

Suivi du comportement thermique et mécanique de l'adaptation de la route d'accès à l'aéroport de Salluit au Nunavik, Québec



Challenges from North to South
Des défis du Nord au Sud

Vincent Lamontagne, Loriane Périer, Chantal Lemieux & Guy Doré
Département de génie civil et Centre d'études nordiques – Université Laval, Québec, Qc, Canada

Michel Allard

Département de géographie et Centre d'études nordiques – Université Laval, Québec, Qc, Canada

Jonathan Roger

Centre d'études nordiques – Université Laval, Québec, Qc, Canada

Anick Guimond,

Transports Québec, Bureau de la coordination du Nord-du-Québec, Rouyn-Noranda, Qc, Canada

ABSTRACT

During summer 2012, rehabilitation, stabilisation and adaptation to global warming were performed on the airport access road of Salluit. Since then, the performance of the adaptations and the stability of the road have been monitored at two stations (A and B). The ground temperatures data show a rise of the permafrost table for both stations. Heat drain effectiveness has only been confirmed at station B where conditions to generate optimal air convective were present. All inclinometers show a displacement of the embankment shoulder following the natural slope, a movement similar to an embankment spreading. The DTS-Fiber optic cable is also confirming the effectiveness of the heat drain.

RÉSUMÉ

À l'été 2012, des travaux de réhabilitation, de stabilisation et d'adaptation au contexte de changement climatique ont été effectués sur la route d'accès à l'aéroport du village nordique de Salluit. Depuis ces travaux, un suivi de la performance des adaptations ainsi que de la stabilité de la route a été fait à deux stations (A et B). Les températures du sol ont montré une remontée du plafond du pergélisol aux deux stations. Par contre, l'efficacité du drain thermique a pu être confirmée seulement à la station B où les conditions pour générer un mouvement convectif optimal de l'air sont présentes. Les inclinomètres montrent tous des déplacements de l'épaule du remblai suivant la pente du terrain naturel, un mouvement qui s'apparente à un évasement du remblai. La fibre optique DTS a permis d'analyser les performances et l'efficacité du drain thermique.

1 INTRODUCTION

Depuis le début des années 1990, le Nord-du-Québec subi un réchauffement climatique notable. Ce réchauffement a une influence sur la dégradation du pergélisol, ce qui contribue à l'apparition d'indices d'instabilité sur des infrastructures auparavant stables (Allard et al., 1995; Wang and Allard, 1995; L'Hérault, 2009; Smith et al., 2010). Le village de Salluit (62°14'N, 75°38'O) au Nunavik ne fait pas exception. Il est situé dans une vallée s'ouvrant sur le fjord de Sugluk (Figure 1). L'unique route donnant accès à son aéroport a été construite dans la pente du terrain naturel qui est constitué, en majeure partie, d'un dépôt d'argile sensible au dégel.

À l'été 2012, des travaux de réhabilitation et d'adaptation aux changements climatiques (CC) ont été entrepris afin de stabiliser thermiquement et mécaniquement ce lien routier vital pour la communauté de Salluit. Les techniques de mitigation de la dégradation du pergélisol utilisées incluent la mise en place d'un drain thermique dans l'épaule du remblai du côté aval ainsi que l'aménagement d'une pente de remblai adoucie du côté amont qui comprend un système de drainage à faible impact sur le pergélisol incluant de nouveaux ponceaux, ainsi que la mise en place et l'empierrement du fossé peu profond et de la sortie des ponceaux.



Figure 1: Localisation du village nordique de Salluit au Nunavik, Québec (Société Makivik, 2015)

Un suivi du comportement thermique et mécanique du remblai a donc été effectué depuis les

travaux. Une description des techniques de protection du pergélisol et de la méthode de suivi utilisées, ainsi que les résultats et conclusions préliminaires sont présentés dans cet article.

1.1 Descriptions des différentes techniques utilisées

1.1.1 Drain thermique

Le drain thermique est une méthode de protection du pergélisol favorisant l'extraction de chaleur par l'induction d'un mouvement d'air convectif dans une membrane de géocomposite à haute perméabilité installée dans l'épaulement ou sur la totalité du remblai. Des conduites d'air sont installées à la base et au sommet du drain afin de favoriser une circulation d'air libre dans le géocomposite (Doré et Beaulac, 2007).

La chaleur du sol est transmise par conduction au drain thermique, réchauffant ainsi l'air dans ce dernier. La masse volumique de l'air chaud étant plus faible que celle de l'air froid, un mouvement d'air ascendant se crée entraînant l'expulsion de l'air plus chaud par la conduite au sommet du drain, ainsi qu'une entrée d'air froid dans la conduite à la base du drain créant ainsi un mouvement de convection (Jorgensen et coll., 2008) (Figure 2).

