

PRÉSERVATION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DANS LE NORD CANADIEN : PROGRAMME ARQULUK

CHANTAL LEMIEUX, M.Sc. – Coordonnatrice du programme Arquluk, GUY DORÉ, ing. Ph. D – Professeur, Université Laval et directeur du programme Arquluk (Membre de la Table d'expertise sur les Infrastructures de transport) et collaborateurs

CONTEXTE

Les infrastructures de transport jouent un rôle primordial en matière de subsistance, de développement économique et de qualité de vie des populations nordiques. La construction des infrastructures (routes, autoroutes et pistes d'atterrissage) sur pergélisol perturbe inévitablement le régime thermique des sols gelés et cause leur dégradation. L'ampleur de la dégradation thermique dépend des méthodes de conception employées, de la distribution du pergélisol riche en glace, ainsi que de sa sensibilité au dégel. Lors de la fonte d'un pergélisol riche en glace, la chaussée subit d'importants tassements, ce qui entraîne une perte significative des capacités fonctionnelles et structurales de l'ouvrage. Dans plusieurs régions nordiques, les chaussées qui étaient stables et adéquatement conçues montrent maintenant des signes d'instabilité due à la dégradation du pergélisol sous-jacent, résultant des récents changements climatiques. Dans ce contexte, maintenir des infrastructures de transport stables et sécuritaires dans des communautés nordiques éloignées est un défi de taille en ingénierie.

PROGRAMME ARQULUK

En langage inuktitut, le terme « Arquluk » réfère à une route endommagée. Arquluk est un programme en partenariat financé par 12 partenaires des secteurs public et privé (ARK, ministère des Transports du Québec, Ouranos, Yukon Highways and Public Works, Yukon Research Center, Yukon Cold Climate and Innovation Center, Colas, EBA, Génivar, Inspec-Sol, Kryotek, Nippo), ainsi que par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG). Ce programme a pour principal objectif de développer des solutions techniques aux problèmes liés à la performance des infrastructures de transport nordiques, bâties sur pergélisol instable, dans un contexte de changement climatique. Son directeur, Guy Doré, professeur en génie civil à l'Université Laval, a combiné son expérience et son expertise à celles de Daniel Fortier, professeur de géomorphologie à l'Université de Montréal, et de Louis Gosselin, professeur en génie mécanique à l'Université Laval.

D'une durée de cinq ans, le programme Arquluk a été lancé en avril 2012 et comprend une dizaine de projets regroupés en trois thèmes de recherche :

- Thème 1 – Amélioration des connaissances actuelles et documentation des principaux facteurs impliqués dans la dégradation des remblais construits sur pergélisol sensible au dégel;
- Thème 2 – Détection et caractérisation des sols sensibles au dégel. Quatre projets de maîtrise portant sur le développement de méthodes permettant de détecter et de caractériser le pergélisol instable;

- Thème 3 – Développement de techniques de stabilisation et d'entretien applicables aux infrastructures de transport existantes et futures, sur pergélisol instable. Deux projets de maîtrise et un projet de doctorat documentant également les coûts, l'efficacité et la faisabilité associés à la mise en place des techniques de stabilisation.

La figure 1 illustre la démarche de recherche utilisée pour les projets du programme Arquluk.

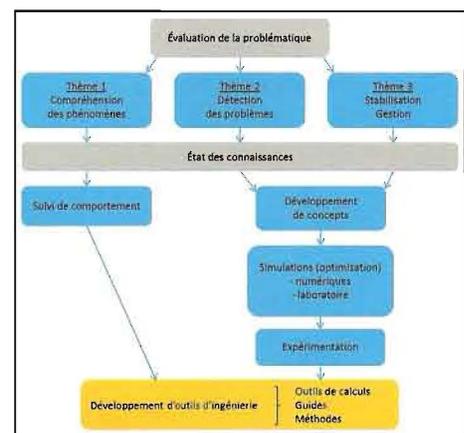


Figure 1 : Démarche générale de recherche du programme Arquluk.

PROJETS DE RECHERCHE EN COURS

Méthodes d'analyse géophysique et thermique, Benoît Loranger (maîtrise, thème 2)

Un pergélisol chaud, riche en glace et présent à de faibles profondeurs est la condition de terrain la plus difficile à gérer pour la construction et la maintenance des infrastructures de transport dans le Nord. La distribution spatiale des corps de glace massifs et des sols riches en glace est difficile à prévoir, en particulier là où les types de sols sont très sensibles au dégel.

Suite >

La figure 2 illustre un effondrement à proximité de la route de l'Alaska résultant de la fonte de glace massive enfouie dans le pergélisol.

