque d'efficacité du système d'évacuation de chaleur (ventilation), ce qui aurait pour effet de provoquer une accumulation de chaleur dans la partie supérieure de la couche convective et une perte

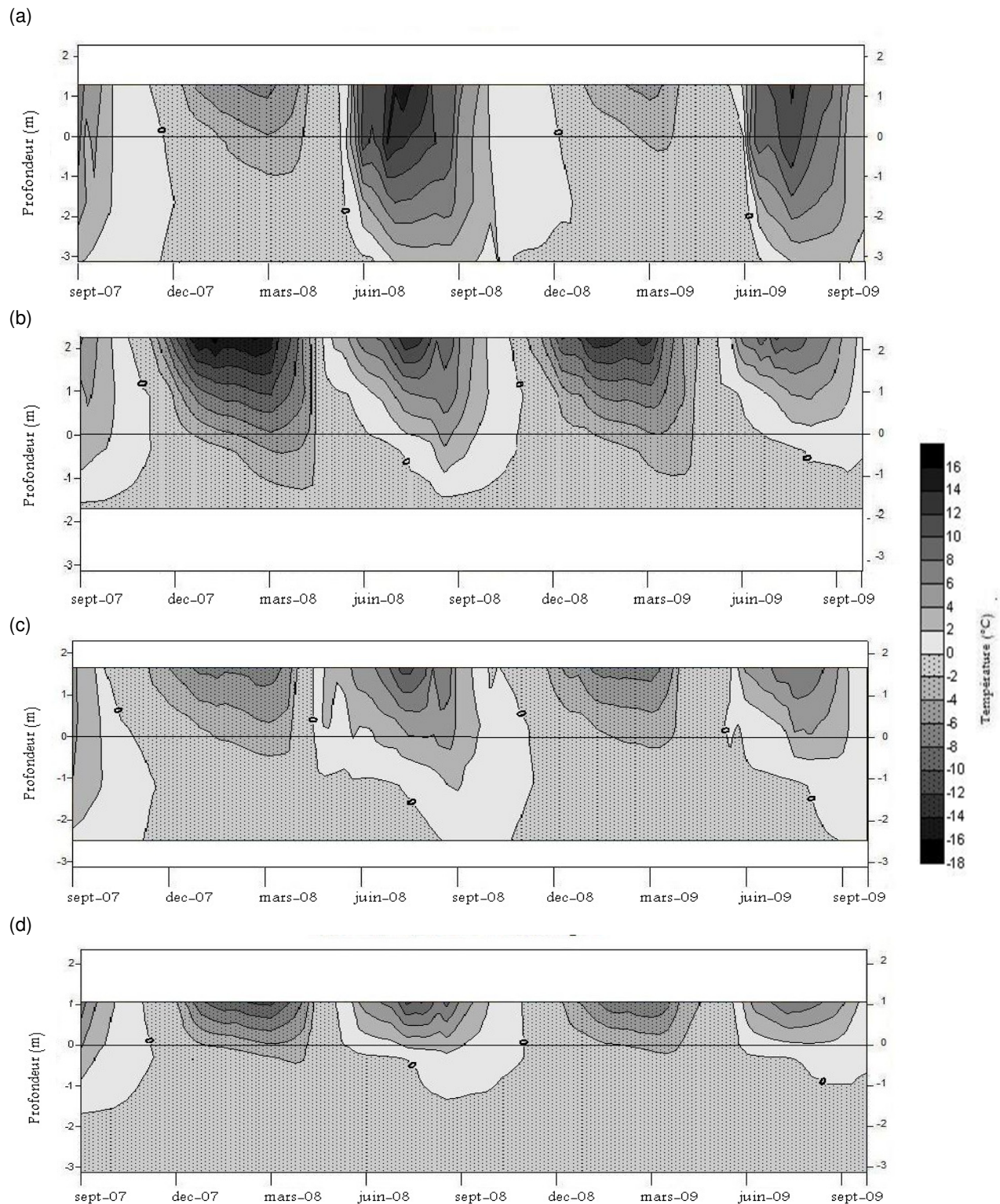


Figure 5. Profils thermiques obtenus par krigage des moyennes sur 7 jours des valeurs à 12h pour les quatre sections expérimentales. a)référence b)pente douce c)remblai à convection d)drain thermique. Les différentes sections n'étant pas instrumentées sur les mêmes plages de profondeur, les profils ont été calés de manière à ce que la valeur 0m de profondeur désigne le contact remblai/ sol naturel.

d'efficacité du système. La densité trop faible de trous dans les conduites de captation de chaleur pourrait expliquer ce phénomène.