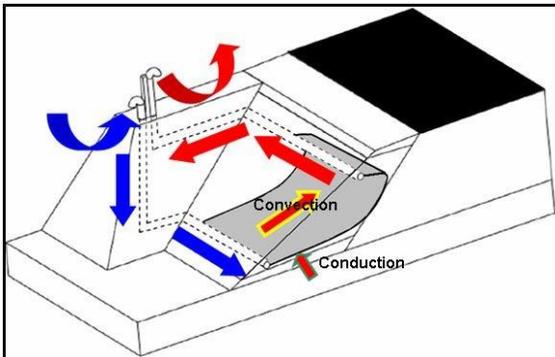


Figure 2: Schéma du fonctionnement du drain thermique installé sur le remblai de la piste d'atterrissage à Tasiujaq. (Doré et coll., 2007)

Des études sur des modèles de laboratoire et sur des modèles numériques réalisées à l'Université Laval et des projets expérimentaux réalisés en collaboration avec le Ministère des transports du Québec (Chataigner et coll., 2009; Jorgensen et al., 2008; Ficheur, 2011) ont permis d'établir la géométrie maximisant l'efficacité du drain thermique. La membrane doit avoir une épaisseur minimale de 25 mm. Elle doit inclure une portion à faible pente pour collecter la chaleur du sol, puis une autre suivant une pente à 45° (1H:1V) pour induire le mouvement d'air ascendant. Une épaisseur minimale de remblai de 1,5 m est requise pour induire un mouvement convectif significatif dans le drain thermique.

1.1.2 Adoucissement de la pente du remblai

La méthode d'adoucissement de la pente du remblai est une méthode de protection du pergélisol basée sur le renforcement du remblai ainsi que sur l'extraction de

chaleur. Cette technique consiste en la mise en place d'une pente au maximum 6H:1V. Elle contribue à une stabilisation mécanique par l'ajout de matériaux en pied de pente. Elle permet également de diminuer cette accumulation réduisant ainsi son effet isolant en favorisant une meilleure extraction de chaleur (Ficheur, 2011).

1.1.3 Câble à fibre optique (DTS)

La technologie de fibre optique «*Distributed Temperature Sensing*» (DTS) est une approche innovatrice expérimentée afin de détecter rapidement toute source de chaleur dans sol pouvant provoquer une dégradation du pergélisol le long d'un ouvrage linéaire. Elle permet de mesurer la température du sol en tout point le long d'une infrastructure linéaire. Elle consiste en un fil optique qui agit comme capteur permettant de mesurer la température à un très grand niveau de précision ($\pm 0,1^\circ\text{C}$) et à une haute résolution linéaire (0,25 m) sur la totalité de sa longueur. Sur la route d'accès à Salluit, elle est utilisée afin de faire le suivi de la performance des systèmes de drainage et de drain thermique.

2 CONTEXTE DES TRAVAUX ET DE L'INSTRUMENTATION

2.1 Description des travaux d'adaptation réalisés

La dégradation du pergélisol sous la route d'accès à l'aéroport de Salluit était principalement causée par l'accumulation de neige en bordure de la route, par l'écoulement d'eau à travers le remblai et par l'absorption de chaleur par le revêtement bitumineux. Ces trois facteurs jumelés au réchauffement climatique contribuaient à augmenter le risque de rupture du remblai. Afin de diminuer le risque, trois mesures d'adaptation visant à favoriser une remontée du plafond du pergélisol ont été mises en place dans le remblai de la route à l'étude: 1) le drain thermique du côté aval du remblai pour extraire la chaleur du sol en générant une convection d'air dans le remblai en hiver; 2) l'aménagement d'une pente douce 6H:1V du côté amont du remblai pour minimiser l'accumulation de neige et éloigner l'écoulement de l'eau de drainage du remblai; 3) l'amélioration du système de drainage pour minimiser les accumulations et infiltrations d'eau dans le remblai, ainsi que l'érosion thermique.

2.1.1 Le drain thermique

Le drain thermique a été installé sur 900 m dans l'épaulement du remblai du côté aval de la pente du terrain naturel sur laquelle la route a été construite. Ce dispositif a pour objectif de favoriser la remontée du plafond du pergélisol à l'intérieur du remblai, limitant les tassements différentiels et permettant la formation d'une «clef» de matériel gelé, stabilisant l'infrastructure et diminuant ainsi le risque de rupture de pente.

Il est à noter qu'en raison d'une erreur d'arpentage lors des travaux, le drain thermique n'a pas été installé correctement sur environ 500 m. Dans ce

secteur, le drain a une pente d'environ 2H:1V, soit inférieure à la pente optimale (1H:1V) établie par Chataigner et coll. (2009) et se termine au bas de la pente plutôt que de se prolonger à l'horizontal en pied de remblai (Figure 3). Selon les simulations effectuées par Chataigner, cette erreur peut entraîner une perte d'efficacité d'environ 30% du système. Le suivi des prochaines années nous indiquera si cette extraction est tout de même suffisante pour favoriser une remontée du plafond du pergélisol dans le remblai.



Figure 3: Drain thermique bien installé

2.1.2 Adoucissement de la pente du remblai du côté amont

Un talus de remblai en pente douce de 6H:1V a également été aménagé du côté amont afin de minimiser l'accumulation de neige en pied de remblai, ce qui réduit l'effet isolant de cette dernière. La pente douce a également pour effet d'éloigner l'écoulement d'eau du remblai.

