

Rapport final

Loriane Périer, Chantal Lemieux, Vincent Lamontagne, Anne-Gabrielle Nolet, Julie Malenfant-Lepage, Guy Doré et Michel Allard

Réalisé pour le compte du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec



Février 2016



AVANT-PROPOS

La présente étude a été mandatée par le Bureau de la coordination du Nord-du-Québec du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec et réalisée dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 et du Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec.

Auteurs

Guy Doré, ing., Ph.D., chercheur responsable, 418-656-2203, <u>guy.dore@gci.ulaval.ca</u>^{1,3} Michel Allard, PhD., chercheur associé, 418-656-5416, <u>michel.allard@cen.ulaval.ca</u>^{2,3} Vincent Lamontagne, étudiant à la maîtrise, <u>vincent.lamontagne.4@ulaval.ca</u>^{1,3} Anne-Gabrielle Nolet, étudiante à la maîtrise, <u>anne-gabrielle.nolet.1@ulaval.ca</u>^{1,3} Julie Malenfant-Lepage, étudiante au doctorat, <u>julie.malenfant-lepage.1@ulaval.ca</u>^{1,3} Loriane Périer, professionnelle de recherche, 418-656-2131 # 7622,

loriane.perier@gci.ulaval.ca^{1,3}

Chantal Lemieux, professionnelle de recherche, 418-656-2131 # 7138, <u>chantal.lemieux@gci.ulaval.ca</u>^{1,3}

Collaborateurs de l'Université Laval

Jonathan Roger, professionnel de recherche ³ Denis Sarrazin, professionnel de recherche ³ Dejan Grabundzija, étudiant à la maîtrise ¹ Élizabeth Morin, étudiante au baccalauréat ²

Collaborateurs du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec

Anick Guimond, chargée de projet, Bureau de la coordination du Nord-du-Québec (BCNQ) Maude Boucher, ingénieure, Service de la géotechnique et de la géologie Joannie Poupart, ingénieure, BCNQ





- ¹ Département de génie civil et de génie des eaux, Pavillon Adrien-Pouliot, 1065 rue de la Médecine, Québec (Québec), G1V 0A6
- ² Département de géographie, Pavillon Abitibi-Price, 2405 rue de la Terrasse, Québec (Québec), G1V 0A6
- ³ Centre d'études nordiques, Pavillon Abitibi-Price, 2405 rue de la Terrasse, Québec (Québec), G1V 0A6

Citation recommandée

Périer L., Lemieux C., Lamontagne V., Nolet A.-G., Malenfant-Lepage J., Doré G. et Allard M. (2016). 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 final réalisé pour le compte du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec. Département de génie civil et de génie des eaux et Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 129 pp.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec pour la confiance accordée pour réaliser cette étude et leur soutien dans la réalisation de ce projet de recherche. Nous tenons également à remercier la communauté de Salluit pour l'accueil et la collaboration offerts depuis le tout début du projet. Finalement, l'aide procurée par les assistants de terrain a été essentielle à la bonne réalisation des travaux au cours de l'étude, nous remercions donc, Marie-Pier Lachance et Maude Pelletier du département de géographie (Université Laval), ainsi que Florence Lanouette et Caroline Richard du département de génie civil et de génie des eaux (Université Laval).

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La route d'accès à l'aéroport de Salluit, au Nunavik, subissait des déformations dues à la fonte du pergélisol causée en partie par les changements climatiques (CC). Des travaux de réhabilitation visant à adapter la route (CC) ont été effectués par le ministère. Afin de favoriser la remontée du plafond du pergélisol pour stabiliser thermiquement et mécaniquement la route différents travaux d'adaptation ont été effectués : un drain thermique a été installé dans le remblai du côté aval de la route; la pente du remblai du côté amont a été adoucie (1:5,7H en moyenne); un fossé de drainage peu profond avec empierrement a été installé au pied de la pente douce du côté amont; et des ponceaux ont été notamment ajoutés pour améliorer le système de drainage. Afin de permettre le suivi thermique et mécanique du remblai routier ainsi que la performance des mesures d'adaptation mis en place, des thermistances, de la fibre optique et des inclinomètres ont été installés dans l'infrastructure et dans le pergélisol sur différentes sections de la route. L'efficacité de la nouvelle technologie expérimentée soit, la fibre optique (DTS), à détecter de façon précoce les secteurs de la route où une dégradation du pergélisol pourrait débuter ainsi que les zones à risque potentiel, a été étudié.

L'analyse thermique du remblai aux chainages 1+620 et 1+720, situé au sud de l'intersection avec la route de Salluit 2, a permis de suivre l'évolution du plafond du pergélisol sur trois années. Au chaînage 1+720, le plafond du pergélisol est remonté de 70 cm en trois ans, sous la pente douce. Au chaînage 1+620, la profondeur du pergélisol est stable, mais une remontée de 50 cm en trois ans, au centre de la chaussé, le positionnait dans le remblai en 2015. Cette remontée est plus prononcée du côté de la pente douce que du côté du drain thermique. Par conséquent, la réponse aux modifications du système de drainage et à l'ajout d'une pente douce, éloignant l'eau du remblai et limitant l'accumulation de neige, est efficace. En complément, l'analyse des températures dans le drain a permis de noter une mauvaise efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+620 et une bonne efficacité du drain thermique au chaînage 1+720, en comparant les différences de température entre le sol et l'air dans le drain. L'échange de chaleur s'effectue toujours du plus chaud vers le plus froid. Le sol doit être plus chaud que l'air dans le drain pour qu'il y ait extraction de chaleur.

Les mouvements latéraux maximums ont été localisés en pied de remblai entre 0,5 et 2,5 m de profondeur et le mouvements verticaux maximums du remblai, aux épaulements. Les mouvements enregistrés par les inclinomètres sont situés dans la couche, donc au-dessus du pergélisol. Il semble que le mécanisme de dégradation impliquant l'activité du gel-dégel saisonnier dans la couche active joue un rôle important dans les mouvements observés du remblai depuis sa réhabilitation.

La technologie du DTS s'est avérée être un outil très efficace. Elle a permis le suivi de la distribution spatiale et temporelle des températures le long du remblai routier. Les sources de chaleur ponctuelles du remblai ont été localisés en plus grande concentration vers le chaînage 2+140 et l'efficacité du drain thermique a été notée. Un suivi à plus long terme permettra de répondre aux interrogations concernant la durabilité du câble DTS dans un environnement dynamique comme le pergélisol.

Lors de visite de terrain, les problématiques suivantes ont été observées : accumulations d'eau dans le fossé de drainage, certains ponceaux trop hauts et/ou endommagés, affaissement de la pente douce, fissures avec décrochement de matériau du côté du drain thermique. Le fossé de drainage sera reprofilé et sa pente accentuée pour éviter les accumulations d'eau et remettre les ponceaux à niveau. Une membrane imperméabilisante devrait être mise autour des ponceaux sous lesquels de l'eau s'écoule malgré leur imperméabilisation lors de la construction. Des bermes de déviation seront installées dans le fossé de drainage pour forcer

l'eau à circuler dans tous les ponceaux et ainsi éviter l'accumulation en bas de pente. Finalement, les coussins diffuseurs à la sortie des ponceaux devraient être réajustés afin d'éviter une érosion sous la chute d'eau due à la hauteur entre l'extrémité du ponceau et l'empierrement.

Un revêtement à albédo élevé ou un traitement de surface avec gravier clair serait nécessaires si la route devait être revêtue.

De façon générale, il n'existe pas de plan d'entretien des systèmes d'adaptation, il serait donc recommandé que le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec se munisse d'une capacité d'intervention pour l'entretien des systèmes d'adaptation de ses infrastructures de transport du Nunavik.

TABLE DES MATIÈRES

| AVAN | T-PR | OPOS | i |
|------------|--------------|--|----------|
| REME | RCIEI | MENTS | . ii |
| SYNTH | IÈSE | DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS | iii |
| LISTE I | DES F | -IGURES | /iii |
| LISTE I | DES 1 | TABLEAUX | xii |
| 1. INT | RODI | | 13 |
| 1.1 | Mise | e en contexte | 13 |
| 1.2 | Prol | blématique | 15 |
| 1.3 | Obje | ectifs | 15 |
| 1.4 | Son | nmaire des travaux et rapports réalisés | 15 |
| 2. MIS | SE EN | CONTEXTE DU PROJET | 17 |
| 2.1 | Trav | vaux d'adaptation aux changements climatiques | 17 |
| 2.1 | 1.1 | Drain thermique | 17 |
| 2.7 | 1.2 | Amélioration du système de drainage | 20 |
| 2.1 | 1.3 | Adoucissement de la pente du remblai côté amont | 21 |
| 2.2 | Inst | rumentation | 22 |
| 2.2 | 2.1 | Câbles à thermistances verticaux | 23 |
| 2.2 | 2.2 | Câbles à thermistances horizontaux | 26 |
| 2.2 | 2.3 | Thermistances installées dans le drain thermique | 27 |
| 2.2 | 2.4 | Enregistreurs de température installées dans les cheminées de ventilation | 28 |
| 2.2 | 2.5 | Câble à fibres optiques - DTS | 29 |
| 2.2 | 2.6 | Inclinomètres verticaux | 31 |
| 2.2 | 2.7 | Inclinomètres horizontaux | 32 |
| 2.3 | Coll | ecte et traitement de données | 32 |
| 2.3 | 3.1 | Données de température | 32 |
| 2.3 | 3.2 | Données de déplacements du remblai et du sol naturel | 33 |
| 3. SUI | VI DL | J COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA ROUTE | 35 |
| 3.1 | Don | nées climatiques | 35 |
| 3.2 | Con | nportement thermique du remblai et du sol naturel aux stations A et B | 36 |
| 3.2 pie | 2.1 ed du | Régime thermique du pergélisol sous la pente douce et dans le sol naturel remblai (côté amont). Câbles A3, A4 et B3, B4 | au 36 |
| 3.2 | 2.2 | Régime thermique du pergélisol sous le centre de la route. Câbles A5 et B5 | 39 |
| 3.2 pie | 2.3 ed du | Régime thermique du pergélisol sous le drain thermique et dans le sol naturel remblai (côté aval). Câbles A6, A7 et B6, B7 | au 40 |
| 3.2 B | 2.4 (1+72 | Distribution spatiale des températures dans le remblai aux stations A (1+620) 0) | et 43 |

| 3 | .3 | Corr | nportement thermique dans le drain thermique | .46 |
|--------|-------------|---------------|---|-------------|
| | 3.3 | .1 | Chaînage 1+620 près de la station A | .46 |
| | 3.3 | .2 | Chaînage 1+720 près de la station B | .48 |
| 3 h | .4 orizc | Com ntau | nportement thermique – Analyse linéaire (DTS et câbles à thermistan x) | ces .52 |
| | 3.4 | .1 | Températures enregistrées par le câble à fibres optiques (DTS) | .52 |
| | 3.4 | .2 | Températures enregistrées par les câbles à thermistances horizontaux | .54 |
| | 3.4 | .3 | Analyse linéaire des températures | .57 |
| 4. 9 | SUIV | 'I DU | I COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE LA ROUTE | 60 |
| 4 | .1 | Mou | vements horizontaux du remblai - Inclinomètres verticaux | .60 |
| | 4.1 | .1 | Chaînage 1+620 (station A, pied du remblai, côté du drain thermique) | .61 |
| | 4.1 | .2 | Chaînage 1+660 (pied du remblai, côté du drain thermique) | .63 |
| | 4.1 | .3 | Chaînage 1+720 (station B, pied du remblai, côté du drain thermique) | .65 |
| | 4.1 | .4 | Comparaison entre les trois inclinomètres verticaux | .66 |
| 4 | .2 | Mou | vements verticaux du remblai - Inclinomètres horizontaux | .69 |
| | 4.2 | .1 | Chaînage 1+720 (station B) | .69 |
| | 4.2 | .2 | Chaînage 2+000 | .70 |
| 4 | .3 | Ana | lyses des mouvements du remblai à la station B (chaînage 1+720) | .71 |
| | 4.3 per | .1 gélise | Généralités sur les mécanismes de dégradation d'un remblai construit ol | sur .72 |
| | 4.3 du | .2 méca | Analyses des mouvements verticaux et horizontaux du remblai : déterminat anisme de dégradation prédominant | ion .72 |
| 5. 9 | SUIV | 'I DU | J SYSTÈME DE DRAINAGE | 75 |
| 5 | .1 | Les | ponceaux | .75 |
| 5 | .2 | Le fo | ossé de drainage | .80 |
| 5 | .3 | La p | ente douce | .82 |
| 6. I | NSP | ECT | ION 2015 | 84 |
| 7. [| DISC | USS | ION | 86 |
| 7 d | .1 e Sa | Disc Iluit | cussion sur le suivi du comportement thermique de la route d'accès à l'aérop | oort .86 |
| | 7.1 | .1 | Comportement thermique aux stations A et B | .86 |
| | 7.1 | .2 | Comportement thermique dans le drain | .89 |
| | 7.1 | .3 | Performance du DTS | .89 |
| | 7.1 | .4 | Stabilité thermique | .90 |
| 7 d | .2 e Sa | Disc Iluit | cussion sur le suivi du comportement mécanique de la route d'accès à l'aérop | oort .90 |
| 7 | .3 | Disc | cussion sur le suivi du système de drainage | .91 |
| 7 | .4 | Coû | ts des travaux d'adaptation à Salluit | .95 |
| 8. F | RECO | DMN | /IANDATIONS | 97 |

| 9. CONCLUSION | 99 |
|--|-----|
| 10. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 102 |
| ANNEXE A | 105 |
| ANNEXE B | 118 |
| ANNEXE C | |
| 1. Une approche avec de faibles impacts sur le pergélisol | 122 |
| a. Les ponceaux | |
| L'excavation du sol riche en glace | |
| La cambrure d'un ponceau | |
| Une épaisseur de parois et un diamètre plus important | |
| L'utilisation d'une série de petits ponceaux | |
| L'isolation des ponceaux | |
| Les ponceaux avec cheminées | |
| b. Les ponts | |
| c. Les remblais perméables | |
| 2. Une approche avec des impacts contrôlés sur le pergélisol | |
| a. Les fossés d'interception | |
| b. Le canal de déviation | |

LISTE DES FIGURES

| Figure 1 : Localisation du village de Salluit |
|--|
| Figure 4 : Étapes suivies pour l'installation du drain thermique : 1) installation du géotextile; 2) mise en place du CG-14; 3) installation du drain thermique; 4) mise en place de TTOG aux extrémités du drain; 5) mise en place du CG-14 sur le drain 6) installation des cheminée sur les TTOG. |
| Figure 5 : Schéma du fonctionnement du drain thermique |
| Figure 6 : Pente et plan non respecte pour la mise en place du drain du chainage 1+550 au chaînage 2+660 |
| Figure 7 : Fossé de drainage en empierrement du côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit |
| Figure 8 : Installation d'un ponceau dans le remblai de la route d'accès à l'aéroport de Salluit |
| Figure 9 : Application du produit imperméabilisant, sous forme liquide21 |
| Figure 10 : Empierrement déposé à la sortie des ponceaux (côté aval) pour diffuser l'écoulement de l'eau et éviter l'érosion thermique |
| Figure 11 : Pente douce aménagée du côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. |
| Figure 12 : Vue globale de l'instrumentation mise en place. Détails des stations A et B23 |
| Figure 13 : Câbles à thermistances verticaux (en rouge)24 |
| Figure 14 : Système d'acquisition de données CR1000 |
| Figure 15 : Positionnement des cables de thermistances verticaux - Station A (1+620)25 |
| Figure 16 : Positionnement des cables de thermistances verticaux - Station B (1+720)25 |
| Figure 18 : Installations des thermistances dans le drain thermique, près de la station B (chaînage 1+720) |
| Figure 19 : Insertion de thermistances supplémentaire à la station A en été 201327 |
| Figure 20 : Emplacement des thermistances dans le drain thermigue |
| Figure 21 : Tidbit installé dans la cheminée d'entrée à la station A |
| Figure 22 : Schéma de fonctionnement du DTS |
| Figure 23 : Emplacement du DTS en amont (vert) et en aval (rouge) |
| Figure 24 : Emplacement de la profondeur du DTS. En rouge : z = 0 cm. En jaune : z = 30 cm |
| Figure 25 : Mise en place de l'inclinomètre horizontal au chaînage 1+72032 |
| Figure 26 : Inclinomètre horizontal écrasé au chaînage 2+000, côté amont (pente douce)34 |
| Figure 27 : L'emperatures moyennes mensuelles de l'air des trois années de suivi |
| Figure 28 : Position des capies à thermistances A3, A4 et B3, B4 |
| nour les trois années de suivi |
| Figure 30 : Régime thermique enregistré par les câbles à thermistances verticaux A4 et B4 |
| pour les trois années de suivi |
| Figure 31 : Régime thermique enregistré par les câbles à thermistance vertical A5 et B5 pour |
| les trois années de suivi |
| Figure 32 : Position des câbles à thermistances verticaux A6, A7 et B6, B740 |
| Figure 33 : Régime thermique enregistré par les câbles à thermistances verticaux A6 et B6 |
| pour les trois années de suivi |
| rigure 34 : Regime thermique enregistre par le cable à thermistance vertical B7 pour les trois années de suivi |
| Figure 35 : Distribution spatiale des températures dans le remblai des stations A (à dauche) et |
| B (à droite) - mois de mars des trois années de suivi44 |

Figure 36 : Distribution spatiale des températures dans le remblai des stations A (à droite) et B (à gauche) - mois de septembre des trois années de suivi......45 Figure 37 : Températures moyennes mensuelles dans : A) le drain et l'air; B) le drain et le sol; pour les mois froids des trois années de suivi; 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+620 près de la station A......46 Figure 38 : Températures moyennes mensuelles dans : A) le drain et l'air; B) le drain et le sol; pour les mois chauds des trois années de suivi; 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+620 près de la station A......47 Figure 39 : Différence entre la température dans le drain et celle du sol à 50 cm sous le drain (câble A6) pour les deux années de suivi; 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+620 près de la station A......48 Figure 40 : Températures moyennes mensuelles dans : A) le drain et l'air; B) le drain et le sol; pour les mois froids des trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+720 près de la station B......49 Figure 41 : Températures movennes mensuelles dans : A) le drain et l'air; B) le drain et le sol; pour les mois chauds des trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+720 près de la station B......50 Figure 42 : Différence entre la température dans le drain et celle du sol à 50 cm sous le drain (B6) pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015(rouge). Chaînage 1+720 proche de la station B......51 Figure 43 : Valeurs absolues des températures movennes hebdomadaires des deux thermistances situées à mi talus dans le drain thermique en fonction des températures de l'air pour les trois années de suivi à la station B......51 Figure 44 : Températures enregistrées par le DTS de mars 2013 à septembre 2014.......54 Figure 45 : Températures de surface en pied de remblai du côté de la pente douce (amont) pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). A) mois de mars; B) Figure 46 : Températures de surface en pied de remblai du côté du drain thermique (aval) pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). A) mois de mars; B) mois de septembre......56 Figure 47 : Positionnement du DTS et des thermistances horizontales. Les thermistances à 2 Figure 48 : Moyenne des températures enregistrées par le DTS pour les deux années de suivi disponibles (2013 et 2014). Côté amont (pente douce), à l'interface sol naturel/remblai, en bleu. Côté aval (drain thermique), sous le drain thermique......57 Figure 49 : Comparaison entre les températures enregistrées par le DTS (pointillés) et par le câble à thermistance horizontal (traits pleins). A) côté amont (pente douce); B) côté aval (drain thermique), juillet et septembre 2014......58 Figure 50 : Températures du sol enregistrées par le DTS combinées à la température de l'air. montrant la réponse rapide du côté amont du remblai lors d'un épisode de chaleur comparativement au côté aval......59 Figure 51 : Températures du sol enregistrées par le DTS combinées à la température de l'air et aux précipitations en eau, montrant le décalage dans le réchauffement du sol......60 Figure 52 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+620. Axe A.61 Figure 53 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+620. Axe B.62 Figure 54 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+660. Axe A.63 Figure 55 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+660. Axe B.64 Figure 56 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+720. Axe A.65 Figure 57 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+720. Axe B.66 Figure 58 : Déplacements cumulatifs des trois inclinomètres verticaux pendant les trois années Figure 59 : Déplacements annuels des trois inclinomètres verticaux pendant les trois années

Figure 60 : Déplacement annuel à différentes profondeurs. Chaînage 1+660. Axes A et B. .68 Figure 61 : Déplacement cumulatif à différentes profondeurs. Chaînage 1+660. Axes A et B. Figure 62 : Déplacement relatif par rapport à la position de l'extrémité de l'inclinomètre, de Figure 63 : Déplacement relatif par rapport à la position de l'extrémité de l'inclinomètre, de 2012 à 2015. Inclinomètre horizontal 2+000......71 Figure 65 : Schéma des mécanismes de A) Rupture par cisaillement par fluage; B) soulèvement au gel.....72 Figure 66 : Schéma de la forme caractéristique d'un tube inclinométrique vertical pour les mécanismes de dégradation : A) Rupture par cisaillement par fluage; B) soulèvement au gel. Figure 67 : Allure du plafond du pergélisol à deux températures différentes pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+720 proche de la Figure 68 : Déplacements horizontaux enregistrés par l'inclinomètre vertical. Chaînage 1+720. Figure 69 : Soulèvements cumulatifs maximal (vert), minimal (rouge) et observé sur le terrain Figure 71 : Ponceau au chaînage 1+450 (#4), amont. Accumulation d'eau importante.......76 Figure 72 : Ponceau au chaînage 1+350 (#3), aval. Surélévation de 10 cm.77 Figure 73 : Ponceau au chaînage 1+660 (#6). Extrémité amont non visible depuis l'aval77 Figure 74 : Ponceau au chaînage 1+730 (#7), amont. Trace du passage de l'eau sur le côté Figure 75 : Écoulement d'eau en pied de remblai, près de la station B (1+720) du côté aval: A) Figure 76 : Ponceaux écrasées. A) Entrée chaînage 1+940 (#11); B) Sortie chaînage 1+940 (#11); C) Entrée chaînage 2+120 (#13); D) Entrée chaînage 2+160 (#14)......79 Figure 77 : Accumulations d'eau dans le fossé de drainage à l'entrée des ponceaux. A) chaînage 1+350 (#3); B) chaînage 1+450 (#4); C) chaînage 1+550 (#5)......80 Figure 78 : Accumulations d'eau importantes du chaînage 1+460 au chaînage 1+820 le long Figure 79 : Dépression dans le terrain naturel à côté du fossé de drainage au chaînage 1+870. Figure 81 : Erosion de la pente douce au chaînage1+220......83 Figure 82 : Cheminée de ventilation endommagée, près de la station A, chaînage 1+720. ...84 Figure 83 : Fissures de décrochage du matériau constituant le remblai. Côté aval (drain Figure 83 : Érosion. Côté aval (drain thermique)......85 Figure 84 : Allure du plafond du pergélisol aux stations A et B (chaînage 1+620 et 1+720) pour Figure 85 : Allure du plafond du pergélisol à deux températures différentes pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+720 proche de la Figure 86 : Schéma du reprofilage du coussin diffuseur sous la chute d'eau à la sortie des ponceaux #6 et #7......92 Figure 89 : Localisation des points GPS, des ponceaux (jaune) et des stations d'étude (rouge),

| Figure 90 : Position des axes des tubes inclinométriques verticaux | 118 |
|---|--------------------|
| Figure 91 : Position des roues sur la sonde | 119 |
| Figure 92 : Étapes à suivre pour la mesure des inclinomètres horizontaux | 121 |
| Figure 93 : Position de la sonde et des roues | 121 |
| Figure 91 : Positions des roues de l'inclinomètre horizontal du chaînage 1+720. a Amont | a) Aval; b) 121 |
| Figure 95 : Coupe transversale et longitudinale d'un ponceau mis en place sur un riche en glace | pergélisol 123 |
| Figure 96 : Schéma illustrant le concept du ponceau avec cambrure | |
| Figure 94 : Schéma du concept d'isolation et de renforcement du ponceau | |
| Figure 98 : Installation et instrumentation d'un ponceau à l'été 2013, sur l'Alaska H | ighway au |
| Yukon | 125 |
| Figure 99 : Un ponceau avec cheminées utilisé au nord-ouest de la Sibérie | 126 |
| Figure 100 : Schéma de conception d'un pont construit sur pergélisol | 127 |
| Figure 101 : Fossé d'interception construit à une distance de 10 m de l'autoroute c | le l'Alaska |
| au Yukon | 128 |
| Figure 102 : Tracé initial du ruissellement et déviation de l'eau de surface vers proximité de la piste d'atterrissage de Puvirnituq au Nunavik | ; un lac à 128 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau 1 : Bris du câble DTS. 31 |
|--|
| Tableau 2 : Indices de dégel et de gel de l'air pour les trois années de suivi |
| Tableau 3 : Épaisseur de la couche active aux câbles à thermistances A3 et B3 pour les trois |
| années de suivi |
| Tableau 4 : Épaisseur de la couche active aux câbles à thermistances A4 et B4 pour les trois |
| Tableau E : Éncience de la couche potier que câblea à thermisteries AE et DE nour les trais |
| années de suivi |
| Tableau 6 : Épaisseur de la couche active aux câbles à thermistances A6 et B6 pour les trois |
| années de suivi42 |
| Tableau 7 : Épaisseur de la couche active au câble à thermistances B7 pour les trois années |
| de suivi43 |
| Tableau 8 : Valeurs maximales et minimales estimées de soulèvement au gel |
| Tableau 9 : Récapitulatif de la profondeur de la couche active par rapport au sol d'infrastructure |
| du remblai. Station A et B pour les 3 années de suivi |
| Tableau 10 : Résumé des problématiques observés liées aux ponceaux (côtés amont et aval). |
| Tableau 11 : Résumé des problématiques observés liées au fossé de drainage, à la pente |
| douce (côté amont)93 |
| Tableau 12 : Coûts des travaux sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit95 |
| Tableau 13 : Observation de terrain du côté amont de la route (pente douce) |
| Tableau 14 : Observation de terrain du côté aval de la route (drain thermique)111 |

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Les infrastructures routières et aéroportuaires jouent un rôle vital dans la subsistance, le développement économique et la qualité de vie des communautés isolées du Nunavik. La construction des pistes d'atterrissage s'y est effectuée entre 1984 et 1992. À cette époque, le pergélisol était considéré comme un sol de fondation stable et le climat comme étant relativement constant. Au début des années 2000, des impacts de la dégradation du pergélisol sur la stabilité des pistes d'atterrissage et leurs routes d'accès ont commencé à apparaître. Dans un contexte de changements climatiques (CC), le maintien d'infrastructures de transport stables et pérennes, dans les communautés nordiques éloignées, représente un défi de taille. La stabilisation de la route d'accès à l'aéroport de Salluit constitue le deuxième projet, à échelle réelle, d'adaptation aux CC effectué par le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec (MTMDET) sur ses infrastructures au Nunavik.