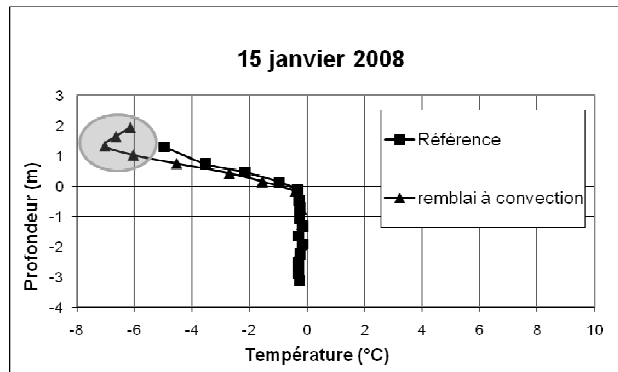


Figure 6. Profils thermiques des sections de référence et remblai à convection le 15 janvier 2008 à 12h00.

Pendant les périodes chaudes, et donc en l'absence de couvert neigeux, la pénétration de chaleur se trouve facilitée. Le maximum de température au niveau du contact remblai / sol naturel est +5.9°C pour la première année et +4.3°C pour la seconde année. Lorsque les températures maximales sont atteintes en surface au cours de l'été, on observe un dégel très rapide du sol en profondeur. Entre le 20 août et le 8 septembre 2008, la profondeur de dégel chute de 1.3m environ, atteignant le maximum de profondeur instrumentée (2.52m sous le contact remblai / sol naturel). Par extrapolation, le maximum de dégel pour la première année dépasserait alors 3m. La seconde année, ce même dégel brusque d'une épaisseur importante de sol est observé entre le 2 et le 22 septembre. Le dégel est de nouveau complet sur la totalité de la profondeur instrumentée. Ce phénomène est possiblement attribuable au dégel d'une couche de sol riche en glace. La chaleur latente de fusion absorbée par la couche pourrait expliquer la stagnation du front de gel avant de reprendre sa progression dans un sol pauvre en glace.

3.1.4 Section à drain thermique

La section à drain thermique (Figure 5.d) connaît une pénétration en profondeur à la fois des vagues de chaud et de froid. Au niveau du contact remblai/ sol naturel, les extremums de températures la première année sont +3.6°C et -3.6°C ; pour la seconde année, ils valent +1.6°C et -2.9°C. On retrouve pour cette section, le même phénomène que celui observé pour la section à remblai à convection : lorsque les températures extérieures atteignent leur maximum, la profondeur de dégel du sol baisse brusquement. Le phénomène est moins marqué que pour la section à remblai à convection : baisse d'environ 0.6m pour atteindre -1.05m la première année, baisse d'environ 0.4m pour atteindre 0.75m la seconde année. Il est intéressant de noter que le phénomène se produit à une plus faible profondeur que pour la section de remblai à convection d'air. Les

valeurs de dégel maximal atteintes sont les plus faibles parmi les différentes sections expérimentées.

3.2 Fonctionnement des systèmes de ventilation

L'efficacité des systèmes de refroidissement peut être évaluée en mesurant la différence de température entre les entrées et les sorties des systèmes de ventilation. Durant l'hiver, le captage de la chaleur du sol par les systèmes à convection (matériau convectif et thermique) entraîne une circulation d'air dans les systèmes de ventilation. L'air qui entre dans la bouche d'entrée d'air a approximativement la température de l'air extérieur. L'air réchauffe durant sa circulation dans les systèmes de ventilation et est expulsée par la bouche de sortie d'air à une température supérieure. La différence de température entre l'entrée et la sortie du système de ventilation est donc un très bon indicateur de l'efficacité du processus d'extraction de chaleur. Les débits d'air dans les cheminées n'étant pas connus, on ne peut quantifier l'extraction de chaleur. Mais le signe de la différence entre l'entrée et la sortie des cheminées, permet de valider le sens de circulation de l'air frais.

La Figure 7 illustre la mesure de la différence de température pour les sections remblai à convection et drain thermique. Les lignes en pointillés sur les figures illustre la température de l'air telle que mesurée aux boîtiers d'instrumentation. Les lignes pleines figurent la différence de température entre les cheminées d'entrée d'air et les cheminées de sortie d'air. Des valeurs négatives du différentiel indiquent ainsi que l'air est plus frais en entrée qu'en sortie, donc que le système de ventilation fonctionne correctement.