2.1.3 Amélioration du système de drainage

Afin de canaliser efficacement l'écoulement d'eau dans les fossés de drainage et les ponceaux, minimiser l'influence de l'eau sur le pergélisol, le système de drainage a été amélioré. Un fossé peu profond (0,5 m de profondeur) protégé par un empierrement a été mis en place au pied de la pente douce du côté amont de la route (Figure 5). Les ponceaux existants ont été remplacés et de nouveaux ont été ajoutés afin de réduire le temps de drainage et ainsi l'accumulation d'eau en pied de remblai. À la sortie des ponceaux, des empierrements ont été placés de réduire les risques d'érosion thermique.

2.2 Description de l'instrumentation

Afin d'effectuer un suivi du comportement thermique et mécanique de la route à l'étude suite aux travaux d'adaptation réalisés, des câbles à thermistances (verticaux et horizontaux), des inclinomètres (verticaux et horizontaux) et un câble à fibre optique (DTS) ont été mis en place. La majorité de l'instrumentation se situe à deux stations principales, soit la station A et la station B (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

2.2.1 Thermistances verticales

Une section de câbles à thermistances verticales a été placée à chacune des deux stations, A et B, afin d'obtenir un profil transversal des températures du pergélisol sous le remblai et dans le remblai de la route de la route. Pour chaque station, 5 séries de 10 thermistances ont été installées en travers du remblai sur 5 m de profondeur, tel qu'illustré à la Figure 4. Ces données permettront de documenter la remontée du plafond du pergélisol.

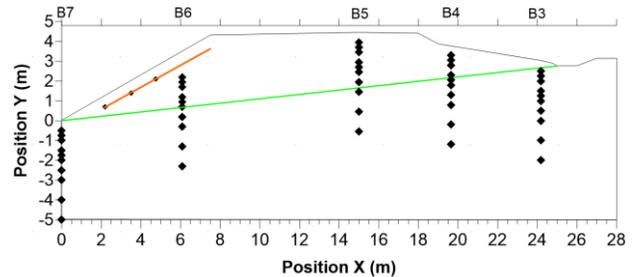


Figure 4: Position des thermistances verticales à la station B. Les positions du sol naturel (ligne verte) et du drain thermique (ligne orange) sont indiquées sur la figure.

2.2.2 Thermistances horizontales

Deux câbles à thermistances horizontales de 50 m ont été installées, près de la station A, en pied de talus, de chaque côté de la route (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les thermistances sont positionnées à intervalle de 2 m le long du câble, qui est localisé légèrement au-dessus du contact sol naturel/remblai.

Ces deux séries de thermistances permettent principalement de valider les températures mesurées par le câble à fibre optique DTS, ainsi qu'à détecter des points chauds.

2.2.3 Thermistances dans le drain thermique

Des câbles à thermistances ont également été installés directement dans le drain thermique près des deux stations (A et B). Pour chacune des stations, un câble de trois thermistances a été placé près d'une cheminée de ventilation et un autre se situe à 15 m de la même cheminée, pour un total de six thermistances. Chacun des câbles mesure la température à trois hauteurs différentes dans la pente du remblai, soit au bas, au quart et au milieu de la pente (Figure 4).

Ces câbles de thermistances permettront de comparer les températures près d'une cheminée d'entrée d'air extérieur et à 15 m de celle-ci, où uniquement la circulation d'air dans le drain influence les températures mesurées. Ces mesures permettront de valider que le système distribue bien l'air froid dans le drain. De plus, elles aideront à valider la performance de ce dernier et serviront ainsi au développement de la méthode de conception des drains thermiques.

2.2.1 Câble à fibre optique-DTS

Un câble à fibre optique DTS couvrant chacun des côtés de la route a été installé. Du côté amont, un seul câble continu de 850 m de long est installé à deux profondeurs,

soit au contact du sol naturel/remblai et à 30 cm sous le contact sol naturel/remblai. Du côté aval, le câble d'une longueur de 550 m est placé directement sous le drain thermique et dans le sol naturel. De ce côté, il traverse également la route sous quatre ponceaux, ce qui permettra de vérifier si les ponceaux et les fossés de drainage fonctionnent efficacement.

