

Programme ARQULUK

Préservation des infrastructures de transport dans le nord canadien

Les infrastructures de transport jouent un rôle vital dans la subsistance, le développement économique et la qualité de vie des populations habitant en régions nordiques. La construction des routes, des autoroutes et des pistes d'atterrissage sur pergélisol affecte inévitablement le régime thermique des sols gelés et cause la dégradation thermique de ceux-ci. L'ampleur de la dégradation thermique dépend des méthodes de design employées et de l'étendue du pergélisol riche en glace ainsi que de la sensibilité au dégel de celui-ci. Lors de la fonte du pergélisol riche en glace, la chaussée subit d'importants tassements ce qui entraîne une perte significative au niveau 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. Ces instabilités résultant de la dégradation du pergélisol, sont également étroitement liées aux récents changements climatiques. Actuellement, ceci devient un problème majeur pour les infrastructures de transport nordique.

Les changements climatiques ont un impact significatif sur la stabilité des sols pergélisolés. Dans ce contexte, maintenir des infrastructures de transport stables et sécuritaires dans des communautés nordiques éloignées est un défi de taille en ingénierie. Le développement de solutions économiques face à ce problème grandissant requiert : une meilleure compréhension des facteurs contribuant à la dégradation du pergélisol, une amélioration des techniques d'investigation du pergélisol pour localiser et caractériser les zones problématiques et le développement de techniques de protection rentables.

Dans le langage Inuktitut, « Arquluk » signifie « Route accidentée ». Les impacts sociaux et économiques de ce problème seront considérés dans le programme ARQULUK. Les résultats de la recherche proposée supporteront directement le développement social et économique du Nord canadien. L'expertise et le savoir-faire développé seront mis à la disposition des communautés et de l'industrie impliquée dans le développement nordique.

CONTEXTE

La construction et la maintenance des routes, aéroports et chemins de fer en condition de pergélisol sont des défis d'ingénierie majeurs. Les causes principales de la dégradation des remblais sont : 1) l'augmentation de l'absorption de chaleur par les rayons solaires et l'augmentation des infiltrations d'eau à travers le matériel de remblai; 2) la capture de la chaleur dans les sols causée par l'augmentation de l'épaisseur de neige sur les pentes du remblai et les zones adjacentes; et 3) la chaleur transférée au remblai et au sol d'infrastructure par la surface et par les eaux souterraines (Kondratiev, 1998; Cheng et Li, 2003; Humlum et al., 2003; de Grandpré et al., 2010). Le type principal de dégradation résultant de ces mécanismes est le tassement au dégel sous le remblai. D'autres types de dégradations tels que la thermo-érosion le long de chenaux d'écoulement, le fluage sous les remblais de grandes épaisseurs et le soulèvement au gel dans la couche active sont susceptibles de survenir. Ces problèmes réduiront les capacités structurelles et fonctionnelles de la route et pourront même entraîner la rupture des remblais dans certains cas. Actuellement, la dégradation des principales infrastructures de transport du nord tend à s'intensifier en raison des changements climatiques qui affectent la température du pergélisol [Gavrilova, 2008; Slater et Lawrence, 2008; Smith et al., 2008; Instanes, 2003].

Les conséquences sociales et économiques de ces problèmes peuvent être considérables. Cole et al., [1999] ont estimé à 12 M \$ (US) le coût de maintenance annuel supplémentaire attribuée à la dégradation du pergélisol sur le réseau routier de l'Alaska. Reimchen et al. [2009] ont estimé que le coût de maintenance annuel supplémentaire par kilomètre de route pour compenser le dégel du pergélisol au Yukon est d'environ 22 000 \$ (CAD). Des dépenses qui, pour l'autoroute de l'Alaska seulement, représentent plus de 4 M \$ par an. Le mauvais état des routes et pistes d'atterrissage affectées par la dégradation du pergélisol augmente le coût d'exploitation des véhicules, réduit l'efficacité du transport et augmente le risque d'accident. Dans certains cas extrêmes, la rupture du remblai peut forcer la fermeture de routes ou de pistes d'atterrissage mettant en danger les populations locales ainsi que les opérations commerciales.