Le village de Salluit est situé au Nunavik, au nord du 62^e parallèle (Figure 1), et s'ouvre sur le fjord de Sugluk qui se jette dans le détroit d'Hudson (Figure 2A). Ce village est localisé sur une zone de pergélisol continu sujet à la dégradation. La Figure 2B montre la répartition du pergélisol. Les zones de couleur bleu foncé correspondent à un pergélisol riche en glace. Les zones bleu clair illustrent un sol contenant des lentilles de glace de faible épaisseur près de la surface. Finalement, les zones de couleur blanche représentent un sol pauvre en glace (L'Hérault, 2009). Outre, le contexte de réchauffement climatique, l'apport de chaleur supplémentaire induit par les constructions contribue à la fonte du pergélisol. La route qui relie l'aéroport au village fait partie des infrastructures susceptibles de contribuer à la dégradation du pergélisol. Cette route est une artère essentielle pour la communauté et constitue l'unique lien avec l'extérieur durant l'hiver. Le cercle rouge, sur la Figure 2, représente l'intersection entre la route d'accès à l'aéroport et la route desservant un quartier plus récent nommé « Salluit 2 ».



Figure 1 : Localisation du village de Salluit Source : modifiée de Allard et al., 2012.



Figure 2 : A) Vue aérienne du village de Salluit (Fortier, 2004), B) Carte du pergélisol du village de Salluit (Fortier, 2004) Source : Voyer, 2009.

1.2 Problématique

Le suivi, depuis plusieurs années, de la route d'accès à l'aéroport de Salluit a confirmé sa sensibilité thermique et une prédisposition au glissement de terrain. La route a été construite, à flanc de pente et traverse un dépôt d'argile instable au dégel sur environ 500 m, entre les chaînages 1+300 et 1+800. Aussi, l'accumulation de neige sur les talus, l'écoulement de l'eau à travers le remblai et l'absorption de chaleur par le revêtement bitumineux semblent être des facteurs responsables de la dégradation du pergélisol sous-jacent à l'infrastructure. Considérant l'importance de cette route pour la communauté de Salluit, le ministère a effectué des travaux de réhabilitation pour assurer la stabilité thermique et mécanique de cette infrastructure en considérant les changements climatiques anticipés. Ce projet d'adaptation à grande échelle étant un des premiers à être réalisé au Nunavik, il était essentiel de documenter les travaux d'adaptation et d'effectuer le suivi de l'infrastructure durant les premières années, afin de valider l'efficacité des systèmes et, au besoin, les améliorer pour des projets futurs.

1.3 Objectifs

La réalisation du projet repose sur l'atteinte de cinq objectifs principaux :

- Documenter la performance (refroidissement du sol et remontée du plafond du pergélisol) du système d'extraction de chaleur (drain thermique) mis en place afin de valider son efficacité dans le contexte du remblai routier de Salluit et d'affiner sa conception et sa mise en place dans le futur.
- Documenter la performance du système de drainage et évaluer son efficacité à réduire les effets nocifs des écoulements de surface sur la stabilité thermique du pergélisol aux abords de la route.
- Documenter la stabilité mécanique du remblai à partir de l'information obtenue par mesures inclinométriques et, au besoin, identifier les améliorations à apporter à la conception des remblais pour en améliorer la stabilité.
- Développer une approche innovatrice de suivi de performance et de détection précoce de dégradation du pergélisol en utilisant la technologie à fibres optiques « Distributed Temperature Sensing » (DTS).
- Documenter les bénéfices apportés en fonction des coûts engendrés et de l'efficacité des systèmes installés, ainsi que les difficultés rencontrées lors de la mise en place de ces systèmes.

1.4 Sommaire des travaux et rapports réalisés

Des travaux de réhabilitation de la route ont été effectués à l'été 2012. Afin de stabiliser thermiquement et mécaniquement le remblai routier, un drain thermique a été mis en place sur le côté aval du remblai entre les chaînages 1+227 et 2+160, soit sur 933 m. Du côté amont, une pente douce a été aménagée entre les chaînages 1+225 et 2+140, soit sur 915 m. Finalement, le système de drainage a été amélioré.

Les côtés amont et aval sont utilisés en référence à la pente du terrain naturel sur lequel la route est construite. Le côté amont correspond au côté droite de la route et le côté aval au côté gauche, ceci en circulant vers l'aéroport, donc suivant l'ordre croissant des chaînages.

Divers types d'instruments ont été mis en place dans le remblai et le sol naturel afin de suivre l'évolution thermique et mécanique de celui-ci. Entre autres, des thermistances et un câble à fibres optiques ont été installés pour mesurer les températures du sol et dans le drain

thermique. Finalement, des inclinomètres ont été placés afin de suivre les mouvements horizontaux et verticaux du remblai.

Trois rapports d'étape ont été livrés au MTMDET. Le rapport d'étape 1, livré en mars 2013, fait un compte rendu des travaux effectués et problématiques rencontrées à l'été 2012 (Lemieux et al., 2013). Le rapport d'étape 2, livré en mars 2014, fournit les observations de la première année de suivi (Lemieux et al., 2014). Le rapport d'étape 3, livré en mars 2015, traite des analyses des deux années de suivi (Périer et al., 2015). Le présent document constitue le rapport final de ce projet de suivi. Il présente les travaux d'adaptation, l'instrumentation mise en place puis, discute de l'analyse des données des 3 années de suivi, des problématiques observées et rencontrées et, propose des conclusions et recommandations.

2. MISE EN CONTEXTE DU PROJET

Afin de réduire les dégradations du pergélisol et ainsi stabiliser thermiquement et mécaniquement la route, des travaux de réhabilitation ont été effectués, soit la mise en place d'un drain thermique, l'amélioration du système de drainage et l'adoucissement de la pente du remblai côté amont. Cette section détaille ces travaux d'adaptation aux changements climatiques. De plus, afin de permettre le suivi thermique et mécanique, une instrumentation spécifique a été mise en place et est présentée dans cette section. Finalement, des précisions sur la collecte de données et l'analyse de ces données y sont aussi énumérées.

2.1 Travaux d'adaptation aux changements climatiques

2.1.1 Drain thermique

La technique du drain thermique a été développée par l'université Laval et a été testée en laboratoire (Chataigner et al., 2009), mais aussi en conditions d'exploitation à l'aéroport de Tasiujaq, Nunavik (Ficheur, 2011) et au site expérimental de Beaver Creek, Yukon (Lepage, 2010). Cette technique est utilisée pour activer l'extraction de chaleur du remblai durant l'hiver et, conséquemment, rehausser le plafond du pergélisol. Le drain a été installé dans le remblai, sur 933 m, entre les chaînages 1+227 et 2+160 de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, sur la pente du remblai côté aval.

Le drain thermique est constitué d'un géocomposite, présenté sur la Figure 3, de marque Terradrain et d'une épaisseur de 25 mm. Il doit être placé de sorte à ce que la surface trouée soit dirigée vers le haut (Voyer, 2009).



Figure 3 : Drain thermique. Source : Jorgensen et al., 2008

Les étapes suivies pour la mise en place du drain sont illustrées sur la Figure 4. Le drain a été apposé sur une couche de matériau granulaire CG-14, elle-même installée sur un géotextile. Des demi-ponceaux, TTOG de 600 mm de diamètre, ont été mis en place aux extrémités du drain et sont connectés à des cheminées de ventilation de 200 mm de diamètre. Ce système permet la circulation de l'air à l'intérieur du remblai. Le tout a été recouvert d'une couche supplémentaire de matériau granulaire CG-14, d'un géotextile et d'une couche de matériau de remblai provenant de l'excavation initiale composée de MG-20 / CG-14 / MG-112, de gros blocs et de béton bitumineux. Les géotextiles et le drain thermique doivent être installés manuellement, requérant ainsi d'importants travaux de manipulation.



Figure 4 : Étapes suivies pour l'installation du drain thermique : 1) installation du géotextile; 2) mise en place du CG-14; 3) installation du drain thermique; 4) mise en place de TTOG aux extrémités du drain; 5) mise en place du CG-14 sur le drain 6) installation des cheminée sur les TTOG. Source : Lemieux et al., 2013, Rapport d'étape 1.

Afin d'assurer une efficacité maximale du drain thermique, il faut respecter une hauteur minimale de pente de 1,5 m avec un gradient de 1V:1H. Il faut également une portion à plat au bas de la pente du remblai, comme le montre la photo 5 de la Figure 4. Cette portion à plat assure le transfert de chaleur par conduction, du sol vers le drain. L'air réchauffé dans le drain crée un mouvement ascendant dans celui-ci qui permet l'extraction de la chaleur par les

cheminées connectées au haut du drain. Ce mouvement d'air aspire ensuite l'air froid par la cheminée connectée au bas du drain. La Figure 5 illustre le fonctionnement du drain thermique.



Figure 5 : Schéma du fonctionnement du drain thermique. Source : Doré et al., 2007

À Salluit, du chaînage 1+227 au chaînage 1+550, le drain thermique a été installé en respectant les indications citées ci-dessus. Par contre, du chaînage 1+550 au chaînage 2+160, la pente minimale requise pour assurer une efficacité maximale, n'a pas été respectée et est plutôt de 1V:2H, donc pas suffisamment abrupte. De plus, sur la majeure partie de cette section, la portion à plat au bas de la pente du remblai n'est pas présente, comme l'illustre la Figure 6. Cette erreur de positionnement peut occasionner une réduction de l'efficacité de l'extraction de chaleur par conduction, mais aussi une moins bonne circulation de l'air à l'intérieur du drain. Selon les simulations réalisées par Chataigner (2008), les erreurs effectuées lors de l'installation du drain thermique pourraient réduire jusqu'à 30% son efficacité.



Figure 6 : Pente et plan non respecté pour la mise en place du drain du chaînage 1+550 au chaînage 2+660. Source : Périer et al., 2015. Rapport d'étape 3.

2.1.2 Amélioration du système de drainage

En région de pergélisol, une attention particulière doit être apportée aux mesures de régulation du drainage compte tenu du dégel saisonnier de la couche active et de l'apport d'eau supplémentaire qui en résulte (Gouvernement du Canada, 2010). À Salluit, le système de drainage a été amélioré afin de réduire l'impact de l'écoulement de l'eau sur le régime thermique du pergélisol. Du côté amont de la route, un fossé de drainage a été aménagé. Ce n'est pas un fossé conventionnel; en effet, il est peu profond et protégé par un empierrement. Le fossé est présenté sur la Figure 7. Il vise à éloigner l'eau du remblai de la route et à éviter les accumulations antérieurement observées sur les buttes au pied des poteaux d'Hydro-Québec.



Figure 7 : Fossé de drainage en empierrement du côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.

De plus, des ponceaux, TTOG de 500 à 1000 mm de diamètre, ont été ajoutés (Figure 8) et d'autres ont été allongés ou remplacés. Un total de 14 ponceaux est maintenant en place dans le remblai.



Figure 8 : Installation d'un ponceau dans le remblai de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.

Source: Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1.

Du côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, toutes les extrémités des ponceaux ont été imperméabilisées avec un produit, appelé Plaset du fournisseur Datsit Inc., appliqué sous forme liquide (Figure 9). Ce produit a permis de cimenter le matériau qui entoure les ponceaux.



Figure 9 : Application du produit imperméabilisant, sous forme liquide. Source: Joannie Poupart, Genivar 2012.

Finalement, du côté aval, un coussin constitué d'un matériau granulaire de 100-200 mm d'environ 300 mm d'épaisseur (Lemieux et al., 2013) a été posé, sur un géotextile type III, pour permettre la diffusion de l'eau et réduire les risques d'érosion thermique à la sortie des ponceaux (Figure 10).



Figure 10 : Empierrement déposé à la sortie des ponceaux (côté aval) pour diffuser l'écoulement de l'eau et éviter l'érosion thermique. Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1.

2.1.3 Adoucissement de la pente du remblai côté amont

L'aménagement d'une pente douce est une pratique recommandée en régions nordiques puisqu'elle permet d'améliorer le comportement mécanique et le régime thermique d'un remblai. Cette technique permet notamment de réduire l'accumulation de neige sur les talus du remblai. La pente optimale recommandée pour cette application est de 1V:6H (TAC, 2010). Dans le cas de Salluit, l'aménagement de la pente douce (en moyenne 1V:5,7H) a été faite du côté amont (Figure 11) et, en plus de réduire les effets de l'accumulation de neige en bordure du remblai, l'aménagement avait pour but d'éloigner l'écoulement d'eau du pied du remblai, pour ainsi limiter le transfert de la chaleur au remblai et au sol naturel.



Figure 11 : Pente douce aménagée du côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.

Source : Périer et al., 2015. Rapport d'étape 3

2.2 Instrumentation

Divers instruments ont été installés afin d'effectuer le suivi du comportement thermique et mécanique du remblai de la route et du sol naturel sous-jacent. Deux stations ont été plus amplement instrumentées, soit les stations A et B, situées respectivement aux chaînages 1+620 et 1+720 (Figure 12). De plus, la technologie du câble à fibres optiques « Distributed Temperature Sensing » (DTS) a été évaluée dans un contexte de suivi d'infrastructure de transport pour évaluer sa capacité à détecter de façon précoce la dégradation thermique du pergélisol.



Figure 12 : Vue globale de l'instrumentation mise en place. Détails des stations A et B. Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1

2.2.1 Câbles à thermistances verticaux

Des câbles à thermistances verticaux ont été installés, en septembre 2012, aux stations A (1+620) et B (1+720). Les thermistances utilisées sont de modèle YSI-4403 et ont été soudées à des câbles de types Belden 88761. Les soudures ont été protégées par des gaines thermorétractables. Cinq câbles à thermistances verticaux (Figure 13), composés de 10 thermistances chacun, ont été placés à chaque station (A et B) formant ainsi le profil

transversal du remblai routier. Des forages de 12,7 cm (5 po.) de diamètre et de 5 mètres de profondeur ont été faits avec une foreuse « Air Track ». Des tuyaux en PVC cédule 80 ont été placés dans les trous pour protéger les câbles à thermistances. Une fois les câbles mis en place, les vides entre le sol et le tube PVC ont été remplis graduellement avec du sable et de l'eau. Ensuite, les tuyaux ont été remplis d'huile de silicone pour empêcher la convection d'air ainsi que la formation de bouchons de glace. Chaque câble est raccordé à un système d'acquisition de données CR1000 de marque Campbell (Figure 14). Des multiplexeurs Campbell AM16/32 ont été ajoutés pour permettre de brancher toutes les thermistances. Les câbles se rendant à la station d'acquisition de données ont été protégés avec des tuyaux métalliques flexibles ou des tubes en PVC.



Figure 13 : Câbles à thermistances verticaux (en rouge). Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1



Figure 14 : Système d'acquisition de données CR1000. Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1

Les câbles à thermistances sont placés en pied de remblai de chaque côté de la route, sous le drain thermique à mi-pente du talus, sous le centre de la chaussée et finalement, sous la pente douce à mi-pente du talus. La position des câbles permet de suivre les températures dans le remblai et le sol naturel sous-jacent et par conséquent l'évolution du plafond du pergélisol. Cette instrumentation est essentielle pour valider si les objectifs de stabilisation thermique et d'adaptation de la route ont été atteints. La Figure 15 illustre le positionnement

des câbles à thermistances verticaux dans le remblai à la station A et la Figure 16 illustre ceux de la station B. Le trait vert sur ces figures représente l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure et le trait rose représente le drain thermique. Chaque câble est nommé par la lettre de sa station suivi d'un numéro allant de 3 à 7. La numérotation est dans l'ordre croissant du côté amont (pente douce) vers le côté aval (drain). L'espacement entre les thermistances varie entre 25 et 100 cm.



Figure 15 : Positionnement des câbles de thermistances verticaux - Station A (1+620).



Figure 16 : Positionnement des câbles de thermistances verticaux - Station B (1+720).

Il a été difficile de valider la position des câbles à thermistances dans le remblai. Premièrement, des erreurs de dimensions de pentes de remblai et d'élévations se sont glissées dans les premières versions des plans tels que construits, faussant ainsi le positionnement des câbles à thermistances et rendant l'interprétation des données difficiles. La seconde révision de ces

plans a toutefois corrigé ces informations. Puis, suite à des mesures sur le terrain (dimensions du remblai) et grâce aux photos prises, les câbles à thermistances ont pu être positionnés avec une bonne précision (rapport d'étape 3, Périer et al. 2015). Deuxièmement, la profondeur des câbles à thermistances en fonction de la surface du remblai a été difficile à déterminer. Finalement, les profondeurs des thermistances sont, tel qu'initialement prévu à 50, 75, 100, 150, 175, 200, 250, 300, 400 et 500 cm par rapport à la surface du remblai. Par ailleurs, les câbles A6 et B6 (côté aval) sont sous une couche plus épaisse de remblai positionnant ainsi la première thermistance à 50 cm sous le drain thermique et non sous la surface du remblai. Ceci complique l'analyse de la performance du drain thermique.

2.2.2 Câbles à thermistances horizontaux

Des câbles à thermistances horizontaux ont été placés lors des travaux de réhabilitation, au pied du talus de remblai sur une longueur de 50 m de chaque côté de la route. Du côté amont (pente douce), le câble a été installé entre les chaînages 1+630 et 1+680. Du côté aval (drain thermique), il a été placé entre les chaînages 1+620 et 1+670. Le positionnement des câbles à thermistances horizontaux a été choisi pour se situer près de la station A pour faciliter le raccordement au système d'acquisition. En plus de permettre un suivi thermique supplémentaire en surface, ces câbles servent à valider les températures obtenues avec le DTS (description à la section 2.2.5).

Les thermistances utilisées sont du même modèle que celles qui composent les câbles verticaux. De même, les câbles ont été conçus de la même façon que les verticaux sauf que chaque thermistance est espacée de 2 m. Les câbles ont été déposés quelques centimètres au-dessus du câble DTS sur une couche de sable puis recouvert d'une autre couche de sable afin d'assurer leur protection (Figure 17).



Figure 17 : Câbles à thermistance horizontaux recouverts de sable. Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1

Les 16 premiers mètres du câble à thermistances horizontal placé au pied de la pente douce (côté amont), sous le fossé de drainage éprouvent des problèmes de fonctionnement. En effet, les thermistances à 4, 6, 12 et 14 m montrent des valeurs identiques en mars et en septembre et sont donc considérées comme déficientes.

2.2.3 Thermistances installées dans le drain thermique

Lors des travaux en 2012, six thermistances ont été installées directement dans le drain thermique, près de la station B au chaînage 1+720, à des hauteurs différentes dans le remblai (Figure 18).



Figure 18 : Installations des thermistances dans le drain thermique, près de la station B (chaînage 1+720). Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1

À l'été 2013, six autres thermistances ont été ajoutées à la station A au chaînage 1+620. Des trous ont été faits préalablement dans le remblai afin de pouvoir insérer les thermistances dans le drain (Figure 19).



Figure 19 : Insertion de thermistances supplémentaire à la station A en été 2013. Source : Périer et al., 2015. Rapport d'étape 5

Aux deux stations, trois thermistances sont situées proche d'une cheminée de ventilation et trois sont situées à 15 m de cette cheminée. Pour chaque trio, la position des thermistances a été déterminée pour mesurer les températures de l'air dans le drain au bas de la pente, au quart inférieur de la pente et à mi-pente. La Figure 20 illustre les positions des thermistances.



Figure 20 : Emplacement des thermistances dans le drain thermique. Source : Lemieux et al., 2014. Rapport d'étape 2

Ces thermistances permettront de déterminer la différence entre la température de l'air extérieur et la température de l'air dans le drain, ainsi que l'influence de la proximité des cheminées de ventilation, dans le but d'évaluer l'efficacité du drain.

Les températures de l'air dans le drain devaient également être comparées aux températures du sol immédiatement sous le drain. Cette comparaison s'est toutefois révélée difficile dû à la position des câbles à thermistances verticaux. En effet, la première thermistance des câbles A6 et B6 est placée assez loin sous le drain thermique, soit à 50 cm. De plus, les câbles verticaux ne sont pas alignés avec les thermistances dans le drain. La distance entre les thermistances comparées est donc suffisamment importante pour compliquer l'analyse.

2.2.4 Enregistreurs de température installées dans les cheminées de ventilation

Comme les deux sections A et B comportant l'instrumentation nécessaire à évaluer l'efficacité du drain thermique sont situées dans la portion de route où l'installation du drain n'est pas optimale, en août 2015, six enregistreurs de température « Tidbit » de la compagnie Onset (Figure 21) ont été mis en place dans les cheminées de ventilation de ces deux stations ainsi qu'au chainage 1+340. Un « X » orange est peint sur chacune des cheminées où les « Tidbit » ont été installés. Ces enregistreurs ont été programmés pour enregistrer, à intervalle d'une heure, les températures de l'air entrant dans le drain thermique ainsi que les températures de l'air sortant du drain. Ces données serviront à comparer l'efficacité du drain où la pente et la géométrie recommandées ont été respectées (chainage 1+340) avec la portion où son installation n'est pas optimale (stations A et B). Les « Tidbit » ont été insérés dans les cheminées environ 6 po. en dessous de la surface du sol afin qu'ils ne soient pas influencés par les températures extérieures. Ils sont retenus à l'aide de fils de nylon (style fil de pêche). Les données ne seront pas présentées dans le présent rapport puisqu'elles seront récoltées à l'été 2016.



Figure 21 : Tidbit installé dans la cheminée d'entrée à la station A.

2.2.5 Câble à fibres optiques - DTS

La technologie du DTS est une approche innovatrice utilisée pour la détection précoce de la dégradation du pergélisol. La technique permet de mesurer, avec une haute précision (± 0,1 °C), les températures à tous les 25 cm sur la longueur du câble et donc, à toutes fins utiles, en tout point en bordure de l'infrastructure linéaire. Une source de chaleur peut alors être détectée dès le début de son effet permettant une intervention rapide pour corriger le problème. Le fonctionnement de ce câble est illustré sur le schéma de la Figure 22. Une impulsion laser se propage à travers la fibre et est rétrodiffusée à sa source. La mesure obtenue correspond au changement de fréquence, par rapport à la fréquence émise, des ondes lumineuses rétrodiffusées dans la fibre en fonction de l'échange d'énergie avec la température ambiante. La position de la lecture de la température est déterminée en mesurant le temps d'arrivée de l'impulsion de lumière de retour, semblable à un écho radar (Lemieux et al. 2013).



Figure 22 : Schéma de fonctionnement du DTS. Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1

Le câble utilisé le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit est de modèle « Sensor Cable Stell » (S2002A) de la compagnie britannique AP Sensing GmbH et est caractérisé par deux fibres optiques, entourée chacune d'une gaine thermo-rétractable et protégées par une gaine métallique de 3,8 mm. Ce câble a une haute résistance à la compression et à la traction (960 N/cm). De plus, il est résistant à l'eau et aux rongeurs. Les températures peuvent être enregistrées sur une gamme de -40 °C à 85 °C.

Le câble couvre un total de 4 km, soit environ 1 km aller et 1 km retour, sur les deux côtés de la route. La Figure 23 illustre le positionnement du câble. Comme le montre la Figure 24, il a été mis en place à deux profondeurs différentes : au niveau de l'interface sol naturel - remblai (z = 0 cm) et à 30 cm sous l'interface (z = 30 cm). Du côté amont (pente douce), il s'étend du chaînage 1+250 au chaînage 2+100 (850 m). Avant la mise en place de la pente douce, une

tranchée a été creusée avec une pelle mécanique, afin de pouvoir déposer le câble à 30 cm (z = 30 cm) sous le sol naturel. Le câble a ensuite été recouvert d'une couche de sable et, au retour, la continuité du câble a été déposée sur cette couche (z = 0 cm). Du côté aval (drain thermique), le câble s'étend des chaînages 1+250 à 1+740 (490 m). La partie du câble à z = 0 cm est située sous le drain thermique, l'autre partie à z = 30 cm a été installée dans le sol naturel à 8-10 m du pied de remblai actuel (Figure 24). De plus, ce câble traverse le remblai au niveau de 4 ponceaux; d'abord enterré sous le ponceau, puis à l'intérieur de celui-ci pour le retour.