On note une différence de comportement entre les deux années et ceci pour les deux sections concernées. Au cours de la seconde année, le différentiel est négatif pendant un certain temps au cours de l'hiver alors qu'il était continuellement positif la première année. Ce qui indique que la convection est opérationnelle plus longtemps, la seconde année. Pendant les périodes chaudes (mai à septembre), le différentiel est continuellement négatif ; pendant les périodes froides (octobre à avril), le différentiel est principalement négatif mais connaît des valeurs positives pendant les périodes de transition. Cependant pendant les périodes où l'air extérieur est chaud, la stratification des couches empêche la convection naturelle. Le débit d'air pendant ces périodes peut être supposé faible. La convection naturelle est efficace lors des périodes où l'air extérieur est plus froid que le sol. Pour les sections à remblai à convection et à drain thermique, le phénomène de convection naturelle peut être considéré conséquent au cours de l'hiver de la seconde année uniquement. Ce comportement est encourageant pour un refroidissement dans les années suivantes.

3.3 Données caractéristiques

Le Tableau 1 est un récapitulatif des différentes données caractérisant les comportements des quatre sections.

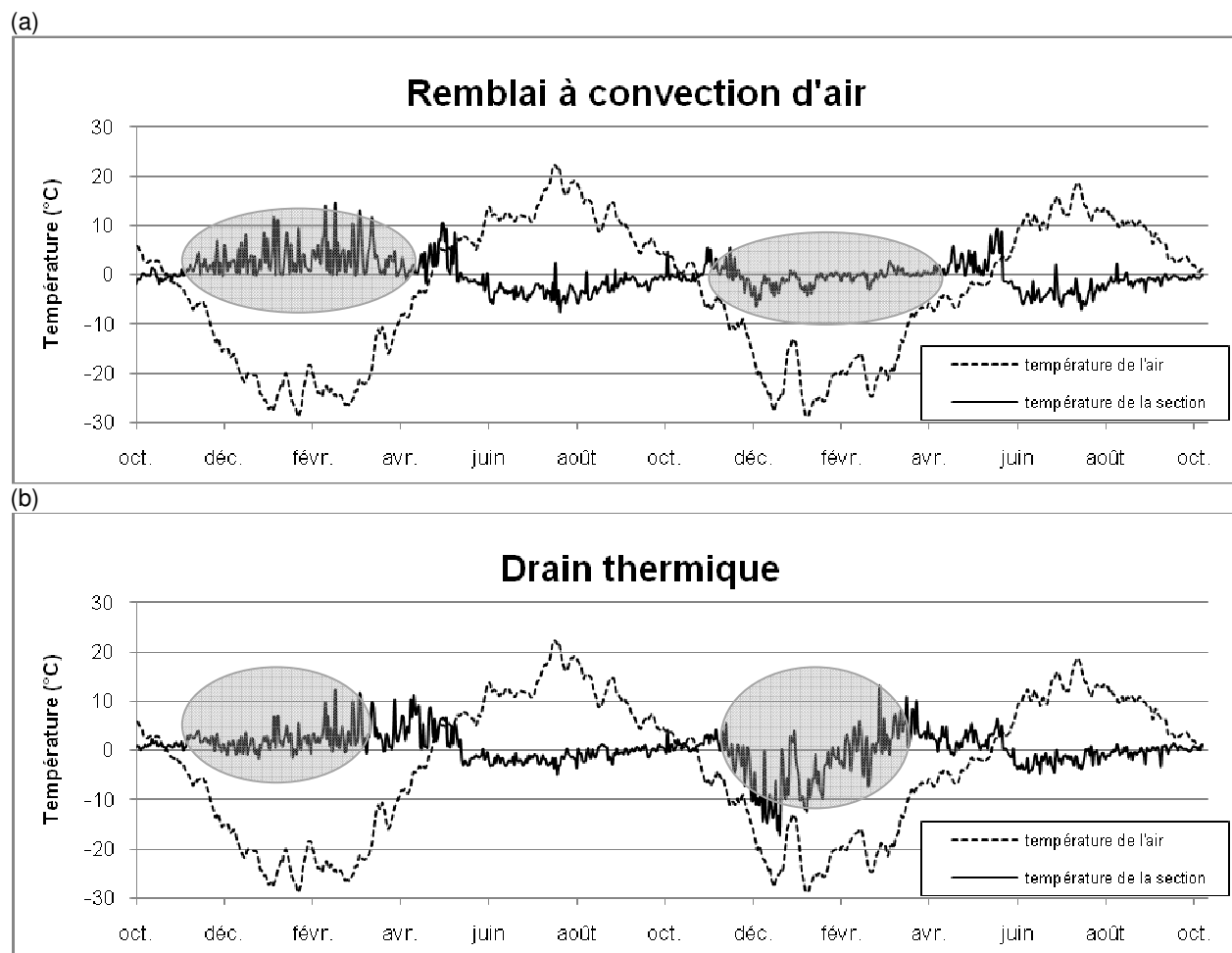


Figure 7. Evolution du différentiel de température entre les cheminées d'entrée d'air et les cheminées de sortie d'air et de la moyenne mobile de la température de l'air extérieur pour une période de 9 jours, en fonction du temps pour les sections à remblai à convection (a) et à drain thermique (b).

Tableau 1. Données caractéristiques

	Référence		Pente douce		Convection d'air		Drain thermique	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Température minimale à l'interface (°C)	-3.9	-2.8	-5.8	-4.3	-3.1	-2.6	-3.6	-2.9
Température maximale à l'interface (°C)	14.8	13.7	6.4	2.4	5.9	4.3	3.6	1.6
Profondeur maximale de dégel (m)	5 ^(*)	4 ^(*)	1.2	0.6	3.4 ^(*)	2.9 ^(*)	1.05	0.75

(*) Valeur obtenue par extrapolation