2003



Source : Guy Doré, Université Laval

2008



Figure 2 : Effondrement associé à la fonte de glace au site Dry Creek, Alaska Highway, Yukon.
Source : Eva Stephani, University of Alaska Fairbanks

Le projet a pour but d'étudier des sites où les infrastructures routières construites sur pergélisol sont problématiques et de tenter de trouver la cause des dégradations. Il comprend deux volets :

1) La méthode microgravimétrique vise à détecter des anomalies entre des matériaux de masse volumique différente dans le sol. La masse volumique de la glace étant environ la moitié de celle du sol environnant, il sera vraisemblablement possible de détecter des anomalies négatives gravimétriques correspondantes à la présence de glace enfouie. Un gravimètre de Scintrex (CG5) est utilisé pour l'acquisition des données (figure 3);



Figure 3 : Utilisation du gravimètre CG5 de Scintrex, Dry Creek, Yukon, 2013.
Source : Benoît Loranger, Université Laval

2) La méthode de détection d'anomalies thermiques sous la surface du terrain est un nouveau concept qui sera développé selon les données acquises sur le terrain. L'hypothèse de départ est que certains corps de glace, ou un changement abrupt du contenu en glace présent dans le sol très près de la surface, pourrait influencer la température de surface du sol. Des mesures sont prises sur un tracé linéaire, à 50 cm sous la surface à l'aide d'un thermomètre de haute précision que l'on insère dans le sol après avoir préalablement fait un trou à l'aide d'une tarière ou d'une barre de métal.

Deux visites de terrain ont été accomplies principalement à Dry Creek, au km 1840 de l'Alaska Highway au Yukon, en juillet et en septembre 2013.

Stabilisation thermique des infrastructures de transport utilisant des surfaces de revêtement à albédo élevé, Simon Dumais (maîtrise, thème 3)

Les surfaces de revêtement routier à albédo élevé peuvent être utilisées afin de réduire l'absorption de chaleur par la surface de la route et de limiter ainsi les dégradations du pergélisol sous-jacent. L'albédo ne perturbe pas les températures de surface durant l'hiver lorsque la radiation solaire est négligeable et que les surfaces sont couvertes d'une couche de neige et de glace.

Un objectif du projet est d'utiliser les données thermiques afin de quantifier l'effet de l'albédo pour justifier leur utilisation lors des étapes préliminaires d'un projet.

Une planche d'essai réalisée à Beaver Creek au Yukon en 2012 a permis d'obtenir les résultats de températures de surface présentés au tableau 1. L'albédo de chacune des surfaces a été déterminé à l'aide d'un pyranomètre lors d'une visite en mai 2013. Ces données démontrent clairement l'efficacité des surfaces ayant un albédo plus élevé durant les mois d'été lorsque la radiation solaire est élevée.

Tableau 1 : Données thermiques du site expérimental de Beaver Creek

Surfaces	Température moyenne en août 2012 (°C)	Température moyenne en décembre 2012 (°C)	Albédo noir = 0 blanc = 1
Enrobé froid	21,0	- 27,5	0,04
Granulats clairs	17,3	- 28,6	0,17
Nippo	17,6	- 27,2	0,43
Lafrentz	14,0	- 27,5	0,60
Température de l'air	11,2	- 29,7	-

Par contre, les surfaces à albédo élevé comportent quelques faiblesses techniques. Elles sont généralement peu durables, glissantes lorsque mouillées et aveuglantes en raison de leur couleur pâle. Un second objectif du projet est de déterminer une série de propriétés et d'essais de laboratoire, présentés au tableau 2, qui permettent d'assurer l'efficacité des surfaces à albédo élevé lors de leur implémentation sur le terrain.

Tableau 2 : Propriétés des surfaces à albédo élevé

Propriétés	Essais
Albédo	Pyranomètre (ASTM E 1918)
Glissance	Pendule britannique (microtexture) (ASTM E 303) Test de la tache de sable (macrotexture) (ASTM D 1155)
Durabilité	Appareil de mesure d'adhérence des couches (AMAC) (LC 25-010) Cycles de gel et de dégel (laboratoire seulement) (ASTM C 666)

PROJETS ASSOCIÉS EN COURS

Les résultats provenant de trois autres projets nordiques du groupe de recherche représenteront un apport significatif au programme Arquluk.