Figure 23 : Emplacement du DTS en amont (vert) et en aval (rouge). Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1





Le poids du rouleau de câble a nécessité la présence de trois personnes pour dérouler le câble et le poser dans la tranchée. Par ailleurs, la mise en place du DTS s'est faite avec beaucoup de précaution puisque la fibre optique est fragile. Le câble n'a donc pas été tendu pour éviter des tensions indésirables et il a d'abord été recouvert manuellement de sable pour ensuite permettre le remblayage à la pelle mécanique. Malgré les précautions prises, le câble a plié à certains endroits jusqu'au point de rupture. Une fois l'installation complétée, seulement trois bris ont été constatés. Le premier a eu lieu au chaînage 1+400 du côté aval (drain), le 2 mars 2013. La cause de ce bris est inconnue. Les deux autres bris ont eu lieu le 23 avril 2014, du

côté amont (pente douce), au chaînage 1+300 et près du ponceau #3 au chaînage 1+350. Ces bris sont dus à un affaissement du sol le long de la route. Une portion de 50 m du câble entre ces deux bris du côté amont ne peut donc plus enregistrer de données étant donné que le signal en boucle est interrompu. Le Tableau 1 synthétise tous les bris observés suite à la mise en place du DTS et lors du téléchargement annuel des données sur le terrain.

| Côté de la route | Chaînage | Type de bris | Cause du bris | Date |
|-------------------|----------|--------------|--|----------------------|
| | 1+250 | câble coupé | coupure volontaire (pour récupérer pour effectuer les réparations) | suite à installation |
| | 1+300 | câble coupé | affaissement du sol | 23 avril 2014 |
| | 1+350 | câble coupé | affaissement du sol | 23 avril 2014 |
| | 1+440 | câble coupé | ponceau | suite à installation |
| Amont | 1+500 | câble plié | lors du déroulage | suite à installation |
| (pente douce) | 1+540 | câble coupé | ponceau | suite à installation |
| | 1+700 | câble plié | lors du déroulage | suite à installation |
| | 1+710 | câble coupé | cause inconnue | suite à installation |
| | 1+800 | câble plié | cause inconnue | suite à installation |
| | 1+840 | câble coupé | ponceau | suite à installation |
| | 1+950 | câble coupé | cause inconnue | suite à installation |
| Aval | 1+400 | câble coupé | cause inconnue | 2 mars 2013 |
| (drain thermique) | 1+440 | câble coupé | ponceau | suite à installation |

Tableau 1 : Bris du câble DTS.

Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1

Finalement, les câbles sont reliés à un boîtier de contrôle DTS qui permet l'analyse du signal et l'enregistrement des données.

2.2.6 Inclinomètres verticaux

L'inclinomètre est un appareil qui permet de mesurer les déplacements du sol par rapport à un axe de référence à l'aide d'une sonde munie d'accéléromètres. Les caissons (tubes) ainsi que les sondes amovibles utilisées ici sont de marque RST Instruments. Le diamètre des caissons est de 80 mm (3,34 po.). Les sondes sont opérationnelles à des températures allant de – 30 °C à 50 °C. Elles sont résistantes aux intempéries et aux chocs et ont une précision de 0,005 mm par 500 mm.

Trois tubes d'inclinomètres verticaux ont été installés à l'été 2012. Ils ont été mis en place en pied de talus du remblai du côté aval (drain thermique) aux chaînages 1+620, 1+660 et 1+720. Les trous de 5 m de profondeur et 12,7 cm (5 po.) de diamètre servant à accueillir les tubes ont été réalisés avec une foreuse de type « Air-Track ». Une fois les tubes d'inclinomètres mis en place dans les trous, les vides entre les parois et le sol ont été remplis graduellement de sable et d'eau. Finalement, les tubes ont été remplis d'huile de silicone afin de prévenir la formation de bouchons de glace. Les boîtiers inclinométriques ont été placés de sorte à bien orienter les indentations à l'intérieur des tubes qui servent ensuite de guide pour la sonde mesurant les déplacements. Ces indentations ont été orientées pour permettre une lecture dans les plans perpendiculaire et parallèle à l'axe de la route. Finalement, des bouchons de plastiques ont été placés à l'extrémité des tubes pour empêcher l'introduction de débris. Ces bouchons sont retirés au moment d'effectuer des mesures.

Les inclinomètres verticaux servent à mesurer les mouvements du remblai tel que les rotations d'épaulement ou encore les affaissements de pente. Ils sont essentiels au suivi mécanique du remblai de la route.

2.2.7 Inclinomètres horizontaux

Deux inclinomètres horizontaux, de la même compagnie et possédant les mêmes spécifications techniques que les inclinomètres verticaux, ont été mis en place à travers le remblai aux chaînages 1+720 et 2+000. Les tubes ont été posés à l'interface sol naturel et remblai. Ils mesurent respectivement 25 m et 24 m. L'excavation de la route a été nécessaire pour l'installation des tubes (Figure 25). L'excavation a été faite en deux temps, un côté de la route à la fois, pour permettre la circulation des usagers. Les tubes ont été protégés par une couche de sable avant d'être remblayés. Les inclinomètres horizontaux servent à mesurer les tassements du remblai.



Figure 25 : Mise en place de l'inclinomètre horizontal au chaînage 1+720. Source : Lemieux et al., 2013. Rapport d'étape 1

2.3 Collecte et traitement de données

2.3.1 Données de température

Les températures de l'air proviennent de la station météorologique SILA 2 installée en 2005 par le CEN. Elle est située à moins de 500 m de la portion de la route à l'étude. Les données téléchargées sur le site Nordicana D (<u>http://www.cen.ulaval.ca/nordicanad</u>) ont été traitées à l'aide du logiciel Excel.

Les deux systèmes d'acquisition de données CR1000 auxquels sont reliés les câbles à thermistances verticaux des stations A et B, les câbles à thermistance horizontaux et les thermistances dans le drain, ont été programmés pour enregistrer les températures aux 30 minutes. Les données peuvent être stockées dans les CR1000 pendant plus d'une année. Le transfert des données a été fait manuellement, chaque été (2013, 2014 et 2015), par un membre de l'équipe du Centre d'études Nordiques, avec un ordinateur portable connecté au

système d'acquisition. Toutes les données provenant des thermistances ont été traitées avec le logiciel Excel. Le câble A7, placé en pied de remblai du côté aval (drain thermique) à la station A, n'a fourni aucune donnée lors de la première année de suivi dû à un mauvais branchement. Les branchements ont été corrigés à l'été 2013, mais les données extraites en 2014 et 2015 ne sont pas cohérentes et malgré les efforts déployés, celles-ci ne sont toujours pas exploitables. La situation devra être corrigée dans l'optique d'un suivi à plus long terme.

La période annuelle couverte par année de suivi est identique pour les températures de l'air, du sol et de l'air dans le drain thermique.

- année 2013 : 8 octobre 2012 au 8 octobre 2013

- année 2014 : 8 octobre 2013 au 8 octobre 2014

- année 2015 : 8 octobre 2014 au 8 octobre 2015

Les années 2013, 2014 et 2015 seront utilisées dans ce rapport pour référer aux périodes étudiées.

Le système d'acquisition de données du DTS a été programmé pour enregistrer les données aux 2 heures. Chaque été, les données ont été récoltées en se connectant directement au boîtier d'acquisition (2013 et 2014). Par contre en 2015, les données couvrant la période d'octobre 2014 à octobre 2015 n'ont pas été téléchargées dû à un malentendu sur le calendrier de téléchargement. Les données du DTS ont été incorporées dans une base de données SQL, conçue et hébergée par le CEN. Une fois intégrées dans la base, les données sont associées à leurs coordonnées respectives grâce à une fonction SQL. La structure de la base de données permet plusieurs types de requêtes statistiques dépendant des besoins.

2.3.2 Données de déplacements du remblai et du sol naturel

Les mesures ont été prises manuellement en insérant la sonde de mesure dans les tubes inclinométriques (voir la procédure ANNEXE B). En septembre 2012, une première lecture a été prise pour servir de référence; puis un mois plus tard, une seconde lecture a été effectuée. Ensuite, les mesures ont été prises chaque année (2013, 2014 et 2015) en août ou en septembre.

Toutefois, des difficultés ont été rencontrées lors de la prise de données des inclinomètres horizontaux aux chaînages 1+720 et 2+000. La présence de bouchons de glace d'environ 7 m de long bloquait le passage de la sonde dès le premier été suivant les travaux. Les données n'ont d'ailleurs pas pu être relevées en 2013. En 2014, le déglaçage des tubes a été effectué à l'aide d'un jet d'eau sous pression et un câble chauffant a été ajouté dans chaque inclinomètre horizontal pour faciliter son déglaçage. Il est à noter que l'emploi d'un jet d'eau sous pression demeure tout de même nécessaire pour finaliser le déglaçage. En 2015, malgré le déglaçage complet des bouchons de glace, les lectures aux deux inclinomètres horizontaux ont dû être prises à partir de chaque extrémité à cause d'un obstacle ou d'une dislocation du tube. Les données ainsi obtenues sont valables, mais relatives au premier point de mesure soit l'entrée du tube. En l'absence d'une référence géodésique externe, les deux profils mesurés ne peuvent donc pas être associés, ce qui rend ainsi les données difficiles à interpréter.

De plus, comme l'illustre la Figure 26, l'extrémité amont (côté pente douce) du tube au chaînage 2+000 a été écrasée et cassée sur 128 cm. En septembre 2015, cette portion a été coupée et sera donc à retrancher des mesures futures.



Figure 26 : Inclinomètre horizontal écrasé au chaînage 2+000, côté amont (pente douce).

Photo prise par Jonathan Roger du CEN, 2015

Par ailleurs, le tube inclinométrique vertical situé au chaînage 1+720 (proche de la station B) comporte des encoches à 287 et 340 cm de profondeur. Ce sont probablement les joints de plastique qui créent ces obstacles, car la situation est la même depuis 2 ans. Pour passer ces encoches, il suffit de laisser glisser la sonde par gravité, sans la retenir; puis de tirer plus fortement sur le câble pour remonter la sonde lors des lectures.

Les données provenant des inclinomètres ont été traités avec les logiciels "*Inclinalysis*" (inclinomètres verticaux) et "*Horizontal Inclinalysis*" (inclinomètres horizontaux) de RST Instruments Ltd.

3. SUIVI DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA ROUTE

Ce chapitre présente la totalité des données de température enregistrées durant les trois années de suivi (2013, 2014 et 2015) après les travaux d'adaptation, soit les données climatiques; les données enregistrées par les thermistances situées dans le remblai, dans le sol naturel et dans le drain thermique; ainsi que les données du DTS. Une analyse des résultats obtenus est également présentée.

3.1 Données climatiques

Les données climatiques ont servi à déterminer les indices de gel et de dégel de l'air pour les trois années de suivi (Tableau 2). Les indices de gel ont été calculés en additionnant les températures négatives de l'année de suivi. Inversement, l'addition des températures positives a permis d'établir les indices de dégel.

| | Indice de dégel de l'air (°C.jour) | Indice de gel de l'air (°C.jour) |
|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Année 2013 (2012-2013) | 674 | 3079 |
| Année 2014 (2013-2014) | 892 | 3598 |
| Année 2015 (2014-2015) | 808 | 3615 |

Tableau 2 : Indices de dégel et de gel de l'air pour les trois années de suivi.

Les indices de dégel indiquent que le printemps et l'été de l'année 2014 ont été les plus chauds, suivis de ceux de 2015 et enfin de 2013. Les indices de gel montrent que l'hiver le plus froid est celui de 2015, suivi de près par 2014. L'hiver 2013 a été substantiellement moins froid. L'année 2015 devrait être la plus bénéfique aux conditions du pergélisol puisque l'indice de gel est plus élevé et que l'indice de dégel a diminué par rapport à l'année précédente.

La Figure 27 illustre les températures moyennes de l'air par mois de chaque année de suivi. Les histogrammes bleus représentent les températures de l'air moyennes de 2013, les jaunes celles de 2014 et les rouges celles de 2015. Les températures moyennes mensuelles de l'air sont négatives d'octobre à mai chaque année et positives de juin à septembre.



Figure 27 : Températures moyennes mensuelles de l'air des trois années de suivi.
3.2 Comportement thermique du remblai et du sol naturel aux stations A et B

Cette section présente le comportement thermique du remblai routier aux stations A (1+620) et B (1+720). Trois années de suivi sont disponibles pour les analyses, soit 2013 couvrant la période d'octobre 2012 à octobre 2013; 2014 couvrant la période d'octobre 2013 à octobre 2014 puis; 2015 couvrant la période d'octobre 2014 à octobre 2015. Les régimes thermiques enregistrés à chaque station (A et B) sont présentés sous forme de courbes trompettes et de répartition spatiale dans le remblai. Tel qu'illustré sur les légendes de chacun de ces graphiques :

- La surface du remblai est située à 0 cm (sur l'axe des y);
- La surface du sol naturel est représentée par la ligne pointillée verte;
- L'année 2013 est en bleu;
- L'année 2014 est en jaune;
- L'année 2015 est en rouge;
- Les températures moyennes à chaque profondeur sont représentées en pointillées pour chaque année.

La section présente ensuite une analyse des profils thermiques et la position du plafond du pergélisol sous le remblai au cours des années de suivi.

3.2.1 Régime thermique du pergélisol sous la pente douce et dans le sol naturel au pied du remblai (côté amont). Câbles A3, A4 et B3, B4.

Les câbles à thermistances verticaux A3 et B3 sont situées dans le sol naturel en pied de remblai, sous l'empierrement près du fossé de drainage (Figure 28). La Figure 29 illustre les températures minimales et maximales enregistrées à chaque profondeur lors des trois années de suivi des deux câbles A3 et B3.



Figure 28 : Position des câbles à thermistances A3, A4 et B3, B4.



Figure 29 : Régime thermique enregistré par les câbles à thermistances verticaux A3 et B3 pour les trois années de suivi.

D'après les résultats illustrés par la Figure 29, les températures du sol aux deux câbles, en 2015, sont plus froides que celles des autres années, tant en hiver qu'en été.

Des données irrégulières de température ont été enregistrées par une thermistance du câble A3 (à 100 cm de profondeur). Ces données sont considérées irrégulières puisqu'elles ne correspondent pas à la tendance de la courbe des températures annuelles du sol et du remblai. Ces températures plus élevées en 2014 et en 2015 peuvent suggérer une dérive dans le temps de la température mesurée par la thermistance à cette profondeur. La possibilité d'une infiltration d'eau sous le remblai n'est pas à exclure. En effet, l'anomalie se situe à la base de la couche active où l'infiltration pourrait se produire et ainsi induire une augmentation des températures enregistrées en été et en hiver.

Au câble B3, la pente positive de la courbe moyenne est un indicateur de réchauffement, sauf entre 50 et 100 cm où une tendance au refroidissement est observée en 2015. Au câble A3, aucune tendance n'est identifiable.

Globalement, les températures moyennes restent plus froides pour les deux câbles en 2015, ce qui est cohérent avec les valeurs de l'indice de gel calculé précédemment.

Le Tableau 3 montre l'évolution de l'épaisseur de la couche active aux câbles à thermistance A3 et B3 par rapport à la surface du sol naturel. La couche active est de plus en plus mince au cours des années au câble B3. Cette observation est encourageante et elle confirme une remontée du pergélisol de 70 cm en 3 ans à cet endroit. Ce résultat indique que l'amélioration du système de drainage semble avoir été bénéfique pour la préservation du pergélisol au chaînage 1+720. Au câble A3, chaînage 1+620, l'épaisseur de la couche active est restée stable. Il faut toutefois être prudent avec la comparaison de ces données car 50 cm de remblai ont été ajoutés au niveau du câble B3, ce qui a certainement contribué à la remontée du plafond du pergélisol.

Tableau 3 : Épaisseur de la couche active aux câbles à thermistances A3 et B3pour les trois années de suivi.

| | | 2013 | 2014 | 2015 |
|--|----|------|------|------|
| Épaisseur de la couche active par | A3 | 140 | 140 | 140 |
| rapport à la surface du sol naturel (cm) | B3 | 220 | 180 | 150 |

Les câbles à thermistances verticaux A4 et B4 sont situés au milieu du talus de la pente douce du remblai (Figure 28). La Figure 30 illustre les températures minimales et maximales enregistrées à chaque profondeur lors des trois années de suivi des câbles A4 et B4.



Figure 30 : Régime thermique enregistré par les câbles à thermistances verticaux A4 et B4 pour les trois années de suivi.

D'après les résultats illustrés par la Figure 30, les températures du sol pour l'année 2015 sont globalement plus froides que pour les autres années, sauf pour les températures maximales qui sont plus chaudes entre 50 cm et 150 cm de profondeur, principalement au câble B4. La variation des températures minimales et maximales est importante, particulièrement en 2015 aux deux câbles.

Aux deux câbles, les températures du sol semblent stables selon les courbes des températures moyennes qui ont une pente nulle dans les premiers mètres sous la surface du sol naturel (trait pointillé vert).

Le Tableau 4 illustre l'évolution de l'épaisseur de la couche active aux câbles à thermistance A4 et B4 par rapport à la surface du sol naturel. La couche active est de plus en plus mince au cours des années au câble B4. Cette observation est encourageante et elle confirme la remontée du pergélisol et l'efficacité de l'aménagement de la pente douce. Par contre, au câble A4, la couche active s'est épaissie de 2014 à 2015, malgré un hiver plus froid. Il est possible qu'une infiltration d'eau soit responsable de cet épaississement, surtout considérant les données irrégulières enregistrées au câble A3. En 2015, la couche active était tout de même plus mince qu'en pied de remblai, soit 50 cm (B4) et 18 cm (A4). Ceci est cohérent avec le profil du plafond du pergélisol sous un remblai routier qui tend à être plus haut vers le centre

du remblai. En 2015, le plafond du pergélisol se situait encore sous l'interface entre le sol d'infrastructure du remblai et le sol naturel.

Tableau 4 : Épaisseur de la couche active aux câbles à thermistances A4 et B4 pour les trois années de suivi.

| | | 2013 | 2014 | 2015 |
|--|----|------|------|------|
| Épaisseur de la couche active par | A4 | 147 | 112 | 122 |
| rapport à la surface du sol naturel (cm) | B4 | 170 | 120 | 100 |

3.2.2 Régime thermique du pergélisol sous le centre de la route. Câbles A5 et B5

Les câbles à thermistances verticaux A5 et B5 sont situés au centre de la route. La Figure 31 illustre les températures minimales et maximales enregistrées à chaque profondeur lors des trois années de suivi à ces deux câbles.



Figure 31 : Régime thermique enregistré par les câbles à thermistance vertical A5 et B5 pour les trois années de suivi.

D'après les résultats illustrés par la Figure 31, les températures de l'année 2015 sont plus froides en hiver que pour les autres années aux deux câbles B5 et A5. Par contre, les profils des températures maximales sont similaires hormis en 2013 au câble B5. Cette observation est cohérente avec les valeurs d'indices de dégel qui sont plus élevées en 2014 et 2015. Les températures proches de la surface sont directement influencées par la température de l'air. Ceci explique, les températures très froides rencontrées en hiver. Les variations entre les températures minimales et les températures maximales sont plus prononcées en 2015. Au câble B5, la courbe de température moyenne de l'année 2015 traduit une légère tendance au refroidissement.

Le Tableau 5 montre l'évolution de l'épaisseur de la couche active aux câbles à thermistance A5 et B5 par rapport à la surface du sol naturel. L'épaisseur de la couche active a diminué de 30 cm au câble B5; tandis qu'au câble A5, le plafond du pergélisol s'est rehaussé de 50 cm, remontant donc de 5 cm dans le remblai. La couche active est plus mince à ces deux câbles qu'en milieu de pente et en pied de remblai, ce qui est cohérent avec le profil attendu du

pergélisol sous un remblai routier. Au centre de la route, l'épaisseur de la couche active est plus mince à la station A (chaînage 1+620) qu'à la station B (chaînage 1+720), ce qui est l'inverse de sous la pente douce.

Tableau 5 : Épaisseur de la couche active aux câbles à thermistance A5 et B5pour les trois années de suivi.

| | | 2013 | 2014 | 2015 |
|--|----|------|------|----------------------|
| Épaisseur de la couche active par rapport à la surface du sol naturel (cm) | A5 | 45 | 0 | -5 (dans remblai) |
| | B5 | 50 | 20 | 20 |

3.2.3 Régime thermique du pergélisol sous le drain thermique et dans le sol naturel au pied du remblai (côté aval). Câbles A6, A7 et B6, B7

Les câbles à thermistances verticaux A6 et B6 sont situées du côté aval, au milieu de la pente du remblai sous le drain thermique (Figure 32). La Figure 33 illustre les températures minimales et maximales enregistrées à chaque profondeur lors des trois années de suivi à ces deux. La position du drain thermique est illustrée par la ligne pointillée rose.



Figure 32 : Position des câbles à thermistances verticaux A6, A7 et B6, B7.



Figure 33 : Régime thermique enregistré par les câbles à thermistances verticaux A6 et B6 pour les trois années de suivi.

D'après les résultats illustrés par la Figure 33 les températures minimales de l'année 2015 sont plus froides que pour les autres années. Les températures maximales de 2015 tendent également à être légèrement plus froides au câble B6.

Des données irrégulières de température ont été enregistrées par quatre thermistances du câble A6, entre 250 et 380 cm de profondeur. Ces données sont considérées irrégulières puisqu'elles ne correspondent pas à la tendance générale de la courbe des températures annuelles. Aucune tendance ne peut être constatée au niveau de la courbe moyenne. Il s'agit du même type de données irrégulières rencontré au câble A3 sous la pente douce. Par contre, aucune irrégularité n'a été constatée dans les données des câbles A4 et A5, mais la couche active s'est épaissie en A5 entre 2014 et 2015. Avant la réhabilitation du remblai, les infiltrations d'eau qui menaient à la dégradation étaient toutes obliques en raison de la pente du terrain naturel (environ 45° par rapport à l'axe de la route). Il est donc plausible qu'une infiltration affecte le câble A6 sans nécessairement affecter tous les câbles à thermistances. De plus, aux câbles A3 (Tableau 3) et A6 (Tableau 6), la profondeur à laquelle se situe le plafond du pergélisol est constante (aucune remontée du pergélisol) pour les trois années de suivi, ce qui pourrait être lié à l'hypothèse d'un écoulement. Finalement, à 40 m de la station A se trouve un ponceau. Suite à des observations faites lors de visites de terrain, il a été constaté que le ponceau semble avoir été placé trop haut dans le remblai, car de l'eau semble s'écouler en dessous. Ce même ponceau semble subir un début d'effondrement (voir section 5.1) et des accumulations d'eau sont présentes dans le fossé de drainage, situé du côté amont entre les chaînages 1+610 et 1+630. Toutes ces observations semblent appuyer l'existence d'un écoulement d'eau sous le remblai.

Au câble B6 les courbes de température moyenne traduisent une tendance au refroidissement au fil des années. Cette observation est encourageante et laisse supposer une bonne efficacité du drain thermique à la station B (chaînage 1+720).

Le Tableau 6 montre l'évolution de l'épaisseur de la couche active aux câbles à thermistances A6 et B6 par rapport à la surface du sol naturel. L'épaisseur de la couche active est plus mince d'année en année au câble B6. Par contre, elle reste stable au câble A6, soit juste au-dessus du drain thermique, tout en étant assez épaisse comparativement à B6.

| Tableau 6 : Épaisseur de la couche active aux câbles à thermistances A6 🤅 | et B6 |
|---|-------|
| pour les trois années de suivi. | |

| | | 2013 | 2014 | 2015 |
|--|----|------|------|------|
| Épaisseur de la couche active par | A6 | 65 | 65 | 65 |
| rapport à la surface du sol naturel (cm) | B6 | 15 | 10 | 0 |

Les câbles à thermistances verticaux A7 et B7 sont situés du côté aval (drain), dans le sol naturel au pied du remblai (Figure 32). Les données enregistrées au câble A7 sont incohérentes depuis le début du suivi et malgré les efforts déployés pour corriger la situation, les températures ne sont toujours pas disponibles. La possibilité d'un écoulement d'eau sous le remblai est plausible, surtout considérant les données du câble A6, mais un problème de branchement, ou une défaillance des thermistances ne sont pas exclus.

Compte tenu des incohérences enregistrées au câble A7, la Figure 34 illustre uniquement les températures minimales et maximales enregistrées par le câble B7 à chaque profondeur lors des trois années de suivi.





D'après les résultats illustrés par la Figure 34, les températures minimales de l'année 2015 sont bien plus froides que celles des autres années et les profils des températures maximales sont semblables pour les trois années, voire légèrement plus chauds dans les premiers centimètres.