Entre les deux années d'études, la profondeur de dégel a été plus faible la seconde année pour toutes les sections. Les extremums de température à l'interface remblai / sol naturel sont, eux aussi, plus faibles la seconde année. L'air extérieur ayant une amplitude thermique plus faible en 2009 qu'en 2008, les comportements thermiques des deux années ne sont pas directement comparables.

La section de référence se distingue des trois autres sections par des températures maximales à l'interface et une profondeur de dégel largement supérieures. L'écoulement d'eau sous cette section est responsable de ce réchauffement massif, qui altère le rôle de référence que doit jouer cette section. Néanmoins, les trois techniques de mitigation proposent des comportements prometteurs. Les sections à pente douce et à drain thermique ont des profondeurs de dégel faibles : 0.6m et 0.75m respectivement pour la seconde année d'étude. La section à remblai à convection est affectée par le dégel brutal d'une couche de sol en profondeur.

Les sections doivent aussi être caractérisées par leur comportement lors des périodes de stabilité thermiques et pas uniquement par les valeurs extrêmes des profils thermiques. Sur la Figure 8, sont représentées les moyennes thermiques mensuelles pour les mois de mars et septembre des 2 années d'études. Ces mois ont été choisis car ils figurent les périodes où la stabilité thermique est la plus grande : mars correspond à l'hiver établi et septembre à l'été établi. La section de référence dégel sur la totalité de la profondeur instrumentée à cause de l'écoulement qui la réchauffe à environ 1m sous le contact remblai/ sol naturel. La section à remblai à convection dégèle massivement et ce, malgré une courbe trompette avec moins d'amplitude en surface. En dessous de 1m de profondeur dans le sol naturel, une faible augmentation de la température réchauffe le sol sur une grande épaisseur de sol. Les sections à pente douce et à drain thermique proposent des profondeurs de dégel faibles ; l'amplitude thermique est grande en surface mais pénètre faiblement les sections