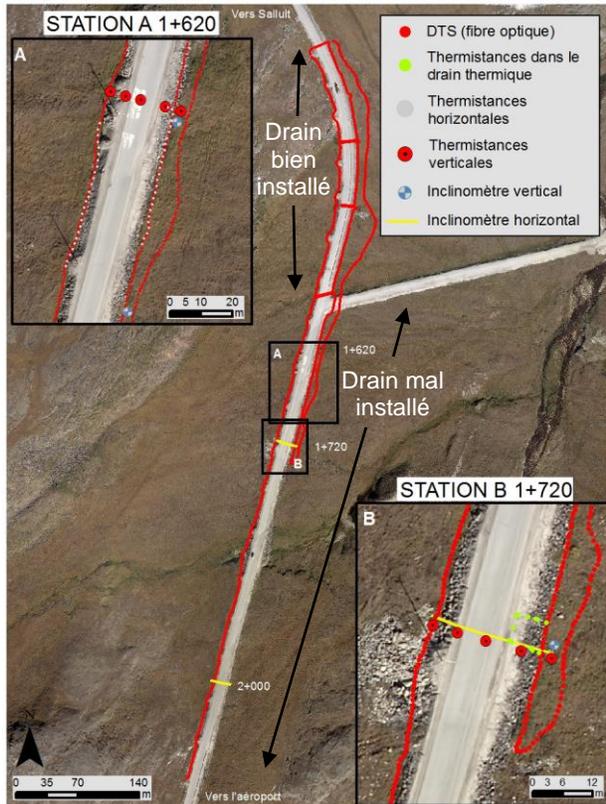


Figure 5: Localisation de l'ensemble de l'instrumentation mis en place

2.2.2 Inclinomètre

Afin de documenter les éventuels mouvements du remblai et du sol sous-jacent, cinq inclinomètres ont été installés, soit 3 verticaux et 2 horizontaux. Les trois inclinomètres verticaux ont été placés en pied de remblai du côté aval près de la station A, entre les deux stations et près de la station B. Ils permettront d'effectuer un suivi des déplacements parallèles et perpendiculaires à la route. Quant aux inclinomètres horizontaux, ils ont été placés perpendiculairement à la route, au contact entre le sol naturel et le remblai, à la station B et 280 m plus au sud (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ils mesurent respectivement 25 m et 24 m. Ils permettront d'illustrer les tassements sur la largeur du remblai.

3 SUIVI DU COMPORTEMENT THERMIQUE AUX STATIONS A ET B

3.1 Évolution des données climatiques

Les données climatiques utilisées pour cette étude proviennent de la station météorologique SILA, située à proximité du site d'étude de Salluit. Les valeurs utilisées sont notamment les températures d'air maximales, minimales et moyennes.

Les températures moyennes journalières de 2013 et 2014 ont permis de calculer les indices de gel et de dégel de l'air. Ces indices serviront à comparer les données climatiques et les températures du remblai et du sol. La méthode de calcul utilisée pour déterminer les indices de gel et de dégel est celle présentée dans le livre *Cold Regions Pavement Engineering* (Doré & Zubeck, 2009) et consiste à faire la somme des températures sous 0°C, pour l'indice de gel, et au-dessus de 0°C pour l'indice de dégel. Ces deux indices ont été calculés sur la même période annuelle que celle utilisée pour les régimes thermiques, soit du 8 octobre 2012 au 7 octobre 2013 pour la première année de suivi, et du 8 octobre 2013 au 7 octobre 2014 pour la seconde. Le Tableau 1 présente les indices de gel et de dégel obtenus pour les deux années de suivi.

Tableau 1. Indice de dégel et de gel des deux années de suivies

Années	Indice de dégel de l'air (°C*jour)	Indice de gel de l'air (°C*jour)
2012-2013	674	3079
2013-2014	892	3598

Les deux indices ont augmentés lors de la deuxième année. En effet, l'indice de dégel de l'air a augmenté de 218°C*jour, indiquant un printemps et un été plus chauds en 2014. Quant à l'indice de gel, il s'est accru de 519°C*jour, indiquant un hiver plus froid en 2014.

3.2 Évolution du régime thermique du pergélisol dans le remblai côté aval aux câbles A6 et B6

Les câbles A6 et B6 se situent dans le remblai sous le drain thermique (Figure 4). Ils sont donc essentiels pour évaluer les performances de celui-ci.

Les données mesurées au câble B6 sont utilisées pour suivre le comportement du drain thermique. La Figure 6 illustre les températures minimales, maximales et moyennes enregistrées en 2013 et 2014. La figure illustre également les températures maximales et minimales enregistrées par les six thermistances installées dans le drain thermique. On note d'abord que les températures minimales, en hiver, mesurées dans le drain thermique sont plus froides que celles dans le sol ce qui est propice au transfert de chaleur du sol vers le drain thermique, donc une indication de son efficacité. Par contre, en été, les températures dans le drain thermique sont plus chaudes que le sol environnant ce qui peut avoir l'effet inverse, soit réchauffer le sol.

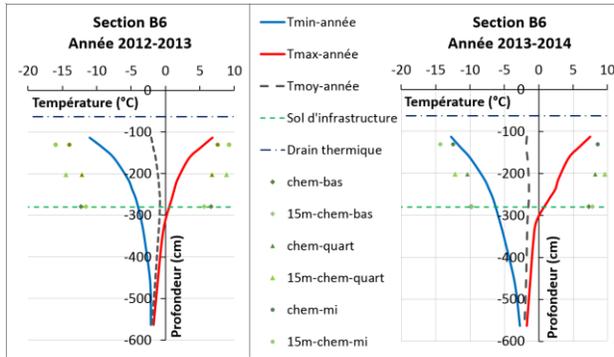


Figure 6: Régime thermique du câble B6

Aux deux câbles, la série de thermistances installées dans le drain thermique à 15 m de la cheminée a enregistré des températures plus chaudes en été et plus froides en hiver que celle à proximité. Cela suggère que la chaleur évacuée aurait un effet plus grand sur la température dans le drain thermique que l'air froid entrant dans le système ; ce qui confirme qu'il y a une bonne distribution de l'air froid dans le drain thermique et donc que l'espacement des cheminées de ventilation est approprié. Aux deux câbles, les températures minimales dans le drain thermique sont généralement plus chaudes en bas et plus froides en haut en hiver. Cela signifie que les conditions propices à l'établissement d'un mouvement convectif efficace sont présentes.