Le Tableau 7 montre l'évolution de la profondeur de la couche active au câble à thermistance B7. L'épaisseur de la couche active est 10 cm plus mince en 2015. Cette lente remontée du

plafond du pergélisol est encourageante, surtout comparativement à aux valeurs stables de A3, également en terrain naturel même si du côté de la pente douce et fossé de drainage.

Tableau 7 : Épaisseur de la couche active au câble à thermistances B7 pour les trois années de suivi.

| | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|------|------|------|
| Épaisseur de la couche active dans le terrain naturel (cm) | 160 | 160 | 150 |

3.2.4 Distribution spatiale des températures dans le remblai aux stations A (1+620) et B (1+720)

Afin de mieux visualiser les températures dans le remblai, des graphiques de distribution spatiale des températures ont été dessinés avec le logiciel Surfer de Golden Software. Les graphiques ont été faits pour les mois de mars et septembre de chaque année de suivi afin de représenter respectivement le gel et le dégel maximal.

La Figure 35 présente ces graphiques pour les stations A (à gauche) et B (à droite) à la fin des mois froids, soit en mars 2013, 2014 et 2015. Contrairement à la station A, les isothermes sous le drain thermique de la station B (câble B6) se trouvent plus haut ou au même niveau que ceux situés sous le centre du remblai (câble B5). Une remontée des isothermes sous le drain indique que l'air circule correctement dans le drain et facilite l'extraction de chaleur du sol. Ceci confirme une bonne efficacité du drain à la station B (chaînage 1+720) étant donné que, sans drain thermique, les isothermes devraient remonter au centre du remblai seulement, comme observé à la station A (câble A6 comparé avec A5). Globalement, au cours des années, les températures dans le remblai restent stables à la station A et se refroidissent à la station B. Par contre, un bulbe de températures plus froides commence à apparaître avec le temps au câble A6, pourrait indiquer une entrée d'air froid dans le sol, possiblement par le drain ou un mauvais fonctionnement d'une thermistance située dans cette zone. L'absence de données au câble A7 limite un peu les analyses de la distribution spatiale pour cette portion du remblai.

La Figure 36 illustre la distribution des températures dans le remblai aux stations A et B après les mois chauds, soit en septembre 2013, 2014 et 2015. L'allure des isothermes, aux deux stations, est la même qu'observée sur la Figure 35 sous le drain thermique, soit des isothermes de températures plus froide remontant sous le drain et au centre de la route à la station B, comparativement à uniquement au centre pour la station A. Au même endroit où le bulbe de températures plus froides est observé en mars au câble A6 (Figure 35), un bulbe plus chaud apparaît au cours des années en septembre, indiquant la possibilité d'une infiltration d'eau sous la surface du sol naturel. Toutefois, aucun écoulement d'eau n'a été observé sur le terrain à la station A, ce qui n'élimine pas un écoulement sous-terrain. Il y a aussi une possibilité que les données anormales enregistrées au câble A6 entre 250 et 380 cm, influence la distribution des températures à cet endroit.



Figure 35 : Distribution spatiale des températures dans le remblai des stations A (à gauche) et B (à droite) - mois de mars des trois années de suivi.



Figure 36 : Distribution spatiale des températures dans le remblai des stations A (à droite) et B (à gauche) - mois de septembre des trois années de suivi.

3.3 Comportement thermique dans le drain thermique

Cette section présente le comportement thermique dans le drain thermique au chaînage 1+620 proche de la station A et au chaînage 1+720 près de la station B. Trois années de suivi (2013, 2014, 2015) sont présentées pour les thermistances installées proches de la station B tandis que deux années de suivi (2014, 2015) sont exposées pour les thermistances placées près de la station A. L'évolution des données climatiques, des températures dans le drain et des températures du sol sous le drain sont montrées. Une relation entre la température de l'air et celle dans le drain a été développée. Finalement une conclusion est proposée concernant le comportement thermique dans le drain thermique.

3.3.1 Chaînage 1+620 près de la station A

La Figure 37 montre les données au chaînage 1+620 près de la station A pour les mois froids de novembre à mai. La Figure 37A présente les températures moyennes mensuelles dans le drain (colonnes de gauche) et de l'air (colonnes de droite), et la Figure 37B, les températures movennes mensuelles dans le drain (colonnes de gauche) et le sol (colonnes de droite), pour les années 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Les températures dans le sol correspondent à une moyenne mensuelle des données enregistrées par la thermistance du câble A6 placées à 50 cm sous le drain thermique. La température moyenne dans le drain thermique a été calculée en faisant la moyenne mensuelle des données enregistrées par les six thermistances placées dans le drain pour le figure A (comparaison avec la température de l'air) et par les deux thermistances situées à mi talus dans le drain thermique pour le figure B (comparaison avec la température dans le sol). D'après les résultats illustrés sur la Figure 37, les températures de l'air sont plus froides que celles du drain et du sol sauf en avril 2015. Quant aux températures dans le drain, elles sont plus chaudes que celles du sol sauf en mai 2015 où la tendance s'inverse très légèrement. Ce comportement semble incohérent et laisse supposer un mauvais fonctionnement d'une série de thermistances ou une inversion d'une série de données. Il est en effet impossible que les températures dans le drain soient plus chaudes que les températures du sol et de l'air.



Figure 37 : Températures moyennes mensuelles dans : A) le drain et l'air; B) le drain et le sol; pour les mois froids des trois années de suivi; 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+620 près de la station A.

La Figure 38 montre les données du chaînage 1+620 proche de la station A pour les mois chauds de juin à octobre. La Figure 38 A présente les températures moyennes mensuelles dans le drain (colonnes de gauche) et de l'air (colonnes de droite) et sur Figure 38 B, les températures moyennes mensuelles dans le drain (colonnes de gauche) et du sol (colonnes de droite) pour les années 2014 (jaune) et 2015 (rouge). D'après les résultats illustrés par la Figure 38, les températures de l'air sont plus chaudes que celles du drain, sauf en octobre. Les températures dans le drain sont plus froides que celles dans le sol tout au long de la période, sauf en septembre et en octobre où elles sont semblables. Encore ici, le comportement observé semble incohérent.



Figure 38 : Températures moyennes mensuelles dans : A) le drain et l'air; B) le drain et le sol; pour les mois chauds des trois années de suivi; 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+620 près de la station A.

La Figure 39 illustre la différence entre les températures moyennes mensuelles des deux thermistances situées à mi talus dans le drain et celles dans le sol 50 cm sous le drain à la station A, câble A6. Les histogrammes correspondent à la moyenne mensuelle de chaque année; 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Lorsque les différences sont négatives, cela signifie que la température dans le drain est plus froide que celle dans le sol, ce qui permet l'extraction de chaleur; et inversement. La température dans le drain est supérieure à celle dans le sol de novembre 2013 à mai 2014 et de novembre 2014 à avril 2015. Les écarts observés ne sont pas logiques et peuvent difficilement être expliqués autrement que par des données erronées ou par une erreur dans leur manipulation.



Figure 39 : Différence entre la température dans le drain et celle du sol à 50 cm sous le drain (câble A6) pour les deux années de suivi; 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+620 près de la station A.

3.3.2 Chaînage 1+720 près de la station B

La Figure 40 présente les données au chaînage 1+720 près de la station B pour les mois froids de novembre à mai. La Figure 40A montre les températures moyennes mensuelles dans le drain (colonnes de gauche) et de l'air (colonnes de droite) et sur la Figure 40B, les températures moyennes mensuelles dans le drain (colonnes de gauche) et du sol (colonnes de droite) pour l'année 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Les températures dans le sol correspondent à une moyenne mensuelle des données enregistrées par la thermistance du câble B6 placées à 50 cm sous le drain thermique. La température moyenne dans le drain thermique a été calculée en faisant la moyenne mensuelle des données enregistrées par les six thermistances placées dans le drain (Figure 40A) et par les deux thermistances situées à mi talus dans le drain thermique (Figure 40B). D'après les résultats illustrés par la Figure 40, les températures de l'air sont plus froides que celles du drain et du sol jusqu'en mars-avril. Quant aux températures dans le drain, elles sont plus froides que celles du sol jusqu'en févriermars. Pendant les premiers mois (novembre et décembre), les températures dans le drain sont à peine plus froides que celles dans le sol. Ensuite, l'écart entre les deux augmente et atteint son maximum en février pour redevenir semblable en avril et en mai. Ceci indigue une bonne circulation de l'air dans le drain en hiver et des conditions propices à l'extraction de chaleur du sol de novembre à avril.



Figure 40 : Températures moyennes mensuelles dans : A) le drain et l'air; B) le drain et le sol; pour les mois froids des trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+720 près de la station B.

La Figure 41 présente les données du chaînage 1+720 proche de la station B pour les mois chauds de juin à octobre. La Figure 41A montre les températures moyennes mensuelles dans le drain (colonnes de gauche) et de l'air (colonnes de droite) et la Figure 41B, les températures moyennes mensuelles dans le drain (colonnes de gauche) et du sol (colonnes de droite) pour l'année 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). D'après les résultats illustrés par la Figure 41, les températures de l'air sont plus chaudes que les autres, hormis en octobre où elles sont plus froides. Les températures dans le drain sont plus chaudes que celles dans le sol de juin à août. Ensuite, elles sont semblables en septembre et en octobre. Ceci confirme que l'extraction de chaleur s'effectue pendant les mois froids et non durant les mois chauds.



Figure 41 : Températures moyennes mensuelles dans : A) le drain et l'air; B) le drain et le sol; pour les mois chauds des trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+720 près de la station B.

La Figure 42 illustre la différence entre les températures moyennes mensuelles des deux thermistances situées à mi talus dans le drain et celles dans le sol 50 cm sous le drain à la station B, câble B6. Les histogrammes correspondent à la moyenne mensuelle de chaque année; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Lorsque les différences sont négatives, cela signifie que la température dans le drain est plus froide que celle dans le sol et inversement. La température dans le drain est inférieure à celle dans le sol de septembre 2012 à février 2013, de septembre 2013 à janvier 2014 et de septembre 2014 à mars 2015. L'écart entre ces deux températures est plus important pour les mois de janvier à mars. Les températures dans le drain est dans le sol. Ces résultats indiquent que le drain est dans des conditions propices à l'extraction de chaleur de septembre à mars environ, puisque l'échange se fait toujours du chaud vers le froid et le sol est plus chaud que l'air dans le drain.



Figure 42 : Différence entre la température dans le drain et celle du sol à 50 cm sous le drain (B6) pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015(rouge). Chaînage 1+720 proche de la station B.

La Figure 43 illustre les valeurs absolues des températures moyennes hebdomadaires dans le drain en fonction des températures de l'air. Les températures inférieures à 0 °C ont uniquement été prises en compte pour cette analyse, car c'est à cette période que le drain thermique peut avoir les conditions nécessaires pour être efficace et extraire la chaleur du sol. Durant cette période, une relation de type exponentielle ressort et est représentée en bleue sur la Figure 43 où le coefficient de corrélation est égal à 0,51.

Cette période se situe entre le mois de novembre et le mois de mars lorsque l'air se refroidit. La baisse des températures de l'air permet le refroidissement des températures dans le drain. Lorsque les températures dans le drain deviennent plus froides que celles du sol, l'extraction de chaleur peut avoir lieu. Au début de l'hiver, l'efficacité du drain est maximale étant donné que les températures du sol sont bien plus chaudes que celles de l'air dans le drain. Le comportement du drain change à partir du mois d'avril alors que la température de l'air et dans le drain devient égale ou supérieure à celle du sol. L'extraction de chaleur n'a donc plus lieu.



Figure 43 : Valeurs absolues des températures moyennes hebdomadaires des deux thermistances situées à mi talus dans le drain thermique en fonction des températures de l'air pour les trois années de suivi à la station B.

3.4 Comportement thermique – Analyse linéaire (DTS et câbles à thermistances horizontaux)

Cette section présente les données enregistrées par le câble à fibres optiques (DTS) pendant deux années de suivi (2013 et 2014) et par les câbles à thermistances horizontaux pendant trois années de suivi (2013, 2014 et 2015). Les points chauds observés y sont énumérés et la comparaison entre les deux instrumentations (DTS et thermistances) est faite. Finalement, une conclusion sur les températures linéaires et la technologie du DTS est exposée.

Du côté amont, le câble DTS est installé, du chaînage 1+250 au chaînage 2+100, sous la pente douce au niveau du sol naturel et à 30 cm sous l'interface sol naturel/remblai. Côté aval, il est placé du chaînage 1+250 au chaînage 1+740 sous le drain thermique en pied de pente à l'interface sol naturel/remblai et à 30 cm sous le sol naturel à 8-10 m du pied de remblai.

Les câbles à thermistances horizontaux sont placés du côté amont, du chaînage 1+630 au chaînage 1+680 et du côté aval, du chaînage 1+620 au chaînage 1+670.

3.4.1 Températures enregistrées par le câble à fibres optiques (DTS)

Rappelons ici que les données de températures enregistrées par le DTS n'ont pas été téléchargées lors des visites de terrain en été 2015. La Figure 44 est un récapitulatif des données présentées dans les rapports d'étapes 2 et 3 remis au ministère en mars 2014 et 2015. Les dates correspondantes à chaque image de la Figure 44 sont indiquées. Globalement, les températures enregistrées se réchauffent entre mai et juin. Certaines zones de chaleur commençaient à apparaitre en juin 2013. En mai 2014, toutes les températures étaient encore négatives.

Du côté amont (pente douce), les températures enregistrées semblent toujours plus chaudes que celles du côté aval (drain thermique). Cette observation est encourageante compte tenu qu'elle suppose une efficacité notable du drain thermique notamment pour les chaînage 1+227 à 1+550, où le drain est installé de façon optimale pour favoriser l'extraction de chaleur durant l'hiver et ainsi refroidir le sol. Les points chauds qui apparaissent généralement du côté amont correspondent aux zones d'accumulation et de circulation d'eau observées lors de visite sur le terrain. Les zones les plus chaudes, encadrées en noir sur les quatre premières images de la Figure 44, sont principalement localisées vers l'aéroport, approximativement des chaînages 1+900 à 2+100. Selon les observations réalisées lors des visites sur le terrain, les ponceaux situés entre ces chaînages sont endommagés (extrémités écrasées) et l'un d'eux commence possiblement à s'effondrer (voir section 5.1), le drainage n'est donc peut-être pas adéquat à cet endroit ce qui est susceptible de causer une dégradation du pergélisol. Aussi, cette section comporte une pente inclinée vers le village qui peut entraîner une plus grande circulation et concentration d'eau dans le fossé de drainage, au lieu d'emprunter les ponceaux de cette section.

Du côté aval (drain thermique), il est possible de constater une légère différence entre les températures enregistrées au sud de la route de Salluit 2 et celles enregistrées au nord de cette même route, pour le DTS situé le plus près de la route sur les images. Au sud, des chaînages 1+600 à 1+800, le drain n'a pas été installé de façon adéquate (voir section 2.1.1). Les températures légèrement plus chaudes enregistrées à cet endroit pourraient confirmer qu'un drain mal placé possède une moins bonne efficacité qu'un drain installé de façon optimale (chaînage 1+250 à 1+600). En effet, au courant de l'année, les températures ont tendance à se réchauffer en premier et à rester plus chaudes du côté sud de la route de Salluit 2. Finalement, du côté aval, à 30 cm de profondeur dans le sol naturel sous la pente

douce, les températures sont toujours plus chaudes que les températures du sol sous le drain thermique (côté aval).



15 août 2013

15 septembre 2013



Figure 44 : Températures enregistrées par le DTS de mars 2013 à septembre 2014.

Source : Lemieux et al., 2014, Périer et al., 2015, Rapport d'étape 2 et 3.

3.4.2 Températures enregistrées par les câbles à thermistances horizontaux

a. Côté amont de la route (pente douce)

La Figure 45 illustre les températures en pied de remblai enregistrées par le câble à thermistances horizontal placé du côté de la pente douce (amont). Les trois années de suivi sont représentées en bleu (2013), en jaune (2014) et en rouge (2015). La Figure 45A présente les températures enregistrées le 15 mars de chaque année. La Figure 45B présente les températures enregistrées le 15 septembre de chaque année. Les températures se sont refroidies au fil des années au mois de mars et réchauffées au cours des années au mois de

septembre. Le ponceau #6 est situé près de la thermistance à 32 m, au chaînage 1+660, ce qui explique le réchauffement visible en mars et le refroidissement en septembre. Les 16 premiers mètres de ce câble à thermistances (1+630 à 1+646) ont été exclus en raison d'un mauvais fonctionnement des thermistances.



Figure 45 : Températures de surface en pied de remblai du côté de la pente douce (amont) pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). A) mois de mars; B) mois de septembre.

b. Côté aval de la route (drain thermique)

La Figure 46 illustre les températures en pied de remblai enregistrées par le câble à thermistances horizontal placé du côté du drain thermique (aval). Les trois années de suivi sont représentées en bleu (2013), en jaune (2014) et en rouge (2015). La Figure 46A présente les températures enregistrées le 15 mars de chaque année. La Figure 46B présente les températures enregistrées le 15 septembre de chaque année. Les données de température de l'année 2013 ne sont pas disponibles pour les thermistances situées à 44 m jusqu'à 50 m. Les températures se sont refroidies au fil des années au mois de mars et réchauffées au cours des années au mois de septembre. Près des thermistances à 44 m et 46 m (chaînages 1+664 et 1+666), un point froid et chaud est notable respectivement en mars et septembre. Le ponceau #6 situé au chaînage 1+660, à quelques mètres des thermistances 44 à 46 m, pourrait être responsable de ce réchauffement si l'écoulement à la sortie du ponceau se fait dans ce sens. Les thermistances à 2 m et 4 m (encerclées en rouge sur la Figure 47) présentent des températures plus froides en hiver et plus chaudes, comparativement à ailleurs sur le câble. Cette différence est due au positionnement de ces deux thermistances bien à l'intérieur du remblai, au lieu d'au pied de celui-ci, comme le reste du câble. Ce positionnement s'explique par le fait que le câble traverse la route jusqu'à l'enregistreur de données de la station A.



Figure 46 : Températures de surface en pied de remblai du côté du drain thermique (aval) pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). A) mois de mars; B) mois de septembre.



Figure 47 : Positionnement du DTS et des thermistances horizontales. Les thermistances à 2 et 4 m sont situés dans le remblai. Source : Périer et al., 2015, Rapport d'étape 3.

3.4.3 Analyse linéaire des températures

L'analyse des données de températures du DTS montrent que les températures du côté du drain thermique sont plus froides que celles du côté de la pente douce, et ce durant toute l'année. À titre de synthèse, la moyenne de ces températures sur les deux années de suivi est présentée sur la Figure 48. La moyenne du côté amont (pente douce), sous le fossé de drainage à l'interface sol naturel/remblai, est représentée par la courbe bleue. La moyenne du côté aval (drain thermique), sous le drain thermique à l'interface sol naturel/remblai, est montrée par la courbe rouge. Cette figure permet également de constater que les températures du côté du drain thermique sont plus stables car il y a moins de fluctuations visibles sur le graphique. Par contre, les températures près du fossé de drainage en amont sont directement influencées par l'accumulation d'eau en été et de neige en hiver dans les dépressions, ce qui expliquerait les points chauds observés du côté amont. Lors de visites de terrain, des accumulations d'eau ont été notées entre le village et la route de Salluit 2, dans le fossé de drainage. Les variations de températures visibles sur la courbe bleue de la Figure 48 semblent confirmer ce constat. Finalement, au niveau des ponceaux, du côté aval (drain thermique), une hausse des températures de 1 à 2 °C est constatée. La technologie du DTS permet donc de localiser les points chauds causés par la circulation d'eau ainsi que les accumulations d'eau (été) et de neige (hiver), mais aussi d'évaluer l'efficacité du drain thermique.



Figure 48 : Moyenne des températures enregistrées par le DTS pour les deux années de suivi disponibles (2013 et 2014). Côté amont (pente douce), à l'interface sol naturel/remblai, en bleu. Côté aval (drain thermique), sous le drain thermique.

Source : Périer et al., 2015, Rapport d'étape 3.

Comme le DTS est une nouvelle technologie appliquée au suivi thermique d'une infrastructure de transport construite sur pergélisol, une comparaison a été faite (Figure 49) entre les températures enregistrées par le DTS (ligne pointillé) et les câbles à thermistances horizontaux (ligne pleine) à deux dates : juillet (en bleu) et septembre (en rouge). La Figure 49A présente les données du côté de la pente douce (amont), où un fort coefficient de corrélation (R² =0,86) entre les deux technologies a été calculé avec les données du 1^{er} septembre 2014. De ce côté, les données des 16 premiers mètres du câble à thermistances horizontaux (du chaînage 1+630 au chaînage 1+646) ont été retirées en raison d'un mauvais fonctionnement. Toutes les autres données concordent. La Figure 49B présente les données du côté du drain thermique (aval), où un fort coefficient de corrélation (R² =0,79) entre les données des thermistances et du DTS a été calculé au 1^{er} septembre 2014. Les données des thermistances à 2 et 4 m ont aussi été retirées puisqu'elles ne sont pas situées au même endroit que le câble DTS. Sur ce graphique, une différence est visible, les températures du DTS sont légèrement plus froides que celles du câble à thermistances horizontal. Les données sont donc globalement similaires et la technologie du DTS semble fiable, voire même plus que celle du câble à thermistances horizontal.



Figure 49 : Comparaison entre les températures enregistrées par le DTS (pointillés) et par le câble à thermistance horizontal (traits pleins). A) côté amont (pente douce); B) côté aval (drain thermique), juillet et septembre 2014. Source : Périer et al., 2015, Rapport d'étape 3.

La Figure 50 présente les températures du sol enregistrées les 27, 28 et 29 juillet 2013 par le DTS juxtaposées à la température de l'air. Cette figure montre la réponse rapide du côté amont du remblai lors d'un épisode de chaleur comparativement au côté aval. La Figure 51 présente les températures du sol enregistrées les 29, 30 avril et 1^{er}, 2 mai 2013 par le DTS juxtaposées à la température de l'air et aux précipitations liquide. Du 29 au 30 avril des températures positives accompagnées par une période significative de pluie ont été enregistrées par la station SILA. Les jours suivants, des températures plus froides ont été enregistrées.

La Figure 51 montre le décalage du sol à répondre à cet épisode chaud et pluvieux. En effet, le sol a pris 2 jours pour emmagasiner la chaleur, ce qui est possiblement dû à l'accumulation d'eau à la base du banc de neige dans le fossé de drainage. Seulement quelques endroits ont montré une réponse immédiate, ce qui peut être associé à de mauvaises conditions de drainage, telles des dépressions dans le fossé de drainage qui favorisent les accumulations d'eau.



Figure 50 : Températures du sol enregistrées par le DTS combinées à la température de l'air, montrant la réponse rapide du côté amont du remblai lors d'un épisode de chaleur comparativement au côté aval. Source : Roger et al., 2015.



Figure 51 : Températures du sol enregistrées par le DTS combinées à la température de l'air et aux précipitations en eau, montrant le décalage dans le réchauffement du sol.

Source : Roger et al., 2014

4. SUIVI DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE LA ROUTE

Ce chapitre présente les données relatives au suivi du comportement mécanique du remblai durant les trois années de suivi après les travaux d'adaptation (2013, 2014 et 2015), soit les données des inclinomètres verticaux installés au pied de remblai du côté aval (drain thermique) aux chaînages 1+620 (station A), 1+660 et 1+720 (station B) et les données des inclinomètres horizontaux installés transversalement au remblai aux chaînages 1+720 (station B) et 2+000. L'évolution des mouvements verticaux et horizontaux du remblai et une conclusion concernant le comportement mécanique du remblai sont présentées.

4.1 Mouvements horizontaux du remblai - Inclinomètres verticaux

Deux déplacements sont mesurés avec l'inclinomètre : un selon l'axe A perpendiculaire à la route et l'autre selon l'axe B longitudinal à la route. En d'autres mots, l'axe A traduit un

déplacement transversal vers l'extérieur du remblai et l'axe B montre un déplacement parallèle à la route, soit un déplacement vers le village ou l'aéroport.

4.1.1 Chaînage 1+620 (station A, pied du remblai, côté du drain thermique)

La Figure 52 illustre le déplacement cumulatif de l'axe A de l'inclinomètre installé au pied du remblai au chaînage 1+620 (station A) en fonction de la profondeur pour les trois années de suivi, 2013 (en vert), 2014 (en bleu) et 2015 (en rouge). Le déplacement cumulatif total obtenu en 2015 est de 190 mm par rapport à l'année de référence (2012), soit 51 mm de plus que l'année 2014. Le déplacement vers le bas de pente est relativement important et se situe entre 0,5 m et 2,5 m sous la surface du sol.



Figure 52 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+620. Axe A.

La Figure 53 illustre le déplacement cumulatif de l'axe B de l'inclinomètre placé au chaînage 1+620 en fonction de la profondeur pour les trois années de suivi. Le déplacement cumulatif total obtenu en 2015 est de 51 mm par rapport à l'année de référence (2012), dont 16 mm entre 2014 et 2015. Le déplacement vers le village, suivant la pente du terrain naturel, se situe entre 0,5 m et 2 m sous la surface du sol.



Figure 53 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+620. Axe B.