Performance thermique des techniques de protection du pergélisol au site expérimental de Beaver Creek, Alaska Highway, Yukon, Julie Malenfant-Lepage (maîtrise réalisée dans le cadre d'une subvention de Yukon Highways)

Des pertes importantes des capacités fonctionnelles et structurales sont enregistrées sur un segment de plus de 200 km de l'Alaska Highway au Yukon, situé entre le village de Destruction Bay et la frontière de l'Alaska. Afin de trouver des solutions rentables à long terme, le ministère des Transports du Yukon (en collaboration avec le Federal Highway Administration, États-Unis; Transports Canada; Université Laval; Université de Montréal; et Alaska University Transportation Center) a mis en place 12 sections d'essais de 50 m de longueur sur l'Alaska Highway près de Beaver Creek, en 2008 (figure 4). Ces différentes sections d'essais ont été conçues pour

évaluer une ou plusieurs méthodes combinées de stabilisation thermique telles que le drain thermique, le remblai à convection d'air RCA, l'abri neige/soleil, le remblai couvert de matières organiques, les drains longitudinaux, le déblaiement de la neige sur les pentes et la surface réfléchissante. Afin d'évaluer l'efficacité des systèmes de protection, une nouvelle méthode d'analyse, basée sur la mesure de flux d'extraction de chaleur H_x et d'induction H_i à l'interface entre le remblai et le sol naturel, a été utilisée dans cette étude. Certaines techniques de protection du pergélisol démontrent un bon potentiel durant les trois premières années de fonctionnement. C'est le cas pour les remblais à convection d'air (sections 1, 3 et 9), les drains longitudinaux (section 7), l'abri neige/soleil (section 6) et la surface réfléchissante (section 12). Des problèmes engendrés lors de la construction ont endommagé les drains thermiques, ce qui explique le manque d'efficacité de cette technique au site expérimental de Beaver Creek. Pour de plus amples renseignements sur la construction des sections d'essais, leur performance thermique ainsi que sur leur potentiel économique à long terme, veuillez consulter les articles suivants : M-Lepage et collab., 2010[1]; M-Lepage et collab., 2012a[2]; M-Lepage et collab., 2012b[3].

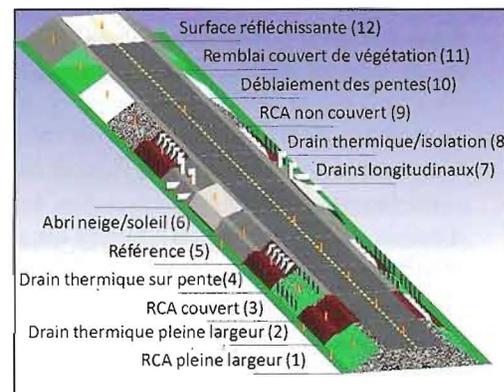


Figure 4 : Site expérimental de Beaver Creek, autoroute de l'Alaska, Yukon. Source : Julie Malenfant-Lepage, Université Laval

Suivi thermique et mécanique de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, Nunavik, Dejan Grabundzija (maîtrise réalisée dans le cadre d'un mandat du ministère des Transports du Québec)

La route d'accès de l'aéroport de Salluit traverse un dépôt d'argile instable à flanc de pente sur une distance d'environ 500 m. Depuis quelques années, la route se dégrade rapidement et

Suite ➤

menace d'être emportée par un glissement de terrain qui pourrait être initié par la dégradation du pergélisol. À l'été et l'automne 2012, la route a été reconstruite en incorporant une méthode de mitigation de la dégradation du pergélisol, le drain thermique (figure 5). Cette méthode de stabilisation favorise, en hiver, l'extraction de la chaleur du sol par convection et devrait ainsi permettre la remontée du pergélisol sous la route pour en garantir la stabilité.

Ce projet fait partie d'une étude à plus long terme qui permettra d'améliorer l'utilisation du drain thermique sous des ouvrages linéaires. Son objectif est de faire le suivi du comportement thermique et mécanique du système de protection du remblai de la route, à l'aide de thermistances verticales et d'inclinomètres verticaux et horizontaux, installés à travers le remblai. Les inclinomètres permettront de vérifier la stabilité du remblai. Les thermistances ont été installées dans une configuration permettant d'analyser l'effet des techniques de mitigation sur une vue en profil du remblai pour deux sections de la route. Des thermistances ont également été installées à l'intérieur du drain thermique pour mesurer la température de l'air qui y circule et pour comparer cette donnée à la température de l'air ambiant. Il devrait alors être possible d'établir un facteur « n » qui mettra en relation ces deux valeurs. Les résultats du projet permettront d'améliorer les méthodes de conception et d'installation de tels ouvrages dans le futur.