3.3 Profils transversaux de température

3.3.1 Station A

Des problèmes d'acquisitions au câble A7 pour les deux années de suivies expliquent l'absence de donnée dans les cinq premiers mètres du côté aval des profils de température de la station A (Figure 7 et Figure 8).

Les profils transversaux de température au 15 mars 2013 et 2014 (Figure 7) montrent que le remblai est complètement gelé à cette date. En 2014, un petit bulbe plus froid est également observable sous le drain. Ce résultat laisse présager une bonne performance du drain thermique, mais un suivi à plus long terme est nécessaire afin de confirmer cette tendance, puisque l'hiver 2014 a été plus froid.

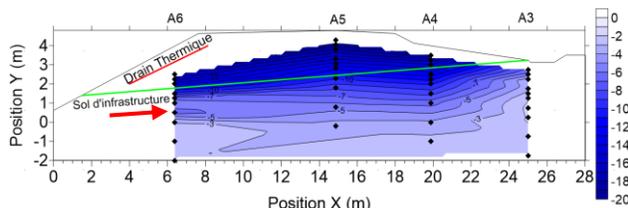


Figure 7: Profil transversal de la température à la station A au 15 mars 2014

En observant les profils transversaux de température au 15 septembre 2013 et 2014 (Figure 8), un bulbe plus froid est visible du câble A6 au câble A4 entre 1,5 m et 3 m de profondeur. La comparaison entre les

deux années de suivi permet d'observer que le bulbe s'étend et se refroidit, lors de la seconde année. Ces observations laissent présager une bonne performance du drain thermique. Par contre, un bulbe plus chaud à 1 m indique que le drain réchauffe le sol durant l'été. Un suivi au cours des prochaines années sera nécessaire afin de vérifier l'efficacité du drain à la station A.

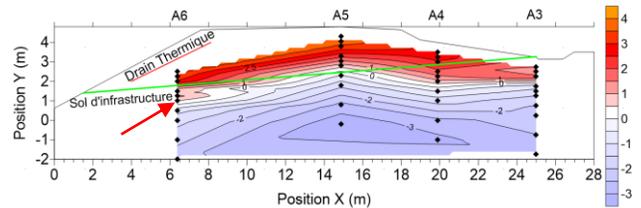


Figure 8: Profil transversal de la température à la station A au 15 septembre 2014

3.3.2 Station B

Les profils de température au 15 mars 2013 (Figure 9) et 2014 (Figure 10) montrent la présence d'un bulbe de chaleur sous le drain thermique (câble B6). L'existence de ce dernier peut s'expliquer par le fait que le régime thermique a été modifié lors de la mise en place du drain thermique et l'air chaud pourrait avoir été emprisonné dans le sol sous le drain thermique (Jorgensen, 2009).

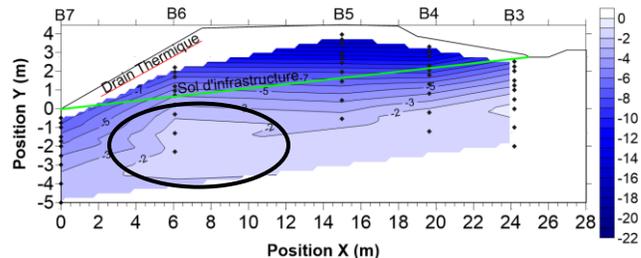


Figure 9: Profil transversal de la température à la station B au 15 mars 2013

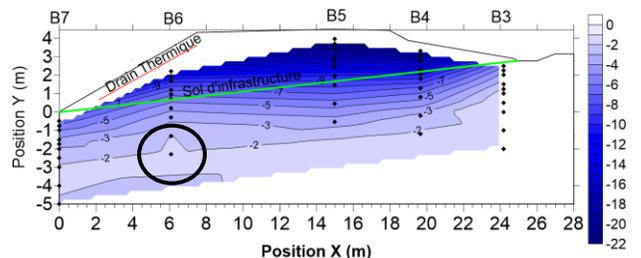


Figure 10: Profil transversal de la température à la station B au 15 mars 2014

Par contre, en 2014, le bulbe plus chaud a diminué de façon significative. Cette diminution est un signe encourageant de la bonne performance du drain thermique, mais un suivi à plus long terme est nécessaire afin de vérifier cette tendance et ainsi confirmer l'efficacité du drain thermique.

Les profils au 15 septembre 2013 et 2014 à la station B suivent la même tendance qu'à la station A et montrent un bulbe plus froid entre les câbles B4 et B6 qui

s'étend et se refroidit en 2014. Ces observations sont des signes indiquant un bon fonctionnement du drain thermique. Un suivi à plus long terme est nécessaire afin de vérifier la tendance du bulbe à s'étendre et se refroidir, ainsi que la remontée du niveau du pergélisol.

3.4 Épaisseur de la couche active aux stations A et B

Les Figure 11 et Figure 12 montrent le niveau du plafond du pergélisol en 2013 et 2014 aux stations A et B. Elles illustrent la variation de l'épaisseur de la couche active par rapport au remblai et au sol d'infrastructure. Le plafond du pergélisol a été déterminé à l'aide des régimes thermiques obtenus par les câbles de thermistances.