Les conditions des routes canadiennes et des pistes d'atterrissage dans un contexte de pergélisol ont été documentées par l'entremise de plusieurs projets de recherche et d'expertises [Beaulac et Doré, 2006; Doré et coll., 2008; Allard et al., 2009]. Ces problèmes ont également été largement documentés en Alaska, au Groenland, en Chine ainsi qu'en Russie [Esch, 1996; Kondratiev, 1998; Cheng and Li, 2003; Humlum et al., 2003]. Différents types de solution ont été proposés et évalués par l'entremise de projets de recherche. Ces solutions comprennent l'utilisation de la convection naturelle pour refroidir les remblais pendant l'hiver par le biais de matériaux de remblai poreux [Goering, 2003], de conduits d'air et de géocomposites de drainage [Beaulac et Doré, 2006; Chataigner et al., 2009; Ficheur et Doré, 2010]. Elles comprennent également les techniques pour contrôler les radiations solaires pendant l'été telles que les surfaces réfléchissantes [Stuhr Jorgensen et al., 2008] et les pare-soleil [Ma et al., 2009]. Malgré ces développements prometteurs, l'information clé est toujours manquante pour la conception et la gestion des infrastructures de transport construit sur un pergélisol sensible au dégel. Entre autres choses, les paramètres et outils de conception ainsi que les outils de gestion sont nécessaires pour faciliter l'évaluation des risques et les processus décisionnels.

PROGRAMME DE RECHERCHE

Le programme de recherche met l'accent sur le développement de solutions rentables pour la conception et la gestion de routes, de pistes d'atterrissage et de chemins de fer construits sur le pergélisol. Cela nécessite une meilleure compréhension des facteurs qui contribuent à la dégradation du pergélisol, l'amélioration des techniques d'investigation pour identifier le pergélisol sensible et le développement d'outils d'ingénierie pour appuyer la conception et la gestion des infrastructures de transport dans le Nord canadien.

But du programme

Le but du programme est d'améliorer les capacités actuelles d'adaptation en développant une expertise sur l'atténuation des instabilités du pergélisol sous les infrastructures de transport dans un contexte de changement climatique. Afin d'atteindre ce but, les objectifs suivants sont proposés:

1. améliorer la connaissance des facteurs qui influent sur la performance des chaussées construites sur un pergélisol sensible,
2. améliorer les techniques de détection et de caractérisation des sols et des remblais instables,
3. élaborer des lignes directrices pour l'application de différentes stratégies de construction et de maintenance afin d'atténuer les problèmes de dégradation du pergélisol découlant de la

construction des chaussées et des changements climatiques basées sur le coût, la faisabilité et l'efficacité des solutions applicables

4. développer un cadre pratique ainsi que des outils de soutien pour la gestion des infrastructures de transport construites sur le pergélisol.

Thèmes de recherche

Afin d'atteindre le but et les objectifs énoncés, le programme proposé est divisé en 3 thèmes portant sur les objectifs spécifiques du programme. Les thèmes sont structurés de manière à faciliter la participation des étudiants aux cycles supérieurs par l'intermédiaire de projets de maîtrise et de doctorat.

THÈME 1 : Amélioration des connaissances actuelles sur la dégradation du pergélisol et ses effets sur les infrastructures de transport (2 projets de maîtrise)

Des efforts considérables ont été faits pour comprendre les mécanismes impliqués dans la détérioration du pergélisol sous les infrastructures de transport. Les principaux facteurs affectant les remblais construits sur le pergélisol incluent le changement des propriétés thermiques de surface causé par l'enlèvement de la végétation et la construction d'une structure granulaire (comprenant dans certains cas, une surface d'asphalte), les effets géométriques provoquant l'accumulation de neige sur les pentes des remblais, le ruissellement d'eau de surface et souterraine sous le remblai ainsi que la sensibilité au fluage des sols riches en glace et salin sous le poids d'un remblai épais (Humlum et al, 2003; Cheng et Li, 2003). Ces aspects sont de plus en plus importants en vue d'un accroissement du développement des régions nordiques où les changements climatiques se produisent plus rapidement que dans la plupart des autres parties du monde. L'emphase de ce thème de recherche sera mise sur la compréhension et la documentation des principaux facteurs impliqués dans la dégradation des remblais construits sur le pergélisol sensible au dégel et sur le développement de paramètres d'ingénierie pour tenir compte de ces facteurs dans la conception et la gestion des infrastructures de transport. En plus d'une revue de littérature détaillée sur ces sujets, les projets impliquent les activités de recherche suivantes.

a) Suivi de la performance thermique des sites expérimentaux de l'autoroute de l'Alaska et de Tasiujaq