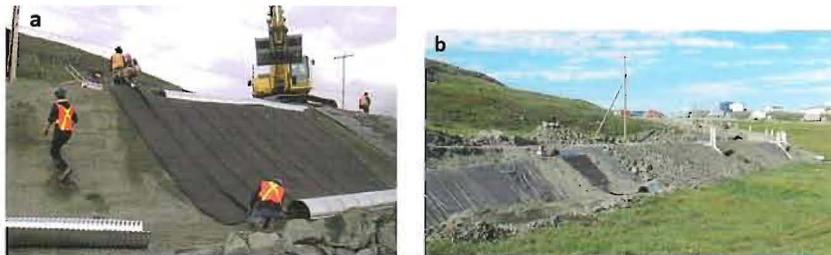


Figure 5 : a) Installation du drain thermique sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit; b) vue d'ensemble du projet. Source : Dejan Grabunzija, Université Laval

Étude du régime thermique autour des ponceaux construits sur pergélisol, Loriane Perier (maîtrise réalisée dans le cadre d'une subvention de Transports Canada)

La mise en place d'un ponceau crée de grandes perturbations thermiques en autorisant la libre circulation de l'eau et de l'air dans les remblais. Ce projet vise à développer une stratégie d'adaptation des infrastructures nordiques, en tentant d'évaluer et de quantifier les effets de ces perturbations thermiques. Les objectifs principaux sont de :

- 1) Documenter le régime thermique présent autour des ponceaux;
- 2) Déterminer les effets de plusieurs paramètres sur cet équilibre thermique;
- 3) Mettre en place un modèle thermique en 2D;
- 4) Identifier les facteurs clés pour la conception d'un drainage optimal sur pergélisol.

Un suivi thermique est effectué sur deux ponceaux de l'Alaska Highway, au Yukon : le ponceau du site expérimental de Beaver Creek et celui situé au km 1 894 + 700. L'instrumentation a nécessité la pose de sondes comprenant trois thermistances chacune, placées à différentes positions dans les ponceaux (figure 6). Ces sondes mesurent la température du sol à différentes profondeurs, chaque heure, durant le

printemps et l'été. De cette manière, un gradient thermique moyen sera défini. La température de l'eau à l'entrée du ponceau, ainsi que la température de l'air dans le ponceau sont également mesurées.

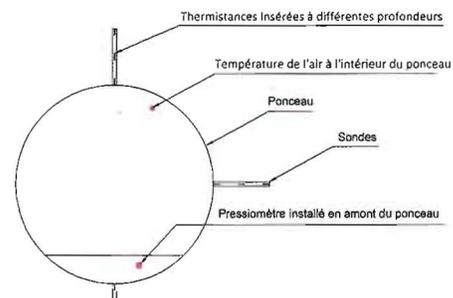


Figure 6 : Schéma type de l'installation des sondes. Source : Loriane Perier, Université Laval

À Beaver Creek, trois sondes ont été placées dans le ponceau existant, deux en amont et une en aval (figure 7a). En amont, un déversoir ainsi qu'un pressiomètre ont été installés pour mesurer le débit et ses variations. Au km 1 894 + 700, six sondes ont été posées au moment de la mise en place du ponceau : trois en amont et trois en aval (figure 7 b). Les résultats escomptés seront d'apporter une relation entre le flux thermique, le débit, la température de l'eau et la température de l'air, pour évaluer ainsi si le flux du régime thermique est positif ou négatif.



Figure 7 : Instrumentation de deux ponceaux à Beaver Creek (a) et à proximité de la frontière de l'Alaska (b) sur la route de l'Alaska, Yukon. Sources : Loriane Perier, Université Laval et Benoît Loranger, Université Laval

Plusieurs autres projets seront entrepris au cours de l'année 2014 pour mener à bien les objectifs du programme. ♦

- 1- M-Lepage, J., 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)*, 63rd Canadian Geotechnical Conference and the 6th Canadian Permafrost Conference, Calgary, Canada, p.526-533.
- 2- M-Lepage, J., Doré, G. & Fortier, F. (2012a). *Thermal effectiveness of the mitigation techniques tested at Beaver Creek Experimental road site based on a heat balance analysis (Yukon, Canada)*, 15th International Conference on Cold Regions Engineering, Quebec, Canada, p. 424-51.
- 3- M-Lepage, J., Doré, G., Fortier, F. & Murchison, P. (2012b). *Thermal Performance of the Permafrost Protection Techniques at Beaver Creek Experimental Road Site, Yukon, Canada*, Tenth International Conference on Permafrost, Salekhard, Yamal-Nenets autonomous district, Russia, Volume 1: 261-266.