L'épaisseur maximale de la couche active à la station A est de 3 m, tandis qu'elle est de 3,3 m à la station B. Entre 2013 et 2014, l'épaisseur de la couche active aux deux stations montrent une diminution générale de 0,1 m à 0,4 m, excepté au câble A3 (sous le fossé amont), où elle augmente de 0,1 m. Cette situation est probablement attribuable à l'accumulation d'eau dans le fossé dans le secteur de la section A. Une remontée du plafond du pergélisol de quelques centimètres au-dessus du sol d'infrastructure est également visible en 2014 au câble A5, sous le centre de la route (Figure 11). Cette diminution de la couche active était attendue étant donné l'augmentation de l'indice de gel en 2014.

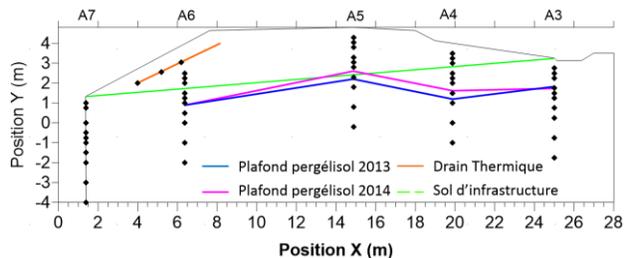


Figure 11: Niveau du plafond du pergélisol à la station A en 2013 et 2014

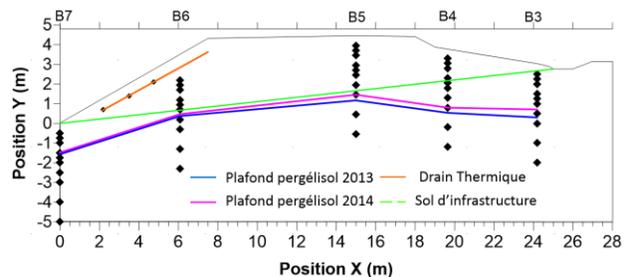


Figure 12: Niveau du plafond du pergélisol à la station B en 2013 et 2014

La Figure 12 permet également de constater que le pergélisol se maintient approximativement au niveau du contact sol remblai sous le drain thermique. Ceci semble être une très bonne indication de l'efficacité du drain thermique puisque la couche active tend normalement à s'épaissir sous les talus d'un remblai en raison de l'isolation occasionnée par l'accumulation de neige à cet endroit en hiver.

3.5 Évolution des températures linéaires par le câble à fibre optique (DTS)

Les températures moyennes annuelles enregistrées par le DTS situé sous le drain thermique (côté aval) sont plus froides que celles enregistrées du côté amont de la route. De plus, le sol du côté aval (drain thermique) est gelé trois mois de plus par année que du côté amont. Ces observations indiquent une bonne performance du drain thermique. La section au sud de l'intersection enregistre des températures positive un mois avant la section au nord. Cette différence s'explique par le fait que le drain thermique a été installé adéquatement dans la section au nord de l'intersection tandis que dans la section au sud n'a pas été mis en place correctement (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le suivi permettra de confirmer cette tendance et de vérifier la différence d'efficacité anticipée de 30%. Afin d'obtenir plus de détails sur la DTS consulter l'article de Roger et al. 2015.

4 SUIVI DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU REMBLAI

4.1 Inclinomètres verticaux

Les inclinomètres verticaux ont été installés afin d'effectuer un suivi des déplacements parallèles et perpendiculaire à la route et ainsi. Comme l'illustre la Figure 13, les inclinomètres montrent des déplacements importants vers le bas de la pente dans l'axe A. En effet, les inclinomètres verticaux de la station A et celui situé entre les deux stations ont enregistré des déplacements cumulatifs d'environ 132 mm après deux ans. Il est à noter que le déplacement maximal se produit proche de la surface et diminue linéairement pour devenir nul au sommet du pergélisol. Du déplacement total de 132 mm, 86 mm (65% du déplacement total) se sont produits lors de la deuxième année de suivi (2014). Le taux de déplacement à ces deux inclinomètres a pratiquement doublé en 2014 (première année : 46 mm/an ; deuxième année : 86 mm/an). L'inclinomètre vertical de la station B a enregistré un déplacement cumulatif de 105 mm, ce qui est inférieur aux deux autres, mais non négligeable. Contrairement aux deux inclinomètres verticaux précédents, le taux de déplacement est resté plutôt stable lors des deux années de suivi, soit environ 50 mm/an.

Les graphiques de l'axe B des trois inclinomètres montrent un déplacement vers le village, soit dans le sens de la pente naturelle du terrain. Contrairement à l'axe A, la quantité de déplacement varie de façon importante selon les inclinomètres. L'inclinomètre situé à la station A montre un déplacement cumulatif de 37,5 mm, celui entre les deux stations est de 75 mm et celui de la station B est le plus faible, soit 14,5 mm (Figure 13).