Cette partie du projet consiste à faire le suivi détaillé des régimes thermiques sur deux sites expérimentaux pavés construits en 2007 au Nunavik et en 2008 au Yukon afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les infrastructures de transport et d'évaluer la performance de différentes techniques d'atténuation visant à prévenir la dégradation du pergélisol sous les remblais. Le site expérimental de Beaver Creek comprend une section de référence, suivi par le Yukon Highways and Public Works (YHPW) depuis 1997. Il comprend également 11 sections d'essais supplémentaires, construites en 2008 et conçues pour tester différentes méthodes d'atténuation. Le site expérimental de Tasiujaq comprend 4 sections incluant une section de référence et 3 sections où différentes méthodes de protection ont été construites. Les deux sites expérimentaux sont entièrement instrumentés pour le suivi thermique de chacune des sections. L'activité proposée comporte la poursuite du suivi thermique, la gestion des données et l'analyse des régimes thermiques de chacune des sections d'essais sur les deux sites expérimentaux. Cette activité nécessitera l'amélioration de l'équipement de suivi sur le site d'essai de Tasiujaq, notamment par

l'installation d'une nouvelle section référence pour remplacer celle existante qui est fortement affectée par l'eau stagnante le long du remblai.

b) Développement et calibration d'un modèle thermique 2D

Les données recueillies sur les sites expérimentaux de Tasiujaq et de Beaver Creek serviront à soutenir le développement et la calibration d'un modèle thermique 2-D. Les besoins et les implications du développement d'une version 3-D du modèle seront également évalués pour l'imposition de conditions de terrain spécifique, tels que le pergélisol discontinu ou la présence d'éléments linéaires comme les coins de glaces ou les ruisseaux. L'intention est d'inclure tous les processus physiques importants, notamment la convection entre l'air et le sol, la conduction à travers les couches de sol, le transfert de chaleur et de masse de l'humidité dans le sol ainsi que le changement de phase. Lorsque les aspects thermiques seront maîtrisés dans le modèle, un couplage thermo-mécanique sera effectué sur la base du travail accompli par Verreault et al. [2011] sur le comportement mécanique d'un pergélisol réchauffant et dégelant. Les équations régissant seront résolues avec un code d'éléments finis. Les logiciels COMSOL et FLUENT seront les principaux outils de développement. Le modèle numérique permettra de déterminer l'évolution de la température et des contraintes mécaniques ainsi que de l'épaisseur de la couche active. Une fois calibré à l'aide des données provenant du site d'essai (les caractéristiques du sol et du matériau de remblai, les conditions climatiques, les données de température, les caractéristiques du site, etc.), le modèle va devenir un outil puissant pour évaluer l'effet des changements climatiques projetés sur les infrastructures de transport. Une analyse de sensibilité sera réalisée pour déterminer les propriétés et les données d'entrées qui sont les plus influentes. Cela permettra de déterminer les données d'entrées sur lesquelles l'attention devrait être mise lors de l'utilisation du modèle pour une situation nouvelle. Le modèle sera utilisé principalement pour l'élaboration des paramètres d'ingénierie (projet 1-c) et pour l'évaluation des techniques d'atténuation (projet 3-a). Les modèles seront utilisés pour proposer des modèles « d'ingénierie » simplifiés.

c) Développement de paramètres d'ingénierie

Tel que mentionné précédemment, les trois principaux facteurs influençant les performances thermiques des remblais dans le nord du Canada sont : 1) Augmentation de l'absorption de la chaleur provenant du rayonnement solaire; 2) rétention de la chaleur dans le sol causée par une épaisseur accrue du couvert neigeux sur les pentes du remblai et sur les zones adjacentes; 3) chaleur transférée aux remblais et aux sols sous-jacents par le ruissellement d'eau de surface et souterraine. L'effet des propriétés thermiques des surfaces est relativement bien compris et documenté dans la littérature. Le bilan énergétique de surface et la température de surface qui en résulte sont des phénomènes complexes impliquant plusieurs facteurs tels que le rayonnement solaire incident, l'albédo de surface, l'émissivité de surface et la conductivité thermique du matériau de remblai. Pour faciliter l'incorporation de ces phénomènes dans les calculs d'ingénierie, un indice dénommé le « Facteur-n », a été développé (Lunardi, 1978) afin de convertir la température de l'air facilement accessible en température de surface. Malgré le fait qu'il soit considéré comme trop simpliste, voire trompeur, le « Facteur-n » est encore largement utilisé dans la pratique du génie en région froide. Ce projet de recherche se concentrera sur le développement d'indices physiques pour permettre la considération de ces facteurs dans la pratique du génie. Il comprendra les activités suivantes :