4.1.2 Chaînage 1+660 (pied du remblai, côté du drain thermique)

La Figure 54 illustre le déplacement cumulatif de l'axe A de l'inclinomètre placé au chaînage 1+660 en fonction de la profondeur pour les trois années de suivi. Le déplacement cumulatif total obtenu en 2015 est de 178 mm par rapport à l'année de référence (2012), dont40 mm entre 2014 et 2015. Le déplacement vers le bas de pente est relativement important et se situe entre 0,5 m et 2 m sous la surface du sol.



Figure 54 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+660. Axe A.

La Figure 55 illustre le déplacement cumulatif de l'axe B de l'inclinomètre placé au chaînage 1+660 en fonction de la profondeur pour les trois années de suivi. Le déplacement cumulatif total obtenu en 2015 est de 93 mm par rapport à l'année de référence (2012) dont 17 mm entre 2014 et 2015. Le déplacement vers le village, suivant la pente du terrain naturel, se situe entre 0,5 m et 2 m sous la surface du sol.



Figure 55 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+660. Axe B.

4.1.3 Chaînage 1+720 (station B, pied du remblai, côté du drain thermique)

La Figure 56 illustre le déplacement cumulatif de l'axe A de l'inclinomètre placé au chaînage 1+720 (station B) en fonction de la profondeur pour les trois années de suivi. Le déplacement cumulatif total obtenu en 2015 est de 160 mm par rapport à l'année de référence (2012), dont 54 mm entre 2014 et 2015. Le déplacement vers le bas de pente est relativement important et se situe entre 0,5 m et 2,5 m sous la surface du sol.



Figure 56 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+720. Axe A.

La Figure 57 illustre le déplacement cumulatif de l'axe B de l'inclinomètre placé au chaînage 1+720 (station B) en fonction de la profondeur pour les trois années de suivi. Le déplacement cumulatif total obtenu en 2015 est de 22 mm par rapport à l'année de référence (2012), dont 7 mm entre 2014 et 2015. Il y a eu un très petit déplacement de 4 mm de 2013 à 2014. Le déplacement vers le village, suivant la pente du terrain naturel, se situe entre 0,5 m et 2 m sous la surface du sol.



Figure 57 : Déplacement cumulatif de 2012 à 2015. Inclinomètre vertical 1+720. Axe B.

4.1.4 Comparaison entre les trois inclinomètres verticaux

A titre de synthèse, la Figure 58 illustre les déplacements cumulatifs obtenus sur l'axe A et l'axe B des trois inclinomètres verticaux aux trois années de suivi. Selon l'axe A (mouvement perpendiculaire au remblai), les valeurs sont comparables pour les trois inclinomètres et plus particulièrement pour ceux placés aux chaînages 1+620 (station A) et 1+660. Les déplacements cumulatifs vont de 155 mm (station B) à 190 mm (station A). Ces déplacements traduisent un mouvement important vers le bas de pente du remblai. L'inclinomètre placé au chaînage 1+720 (station B) a fourni un taux de déplacement assez constants de 52,5 mm par année en moyenne.

Selon l'axe B (déplacement parallèle au remblai, vers le village), les déplacements cumulatifs maximaux ont été mesurés au chaînage 1+660 puis au chaînage 1+620 (station A) et finalement au chaînage 1+720 (station B). Les déplacements cumulatifs vont de 22 mm (station B) à 93 mm. La station B (1+720) correspond au chaînage ayant eu le moins de déplacement cumulatif sur les axes A (155 mm) et B (19 mm) au cours des trois années.



Figure 58 : Déplacements cumulatifs des trois inclinomètres verticaux pendant les trois années de suivi. Axes A et B.

La Figure 59 montre les déplacements annuels obtenus à 0,5 m de profondeur sur l'axe A et l'axe B des trois inclinomètres verticaux aux trois années de suivi. Selon l'axe A (mouvement perpendiculaire au remblai), les valeurs obtenues aux chaînages 1+620 (Station A) et 1+660 sont similaires. Le déplacement le plus important s'est produit lors de l'année 2014. L'année a été une année plus froide et les déplacements observés se sont ensuite atténués. Le prolongement de la période de suivi permettra de vérifier la tendance à long terme des déplacements. Au chaînage 1+720 (station B), les déplacements sont constants d'année en année.

Selon l'axe B (déplacement parallèle au remblai, vers le village), le taux d'augmentation est semblable pour les trois inclinomètres entre 2013 et 2014. Par contre, le taux de diminution entre 2014 et 2015 est plus important pour l'inclinomètre placé au chaînage 1+660 que pour les deux autres qui ont un taux de diminution similaire. C'est lors de l'année 2014 que l'on obtient le plus grand déplacement selon cet axe aussi.



Figure 59 : Déplacements annuels des trois inclinomètres verticaux pendant les trois années de suivi. Axes A et B.

La Figure 60 illustre les déplacements annuels du chaînage 1+660 à différentes profondeurs et la Figure 61 montre les déplacements cumulatifs au même chaînage pour les mêmes profondeurs. Les autres inclinomètres verticaux ne sont pas présentés, car ils ont les mêmes allures, l'inclinomètre 1+660 est donc représentatif des autres. La tendance des déplacements annuels et cumulatifs est semblable pour chaque profondeur et diminue plus la profondeur augmente. Très peu de déplacements sont visibles sous 2 m de profondeur, soit sous le plafond du pergélisol.



Figure 60 : Déplacement annuel à différentes profondeurs. Chaînage 1+660. Axes A et B.



Figure 61 : Déplacement cumulatif à différentes profondeurs. Chaînage 1+660. Axes A et B.

4.2 Mouvements verticaux du remblai - Inclinomètres horizontaux

Les données de déplacements des deux inclinomètres horizontaux aux chaînages 1+720 et 2+000 n'ont pas été relevées en 2013 étant donné qu'un obstacle ou une dislocation du tube bloquait la progression de la sonde. Les mesures devaient être prises lors de la collecte des données des thermistances et le séjour ne prévoyait donc pas suffisamment de temps pour dégeler les tubes inclinométriques.

4.2.1 Chaînage 1+720 (station B)

La Figure 62 montre les déplacements cumulatifs relevés à l'inclinomètre horizontal au chaînage 1+720 aux années 2012 (bleu), 2014 (violet) et 2015 (orange).

Les valeurs des déplacements ont été déterminés à chaque année par rapport à la position de l'extrémité de l'inclinomètre. La mesure effectuée au pied de talus du remblai en aval à 0 m (côté drain thermique), a été utilisée comme valeur de référence. Puisque l'élévation de ce point n'a pas été mesurée, les valeurs obtenues sont en déplacement relatif annuel et non en déplacement absolu. En 2014, les déplacements relatifs maximum de 23 et 26 mm ont été relevés à 9,5 et 21,5 m depuis le pied de talus du remblai. Ces distances correspondent à la tête des pentes du remblai en aval et en amont (épaulements). La même année, un déplacement relatif minimal de 9 mm a été enregistré à 15 m depuis le pied de talus du remblai

Les mesures de 2015 ont été prises à partir des deux extrémités de l'inclinomètre car la sonde ne passait pas entre 9,5 m et 22 m. Ces deux positions correspondent aux points de déformation maximum enregistrés en 2014, ce qui suggère que le tube s'est possiblement disloqué à ces endroits. La mesure effectuée au pied de talus du remblai à 0 m en aval a été utilisée comme valeur de référence. Les mesures de 22 et 25 m ont été calculées à partir du déplacement cumulatif enregistrées en pied de talus de remblai en amont à 25 m.

La tendance de la courbe de l'année 2015 est un indicateur de la distorsion que se produit dans le remblai mais n'est aucunement représentative, des valeurs absoluesqui sont nécessairement sous-estimées. Puisque ce sont les valeurs aux extrémités (0m et 25m) qui servent de référence aux points de mesures, l'incertitude associée aux valeurs entre 0 et 4,5 m et entre 22 et 25 m est importante



Figure 62 : Déplacement relatif par rapport à la position de l'extrémité de l'inclinomètre, de 2012 à 2015. Inclinomètre horizontal 1+720.

4.2.2 Chaînage 2+000

La Figure 63 montre les déplacements relevés à l'inclinomètre horizontal au chaînage 2+000 aux années 2012 (bleu), 2014 (violet) et 2015 (orange). Les valeurs des déplacements ont été déterminés à chaque année par rapport à la position de l'extrémité de l'inclinomètre. La mesure prise à 2,5 m du côté aval (drain thermique) en 2014, au pied de la pente du remblai, a été reportée à un déplacement de 0 mm puisque les incertitudes entre 0 à 2,5 m enregistrées par la sonde étaient trop grandes pour servir de données de base au calcul des déplacements. Ces incertitudes sont calculées par le logiciel *Inclinalyses*.

En 2014, les déplacements relatifs maximums de 25 et 18 mm ont été enregistrés respectivement à 5 et 21 m. Ces distances correspondent à la position des épaulements du remblai. Cette même année, un déplacement relatif minimal de 9 mm a été enregistré à 17,5 m. Le déplacement est stable à 18 mm entre 8 m et 12,5 m. En 2014, le déplacement entre 22,75 m et 24 m du côté de la pente douce est positif. Ceci peut s'expliquer par le fait que le point de référence dont le mouvement a été établi à 0 a en fait tassé d'au moins 25 mm. Il faut noter également que l'inclinomètre sort du remblai à cet endroit et qu'il repose sur des roches comme le montre la Figure 64. Il est donc possible que le mouvement du remblai ait entraîné un mouvement vers le haut de l'extrémité de l'inclinomètre.

Les mesures de 2015 ont été prises à partir des deux extrémités de l'inclinomètre car la sonde ne passait pas entre 14 m et 20,5 m. Par conséquent, les mesures à 13,5 m et à 24 m ont été ramenées à des déplacements identiques à ceux de l'année 2014. En effet, il a été supposé que le déplacement en 2015 ne pouvait pas être inférieur à celui de 2014. Par contre, cette

hypothèse entraîne une sous-estimation de déplacement de 2015 à ces deux endroits. Les mesures entre 2,5 m et 14 m ont été déterminées en cumulant les déplacements à partir de la mesure à 2 m tandis que les mesures entre 20,5 et 24 m ont été cumulées à partir de la mesure à 24 m. Le déplacement maximal enregistré en 2015 est de minimum 43 mm à 5 m du côté du drain thermique, au niveau de l'épaulement.



Figure 63 : Déplacement relatif par rapport à la position de l'extrémité de l'inclinomètre, de 2012 à 2015. Inclinomètre horizontal 2+000.



Figure 64 : L'inclinomètre horizontal. Chaînage 2+000, côté amont (pente douce). Source : Périer et al., 2015, Rapport d'étape 3

4.3 Analyses des mouvements du remblai à la station B (chaînage 1+720)

La station B, au chaînage 1+720, a été choisie pour une analyse approfondie en raison des deux inclinomètres, vertical et horizontal, qui y sont installés. La mise en relation des
mouvements observés par ces deux inclinomètres a permis de cibler quel mécanisme de dégradation peut être à l'origine des déformations du remblai de la route de Salluit.

4.3.1 Généralités sur les mécanismes de dégradation d'un remblai construit sur pergélisol

Trois mécanismes principaux sont responsables de la dégradation d'un remblai construit sur pergélisol : la consolidation, le cisaillement par fluage et le soulèvement au gel. La consolidation se produit lorsqu'un changement progressif du volume du sol se produit suite à une réduction de sa teneur en eau. Ce phénomène se produit notamment lors de la fonte d'un pergélisol riche en glace ce qui entraîne un tassement par consolidation. Le phénomène peut également se produire dans un sol compressible de la couche active soumis à un accroissement de contrainte. Le cisaillement par fluage se produit lorsque le poids du remblai exerce une contrainte constante sur le sol sous-jacent et entraine une déformation progressive qui peut mener à une rupture par cisaillement. Finalement, le soulèvement au gel se produit annuellement lorsque la couche active gèle en hiver perpendiculairement à la base du sol et dégèle verticalement (par gravité) au printemps-été. La Figure 65 illustre les mécanismes de rupture par cisaillement avoir le tube inclinométrique de l'inclinomètre vertical dans le cas d'un d'une rupture par cisaillement par fluage (A) et d'un soulèvement au gel (B).



Figure 65 : Schéma des mécanismes de A) Rupture par cisaillement par fluage; B) soulèvement au gel.



Figure 66 : Schéma de la forme caractéristique d'un tube inclinométrique vertical pour les mécanismes de dégradation : A) Rupture par cisaillement par fluage; B) soulèvement au gel.

4.3.2 Analyses des mouvements verticaux et horizontaux du remblai : détermination du mécanisme de dégradation prédominant

Dans une étude antérieure, des forages ont été effectué au chaînage 1+600. Les tests effectués sur les échantillons ont révélé une teneur en eau élevée et une quantité importante de particules fines. Aussi, une salinité du sol a été confirmée avec un constat du point de fusion inférieur à 0 °C. En effet, le sol était partiellement dégelé à -2 °C. Finalement, des tests de

fluage ont été faits en laboratoire sous une contrainte verticale de 200 kPa et entre -3 et -5 °C. Ils ont révélé un pourcentage de fluage entre 1 et 1,5 % (Verreault, 2015).

L'allure du plafond du pergélisol a été tracée à partir des thermistances de la station B (chaînage 1+720) et est représentée sur la Figure 67 pour une température de 0 °C (traits pleins) et pour une température de -1 °C (pointillés). Ce graphique permet de constater une élévation du plafond du pergélisol chaque année et de souligner l'importance de la salinité du sol. En effet, en tenant compte de celle-ci (température à -1 °C), le plafond du pergélisol se situe 1 m plus bas dans le remblai. Par conséquent, pour la suite des analyses, l'allure à -1 °C sera uniquement considérée. La remontée du plafond du pergélisol d'année en année exclue le mécanisme de consolidation au dégel comme étant la cause significative de la dégradation. Il faut toutefois considérer qu'il peut se produire une consolidation dans les sols argileux de la couche active sur l'effet de l'augmentation de la contrainte suite au rehaussement du remblai lors de la réhabilitation.



Figure 67 : Allure du plafond du pergélisol à deux températures différentes pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+720 proche de la station B.

L'inclinomètre vertical de ce chaînage (1+720) est placé en pied de remblai du côté du drain thermique et est représenté par le trait plein orange sur la Figure 67. Les mouvements enregistrés par cet inclinomètre confirment la position, du plafond du sol gelé, qui se situerait entre -2,5 et 3 m et sont encerclés en noir sur la figure. La Figure 68 montre qu'à cette profondeur, les déplacements horizontaux enregistrés par l'inclinomètre vertical et encerclés en noir sur la figure, sont négligeables. Cette observation exclue le mécanisme de cisaillement par fluage comme étant la cause de la dégradation. En effet, les mouvements dans le pergélisol sont très faibles et les données de l'inclinomètre vertical ne présentent pas de plan de rupture caractéristique du fluage (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** schéma 1).



Figure 68 : Déplacements horizontaux enregistrés par l'inclinomètre vertical. Chaînage 1+720.

Finalement, l'allure du mouvement enregistré par l'inclinomètre vertical ressemble à celui attendu dans le cas d'un mécanisme de soulèvement au gel (**Erreur ! Source du renvoi i ntrouvable.**B). De plus, comme vu dans la section 4.2 les déplacements verticaux maximums enregistrés par l'inclinomètre horizontal au chaînage 1+720 correspondent aux têtes de pente du remblai (épaulement) des deux côtés (amont et aval). Ceci indiquerait que les pentes subiraient un mouvement causé par le soulèvement du sol d'infrastructure gélif perpendiculaire à la pente du sol gelé en hiver et un mouvement d'affaissement par gravité au printemps été (Figure 65B).

Afin de vérifier cette hypothèse, le soulèvement au gel h (mm) minimal et maximal a été calculé. Ce paramètre se calcule en fonction du potentiel de ségrégation SP (mm²/°C.j), du gradient de température gradT (°C/mm) et du temps t (j) avec l'équation suivante (Konrad, 1999) :

$$h = 1,09 \times SP \times gradT \times t$$

Le sol où repose le remblai étant de type argileux, le potentiel de ségrégation est compris entre 150 et 300 mm²/°C.j. Les températures du sol d'infrastructure (pergélisol) sont estimées entre -1 et -2 °C et le temps est de 365 j. Le Tableau 8 énumère les valeurs maximales et minimales estimées du soulèvement au gel en considérant les données citées ci-avant. Les gradients de

température ont été calculés à partir des données de thermistances de la station B (1+720), entre les isothermes -2 °C et -1 °C, pour obtenir la distribution de température dans le sol gelé, en considérant que le sol est partiellement gelé entre 0°C et -1°C dû à la salinité élevée.

| | GradT (°C/mm) -1°C < T < -2°C | h min (mm) avec SP=150 mm²/°C.j | h max (mm) avec SP=300 mm²/°C.j | |
|------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| 2013 | 0,00057 | 33,9 | 67,8 | |
| 2014 | 0,00056 | 33,5 | 67,1 | |
| 2015 | 0,00048 | 28,6 | 57,1 | |

| Tableau 8 : Valeurs | s maximales e | et minimales | estimées de | e soulèvement | au gel. |
|---------------------|---------------|--------------|-------------|---------------|----------|
| | | | | | <u> </u> |

La Figure 69 illustre les déplacements horizontaux cumulatifs observés sur les inclinomètres verticaux sur le terrain et ceux calculés. Le déplacement horizontal cumulatif maximum estimé est représenté en vert, le déplacement minimal estimé en rouge et le déplacement observé sur le terrain en bleu. Cette figure confirme que les déplacements observés sur le terrain suivent la même allure que ceux qui ont été calculés. Le soulèvement au gel semble donc bien être un mécanisme de dégradation qui peut expliquer, en bonne partie les mouvements observés après la réhabilitation du remblai. Le matériau déplacé vers l'extérieur par ce type de mécanisme entraîne un affaissement vertical sous les épaulements du remblai qui semblent être corroboré par les déplacements verticaux enregistrés par les inclinomètres horizontaux.



Figure 69 : Soulèvements cumulatifs maximal (vert), minimal (rouge) et observé sur le terrain (bleu) des trois années de suivi.

5. SUIVI DU SYSTÈME DE DRAINAGE

Sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit, les améliorations au système de drainage consistent en l'ajout de ponceaux avec des coussins diffuseurs à la sortie de chacun et l'aménagement d'une pente douce avec un fossé de drainage. Le suivi du système de drainage s'est fait avec des observations lors des inspections annuelles de 2014 et 2015. Deux tableaux regroupent ces informations à l'ANNEXE A.

5.1 Les ponceaux

Les ponceaux ont été inspectés en septembre 2014 et en août 2015 et sont numérotés de 1 à 14 à partir du chaînage 1+250 jusqu'au chaînage 2+160. Les accumulations d'eau dans le fossé ont également été prises en note et géoréférencées avec un GPS. La présence de neige

en 2014, n'avait pas permis de faire toutes les observations nécessaires, notamment aux ponceaux des chaînage 1+250, 2+120 et 2+160, mais tout a été fait en août 2015. Les détails des observations sont énumérés ci-dessous.

Les ponceaux des chaînages 1+250 (#1), 1+310 (#2), 1+350 (#3), 1+550 (#5), 1+830 (#8), 1+840 (#9 et #10) semblent assurer un bon drainage à travers le remblai. L'eau sortant du ponceau #8 a tendance à utiliser qu'une moitié du coussin diffuseur pour ensuite se diriger de part et d'autre (Figure 70), créant une accumulation d'eau au pied du remblai et un écoulement vers le ruisseau où peu d'érosion thermique du terrain naturel a été observé.



Figure 70 : Ponceau au chaînage 1+830 (#8), aval. Drainage de l'eau vers la rivière.

Les ponceaux des chaînages 1+450 (#4) et 1+980 (#12) sont positionnés un peu haut dans le remblai du côté amont. Cependant, la présence de sédiments en aval a été relevée aux deux ponceaux, indiquant le passage de l'eau, ce qui n'élimine pas la possibilité d'une circulation d'eau sous le ponceau. Au ponceau #4, une importante accumulation d'eau en amont du ponceau (Figure 71) ainsi qu'une accumulation d'eau dans le ponceau vers le centre ont été relevées en 2015. L'accumulation d'eau dans le ponceau traduit un mouvement du remblai ayant entraîné la modification de la pente.



Figure 71 : Ponceau au chaînage 1+450 (#4), amont. Accumulation d'eau importante.

Les ponceaux aux chaînages 1+310 (#2) 1+660 (#6) et 1+980 (#12) ont leurs extrémités aval surélevées par une poutre en bois. Au chaînage 1+350 (#3), l'extrémité aval n'est pas accotée sur une poutre mais elle est surélevée de 10 cm (Figure 72).



Figure 72 : Ponceau au chaînage 1+350 (#3), aval. Surélévation de 10 cm.

L'extrémité amont du ponceau du chaînage 1+660 (#6) proche de l'inclinomètre vertical n'est pas visible depuis l'extrémité aval. Ceci pourrait indiquer un affaissement du ponceau. De plus, les extrémités amont et aval semblent être surélevées de 1 cm environ, ce qui confirmerait un affaissement entrainant une remontée des extrémités. La surélévation du ponceau en amont entraîne une circulation de l'eau sous le ponceau. La Figure 73 illustre ce ponceau.



Figure 73 : Ponceau au chaînage 1+660 (#6). Extrémité amont non visible depuis l'aval

L'écoulement de l'eau dans le ponceau du chaînage 1+730 (#7), situé proche de la station B, est concentré d'un seul côté et non au centre. La Figure 74 illustre la trace orangée laissé par l'eau sur le côté gauche à l'entrée du ponceau. L'eau pourrait donc également s'écouler à l'extérieur et sur le côté du ponceau et provoquer des dégradations dans le remblai. D'ailleurs des écoulements d'eau en pied de remblai du côté aval ont été observés durant les travaux en 2012, ainsi qu'en septembre 2014 (Figure 75).



Figure 74 : Ponceau au chaînage 1+730 (#7), amont. Trace du passage de l'eau sur le côté gauche.



Figure 75 : Écoulement d'eau en pied de remblai, près de la station B (1+720) du côté aval: A) durant les travaux en 2012, et B) en septembre 2014.

L'entrée et la sortie du ponceau du chaînage 1+940 (#11) sont écrasées, tandis que seulement les entrées des ponceaux des chaînages 2+120 (#13) et 2+160 (#14) sont écrasées (Figure 76). En 2014, le ponceau #11 n'avait pas l'entrée écrasée. La présence de sédiment, à l'entrée des ponceaux #13 et #14, visible sur les photos C et D de la Figure 76 confirmerait une circulation de l'eau et par conséquent un drainage assuré. De plus, des sédiments sont présents dans ces ponceaux ainsi qu'en aval.



Figure 76 : Ponceaux écrasées. A) Entrée chaînage 1+940 (#11); B) Sortie chaînage 1+940 (#11); C) Entrée chaînage 2+120 (#13); D) Entrée chaînage 2+160 (#14).

5.2 Le fossé de drainage

Les observations faites sur le fossé de drainage sont regroupées dans le Tableau 13 de l'ANNEXE A. Comme l'illustre la Figure 77, des accumulations d'eau importantes ont été relevées en amont et près des ponceaux des chaînages 1+350 (#3), 1+450 (#4) et 1+550 (#5).



Figure 77 : Accumulations d'eau dans le fossé de drainage à l'entrée des ponceaux. A) chaînage 1+350 (#3); B) chaînage 1+450 (#4); C) chaînage 1+550 (#5).

Des accumulations d'eau plus ou moins importantes ont été aperçues également le long du fossé de drainage de la pente douce. La Figure 78 illustre les accumulations les plus importantes relevées. Les chaînages correspondants à ces accumulations sont notés sous chaque photo. Le nombre important d'accumulation indique une succession de dépressions dans le fossé de drainage.



chaînage 1+460



chaînage 1+490



chaînage 1+470



chaînage 1+500



chaînage 1+530



chaînage 1+580



chaînage 1+630



chaînage 1+540



chaînage 1+610



chaînage 1+820

Figure 78 : Accumulations d'eau importantes du chaînage 1+460 au chaînage 1+820 le long du fossé de drainage de la pente douce.

Une dépression importante à côté du fossé de drainage dans le terrain naturel a été constatée au chaînage 1+870 (Figure 79). La dégradation du pergélisol riche en glace est probablement à l'origine de ce phénomène.



Figure 79 : Dépression dans le terrain naturel à côté du fossé de drainage au chaînage 1+870.

5.3 La pente douce

La pente douce semble bien remplir son rôle d'éloigner l'eau du pied du remblai pour ainsi limiter les transferts de chaleur vers le sol ce qui engendre des dégradations du sol et par conséquent, du remblai routier. Les observations faites sur la pente douce sont regroupées dans le Tableau 13 de l'ANNEXE A.

Des affaissements du sol de la pente douce ont été observés aux chaînages 1+420, 1+720 et 1+870. Les limites des affaissements sont tracées en rouge sur la Figure 80. Les chaînages correspondant aux observations sont indiqués en dessous de chaque photo.





chaînage 1+420

chaînage 1+720



Figure 80 : Affaissement de la pente douce.

Finalement, des tracés d'érosion ont été observés au chaînage 1+220 et sont présentés en rouge sur la Figure 81.



Figure 81 : Erosion de la pente douce au chaînage1+220.

6. INSPECTION 2015

Lors de visites de terrain, en 2013, 2014 et 2015, des inspections visuelles ont été faite tout le long de la route. Une cheminée endommagée a été observée près de la station B (1+720). Celle-ci a été réparée avec du « duct-tape » (Figure 82).