Les mouvements enregistrés par les trois inclinomètres verticaux semblent indiquer un évitement du remblai qui proviendrait du fluage du sol dans la couche active et possiblement du sommet du pergélisol. Ce fluage important, malgré la présence de systèmes de protections, pourrait être associé au gel et au dégel

saisonnier dans la couche active. Une attention particulière sera portée lors de la visite de terrain de l'été 2015 afin de vérifier cette hypothèse.

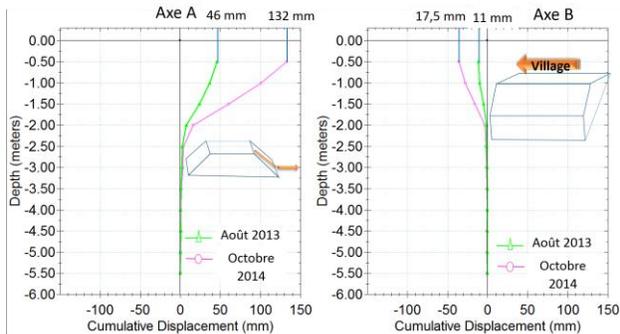


Figure 13: Déplacements cumulatifs sur les axes A (perpendiculaire à la route) et B (parallèle à la route) de l'inclinomètre vertical de la station A entre septembre 2012 et octobre 2014

Par ailleurs, des signes de ces déplacements sont observables sur le terrain. Des fissures longitudinales de plusieurs mètres de long et dont certaines avaient des décrochements de 2 à 3 cm ont été observées lors de la visite de terrain de 2014 (Figure 14).



Figure 14: Fissure longitudinale avec décrochement située près des inclinomètres de la station B

4.2 Inclinomètres horizontaux

Des bouchons de glace formés à l'intérieur des inclinomètres horizontaux durant l'hiver ont occasionné des problèmes d'acquisition en 2013, expliquant que seuls les déplacements cumulatifs de l'année 2014 soient visibles aux Figure 15 et Figure 16. Ces bouchons de glace, localisés sous le drain thermique sont un autre indice de l'efficacité du drain thermique qui refroidit le sol sous 0°C.

L'inclinomètre horizontal de la station B (Figure 15) a enregistré un déplacement maximal de 35,3 mm à 22m, soit près de l'extrémité aval. Les déplacements en aval sont plus grands qu'en amont en raison du poids plus important du remblai et de la pente naturelle qui favorise l'évasement du remblai à cet endroit. Vers le centre de l'inclinomètre ($X = 15,5$ m), et donc de la route, un déplacement de 18 mm est visible. Ce déplacement significativement inférieur à ce qui l'entoure s'explique par le plafond du pergélisol qui est remonté plus haut

qu'ailleurs (Figure 11), ce qui a vraisemblablement limité le tassement à cet endroit.

L'inclinomètre situé le plus au sud indique un déplacement maximal de 270 mm dans le premier mètre du côté amont, puis, un déplacement assez constant d'environ 45 mm est observable entre les positions $X = 3$ m et $X = 23$ m pour diminuer graduellement dans le dernier mètre ($X = 23$ m à 24 m) (Figure 16).

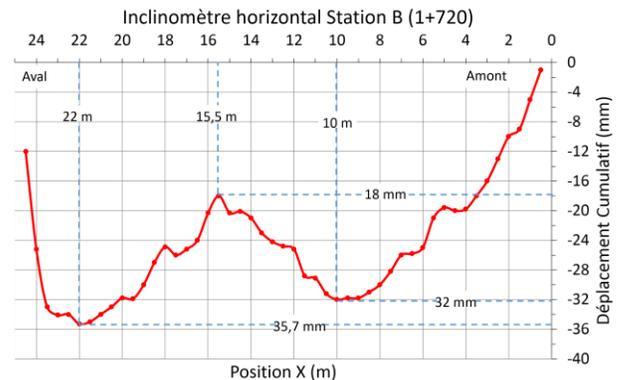


Figure 15: Déplacements cumulatifs de l'inclinomètre horizontal de la station B entre septembre 2012 et octobre 2014

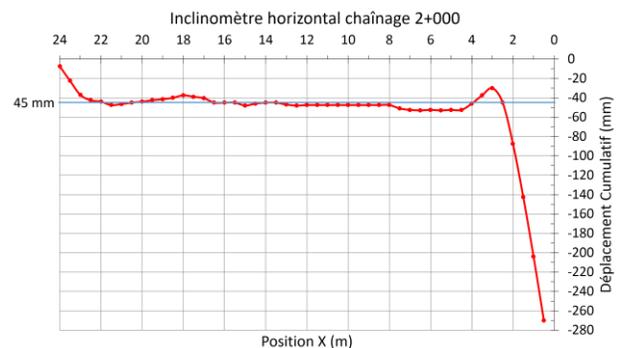


Figure 16: Déplacements cumulatifs de l'inclinomètre horizontal situé le plus au sud entre septembre 2012 et octobre 2014

Le déplacement le plus important du premier mètre s'explique par le fait que l'inclinomètre dépasse du remblai et repose sur une butte de pierres. Cette portion peut donc être influencée par des facteurs extérieurs au remblai tel que la neige ou, la proximité du fossé de drainage. Les déplacements moins importants dans les derniers mètres (côté aval), sont dû au fait que ce secteur ne supporte pas le poids du remblai.