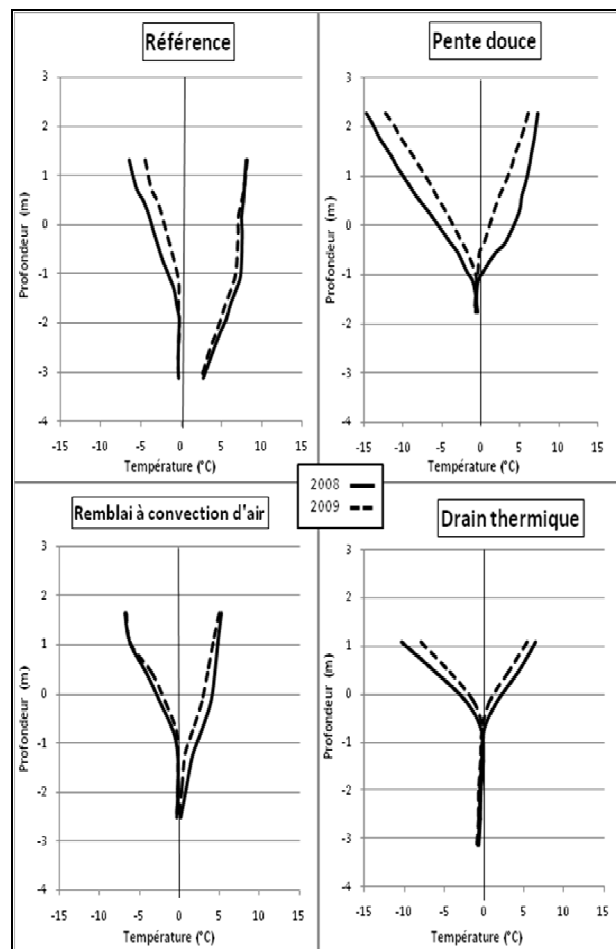


Figure 8. Profils thermiques des valeurs moyennes respectivement des mois de mars 2008, septembre 2008, mars 2009 et septembre 2009 pour les quatre sections expérimentales.

4 CONCLUSION

L'analyse des données thermiques des deux premières années d'expérimentations des systèmes de protection a permis de caractériser leurs potentiels respectifs.

La section de référence est perturbée par un écoulement d'eau à environ 1m de profondeur dans le sol naturel, qui la réchauffe massivement. Elle dégèle sur la totalité de la profondeur instrumentée, et ne remplit plus son rôle de référence à proprement parler.

La géométrie de la section à pente douce permet de s'affranchir de l'effet isolant du couvert neigeux et donc de favoriser l'évacuation de la chaleur. La température moyenne annuelle au niveau de l'interface remblai/ sol naturel a été abaissée de 2,6°C environ.

La section à remblai à convection a son efficacité diminuée par un sous dimensionnement de son système de ventilation, ce qui provoque une accumulation de chaleur dans la partie supérieure du matériau convectif. La modification des conduites de ventilation, prévue à l'été 2010, doit permettre de donner sa pleine efficacité à cette section. La température moyenne annuelle au niveau de l'interface remblai/ sol naturel a été abaissée de 1,6°C par rapport à la section de référence.

La section à drain thermique a donné un bon rendement en réduisant la température moyenne annuelle de 2,2°C au niveau du contact remblai / sol naturel, et elle propose une profondeur de dégel faible (0.75m en 2009). Le comportement de cette section est très encourageant.

REMERCIEMENTS

Avec le soutien technique et financier du Ministère des transports du Québec.

References

- Allard, M., Fortier, R., Calmels, F., Savard, C., Guimond, A., Tarussov, A., 2007. L'évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur la stabilité des pistes d'atterrissage au Nunavik: première étape vers une stratégie d'entretien. Congrès annuel de 2007 de L'Association des transports du Canada à Saskatoon (Saskatchewan)
- Beaulac, I. et Doré, G. 2006. Development of a new heat extraction method to reduce permafrost degradation under roads and airfields. Département de génie civil, Université Laval, Québec, Canada, 248 p.
- Doré, G., Pierre, P., Juneau, S., Lemelin, J.-C. 2007. Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures du Nunavik : aéroport de Tasiujaq, Rapport d'étape 1 – Compte rendu des travaux d'instrumentation et de supervision de construction des planches expérimentales de l'aéroport de Tasiujaq, description des planches construites et de l'instrumentation installée. Groupe de recherche en ingénierie des chaussées. Département en génie civil, Université Laval, Québec, Canada, 28p.
- Doré, G., Jorgensen, A.S. 2008. Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures du Nunavik : aéroport de Tasiujaq, Rapport d'étape 2 – Comportement thermique durant le premier hiver et analyse des données sur le comportement mécanique de la couche active. Groupe de recherche en ingénierie des chaussées, Département de génie civil, Université Laval, Québec, Canada, 12p.
- Goering, D.J. et Kumar, P. 1996. Winter-time convection in open-graded embankments. *Cold Regions Science and Technology*, 24,57-74
- Goering, D.J. 1996. Air convection embankments for roadway construction in permafrost zones. Proceedings of the 8th International Conference on Cold regions Engineering, Fairbanks, Alaska, 1-12.
- Jorgensen, A.S. et Doré, G. 2007. Assessment of the effectiveness of two heat removal techniques for permafrost protection. *Cold Regions Science and Technology* 53 (2008) 179–192
- Saboundjian, S. et Goering, D.J. 2003. Air convection embankment for roadways-field experimental study in Alaska. *Transportation Research Record* 182 1, 20-28