Figure 82 : Cheminée de ventilation endommagée, près de la station A, chaînage 1+720.

La Figure 83 illustre quelques fissures observées du côté du drain thermique qui peuvent être associés aux mouvements du remblai.



Chaînage 1+400

Chaînage 1+450



Figure 83 : Fissures de décrochage du matériau constituant le remblai. Côté aval (drain thermique).

Puis, des traces d'érosion ont été constatée dans la pente du remblai (Figure 84). Les chaînages correspondants aux observations sont indiqués sous chaque photo. Ces observations sont plus localisées vers l'aéroport que vers le village. Le DTS a confirmé des points chauds dans cette zone, en particulier des chaînages 1+900 à 2+100 (voir section 3.4.1). Toutefois, cette érosion semble être l'effet de l'eau qui s'écoule de la route au bas de la pente

venant de l'aéroport. Le DTS enregistre probablement un réchauffement créé par l'eau qui s'écoule jusqu'au bas de la pente.



Chaînage 1+820



Chaînage 1+900



Chaînage 1+880



Chaînage 1+930

Figure 84 : Érosion. Côté aval (drain thermique).

7. DISCUSSION

Dans le contexte de changements climatiques, des travaux de réhabilitation ont été effectués, afin de réduire les dégradations du pergélisol et ainsi stabiliser thermiquement et mécaniquement la route d'accès à l'aéroport de Salluit. Ces travaux incluaient la mise en place d'un drain thermique, l'amélioration du système de drainage et l'adoucissement de la pente du remblai du côté amont.

Le drain thermique est une technique utilisée pour activer l'extraction de chaleur du remblai durant l'hiver et ainsi aider à rehausser le plafond du pergélisol. Le drain a été installé sur 933 m dans le remblai du côté aval, entre les chaînages 1+227 et 2+160.

Le système de drainage de la route a été amélioré pour réduire les impacts du transfert de chaleur de l'eau au sol, et a consisté en l'extension et l'ajout de ponceaux; l'ajout de coussins diffuseurs à la sortie des ponceaux pour éviter de concentrer l'eau et provoquer de l'érosion thermique; l'aménagement d'une pente douce et d'un fossé de drainage pour éloigner l'écoulement d'eau de la route.

Afin d'effectuer le suivi du comportement thermique et mécanique du remblai de la route et du sol naturel sous-jacent et d'évaluer la performance des adaptations, divers instruments ont été installés : des câbles à thermistances verticaux et horizontaux, des thermistances dans le drain thermique et, des inclinomètres verticaux et horizontaux. De plus, un câble à fibres optiques (DTS) a été installé pour évaluer cette technologie dans un contexte de suivi d'infrastructure de transport et de détection précoce de la dégradation du pergélisol. La majorité des instruments sont situées aux chaînages 1+620 et 1+720, respectivement les stations A et B. Malgré certaines difficultés et à l'exception de quelques dysfonctions, les instruments ont tous rempli le but pour lequel ils ont été installés, soit effectuer fourmi des données nécessaires au suivi thermique et mécanique de la route suite aux mesures d'adaptation réalisées.

7.1 Discussion sur le suivi du comportement thermique de la route d'accès à l'aéroport de Salluit

7.1.1 Comportement thermique aux stations A et B

Les températures enregistrées par les câbles à thermistances verticaux des stations A et B ont permis de déterminer l'épaisseur de la couche active et notamment une remontée du pergélisol à certains endroits. Le Tableau 9 récapitule les valeurs des épaisseurs de la couche active à chaque câble à thermistances aux deux stations. Les épaisseurs sont calculées à partir de la surface du sol naturel (A3, A7, B7) ou de l'interface entre le sol naturel et le remblai (tous les autres câbles). Afin d'appuyer ce tableau, la Figure 85 illustre le profil du plafond du pergélisol au cours des trois années de suivi aux stations A et B.

À la station A (chaînage 1+620), le pergélisol semble stable mais une remontée de 50 cm au centre de la route au câble A5, amène le plafond du pergélisol dans le remblai. Ceci était un des objectifs à atteindre avec les mesures d'adaptation, pour ainsi augmenter la stabilité de l'infrastructure. On distingue par contre un approfondissement de 10 cm en 2015 du côté de la pente douce (A4). Cependant, du côté du drain le plafond du pergélisol est stable.

À la station B (chaînage 1+720), de manière générale, le plafond du pergélisol s'est rehaussé durant les trois années de suivi. À cette même station, la remontée est plus marquée du côté de la pente douce du remblai (amont) avec un rehaussement de 70 cm aux câbles B3 et B4. Au centre de la route (B5), la remontée du pergélisol est de 30 cm tandis que du côté du drain thermique (B6 et B7) elle équivaut à 10-15 cm. L'aménagement de la pente douce et l'amélioration du drainage semblent avoir été très bénéfiques à la préservation du pergélisol. Même si l'amélioration est plus timide du côté du drain thermique, elle est tout de même observable et traduit un bon fonctionnement du drain thermique. L'erreur de mise en place du drain (pente non optimale) peut être la cause de la remontée limitée du plafond du pergélisol, mais un suivi à plus long terme permettrait de suivre la remontée.

| Station | Câble à thermistances | Épaisseur de remblai | Épaisseu rapport interf | Remontée du plafond du pergélisol | | |
|---------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|---|------|--------|
| | - | (CIII) | 2013 | 2014 | 2015 | (ciii) |
| | A3 | 0 | 140 | 140 | 140 | 0 |
| A | A4 | 130 | 147 | 112 | 122 | 25 |
| | A5 | 230 | 45 | 0 | -5 | 50 |
| | A6 | 210 | 65 | 65 | 65 | 0 |
| | A7 | 0 | | | | |
| | B3 | 50 | 220 | 180 | 150 | 70 |
| | B4 | 165 | 170 | 120 | 100 | 70 |
| В | B5 | 280 | 50 | 20 | 20 | 30 |
| | B6 | 280 | 15 | 10 | 0 | 15 |
| | B7 | 0 | 160 | 160 | 150 | 10 |

Tableau 9 : Récapitulatif de la profondeur de la couche active par rapport au sol d'infrastructure du remblai. Station A et B pour les 3 années de suivi.

Le plafond du pergélisol à la station A (chaînage 1+620) est représenté sur la Figure 85 à partir du câble A3 jusqu'au câble A6 étant donné que les données du câble A7 ne sont pas disponibles pour les trois années de suivi. Cette même figure confirme une performance du drain thermique plus encourageante à la station B (chaînage 1+720) qu'à la station A (chaînage 1+620). En effet, le plafond du pergélisol est proche du sol d'infrastructure entre les câbles à thermistances B6 et B5 et non au câble A6. La couche active tend normalement à être plus épaisse sous une pente de talus qu'au centre de la route, or à la station B du côté du drain, elle est approximativement de la même épaisseur aux deux endroits par rapport à l'interface entre le sol naturel et le sol d'infrastructure du remblai.



Figure 85 : Allure du plafond du pergélisol aux stations A et B (chaînage 1+620 et 1+720) pour les trois années de suivi.

Les données irrégulières de température obtenues aux câbles A3 et A6 peuvent s'expliquer par une infiltration d'eau si l'on se fie à l'allure des profils thermiques, quoiqu'un mauvais fonctionnement des thermistances ne soit pas exclu. L'hypothèse de l'écoulement d'eau pourrait être vérifiée par l'analyse du comportement dans le temps des températures pour les thermistances concernées. Par conséquent, un suivi des régimes thermiques à ces câbles dans les prochaines années permettrait de déterminer si les irrégularités de température persistent et de mieux cibler la cause du problème. Il sera alors peut-être possible de déterminer si un tel écoulement d'eau est également responsable des données incohérentes enregistrées par le câbles A7.

L'analyse de la distribution spatiale des températures à la station B, a montré une remontée des isothermes sous le drain indiquant que l'air circule correctement dans le drain et facilite ainsi l'extraction de chaleur du sol. Ceci confirme une bonne efficacité du drain à la station B (chaînage 1+720) étant donné que, sans drain thermique, les isothermes devraient remonter au centre du remblai uniquement. Par ailleurs, le fait de ne pouvoir utiliser les données du câble A7 limite un peu les analyses de la distribution spatiale.

7.1.2 Comportement thermique dans le drain

Les températures dans le drain ont été comparées avec les températures enregistrées par les thermistances des câbles A6 et B6 placée à 50 cm sous le drain.

Les résultats de la station B (chaînage 1+720) ont montré que les températures dans le drain sont plus froides que dans le sol en hiver, ce qui permet une bonne circulation de l'air dans le drain et ainsi l'extraction de chaleur du sol, puisque l'échange s'effectue du plus chaud vers le plus froid. Durant cette période, on peut estimer la température dans le drain en fonction de la température de l'air à partir d'une relation exponentielle établie entre les deux paramètres. Toutefois, en avril et en mai, les températures dans le drain sont, généralement égales ou plus chaudes que celles du sol, ce qui, tel qu'anticipé, rend le drain inefficace à extraire la chaleur du sol durant la période chaude.

Les résultats à la station A (chaînage 1+620) ont démontré des comportements thermiques incohérents. Les températures plus chaudes dans le drain que les températures de l'air et du sol en hiver et les températures plus froides dans le drain que les températures de l'air et du sol en été ne représentent pas un résultat cohérent et laisse supposer un mauvais fonctionnement des systèmes de mesure ou une erreur dans la manipulation des données. Aucune relation entre la température dans le drain et la température dans le sol n'a pu être déterminée à cette station.

Par ailleurs, l'ajout des thermistances, en 2015, dans les cheminées d'entrée et de sortie aux stations A et B, ainsi qu'au chaînage 1+340 permettra de comparer les températures de l'air qui circule dans le drain mal installé (stations A et B) et le drain bien installé (1+340).

7.1.3 Performance du DTS

La technologie du DTS est une technologie de pointe qui permet la mesure des températures en tout point le long d'un câble. C'est une approche innovante permettant de détecter de façon précoce les sources ponctuelles de chaleur susceptibles de favoriser la dégradation du pergélisol et ce, tout le long d'une infrastructure de transport. Comme le DTS est une nouvelle technologie appliquée à ce type de suivi, une comparaison a été faite entre les températures enregistrées par le DTS et les câbles à thermistances horizontaux. Les données sont globalement similaires même que la technologie du DTS semble plus fiable que les traditionnels câbles à thermistances.

Les données du DTS ont permis l'identification des points chauds principalement dans le fossé de drainage. L'analyse des températures enregistrées par le DTS a également servi à évaluer la performance du drain thermique. En effet, le DTS montrent que les températures du côté du drain sont plus froides que celles du côté de la pente douce, et ce durant toute l'année, témoignant ainsi de l'efficacité du drain à préserver le pergélisol, mais indiquant aussi des sources ponctuelles de chaleur liées à des accumulations d'eau et de neige dans les dépressions du fossé de drainage. Cette technologie ouvre plusieurs possibilités de suivi des infrastructures nordiques et de l'identification précoce la dégradation du pergélisol.

Les principaux problèmes liés à l'utilisation de cette technologie sont reliés à sa fragilité et à son coût très élevé. Toutefois, une fois l'installation terminée, uniquement trois bris ont eu lieu, ce qui semble montrer une bonne résistance aux conditions d'exploitation en milieu de pergélisol, mais un suivi à plus long terme sera nécessaire avant de conclure sur cet aspect.

7.1.4 Stabilité thermique

L'analyse des températures a permis de confirmer une remontée du plafond du pergélisol à la station B et une stabilisation du plafond du pergélisol à la station A, sauf au centre de la route où, en 2015, le pergélisol est remonté dans le remblai. En somme, l'infrastructure est stable et les données tendent vers une stabilisation accrue dans les années à venir. Par ailleurs, la remontée se fait plus timidement du côté du drain thermique que du côté de la pente douce, ce qui confirme l'efficacité de la stratégie d'éloigner l'écoulement d'eau du remblai.

7.2 Discussion sur le suivi du comportement mécanique de la route d'accès à l'aéroport de Salluit

Dans une étude antérieure (Verreault, 2015), des forages ont été effectué au chaînage 1+600. Les tests effectués sur les échantillons ont révélé une teneur en eau élevée et une quantité importante de particules fines. Aussi, une salinité du sol a été confirmée avec un constat du point de fusion inférieur à 0 °C. En effet, le sol était partiellement dégelé à -2 °C.

L'allure du plafond du pergélisol a été tracée à partir des thermistances de la station B (chaînage 1+720) et est représenté sur la Figure 86 pour une température de 0 °C (traits pleins) et pour une température de -1 °C (pointillés). Ce graphique permet de constater une élévation du plafond du pergélisol chaque année et de souligner l'importance de la salinité du sol. En effet, en tenant compte de celle-ci (température à -1 °C), le plafond du pergélisol se situe 1 m plus bas dans le remblai.





Figure 86 : Allure du plafond du pergélisol à deux températures différentes pour les trois années de suivi; 2013 (bleu), 2014 (jaune) et 2015 (rouge). Chaînage 1+720 proche de la station B.

L'analyse des mouvements perpendiculaires et parallèles à la route (inclinomètres verticaux) a montré que les déplacements maximums se situent entre -0,5 et -2,5 m sous le sol d'infrastructure, soit dans la couche active. À ces profondeurs et considérant la localisation des inclinomètres et la salinité du sol (Verreault, 2015), le pergélisol ne serait pas affecté puisque son plafond se situe entre -2,5 et 3 m (station B). De façon générale, les déplacements sont légèrement plus importants à la station A (chaînage 1+620) mais sont, tout de même, similaires entre les stations (compris entre 155 et 190 mm). Les déplacements sont toujours plus importants de façon perpendiculairement à la route vers le bas de la pente naturelle, et plutôt négligeable de façon parallèle à la route, vers le village.

L'analyse des mouvements verticaux de la route (inclinomètres horizontaux) a montré que les déplacements maximums se situent aux niveaux des épaulements du remblai et les déplacements minimums au centre du remblai. Les mesures à ces inclinomètres ont été difficile en 2015 en raison de la présence d'un obstacle ou d'une dislocation des tubes empêchant le passage de la sonde. Par conséquent, les mesures de cette année contiennent des erreurs et n'ont pas pu être entièrement analysées. Lors des années futures, il faudra s'assurer de toujours prendre les mesures à partir des deux extrémités des inclinomètres de chaque côté de l'obstacle ou la dislocation et de référencer par arpentage les extrémités afin de pouvoir déterminer les mouvements.

Finalement, il semble que le mécanisme de dégradation impliquant le soulèvement au gel dégel de la couche active joue un rôle important dans les mouvements observés du remblai depuis sa réhabilitation. En effet, d'après l'analyse de la forme et de l'amplitude des déplacements mesurés avec les inclinomètres verticaux et l'emplacement des déplacements enregistrés par les inclinomètres horizontaux (épaulements), ce mécanisme expliquerait une bonne partie des mouvements observés. Le mécanisme ne serait donc pas associé à la dégradation ni au fluage du pergélisol mais plutôt à l'activité du gel saisonnier dans la couche active.

Des fissures dans le remblai traduisant les mouvements mesurés avec les inclinomètres, ont été observées. L'intégrité de l'infrastructure n'est toutefois pas en jeu.

7.3 Discussion sur le suivi du système de drainage

Le fossé de drainage peu profond avec empierrement rempli bien son mandat de capter l'eau s'écoulant du terrain naturel en amont de la route, de même que la pente douce qui sert plutôt à éloigner l'eau du remblai de la route. Ces deux adaptations limitent le transfert de chaleur de l'eau à l'infrastructure et au sol sous-jacent, ce qui a été confirmé par une remontée du plafond du pergélisol du côté de la pente douce (Figure 85). Ceci confirme l'efficacité de la stratégie d'adaptation mise en place. Ces améliorations au système de drainage sont bénéfiques à la stabilité de l'infrastructure.

L'ajout et le remplacement de ponceaux a également joué un rôle important dans la stabilisation du remblai, de même que l'imperméabilisation des extrémités en amont ainsi que la mise en place de coussins de diffusion aux extrémités aval. L'efficacité de ces améliorations est toutefois difficile à quantifier, mais un suivi qualitatif, basé sur des inspections annuelles, a été réalisé durant ce projet.

Lors des visites de terrain, plusieurs accumulations d'eau dans le fossé de drainage ont été notées, de même que des ponceaux endommagés et quelques observations concernant la pente douce. Les Tableau 10 et Tableau 11 résument les problématiques. Des recommandations associées suivent chacun des tableaux pour permettre au ministère de planifier les travaux correctifs au système de drainage pour l'été 2016.

| Observation | Côté | Chaînage | Ponceau | Problématiques |
|-------------|-------------|-------------------------|-------------------|--|
| | de la route | _ | | |
| 1 | | 1+660 | #6 | Début d'affaissement du ponceau |
| 2 | amont | 1+660 | #6 | Écoulement d'eau sous ou sur le côté |
| | | 1+730 | #7 | des ponceaux |
| 2 | aval | 1+310 | #2 #2 | Risque d'érosion |
| 5 | avai | 1+660 1+980 | #3 #6 #12 | surélevée au-dessus de la poutre de bois |
| 4 | amont | 1+450 1+980 | #4 #12 | Accumulation d'eau : - en amont, due à l'extrémité trop haute - à l'intérieur des ponceaux |
| 5 | amont | 1+940 2+120 2+160 | #11 #13 #14 | Extrémités écrasées |

Tableau 10 : Résumé des problématiques observés liées aux ponceaux (côtés amont et aval).

Les recommandations associées au problématiques observées sont :

- 1. L'affaissement d'un ponceau est généralement dû à des tassements importants du remblai exerçant des contraintes sur le ponceau. Le ponceau #6 commence à subir des déformations qui risquent de le rendre inefficace. Actuellement, il n'est pas dégradé au point de le remplacer. Par contre, si les déformations du ponceau continuent au point de le rendre inutilisable, il faudra le remplacer et s'assurer que le phénomène ne se reproduise pas. Si le sol où se situe le ponceau est riche en glace, il serait recommandé d'excaver 1,5 m de sol et de le remplacer par un matériau non gélif. De plus une cambrure devrait être imposée au ponceau. Le suivi du comportement de ce ponceau permettra d'évaluer la marche à suivre et l'isolation de celui-ci pourrait être à envisager.
- 2. Les ponceaux ont tous été imperméabilisés, mais comme il y a des écoulements sous ou sur le côté des ponceaux #6 et #7, l'ajout d'une membrane imperméabilisante à ces endroits devrait être considéré.
- 3. Un reprofilage du coussin diffuseur sous la chute d'eau à la sortie du ponceau #2, #3, #6 et #12 devrait être fait. Ainsi, la hauteur de chute d'eau serait réduite et le risque d'érosion atténué. La Figure 87 propose un schéma du concept de reprofilage recommandé.



Figure 87 : Schéma du reprofilage du coussin diffuseur sous la chute d'eau à la sortie des ponceaux #6 et #7.

- 4. En se basant sur le même principe que le schéma présenté sur la Figure 87, un reprofilage du fossé en amont devrait être fait pour les ponceaux #4 et #12 qui sont trop hauts dans le remblai et qui limitent ainsi l'efficacité du drainage. Le remblayage pourrait être fait avec du MG20.
- 5. Les extrémités endommagées des ponceaux #11, #13 et #14 ne semblent pas compromettre le drainage. Cependant, les déformations pourraient s'aggraver au cours des prochaines années. Si les ponceaux doivent être remplacés, il serait préférable de choisir des ponceaux avec des parois plus épaisses ou encore des ponceaux rivetés. L'endommagement de ces ponceaux a probablement été causé par de la machinerie (pelles mécaniques ou déneigeuses).

| Observation | Côté de la route | Chaînage | Endroit | Problématiques |
|-------------|---------------------|---|---------------------|---|
| 1 | aval | 1+820 1+880 1+900 1+930 | épaulement pente | Traces d'érosion dans l'épaulement de la pente |
| 2 | amont | 1+220 | pente douce | Traces d'érosion dues à un écoulement d'eau sur la pente douce |
| 3 | amont | 1+420 1+720 1+870 | pente douce | Affaissements du sol au pied de la pente douce |
| 4 | amont | 1+870 | terrain naturel | Affaissement du sol naturel en bordure du fossé de drainage |
| 5 | amont | 1+350 (#3) 1+450 (#4) 1+460 1+470 1+490 1+500 1+530 1+530 1+540 1+550 (#5) 1+580 1+610 1+630 1+820 | fossé | Affaissements du sol sous le fossé de drainage engendrant d'importantes et fréquentes (en moyenne aux 10 m) accumulations d'eau, localisées près des ponceaux #3, #4 et #5 |

Tableau 11 : Résumé des problématiques observés liées au fossé de drainage, à la pente douce (côté amont).

Les recommandations associées aux problématiques observées sont :

 Afin de rectifier les traces d'érosion dans l'épaulement de la pente du remblai, il est préconisé de simplement répartir le matériau en place avec une pelle mécanique et d'en ajouter au besoin. Si ces zones d'érosion sont fréquentes, ou s'amplifient, il sera à envisager d'utiliser du matériau plus grossier permettant à l'eau de circuler sans toutefois entraîner le matériau en bas de pente.

- 2. Répartir le matériau en place avec une pelle mécanique sur les zones ayant subi une érosion due à l'écoulement de l'eau.
- 3. Afin de rectifier, il est recommandé de niveler la surface en répartissant le matériau en place avec une pelle mécanique. Pour les dépressions importantes, un matériau d'emprunt ordinaire ou un MG-20 peut être utilisé pour combler les dépressions.
- 4. Par ailleurs, aux endroits où il y a de l'érosion active du sol en surface du terrain naturel, nous recommandons de combler les dépressions avec un empierrement similaire à celui utilisé pour protéger le fossé.
- 5. Afin de limiter les accumulations d'eau, des bermes obliques pourraient être mises en place à proximité des ponceaux afin de forcer et diriger l'eau à travers ceux-ci (Figure 88). Il est important que les bermes couvrent la largeur totale du fossé, de la pente douce au terrain naturel. Leur hauteur devrait être minimum celle du terrain naturel adjacent. L'utilisation d'une membrane imperméable est recommandée pour empêcher l'eau de couler à travers les bermes. Puis, les bermes devraient être entièrement recouvertes d'un matériau grossier (diamètre d'environ 100 mm), pour les stabiliser.



Figure 88 : Schéma des bermes pour dévier l'eau dans les ponceaux.

Un reprofilage du fossé est aussi conseillé afin de combler les dépressions et accentuer la pente du fossé. La Figure 89 propose un schéma de ce concept. Le remblayage des dépressions devrait être fait avec le même matériau grossier utilisé dans le fossé de drainage (environ 100 mm de diamètre), ou avec un gravier de type MG20 (moins efficace dans le fossé) recouvert par un matériau grossier.





Source : Périer et al., 2015. Rapport d'étape 3.

Finalement, le possible écoulement d'eau à l'extérieur, sur le côté du ponceau #7 (1+730) en amont, expliquerait la provenance de l'écoulement d'eau observé au pied du remblai près de la station B (1+720) en aval. Il est peu probable que cet écoulement croise les câbles à thermistances verticaux pour ainsi affecter les températures enregistrées, puisque le ponceau est situé au sud de la station B, ainsi que l'écoulement observé en aval, sauf une petite portion vis-à-vis le câble à thermistances B7. Les données de températures enregistrées par la première thermistance, à 50 cm de profondeur, ne montre aucune perturbation.

7.4 Coûts des travaux d'adaptation à Salluit

Les coûts de travaux d'adaptation aux changements climatique sont généralement assez élevés par rapport à des travaux conventionnels. Le contexte d'application de ces méthodes est donc essentiel dans le processus de décision. Dans le cas de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, la nécessité d'assurer la pérennité de ce lien unique pour la communauté justifiait le choix de prendre des mesures pour s'adapter aux changements climatiques. Le Tableau 12 présente le coût total des travaux sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit ainsi que le coût des travaux d'adaptation. Le coût relié aux travaux d'adaptation représente 51 % des coûts totaux. Aussi, les coûts de construction reliés aux travaux d'adaptation représentent une augmentation de 104 % par rapport à des travaux de conservation. Le suivi à court terme du comportement de la route après sa réhabilitation suggère que cette hausse des coûts est justifiée par les bénéfices apportés, soit la stabilisation de l'infrastructure confirmée par l'analyse de l'efficacité des systèmes d'adaptation mis en place. Un suivi à plus long terme permettra de confirmer cette analyse.

| | Coût total des travaux | Coût des travaux d'adaptation | Pourcentage des coûts d'adaptions par rapport au coût total des travaux | Pourcentage des coûts des travaux d'adaptation par rapport aux travaux de conservation | |
|---|---------------------------|-------------------------------------|---|--|--|
| Route d'accès à l'aéroport de Salluit | 5 719 317,55 \$ | 2 915 855,10 \$ | 51 % | 104 % | |

Source : Bureau de coordination du nord du Québec, MTMDET, 2015

Une analyse coûts-bénéfices détaillée pourra être effectuée suite à une plus longue période de suivi, dans le cadre du futur projet « Adapter la conception et développer un cadre de gestion intégré pour les infrastructures de transport du ministère construites sur pergélisol dans le contexte des changements climatiques », actuellement à l'étape de préparation du devis. Cette analyse nécessitera une liste des infrastructures problématiques au Nunavik, des informations relatives aux interventions passées et prévues durant les 5 prochaines années, les coûts d'entretien annuel des routes et pistes d'atterrissage adaptées puis, les coûts d'une intervention temporaire dans un scénario de rupture d'une infrastructure de transport.