1. Le modèle thermique 2D développé dans les travaux de recherche 1b sera utilisé pour simuler différentes conditions d'exposition au rayonnement solaire de la surface,

d'accumulation de neige sur les pentes de remblai et d'infiltration d'eau sous le remblai. Pour tenir compte de l'absorption du rayonnement solaire, nous proposons d'adapter le concept de « l'indice de rayonnement (IR) » développé par Dysli et al. [1997] pour la pratique de l'ingénierie des chaussées en zone de gel saisonnier. L'IR utilise la physique de la transmission de chaleur par rayonnement solaire pour quantifier une correction à appliquer à la température de surface. Il s'agit d'une approche plus rigoureuse de la quantification de l'effet du rayonnement solaire comparativement au « Facteur-n ». Il n'a cependant jamais été calibré et appliqué à des conditions de pergélisol

2. Une approche similaire sera utilisée pour développer des indices mécanistes quantifiant le transfert et la rétention de la chaleur causée par l'écoulement d'eau et l'accumulation de neige.
3. Les indices de conception développés en utilisant la modélisation thermique seront validés à l'aide des données thermiques des sites expérimentaux de Tasiujaq et de Beaver Creek.

Les indices mécanistes développés dans le cadre de ce projet seront ensuite intégrés dans les procédures de conception des chaussées dans les projets de recherche proposés dans le cadre du thème 3.

THÈME 2 : Identification et caractérisation des sols sensibles au dégel (3 projets de maîtrise)

Les zones de terrain instable en raison de mauvaises conditions de sol constituent un risque pour l'intégrité des infrastructures de transport et doivent être identifiées et caractérisées. Un pergélisol riche en glace à de faibles profondeurs est la condition de terrain la plus difficile à gérer pour la construction et la maintenance des infrastructures de transport. La distribution spatiale des corps de glace massive et des structures de sol riche en glace est très difficile à prévoir, en particulier là où les matériaux de surface ou les types de sols sont très variables. Ceci représente un défi majeur pour la planification et la préparation de nouveaux projets de transport ainsi que pour la gestion des infrastructures de transport existantes. Les capacités des méthodes d'investigation existantes sont limitées compte tenu du manque de précision de certaines de ces méthodes et du coût élevé des autres. Le long des routes existantes, il est attendu que l'analyse avancée de l'état et du profil de surface peut contribuer à identifier et caractériser les zones sensibles au dégel. Une meilleure connaissance de la distribution et des caractéristiques des sols riches en glace est nécessaire pour l'implantation de nouvelles infrastructures de transport ainsi que pour la gestion efficace des infrastructures existantes. En plus d'une revue de littérature détaillée sur ces sujets, les projets impliquent les activités de recherche suivantes.

a) Méthodes d'analyse géophysique et thermique (maîtrise)

L'emphase de cette recherche sera mise sur les méthodes et les technologies utilisées dans la surveillance du pergélisol et la détection de glace dans le sol. D'un point de vue d'ingénierie, les questions les plus importantes sont l'emplacement et le contenu en glace du pergélisol riche en glace. Cela peut être soit une zone locale, comme un site de construction proposé ou soit un corridor linéaire, comme un chemin de fer ou une route. La combinaison de plusieurs méthodes géophysiques avec le recoupement des indices de matériaux riches en glace est la technique la plus prometteuse pour la délimitation des zones riches en glace [Kneisel et al., 2008]. L'objectif principal de la recherche consistera à utiliser des méthodes de mesure géophysiques et de mesure directe pour détecter la présence et caractériser les propriétés mécaniques d'un pergélisol à grain fin riche en glace ou de glace massive enfouie. Les technologies considérées seront l'imagerie géophysique à l'aide de la résistivité électrique DC, le géoradar, la micro-gravimétrie et le profilage thermique. Les