5 CONCLUSION

Les deux années de suivi ont permis la collecte et l'analyse des données enregistrées. Les visites de terrain ont permis une meilleure compréhension des résultats obtenus. Plusieurs conclusions préliminaires peuvent en être tirées :

- L'analyse des régimes thermiques indiquent une remontée du plafond du pergélisol en 2014 aux deux stations. À la station A, le pergélisol est remonté de quelques centimètres au-dessus du sol d'infrastructure au câble A5.
- Plusieurs indices confirment l'efficacité du drain thermique, tel la remontée du pergélisol et le tube inclinométrique gelé à la station B, ainsi que les données du DTS. L'efficacité du drain thermique est plus évidente à la station B qu'à la station A.
- Les résultats des inclinomètres ajoutés aux nombreuses fissures longitudinales observées sur le terrain semblent indiquer un mouvement significatif d'évasement du remblai dû au fluage des sols de la couche active.
- Les déplacements s'effectuent de l'amont vers l'aval, donc vers le bas de la pente du terrain naturel, soit vers le village.
- Le DTS montre une bonne performance du drain thermique, et ce principalement dans la section au nord de l'intersection, où le drain thermique a été bien installé.

Il est à noter que les conclusions énoncées ci-dessus sont préliminaires. Un suivi à plus long terme est nécessaire afin de documenter les bénéfices technologique, économique et opérationnel liés à l'implémentation des solutions d'adaptation aux changements climatiques sur une infrastructure de transport nordique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des transports du Québec (MTQ) ainsi que le Fonds vert pour leur soutien financier dans ce projet. Ils remercient également le Centre d'études nordiques et la communauté de Salluit.

RÉFÉRENCES

- Allard, M., Wang, B.L. et Pilon, J.A. 1995. *Recent cooling along the southern shore of Hudson Strait, Quebec, Canada, documented from permafrost temperature-measurements*. *Arctic and Alpine Research*, 27(2): 157-166.
- Allard M., et Séguin M.K., 1987, *Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives*. *Géographie Physique et Quaternaire*, 41(1) : 141-152.
- Chataigner Y., Gosselin L., Doré G. 2009. *Optimization of embedded inclined open-ended channel in natural convection used as heat drain*, *Int. J. of Thermal Sc.*, Elsevier, 48:6, p. 1151-1160.
- Doré G., Beaulac I., novembre 2007, *Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptation*. Rapport de l'université Laval, remis au Ministère des Transport du Québec.
- Doré G. & Zubeck H.K., 2009. *Cold Pavement Engineering: McGraw-Hill*.

Ficheur A., 2011. *Expérimentation de techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport au Nunavik : Aéroport de Tasiujaq*. Mémoire de maîtrise, département de génie civil, Université Laval, Québec, 197 pp.

Gravel Gaumond F., 2014. *Suivi des comportements thermique mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq*. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec.

Jorgensen A.S., Doré G., Voyer E., Chataigner Y., Gosselin L., 2008, *Assessment of effectiveness of two heat removal techniques for permafrost protection*, *Cold Regions Science and technology*, 53, p. 179-192.

Jorgensen A.S. May 2009. *Assessment of three mitigation techniques for permafrost protection: Roads and airfields in the Arctic*. Thèse doctorale, département de Génie Civil, Université technique du Danemark, 122 pp.

Kasper, J.N. et Allard, M. 2001. *Late-Holocene climatic changes as detected by the growth and decay of ice wedges on the southern shore of Hudson Strait, northern Quebec, Canada*. *Holocene*, 11(5): 563-577.

Lemieux C., Grabundzija D., Morin E., Doré G. Allard M., mars 2014. *Suivi du comportement thermique et mécanique de la route d'accès de Salluit et expérimentation d'une méthode de détection de la dégradation du pergélisol le long des structures linéaires*. Rapport d'étape 2 réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Département de génie civil et Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 44 pp.

L'Hérault, E. 2009. *Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik*. Mémoire, M.Se, Université Laval, Québec, 149 p.

Morin E. 2014. *Nouvelle technologie testée sur le pergélisol: La fibre optique comme outil de détection précoce du dégel*. Projet de recherche de fin d'études, Département de géographie, Université Laval, Québec, 114 pp.

Smith, S.L., Romanovsky, V.E., Lewkowicz, A.G., Burn, C.R., Allard, M., Clow, G.D., Yoshikawa, K. et Throop, J. 2010. *Thermal state of permafrost in North America-a contribution to the international polar year*. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21: 117-135.

Roger, J., Allard, M., Sarrazin, D., L'Hérault, E., Doré, G., Guimond, A. *Evaluating the use of distributed temperature sensing for permafrost monitoring in Salluit, Nunavik*. GéoQuébec 2015

Wang, B.L. et Allard, M. 1995. *Recent Climatic Trend and Thermal Response of Permafrost in Salluit, Northern Quebec, Canada*. *Permafrost and Periglacial Processes*, 6(3): 221-233.

Société Makivik, *Cartes du Nunavik*, [En ligne], 2015, <http://www.makivik.org/fr/nunavik-maps/#prettyPhoto> (1^{er} juillet 2015)