8. **RECOMMANDATIONS**

Suite au projet de recherche, les recommandations suivantes sont proposées pour la route d'accès à l'aéroport de Salluit :

- Il est recommandé d'ajouter une thermistance directement sous le drain afin de comparer la température dans le drain avec la température sous le drain. Il serait aussi intéressant d'ajouter d'autres thermistances dans le drain, au-dessus des câbles à thermistances A6 et B6, afin de mieux comparer les températures dans le drain et les températures dans le sol. Cependant, la première proposition est à privilégier.
- Une prolongation du suivi pour quelques années additionnelles permettrait de vérifier l'hypothèses d'un écoulement d'eau pour expliquer les données irrégulières de températures obtenues à A3 et A6.
- Afin de poursuivre le suivi de la route à la station A, il est recommandé de retirer le câble A7 lors d'une prochaine visite pour valider l'intégrité des thermistances et s'assurer que les données incohérentes ne proviennent pas d'une erreur d'identification ou de branchement des thermistances.
- Le suivi du DTS pour une période prolongée nécessitera la réparation du câble à plusieurs endroits. Cette réparation est d'ailleurs planifiée pour l'été 2016.
- La comparaison des températures obtenues avec les câbles à thermistances horizontaux avec les températures enregistrées avec le DTS a permis d'affirmer que les données des thermistances à 4, 6, 12 et 14 m du câble placé du côté amont, sont erronées. Par conséquent, il est recommandé d'extraire les températures enregistrées par ces thermistances lors d'analyses futures. Il n'est cependant pas recommandé de remplacer les thermistances dysfonctionnelles, puisque les données du DTS peuvent être utilisées au besoin.
- Du côté aval, les thermistances à 2 et 4 m étant placées vers l'intérieur du remblai, elles ne doivent donc pas servir en tant que températures au pied du remblai.
- Si la route devait être revêtue, il serait nécessaire de limiter l'absorption de chaleur avec un revêtement à albédo élevé ou avec un traitement de surface bitumineux (BST) avec graviers clairs.

Les recommandations suivantes sont proposées dans le cas d'une installation similaire sur d'autres infrastructures de transport construites sur pergélisol au Nunavik :

 L'installation du drain thermique, sur une portion de la route, ne respectant pas les critères favorisant une efficacité optimale est due à une erreur d'arpentage lors de sa mise en place en 2012. Cette erreur semble entrainer une moins bonne efficacité du drain thermique si on se fie à la faible remontée du plafond du pergélisol de ce côté de la route. Une attention particulière devra être apportée lors de futur travaux d'installation d'un drain thermique.

- Il est essentiel de bien référencer les positions des câbles à thermistances verticaux, surtout au niveau de la profondeur par rapport à la surface du remblai, pour ainsi faciliter les analyses.
- Il est recommandé d'installer le DTS avec grande minutie. Le câble doit être déroulé et déposé au sol manuellement en prenant soin de laisser le jeu nécessaire pour éviter l'accumulation de tensions qui pourraient briser la fibre optique. Le poids du rouleau de câble a nécessité la présence de trois personnes. Un dévidoir sur roue aiderait considérablement la pose du câble à fibres optiques. Une couche de protection de sable devrait être déposée à la pelle, manuellement, au-dessus du câble avant que la pelle mécanique remblaie. Lorsqu'une tranchée doit être creusée, l'utilisation d'une petite excavatrice sur chenille permettrait un déploiement relativement rapide tout en minimisant la perturbation du sol. Il est essentiel d'effectuer la pose de la fibre optique une fois tous les travaux d'excavation terminés pour éviter les risques de bris. Puis, lorsque le suivi inclut des ponceaux, il est nécessaire de synchroniser la pose du câble DTS avec celle des ponceaux, car il est pratiquement impossible de déployer le DTS sous un ponceau en place.
- Malgré les précautions et la gaine métallique protégeant les fibres optiques, le câble DTS est toutefois très flexible et plie très facilement, parfois jusqu'au point de rupture, occasionnant des bris lors de sa mise en place. Ces bris sont réparables lorsque le câble est accessible. Il faut toutefois faire affaire avec un spécialiste de la fibre optique ou se munir de l'équipement permettant de faire la réparation (son coût en 2015 était de 15 000\$).
- Finalement, le fonctionnement de ce type de câble DTS nécessite un courant de 120V, avec un transformateur à proximité. Un voltage trop bas aurait comme conséquence d'endommager le système d'acquisition.

9. CONCLUSION

La route d'accès à l'aéroport de Salluit subissait des déformations dues à la fonte du pergélisol causée en partie par les changements climatiques. Des travaux d'adaptation ont donc été réalisés afin d'atténuer les dégradations et de préserver le pergélisol sous-jacent. Un drain thermique a été mis en place du côté aval de la route, une pente douce a été aménagée du côté amont de la route et le système de drainage (ponceaux et fossé de drainage) a été amélioré. Afin de suivre le comportement thermique et mécanique du remblai, de l'instrumentation a été installée. Des câbles à thermistances verticaux et horizontaux mesurent les températures dans le sol et en surface, des thermistances mesurent la température dans le drain thermique, des inclinomètres verticaux et horizontaux mesurent les mouvements latéraux et verticaux du remblai. Aussi, une nouvelle technique de détection précoce de la dégradation du pergélisol a été testée, soit le câble à fibres optiques (DTS) qui permet de mesurer la température dans le sol en tout point et de façon linéaire.

Le présent document a présenté les objectifs du projet, les travaux d'adaptation réalisés, l'instrumentation installée, l'analyse des résultats obtenus et les recommandations proposées.

L'analyse du comportement thermique sur trois années de suivi a permis de tirer les conclusions suivantes :

- 1) Le plafond du pergélisol à la station A (chaînage 1+620) est stable avec une remontée dans le remblai au centre de la chaussée;
- 2) Le plafond du pergélisol à la station B (chaînage 1+720) est remonté;
- La remontée du plafond du pergélisol est notable du côté de la pente douce, suggérant une bonne réponse aux modifications du système de drainage et à l'ajout d'une pente douce;
- 4) Une efficacité mitigée du drain thermique à la station A (chaînage 1+620);
- 5) Une bonne efficacité du drain thermique à la station B (chaînage 1+720);
- Une perte d'efficacité qui semble significative pour la section du drain qui n'a pas été installée correctement;
- 7) Une relation exponentielle entre la température dans le drain et la température de l'air lorsque le drain possède les conditions nécessaires pour un bon fonctionnement.

Cette information servira de fondement au développement d'une méthode empirique de conception du drain thermique qui sera finalisée dans le cadre du projet de maîtrise de Vincent Lamontagne (génie civil, Université Laval).

L'analyse du comportement mécanique sur trois années de suivi a permis de déterminer que :

- Les mouvements latéraux maximums enregistrés en pied de remblai se situent entre 0,5 et 2,5 m de profondeurs, soit dans la couche active au-dessus du pergélisol. En effet, étant donné la salinité importante du sol naturel, le plafond du pergélisol se situerait 1 m plus bas que l'isotherme 0°C indiqué par les thermistances.
- 2) Les mouvements verticaux maximums du remblai se situent aux épaulements;
- Le mécanisme de dégradation serait associé à l'activité du gel-dégel saisonnier dans la couche active.

La technologie du DTS s'est avérée être un outil très efficace pour suivre et comprendre la distribution spatiale et temporelle des températures le long d'une infrastructure linéaire construite sur pergélisol. Les températures enregistrées par le DTS, et validées avec celles enregistrées par les câbles à thermistances horizontaux, ont permis de :

- 1) Localiser les points chauds du remblai qui sont situés en plus grande concentration vers le chaînage 2+140 et;
- Vérifier l'efficacité du drain thermique par les mesures de températures plus froides sous le drain par rapport aux températures mesurées du côté amont de la route ou dans le sol naturel.

La technique offre plusieurs possibilités pour la localisation de points chauds, reliés par exemple à des écoulements d'eau sous le remblai ou pour le suivi des températures dans le temps et dans l'espace le long d'une infrastructure linéaire. Un suivi à plus long terme permettra de répondre aux interrogations concernant la durabilité du câble DTS dans un environnement dynamique comme le pergélisol.

Des inspections visuelles ont permis de constater :

- 1) Des accumulations d'eau dans le fossé de drainage;
- 2) Des ponceaux trop hauts et/ou endommagés;
- 3) Un affaissement de la pente douce;
- 4) Des fissures du côté du drain thermique.

Concernant, les dégradations observées, il est recommandé de :

- Reprofiler le fossé de drainage (en accentuant sa pente longitudinale) pour éviter les accumulations d'eau et assurer un écoulement efficace par les ponceaux (travaux prévus à l'été 2016);
- Mettre en place des bermes de déviation dans le fossé de drainage pour forcer l'eau à utiliser tous les ponceaux et ainsi limiter les accumulations d'eau en bas de pente (travaux prévus à l'été 2016) et;
- Mettre en place une membrane imperméabilisante autour des ponceaux auxquels l'eau s'écoule dessous et donc dans le remblai;
- 4) Réajuster les coussins diffuseurs à la sortie des ponceaux afin d'éviter une érosion sous la chute d'eau;
- 5) Passer avec une pelle mécanique sur les zones aillant subit une érosion due à l'écoulement de l'eau (entre les chaînages 1+820 et 1+930 environ).

En somme, la performance (refroidissement du sol et remontée du plafond du pergélisol) du système d'extraction de chaleur (drain thermique) mis en place a été documentée afin de valider son efficacité dans le contexte du remblai routier de Salluit. Les informations recueillies serviront de fondement pour affiner la conception de cette méthode ainsi que et sa mise en place dans le futur. La performance du système de drainage a aussi été documentée et son efficacité à réduire les effets nocifs des écoulements de surface sur la stabilité thermique du pergélisol aux abords de la route a été évaluée. De plus, la stabilité mécanique du remblai à partir de l'information obtenue par mesures inclinométriques a été documentée. Puis, une approche innovatrice de suivi de performance et de détection précoce de dégradation du pergélisol en utilisant la technologie du

DTS a été développée. Et finalement, les difficultés rencontrées lors de la mise en place de ces systèmes ont été documentées et les améliorations requises identifiées.

Bien que les tendances observées soient encourageantes pour la plupart des systèmes utilisés pour la stabilisation de la route, il y aurait intérêt à poursuivre le suivi de la chaussée pour une période additionnelle de trois ans. Le suivi permettrait de confirmer les tendances observées et de documenter la performance à long-terme des interventions. Cette information est essentielle pour pouvoir établir le bénéfice associé aux interventions qui permettra d'en déterminer le rapport coût/bénéfice quand les données sur les comportements des infrastructures du Nunavik seront disponibles. Ces deux aspects seront couverts dans le cadre d'un futur projet qui portera sur le suivi et l'évaluation des adaptations aux CC faites sur les infrastructures du MTMDET au Nunavik.

Par ailleurs, il serait important de développer et de mettre en application un plan d'entretien des systèmes de protection implantés sur les infrastructures de transport dans le cadre de la stratégie d'adaptation aux changements climatiques. Il serait important que le MTMDET et son partenaire, l'Administration régionale Kativik (Kativik Transport) se dote d'une capacité de suivi et d'intervention pour corriger les défectuosités des systèmes de protection essentiels au bon fonctionnement de ses infrastructures de transport du Nunavik.

10. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLARD, M., FORTIER, R., FORTIER D., (2004), *Caractérisation du pergélisol aux aéroports du Nunavik – Résultats des travaux effectués à l'été 2004*, Centre d'Études Nordiques de l'Université Laval, Québec, 24 pp.

Association des transports du Canada (ATC) – Transport Association of Canada (TAC), (2010), *Guidelines for development and management of transportation infrastructure in permafrost regions*, Transportation association of Canada, Ottawa, Canada, 177p.

BUREAU DE COORDINATION DU NORD DU QUÉBEC, (janvier 2015), *Coûts des travaux sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit.* (Communication personnelle)

CHATAIGNER, Y., (mars 2008), Modélisation du transfert thermique dans un remblai sur pergélisol et élaborations de stratégies pour faire face aux changements climatiques. Mémoire de maitrise, Université Laval, Québec, 137 pp.

CHATAIGNER, Y., GOSSELIN L., DORÉ G., 2009. *Optimization of embedded inclined openended channel in natural convection used as heat drain*, Int. J. of Thermal Sc., Elsevier, 48:6, pp. 1151-1160.

CLARIDGE, F.B., MIRZA, A.M., (1981). *Erosion Control along Transportation Routes in Northern Climates,* Arctic, Vol. 34, No. 2.

DORÉ, G., ZUBECK, H., (2008). Cold Regions Pavement Engineering, McGraw-Hill/ASCE Press.

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 transports du Québec, Québec.

EBA Engineering Consultants Ltd., (mars 2000). *Conceptual Design Update, NWT Highway No. 3*, Report submitted to Government of the Northwest Territories, Department of Transportation, Yellowknife, File No. 0701-98-13330.001.

FICHEUR, A. (2011). Expérimentation de techniques de mitigation des effets de la fonte du Pergelisol sur les infrastructures de transport du Nunavik : Aéroport de Tasiujaq. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec.

GOUVERNEMENT DU CANADA, (2010), Affaires autochtones et Développement du Nord Canada. Lignes Directrices sur l'aménagement des Terres du Nord - Accès : routes et sentiers.

GRAVEL-GAUMOND, F., (2014). Suivi des comportements thermique et mécanique de la piste de Puvirnituq, Mémoire de maîtrise en génie civil, Université Laval, 254 p.

L'HÉRAULT, E., (2009), Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik. Mémoire de maîtrise. Université Laval. Québec. Canada

JOHNSTON, G.H., (1981). *Permafrost: Engineering Design and Construction*, Associate Committee on Geotechnical Research, National Research Council of Canada, Wiley & Sons.

JORGENSEN, A.S., DORÉ, G., VOYER, E., CHÂTAIGNIER, Y., GOSSELIN, L., (2008), *Assessment of the effectiveness of two heat removal techniques for permafrost protection*, Cold Regions Science and technology, 53, pp. 179-192

KHROUSTALEV, L.N., (2005). *Fundamentals of Geotechnics in Permafrost Zone* (in Russian), Moscow, MSU Publishers.

KONRAD, J.-M., (octobre 1999), *Frost Susceptibility Related to Soil Index Properties*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 36, no. 3, 403-417 pp.

LEMIEUX, C., GRABUNDZIJA, D., DORÉ, G., ALLARD, M., (mars 2013). Suivi du comportement thermique 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 1 réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Département de génie civil et Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 44 pp.

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, 57 pp.

LEPAGE, J. M., DORÉ, G., FORTIER, F. (2010), *Experimentation of mitigation techniques to reduce the effects of permafrost degradation on transportation infrastructures at Beaver Creek experimental road site (Alaska Highway, Yukon).* In Proceedings of the Join 63 rd Canadian Geotechnical Conference & 6th Canadian Permafrost Conference, Calgary, Alberta. pp. 526-533.

PERIER, L., LEMIEUX, C., LAMONTAGNE, V., ROGER, J., DORÉ G., ALLARD M., (mars 2015). 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 3 réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Département de génie civil et Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 85 pp.

ROGER, J., ALLARD, M., SARRAZIN, D., L'HÉRAULT, E., DORÉ, G., (2015). *Evaluating the Use of Distributed Temperature Sensing for Permafrost Monitoring in Salluit, Nunavik.* GEOQuébec, Québec, Canada, 6pp.

VERREAULT, J., (2015), *Caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du Nunavik*, Université Laval, Québec, 170 pp.

VOYER, E., (2009), *Expérimentation de méthodes de mitigation de la dégradation du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik, Nord du Québec. Mémoire de maîtrise*. Université Laval. Québec. Canada

YUKON HIGHWAYS and PUBLIC WORKS, (2013). *Shakwak Highway Project: Highway Restoration and Bituminous Surface Treatment km 1880.8 to km 1902.5*, Alaska Highway #1, Yukon

ANNEXE A

OBSERVATIONS DE TERRAIN

Le Tableau 13 (en orange) présente les observations de terrain de 2014 et 2015 effectuées du côté amont (pente douce) tandis que le Tableau 14 (en bleu) présente celles effectuées du côté aval (drain thermique). Les chaînages, lorsque connus, les points GPS et les numéros de photo associés aux observations sont indiqués dans les tableaux. Il est à noter que lors de l'inspection en 2014, une couche de neige ne permettait pas l'observation des petites accumulations d'eau ainsi que certains ponceaux.

La Figure 90 montre la localisation des points GPS, des ponceaux, des stations A et B et des inclinomètres situés aux chaînages 1+660 et 2+000; les images sont présentées du village vers l'aéroport.

| | | | | OBSERVATI | IT (PENTE DOUCE | E) | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|--|---------------------------|---|---|---|-------------|--|--|----------------------------|--|
| Chaînage | Points GPS | Accumulation d'eau Profondeur x Longueur x largeur (cm) | | Accumulation d'eau Profondeur x Longueur x largeur (cm) | | Pon | ceaux | État du drainage | | Observation sur le remblai | |
| | Amont | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | | |
| DÉBUT FOSSÉ (près village) | 93 | | | | | Succession d'accumulation d'eau dans le fossé (4942-4943) | idem à 2014 | | | | |
| | 135 | | 5x400x80 (5368-5369) | | | | | | | | |
| | 134 | | 3x100x50 (5367) | | | | | | | | |
| | 94 | | | | | | | Dépression / affaissement / décrochement en pied de remblai (4947-4949) | Erosion et affaissement (5640-5642- 5366) | | |
| 1+250 | 95 | Accumulation d'eau avant le ponceau (4997) | idem à 2014 | N°1 : Trop de neige | N°1 : Rien à signaler (5363-5364) | | | | | | |
| 1+310 | 97 | | | N°2 : Trop de neige (5002-5003) | N°2 : Rien à signaler (5362) | | | | | | |
| 1+350 | 100 | Accumulation d'eau juste avant et après le ponceau (5011) | idem à 2014 | N°3 : Rien à signaler | N°3 : Rien à signaler (5357-5359) | | | | | | |
| | 101 | 20x400x125 (5007-5013) | 20x700x400 (5355-5356) | | | | | Rien à signaler | Accumulation de sédiment (5355-5356) | | |
| | 132 | | 10x400x100 (5353-5354) | | | | | Rien à signaler | Bas de pente instable sur 10 m | | |
| | 103 104 | 25x2000x175 (5018-5026) | 50x2000x300 | | | | | | | | |

 Tableau 13 : Observation de terrain du côté amont de la route (pente douce)

| Chaînage | Points | Accumulation Profondeur x I | on d'eau Longueur x | Pon | Ponceaux | | ainage | Observati | on sur le |
|-------------------------------|-------------|---|---|---|------------------------------------|---|--------------|-----------|-----------|
| J J | GPS | largeur | (cm) | | | - | | rempiai | |
| | Amont | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 |
| 1+450 | 105 | Accumulation devant le ponceau de 15 cm de profondeur (5028-5035) | Accumulation devant le ponceau | N°4 : Écoulement d'eau sous le ponceau | N°4 : Extrémité trop haute | | | | |
| | 106 | 10x200x30 (5037) | 5x350x100 (5348-5349) | | | | | | |
| | 107- 108 | 15x1000x50 | 10x1600x50 | | | | | | |
| | 109 | 5x150x50 | (5547) | | | | | | |
| | 110 | 10x100x50 | | | | | | | |
| | 111 | 10x100x50 | 4 00 00 | | | | | | |
| | 112 | Neige fondue sur | 1x80x80 | | | | | | |
| | 110 | 50 cm de long | (5344) 8x1000x200 | | | | | | |
| | 113- | (5039) | 6X1000X200 (5343) | | | | | | |
| | 115 | 5x100x50 | (33+3) | | | | | | |
| | 117- | 40x600x100 | 30x1300x250 | | | | | | |
| | 118 | (5040-5042) | (5342) | | | | | | |
| | 128 | | 10x250x100 (5341) | | | | | | |
| | 119 | 10x200x60 (5043-5044) | | | | | | | |
| | 120 | | 12x1100x250 | | | | | | |
| 1+550 (route Salluit 2) | 21 | Légère accumulation d'eau (4758-4760) | Accumulation d'eau avant le ponceau (5340) | N°5 : Rien à signaler | N°5 : Rien à signaler (5340) | Bon drainage | Bon drainage | | |
| | 22 | 10x200x100 (4763-4764) | Aucune | | | | | | |
| | 23 | 5x300x100 (4765) | 5x300x100 (5280-5282) | | | | | | |
| | 24 | 5x400x100 | 1x300x100 (5283-5285) | | | | | | |
| | 25 | | | | | Son d'écoulement sous le remblai (4766) | Bon drainage | | |
| Chaînage | Points GPS | Accumulatio Profondeur x I largeur | on d'eau _ongueur x (cm) | Pon | ceaux | État du dr | ainage | Observation sur le remblai | |
|-----------------------|---------------|--|--|---|---|---|--|----------------------------|------|
| | Amont | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 |
| | 26 | 10x200x150 (4767-4768) | | | | Ecoulement vers le village suivant la pente du fossé (4768) | Bon drainage | | |
| | 27 | 5x100x40 (4769-4770) | 5x200x200 (5289-5290) | | | Chenal venant du terrain naturel se déverse dans le fossé de drainage (4769-4770) | Bon drainage | | |
| | 28 | | 1x100x50 (5291-5293) | | | Bon drainage | Bon drainage | | |
| | 29 | | 1x100x50 (5294-5295) | | | Pente du fossé plus faible | Pente du fossé plus faible (5295) | | |
| 1+630 | 30 | | | | | | | | |
| | 30-31 | Succession d'accumulation de 5 à 10 cm de profondeur (4776-4777) | 5x400x150 (5296-5297) 1x100x100 (5302-5303) | | | | | | |
| | 124 | | 5x100x100 (5298-5299) | | | | | | |
| | 125 | | 5x100x980 (5300-5301) | | | | | | |
| 1+660 | 32 | | | N°6 : Trop haut | N°6 : Trop haut (5305-5306) | | | | |
| | 33 | 5x40x40 | | | | Bon drainage | Bon drainage (5309) | | |
| 1+720 STATION B | 34 | | | Inc | clinomètre horizonta | al 1+720 (5491, 5494) | | | |
| 1+730 | 35 | | | N°7 : Présence de glace en dessous et sur le côté (4779) | N°7 : Rien à signaler (5311-5312) | Bon drainage | Accumulation de sédiment avant le ponceau (5311) | | |

| Chaînage | Points GPS | Accumulatio Profondeur x L largeur | on d'eau .ongueur x (cm) | Pon | ceaux | État du dr | ainage | Observation sur le remblai | |
|-------------------------|---------------|--|--------------------------------|---|--|--|---|----------------------------|--------------|
| | Amont | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 |
| | 36 | 5x4x30 | 1x100x200 (5313-5314) | | | Bon drainage | Bon drainage | | |
| | 37 | 5x700x100 | 1x100x100 (5315-5317) | | | Bon drainage | Bon drainage | | |
| | 38 | 100x1000x100 (4781-4782-4783) | 2x700x200 (5318-5319) | | | Pente du fossé presque nulle. Dépressions. | Bon drainage | | |
| 1+830 | 39 | | | N°8 : Rien à signaler (4784) | N°8 : Rien à signaler (5320) | Bon drainage | Dépression à l'entrée du ponceau (5321) | | |
| 1+840 | 40 | | | N°9 : Rien à signaler (4785) | N°9 : Rien à signaler (5322-5323) | | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | |
| 1+840 | 41 | | | N°10 : Rien à signaler | N°10 : Rien à signaler (5324) | | | | |
| 1+870 | 42 | | | | | Grande dépression dans le terrain naturel (4788-4792) | Grande dépression dans le terrain naturel (5325-5326) | | |
| | 43 | | | | Dépression dans le fossé (4795) | | Dépression dans le fossé (5327-5329) | | |
| 1+940 | 44 | | | N°11 : Un peu trop haut (4797) | N°11 : Extrémité écrasée (5330) | | | | |
| | | Pente douce du | remblai minimal | e (atteignant 1V : | 38H) pour correspo environ | ndre au terrain nature 2+120 | l qui est au même | e niveau que la ro | ute. Jusqu'à |
| 1+980 | 45 | | | N°12 : Affaissement au milieu du ponceau | N°12 : Extrémité un peu trop haute et affaissement au milieu (5331) | Dépression dans le fossé | | | |
| 2+000 INCLINO HOR | 46 | | | 2014 (481 | 5) et 2015 (5500, 5 | 5509, 5511-5513, 579 | 5-5797) | | |

| Chaînage | Points GPS | Accumulation d'eau Profondeur x Longueur x largeur (cm) | | Por | nceaux | État du drainage | | Observation sur le remblai | |
|----------------------------|---------------|---|------|-----------------------------------|---|------------------|------|----------------------------|------|
| | Amont | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 |
| 2+120 | 48 | | | N°13 : Trop de neige (4824) | N°13 : Extrémité écrasée (5337) | | | | |
| 2+160 | 49 | | | N°14 : Trop de neige | N°14 : Extrémité écrasée et accumulation de sédiment à l'entrée et dans le ponceau (5338) | | | | |
| FIN FOSSÉ (sablière) | 50 | | | | • • • | | | | |