études dans la littérature utilisent généralement une ou deux dimensions de résistivité et le GPR. Des études tridimensionnelles ont été entreprises, mais elles sont souvent dans une grille d'interpolation rectiligne cartésienne. Des études récentes indiquent que l'utilisation d'une matrice à configuration radiale autour d'un point central produit des données avec beaucoup moins de bruit et qu'il en résulte des images plus claires. Dans l'environnement à haute résistance du pergélisol, cela pourrait se traduire par une plus grande fiabilité des résultats. Plusieurs auteurs (Saarenketo et Scullion, 2000; Moorman et al, 2003) décrivent une méthode d'« empreintes digitales » pour identifier différents types de sols par leur signature GPR. Ceci a été fait visuellement, mais le procédé pourrait être numérisé. En utilisant une combinaison de logiciels statistiques et de logiciels de modélisation 3D, un système de logique floue pourrait facilement être développé pour corrélérer les caractéristiques des « empreintes digitales » à une probabilité de glace dans le sol. Le projet implique :

1. L'utilisation de la résistivité DC, du GPR, des lectures gravimétriques et thermiques pour définir l' « empreinte digitale » du matériau riche en glace à travers l'examen d'un grand nombre de données tomographiques de terrain vérifiées provenant du Yukon de la littérature.
2. Le développement d'une méthodologie 3D radiale pour l'évaluation rapide du site en trois dimensions.
3. Élaborer un cadre de logiciel pour l'interprétation de plusieurs séries de données géophysiques afin de distinguer une signature des matériaux riches en glace. Utiliser les logiciels d'interpolation statistique Surfer et SigmaPlot 3D. Faire usage des technologies infonuagiques pour gérer la grande quantité de données générées. Attribuer une description qualitative des données quantitatives indiquant un terrain riche en glace et utiliser un système de logique floue pour attribuer des degrés de probabilité de la présence de glace dans le sol similaire à ceux utilisés par Hauck et Wagner (2003).
4. Développer une méthodologie pour la prise linéaire du GPR, de la résistivité, de lectures gravimétriques et thermiques simultanément à partir d'un véhicule en mouvement pour la cartographie d'un corridor. Cette technique produirait une carte de probabilité de glace massive dans les 10 premiers mètres de sol.

L'évaluation de l'efficacité des technologies de détection sera effectuée à plusieurs endroits au Yukon et dans les Territoires du Nord-Ouest. La présence de sols riches en glace et de glace massive a été bien documentée dans la plupart de ces sites.

b) L'analyse des profils longitudinaux des chaussées existantes (maîtrise)

La détection précoce de la dégradation du pergélisol sous les routes et les pistes d'atterrissage existantes est un élément clé d'une bonne prise de décision dans le processus de maintenance et de réhabilitation des remblais construits dans les zones de pergélisol. Les techniques d'analyse de profil se sont révélés être de bons outils pour la détection et la caractérisation des effets du gel sur les routes dans les zones de gel saisonnier [Fradette et al, 2005; Doré et al, 2001.]. Les mêmes techniques, basées sur le filtrage du signal et sur l'analyse de la longueur d'onde, sont susceptibles de se révéler très efficaces dans l'identification précoce de la dégradation du pergélisol et la sélection de la stratégie d'atténuation appropriée. Le projet comprend les activités de recherche suivantes :

1. Des mesures de profil longitudinal et transversal seront recueillies le long de l'autoroute de l'Alaska. Les profils seront recueillis à la fin de l'été (pénétration maximale du dégel) en

utilisant le profilomètre SURPRO disponible à l'Université Laval. Le profilomètre manuel est toutefois lent et ne permet que la collecte de données sur de courtes sections de l'autoroute. Les données seront complétées par des données de profil recueillies par des entreprises privées mandatées par le Yukon Highways.

2. Les profils seront analysés à l'aide des logiciels PROVAL, ROADRUF931 et/ou PROFAN afin d'identifier la « signature » de la dégradation du pergélisol en termes de longueur d'onde et l'amplitude pour des contextes différents. L'analyse de la densité spectrale de puissance et la technique d'analyse du contenu de longueur d'onde mis au point par Flamand [Doré et al., 2001] seront utilisées pour comparer les tronçons de route et de piste d'atterrissage dans des contextes sensibles au dégel et non sensibles au dégel.
3. Sur la base de l'analyse décrite dans l'activité 2, un algorithme sera développé pour aider à détecter des anomalies du profil susceptibles d'être associées à la dégradation du pergélisol le long d'une route ou d'une piste d'atterrissage.