| Tableau 14 : Observation | de terrain du côté aval de | e la route (drain t | hermique) |
|--------------------------|----------------------------|---------------------|-----------|
|--------------------------|----------------------------|---------------------|-----------|

| | | | | OBSER | VATIONS CÔTÉ AV | AL (DRAIN THI | ERMIQUE) | | | |
|----------|---------------|---|---|--|--|------------------|--------------------|--|--|--|
| Chaînage | Points GPS | Accumul d'ea Profond Longue largeur | lation lu leur x Pon eur x (cm) | | ceaux | État du drainage | | Observation | Observation sur le remblai | |
| | Aval | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | |
| | 92 | | | Début | t de la section de route | adaptée (côté av | al, drain thermiqu | ie) | | |
| 1+250 | 91 | | | N°1 : Rien à signaler (4939) | N°1 : Rien à signaler (5392) | | | | | |
| | 90 | | | | | | | Fissure ou affaissement sur 8m de long de 5 à 20cm de large, collé sur bord de la pente (4937) | (5391) | |
| 1+310 | 89 | | | N°2 : Rien à signaler (4935-4936) | N°2 : Rien à signaler (5389-5390) | | | | | |
| 1+350 | 88 | | | N°3 : Extrémité surélevée de 10 cm | N°3 : Extrémité surélevée de 10 cm (5387-5388) | | | | | |
| 1+400 | 139 | | | | | | | | Début d'affaissement et fissure sur 7-8 m (5384-5386) | |
| | 87 | | | | | | | 3 légers affaissements sur l'épaulement (4930-4931) | idem à 2014 | |
| 1+450 | 136 | | | | | | | Rien à signaler | Affaissement et fissures sur 10 m (5381) | |
| 1+450 | 86 | | | N°4 : Rien à signaler (4926-4927) | N°4 : Accumulation d'eau dans le ponceau (5380) | | | | | |

| Chaînage | Points GPS | Accumulation d'eau Profondeur x Longueur x largeur (cm) | | Ponceaux | | État du drainage | | Observation sur le remblai | | |
|--------------------------|---------------|---|------|--|---|------------------|-------------------|--|--|--|
| | Aval | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | |
| | 85 | | | | | | - | Affaissement ou érosion de l'épaulement | Érosion (5378-5379) | |
| | 84 | | | | | | | Fissures (4920-4925) | Plusieurs fissures plus larges sur 6 m (5377) | |
| | 82 | | | | | | | | Plusieurs fissures, sur 6 m (5376) | |
| 1+550 | 81 | | | N°5 : Rien à signaler (4917-4919) | N°5 : Rien à signaler (5375) | | | | | |
| | 79-80 | | | | | | | Érosion (4916) | (5394-5395) | |
| | 77 | | | | | | | Fissure de 2 cm de profondeur sur 16 m de long à 20 cm à 1 m du bord de la pente (4915) | Fissure (5398) | |
| 1+620 STATION A | 76 | | | | | | | | | |
| 1+660 INCLINO VERT | 75 | | | N°6 : Extrémité un peu haute (4913-4914) | N°6 : Extrémité un peu haute, ne voit pas de l'autre côté (5402) | | | | | |
| | | | | Cheminée cassée o | dans le coude, du côté | du poteau : répa | arée en 2014 avec | du « duct-tape » | | |
| 1+720 STATION B | 74 | | | | Inclinomètre h | norizontal 1+720 | (5493) | | | |
| 1+730 | 73 | | | N°7 : Rien à signaler (4905) | N°7 : Rien à signaler (5403) | | | | | |

| Chaînage | Points GPS | Accumulation d'eau Profondeur x Longueur x largeur (cm) | | Ponceaux | | État du drainage | | Observation sur le remblai | |
|----------|---------------|---|----------------|--|---|---|--|--|--|
| | Aval | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 |
| | 72 | | | | | | | Fissure avec décrochage de matériau (2,5 cm) sur 13-14 m (4901-4904) | Fissure avec décrochage de matériau (2 m) sur 5 m (5404-5405) |
| | 71 | | | | | | | Fissure fine sur environ 30 m (4897-4900) | Fissure avec décrochage de matériau (2-3 cm) sur 5 à 10 m (5406-5407) |
| | 70 | | | | | | | Fissure de 2cm sur environ 30m à 10-40cm du bord de la pente (4897-4900) | Ruissellement sur le talus (5407) |
| 1+820 | 69 | | | | | | | Érosion sur l'épaulement (4891) | Érosion sur l'épaulement (5412-5413) |
| 1+830 | 68 | 10x1000x50 (4893-4896) | idem à 2014 | N°8 : L'eau sortant du ponceau utilise seulement la moitié du coussin de diffusion (4884-4888) | N°8 : L'eau sortant du ponceau utilise seulement la moitié du coussin de diffusion (5414-5415) | | | | |
| | 67 | | | | | Écoulement provenant de sous le remblai (4871-4873) (4881-4883, 4887) | Écoulement provenant de sous le remblai (5416) | | |

| Chaînage | Points GPS | Accumulation d'eau Profondeur x Longueur x largeur (cm) 2014 2015 | | Pon | ceaux | État du drainage | | Observation sur le remblai | |
|-------------------------|---------------|--|------|--|---|------------------|--------------|---|---|
| | Aval | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 |
| | 66 | | | | | | | Plusieurs chenaux d'érosion (4874-4878) | Plusieurs chenaux d'érosion (5420-5423) |
| 1+840 | 65 | | | N°10 et 9 : Rien à signaler (4867-4870) | N°10 et 9 : Accumulation de sédiment (5417-5419) | | | | |
| 1+900 à 1+930 | 63-64 | | | | | | | Érosion sur l'épaulement (4850 à 4866) | Érosion sur l'épaulement. Chenaux d'écoulement sur 5 m (5424-5427) |
| | 62 | | | | | | | | Affaissement |
| 1+940 | 61 | | | N°11 : Extrémité tordue | N°11 : Extrémité tordue (5428) | | | | |
| | | | | | Pas de drain thermiqu | le entre ponceau | N°11 et N°12 | | |
| 1+980 | 60 | | | N°12 : Extrémité surélevée légèrement (4835 et 4841- 4845) | N°12 : Accumulation de sédiment (5431) | | | | |
| | 59 | | | | | | | Fissure de 2 à 5 cm de profondeur sur 2 à 4 m de long à 50 cm du bord de pente | (5432) |
| 2+000 INCLINO HOR | 58 | | | | | (5493) | | | - |
| | 57 | | | | | | | Fissure de 1 m de long à 10 cm du bord de pente | Fissure (5434-5435) |

| Chaînage | Points GPS | Accumulation d'eau Profondeur x Longueur x largeur (cm) | | Pon | ceaux | État du drainage | | Observation sur le remblai | |
|----------|---------------|---|------|--|--|--------------------|-----------|---|-----------------------------|
| | Aval | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 | 2014 | 2015 |
| | 56 | | | | | | | Fissure discontinue sur 9 m à 50 cm du bord de pente (4837-4839) | Fin de la fissure (5436) |
| | 54-55 | | | | | | | Fissure de 1 à 2 cm de profondeur sur 4 m de chaque côté de la cheminée (4829-4831) | Fissure (5437) |
| 2+120 | 53 | | | N°13 : Eau gelée à l'extrémité (4827-4828) | N°13 : Présence de sédiment (5438) | | | | |
| 2+160 | 51 | | | N°14 : Rien à signaler | N°14 : Rien à signaler | | | | |
| | 52 | | | | 1 ^{ière} cheminée ver | ntilation du drain | thermique | | |





Figure 90 : Localisation des points GPS, des ponceaux (jaune) et des stations d'étude (rouge), du village vers l'aéroport.

ANNEXE B

PROCEDURE DE LECTURE DES INCLINOMETRES

Inclinomètres verticaux : prise de mesures.

Pour les inclinomètres verticaux, les axes A et B doivent être choisie dès l'installation. L'axe A doit être parallèle au déplacement anticipé comme le présente la Figure 91 ci-dessous. À Salluit, le déplacement selon A+ représente un mouvement vers le bas de la pente du terrain naturel. Le déplacement selon A- correspond à une direction vers le remblai. Les déplacements selon B+ et B- représentent respectivement un mouvement vers l'aéroport et vers le village.



Figure 91 : Position des axes des tubes inclinométriques verticaux

Afin de mesurer les déplacements subis par le tube inclinométrique :

- Mettre la roue « Upper wheel » de la sonde (Figure 92) dans la rainure A+ du tube (Figure 91). L'accéléromètre est très sensible au choc. Manipuler la sonde avec soin en évitant les chocs, surtout au moment de relâcher les roues lors de l'insertion dans le tube;
- 2. Descendre la sonde jusqu'au bas du tube;
- 3. Attendre que la sonde soit stabilisée (*noise bar, standard deviation*) et que le « *average number* » soit au plus bas ce qui procurera une meilleure précision;
- 4. Insérer le capuchon métallique rouge « cable grip »;
- 5. Prendre les mesures en la remontant, en suivant les marques sur le câble et en permettant la stabilisation avant chaque enregistrement de lecture;
- 6. Une fois terminé, tourner la sonde de 180° de façon à ce que la roue « *Lower wheel* » de la sonde soit dans la rainure A+ du tube;
- 7. Descendre la sonde jusqu'au bas du trou;
- 8. Prendre les mesures en la remontant;
- 9. Refaire ces étapes pour l'axe B en créant un nouveau fichier.

* Les mesures des axes A et B doivent être enregistrées dans deux fichiers différents.

Il est à noter qu'à l'inclinomètre situé au chaînage 1+720, la sonde rencontre des « encoches » (déformations ou rotation du tube) à 2,87 et à 3,4 m de profondeur.



Figure 92 : Position des roues sur la sonde

Inclinomètres horizontaux : dégel des tubes inclinométriques

Les bouchons de glace se situent entre 5,95 et 12 m au chaînage 1+720 et entre 5 et 12 m au chaînage 2+000 et mesurent respectivement 7 et 6,5 m de longueur.

Afin de déglacer chacun des inclinomètres horizontaux, il faut brancher le fil chauffant placé à l'intérieur du tube, à une génératrice attachée au poteau Hydro-Québec, pendant 1h à 1h30. Il faut prévoir une extension électrique. Pendant que le fil chauffant est en fonction, laisser le bouchon sur le tube de l'inclinomètre du côté aval (bas) et remplir avec un jet d'eau sous pression (louer une machine à pression et gros une réservoir d'eau, au garage du *Land Holding*). Lorsque l'eau rempli le tube jusqu'à l'extrémité amont, enlever le bouchon en aval. Cette procédure permet d'évacuer rapidement plusieurs morceaux de glace. Pour finir de dégeler les tubes utiliser un boyau d'arrosage (ou un tuyau de laveuse).

Inclinomètres horizontaux : prise de mesures.

L'inclinomètre du chaînage 1+720 mesure 25 m.

L'inclinomètre du chaînage 2+000 mesure 24 m.

La mesure à 0 m est prise en pied de remblai du côté aval (drain thermique) et les mesures à 25 ou 24 m, dépendamment de l'inclinomètre, correspondent au pied de remblai du côté amont (pente douce).

Les étapes à suivre pour la prise de données des inclinomètres horizontaux est présentée cidessous sur la Figure 93. L'étape 1 n'est pas nécessaire à Salluit, puisqu'un fil de fer est déjà installé dans le tube, il faut toutefois d'abord retirer le câble chauffant.

1. Brancher la sonde inclinométrique et l'accrocher au fil de fer à partir du côté amont;

2. À partir du côté aval, tirer le fil de fer pour descendre la sonde à l'extrémité aval du tube. Il ne faut pas prendre de mesure à ce moment-là;

*Lors du premier passage de la sonde pour faire l'acquisition des données, le 0° doit être vers le « data logger » et donc la personne prenant les mesures du côté amont, et les « *upper wheels* » doivent être vers le bas (sol) (Figure 94).

- 3. Attendre que la sonde soit stabilisée (*noise bar, standard deviation*) et que le « *average number* » soit au plus bas ce qui procurera une meilleure précision;
- 4. Prendre les mesures en la remontant, en suivant les marques sur le câble et en permettant la stabilisation avant chaque enregistrement de lecture;
- 5. Une fois terminé, il faut tourner et reconnecter la sonde avant d'appuyer sur ok;

*Lors de la deuxième saisie de données, le 180° doit être vers le « *data logger* » et donc la personne prenant les mesures du côté amont, et les « *upper wheels* » doivent être vers le haut (chaussée) (Figure 94).

- 6. Descendre la sonde jusqu'à l'extrémité aval du tube et prendre une nouvelle série de mesures.
- 7. Lorsque terminé, repasser le câble chauffant. Si c'est difficile, utiliser un « *fisher* » ou emprunter huit tuyaux de cuivre au garage.



1. Fisher le fil de fer jusqu 'à l'autre extrémité



Figure 93 : Étapes à suivre pour la mesure des inclinomètres horizontaux Source : Roger, J. 2015

Figure 94 : Position de la sonde et des roues

La position des roues de l'inclinomètre horizontal au chaînage 1+720 est illustrée sur la Figure 95, montrant que la sonde change de rainures dans le tube inclinométrique au cours de l'acquisition des données. La Figure 95a indique la position des roues dans les rainures du tube du côté aval et la Figure 95b, du côté amont.



Figure 95 : Positions des roues de l'inclinomètre horizontal du chaînage 1+720. a) Aval; b) Amont

ANNEXE C

GENERALITES ET RECOMMANDATIONS SUR LES SYSTEMES DE DRAINAGE EN MILIEU DE PERGELISOL

Cette section présente une brève revue de littérature relatant les deux écoles de pensées couramment rencontrées pour la conception et la mise en place des systèmes de drainage (ponceaux, ponts, remblais perméable, fossés de drainage et canal de déviation) en milieux de pergélisol.

Même si les précipitations sont généralement faibles dans le nord canadien, la conception d'un système de drainage est une des étapes les plus importantes à considérer lors de la construction de routes, de chemins de fer et de pistes d'atterrissage (Jonhston, 1981). Dans les environnements pergélisolés, le drainage du sol naturel se fait difficilement et plus particulièrement dans les zones à relief plat tel que les muskegs où le sol gelé se trouve à de faibles profondeurs. Par conséquent, la couche active est souvent saturée. L'accumulation d'eau autour et sous les infrastructures de transport peut provoquer le dégel du pergélisol et entrainer des tassements et des dépressions thermokarstiques. Les tassements et dépressions ainsi formés accumulent davantage d'eau, accélèrent la fonte du pergélisol et diminuent de manière importante la capacité portante du remblai. Cependant, en adoptant des techniques de construction appropriées, en assurant un drainage adéquat et un contrôle de l'érosion le long du tracé, la dégradation du pergélisol peut être évitée (Claridge and Mirza, 1981).

Diverses méthodes d'ingénierie sont utilisées pour améliorer les conditions de drainage. Par contre, l'expérience développée est très localisée et diffèrent d'une région à l'autre. Aucun critère de conception n'a été clairement défini jusqu'à maintenant. Toutefois, deux écoles de pensées basées sur le savoir-faire existent. Elles se caractérisent soit par une approche avec faibles impacts sur le pergélisol ou par une approche avec des impacts contrôlés.

1. Une approche avec de faibles impacts sur le pergélisol

Cette approche consiste à ne pas détourner le drainage ni à l'intercepter avec le remblai routier. L'eau doit s'écouler au travers du remblai à l'aide de structures de drainage situées à tous les cours d'eau ou à chaque dépression du terrain naturel. Les ponceaux, les ponts et les remblais perméables sont les structures couramment utilisées pour contrôler les écoulements d'eau de surface et souterraine. Les intervalles entre chaque structure de drainage ne devraient pas dépasser 300 à 500 m (Khroustalev,2005 cité par Association des transports du Canada, 2010).

a. Les ponceaux

En général, les ponceaux ont une faible performance en zone de pergélisol sauf lorsqu'ils sont utilisés dans des sections de route reposant sur le socle rocheux ou sur des sols pauvres en glace ayant une valeur maximale de tassement au dégel variant entre 0,03 et 0,1 m (Khroustalev, 2005 cité par l'Association des transports du Canada, 2010). Cependant, l'utilisation de ponceaux est parfois inévitable, et ce, même lorsque le pergélisol est riche en glace et à proximité de la surface du sol. Dans de telles situations, d'importantes précautions

doivent être prises pour éviter le dégel accéléré du sol d'infrastructure. L'Association des transports du Canada (2010) propose quelques recommandations à suivre afin d'assurer la stabilité du remblai : 1) excaver le sol riche en glace; 2) imposer une cambrure au ponceau; 3) augmenter l'épaisseur des parois et le diamètre des ponceaux; 4) utiliser des séries de petits ponceaux; ou 5) isoler les côtés et la base du lit granulaire des ponceaux pour permettre le refroidissement du sol par effet de convection durant l'hiver sous le ponceau. Cette dernière recommandation n'a cependant pas été expérimentée au Canada.

L'excavation du sol riche en glace

Ce procédé ne vise pas à préserver la totalité du pergélisol en dessous du ponceau, mais plutôt à réduire l'ampleur des futurs tassements différentiels et à prolonger la période pendant laquelle les tassements se produiront. La Figure 96 illustre le concept de la configuration d'un ponceau placé sur un sol riche en glace. Il est recommandé d'excaver le sol naturel jusqu'à une profondeur minimale de 1,5 m ou jusqu'à la base de la couche du sol riche en glace (EBA, 2000). Généralement, la teneur en glace du pergélisol diminue avec la profondeur. L'excavation et le remplacement du sol par des matériaux granulaires non-gélifs devrait être effectué jusqu'à obtenir un contenu en glace inférieur à 5 % du volume de sol gelé (EBA, 2000). Il est aussi suggéré d'ajouter à l'entrée et à la sortie des ponceaux, l'ajout de barrières étanches d'argile afin d'éviter l'écoulement d'eau sous les ponceaux et ainsi limiter la dégradation du pergélisol.



Notes: - All dimensions are in "mm" unless otheries specified.

Figure 96 : Coupe transversale et longitudinale d'un ponceau mis en place sur un pergélisol riche en glace (EBA, 2000).

La cambrure d'un ponceau

Afin de préserver le ponceau de tassements importants, il est recommandé de leur donner une certaine cambrure vers le haut. La cambrure maximale devrait être située à mi-chemin du profil transversal de la route. La Figure 97 illustre ce concept.



Figure 97 : Schéma illustrant le concept du ponceau avec cambrure (EBA, 2000).

Une épaisseur de parois et un diamètre plus important

En régions de pergélisol, l'épaisseur des parois des ponceaux devrait être supérieure à l'épaisseur utilisée dans les régions du sud. Cette précaution devrait être prise en raison de la perte de l'effet de confinement lors du dégel du pergélisol, de l'englacement des ponceaux en hiver et du soulèvement au gel. Le Ministère des Transports des Territoires du Nord-Ouest suggère une épaisseur de paroi de 2,8 mm pour les ponceaux ayant un diamètre de 1200 mm et moins tandis que le Ministère des Transports du Yukon préconise plutôt l'utilisation de ponceaux rivetés pour une meilleure résistance à la déformation lors des tassements. De plus, les ponceaux devraient être surdimensionnés de l'ordre de deux à trois fois la taille qui serait normalement utilisée en zone exempte de pergélisol. Ceci permettrait de pallier aux incertitudes liées à la conception, à la glace, à la neige, au blocage par les sédiments et aux tassements au dégel.

L'utilisation d'une série de petits ponceaux

L'utilisation de petits ponceaux avec un petit intervalle de distance entre chacun est une autre alternative permettant de réduire le débit d'eau dans les ponceaux et de limiter la dégradation du pergélisol.

L'isolation des ponceaux

Le Ministère des Transports du Yukon propose l'utilisation de géotextiles et géogrilles pour le renforcement de la structure de drainage et, l'isolement du coussin granulaire des ponceaux à l'aide de polystyrène (Figure 98). Cette technique permettrait de prolonger la durée de vie des ponceaux. De plus, afin de limiter l'apparition de soulèvements à la surface de la route aux extrémités de l'isolant, il est recommandé de prolonger l'isolant au-dessus du sol naturel le long des pentes excavées. Ce concept de drainage a été réalisé à l'été 2013 sur l'autoroute de l'Alaska au Yukon (Figure 99).



Figure 98 : Schéma du concept d'isolation et de renforcement du ponceau (Yukon Highways and Public Works, 2013).



Figure 99 : Installation et instrumentation d'un ponceau à l'été 2013, sur l'Alaska Highway au Yukon. Source : Simon Dumais, 2013.

Les ponceaux avec cheminées

Un ponceau innovateur avec cheminées a été mis en place dans un remblai de chemin de fer en Sibérie (Figure 100). Du début de l'hiver jusqu'au début de la crue printanière, l'entrée et la sortie du ponceau sont fermées à l'aide de planches de bois pour empêcher toute accumulation de neige à l'intérieur de celui-ci. En hiver, les cheminées permettent à l'air froid de circuler à travers le ponceau et de refroidir le sol sous-jacent, ce qui ralentit la progression du dégel du pergélisol pendant l'été.





b. Les ponts

Les petits ponts peuvent être construits autant sur les passages des cours d'eau permanents que saisonniers. Ils peuvent être mis en place sur des sites reposants sur des sols riches en glace ayant des valeurs potentielles de tassements au dégel variant entre 0,1 et 0,4 m (Khroustalev, 2005 cité par l'Association des transports du Canada, 2010). Dans le cas où les tassements au dégel seraient plus importants, la structure de support doit être placée directement à la surface ou à la base de la couche riche en glace et à une profondeur minimale de 4 m. De plus, un thermosiphon pourrait être ajouté à l'intérieur de la structure de support pour garder le sol gelé en permanence. La Figure 101 propose un schéma de conception d'un pont construit sur pergélisol.



Figure 101 : Schéma de conception d'un pont construit sur pergélisol (Khroustalev, 2005).

c. Les remblais perméables

Les remblais perméables sont construits avec des pierres ayant un diamètre minimal de 0,5 m afin de laisser l'eau circuler librement à travers le remblai. L'enrochement est placé directement sur le couvert organique et est ensuite recouvert par un géotextile qui agira comme un filtre inversé. Si le débit d'écoulement est supérieur à 10 m³/s, il est recommandé de placer un ponceau au-dessus du remblai perméable afin de contrôler l'écoulement de surface en période de crue. En général, les remblais perméables sont préférables aux petits ponts, car ils sont moins coûteux, offrent une meilleure performance lorsque le sol est saturé et sont plus stables dans les zones de pergélisol sensible au dégel.

2. Une approche avec des impacts contrôlés sur le pergélisol

Cette approche comprend la création de fossé d'interception et de canaux de déviation. Ceci aide à prévenir la fonte du pergélisol en interceptant l'eau en amont de la route, en prévenant l'accumulation d'eau en pied de remblai et en limitant l'infiltration d'eau sous et à travers le remblai. Ces structures de drainage doivent être situés à une certaine distance de l'infrastructure afin d'éloigner des remblais la dégradation du pergélisol qui sera engendrée par l'eau.

a. Les fossés d'interception

Les fossés d'interception sont construits parallèlement au remblai (Figure 102) et dirigent l'écoulement d'eau vers les ponceaux qui feront cheminer l'eau de l'autre côté de l'infrastructure. Au début de la mise en place de ce système, les fossés ont tendance à se dégrader rapidement. Par la suite, si les capacités des fossés sont respectées, ils fonctionneront correctement. Ils se stabilisent lorsque le couvert de végétation, qui agit comme isolant, vient recouvrir les pentes du fossé. Il n'est pas recommandé de construire des fossés d'interception dans des sols à grains fins riches en glace. En cas de nécessité, un système de protection contre l'érosion pourrait et devrait être considéré (Claridge and Mirza, 1981) ainsi qu'une plus grande distance entre le fossé d'interception et le remblai. Il n'y a pas d'exigence connue concernant la distance à considérer entre le système de drainage et l'infrastructure de transport. Cependant, une distance sécuritaire de 10 m peut être proposée (Doré et Zubeck, 2008).



Figure 102 : Fossé d'interception construit à une distance de 10 m de l'autoroute de l'Alaska, Yukon (Association des transports du Canada, 2010).

b. Le canal de déviation

Un canal de déviation des eaux de surface est une solution envisageable lorsque le débit d'eau et les tassements au dégel associés sont si importants qu'ils mettent en péril la sécurité de l'infrastructure. À Puvirnituq au Nunavik, un canal de déviation a été creusé en 2010 afin d'éloigner l'eau du pied de la piste d'atterrissage. Un dynamitage de 826 m³ de roc au sudouest de la piste a été réalisé pour construire une tranchée redirigeant l'eau de surface vers un lac à proximité (Gravel-Gaumond, 2014). La Figure 103 présente le tracé initial (en rouge) ainsi que la déviation effectuée (en bleu) lors des travaux. La ligne rouge pointillée rouge montre le secteur où le ruissellement s'effectuait sous le remblai de la piste.



Figure 103 : Tracé initial du ruissellement et déviation de l'eau de surface vers un lac à proximité de la piste d'atterrissage de Puvirnituq au Nunavik (Gravel-Gaumond, 2014).