Les produits de recherches issues de ce projet aideront à localiser les zones sensibles au dégel le long d'un corridor de transport, à diagnostiquer les causes de la dégradation et à sélectionner la stratégie d'atténuation appropriée.

c) Essais œdométriques in situ (maîtrise)

Lorsqu'un pergélisol riche en glace est identifié et localisé en utilisant la géophysique, une technique thermique ou une technique de profilométrie, le principal défi est de caractériser le dégel des sols sensibles afin d'évaluer le risque de la construction d'un nouveau remblai de transport ou du maintien d'un remblai déjà existant. Ceci n'est actuellement possible que par le biais de forages et d'échantillonnages des sols gelés. La récupération d'échantillons gelés non remaniés au cours des opérations de forage est très difficile et coûteuse dans les localités nordiques éloignées. L'objectif de ce projet est de développer un carottier œdométrique pour mesurer in situ les propriétés de consolidation du pergélisol. Au lieu d'essayer de récupérer des échantillons gelés, le système d'essai permettrait le dégel du pergélisol dans le carottier et la mesure de ses propriétés de consolidation sous une contrainte verticale choisie. Cela permettrait de produire des profils de fonte-consolidation en fonction de la profondeur qui appuierait l'analyse de risque pour différent scénario de réchauffement et de dégel. Le projet comprend les activités suivantes :

1. Conception d'un carottier œdométrique en coopération avec le bureau de design du département de génie mécanique de l'Université Laval
2. Construction d'un prototype pour la réalisation d'essais en laboratoire et sur le terrain
3. Validation de la performance du carottier à l'aide d'un échantillon de sol riche en glace reconstitué dans une chambre froide du département de génie civil
4. Ajustements apportés à la conception du carottier et modification du prototype si nécessaire
5. Essais sur le terrain de la performance du carottier à l'aide d'équipement de forage léger disponible à l'Université Laval et au Yukon (Kryotek inc.)

Si les essais sont concluants, un carottier entièrement opérationnel sera construit et utilisé pour caractérisation des sites dans le cadre du programme Arquluk ainsi que pour d'autres projets de recherche en région de pergélisol.

Thème 3 : Développement des techniques d'adaptation pour les infrastructures de transport construites sur un pergélisol instable (1 projet de doctorat, 2 projets de maîtrise)

En plus des différentes stratégies de maintenance, de nombreuses méthodes ont été proposées et testées pour contrer les effets de la dégradation du pergélisol. Ces méthodes peuvent être classées en trois catégories principales :

- Les méthodes basées sur la limitation de l'apport de chaleur sous le remblai durant l'été,
- Les méthodes basées sur la maximisation de l'extraction de chaleur à partir du remblai pendant l'hiver, et,
- Les méthodes basées sur le renforcement des remblais afin de résister à la dégradation du pergélisol.

L'objectif principal de ce thème est d'optimiser les stratégies de préservation, en évaluant leur champ d'application, leurs performances et en documentant les coûts et les obstacles associés à leur mise en place. Les activités de recherche au sein de ce thème se concentreront également sur l'amélioration des caractéristiques de conception et sur le développement des méthodes de stabilisation thermique, incluant les activités de maintenance et de réhabilitation adaptées. Ces stratégies seront intégrées dans un cadre de gestion des infrastructures de transport qui permettra d'identifier et d'évaluer les scénarios d'adaptation réalistes nécessaires pour stabiliser les infrastructures de transport essentielles dans les villages nordiques éloignés. En plus d'une revue de littérature détaillée sur ces sujets, les projets impliquent les activités de recherche suivantes.

a) Modélisation en laboratoire et numérique (maîtrise)

Des essais à petite échelle portant sur les techniques de protection ont été réalisés à l'Université Laval dans un laboratoire à environnement contrôlé. Ces essais se sont avérés très utiles pour fournir les paramètres d'ingénierie (conductivité thermique, propriétés de convection, etc.) qui seront utilisés pour l'optimisation et la conception de ces techniques. Une étude plus détaillée sera nécessaire pour évaluer les propriétés mécaniques sous différentes conditions (température, humidité, etc.) et ainsi améliorer les caractéristiques des techniques de conception actuelles et nouvelles. Les activités de recherche proposées en modélisation se feront en utilisant les chambres froides disponibles à l'Université Laval et à l'Université de Montréal (FCI; Fortier 2011). Le projet appuiera le développement et l'évaluation des performances des techniques de protection sélectionnées. Il comprendra les activités suivantes :

1. Essai de remblais à convection d'air (ACE), de système de drains thermique et de demi-tuyaux dans des remblais à petite échelle à l'intérieur d'une chambre froide. En plus des avantages mentionnés dans le paragraphe précédent, ces études seront également utilisées afin de déterminer une température minimale de fonctionnement de ces systèmes dans l'optique d'expliquer la performance médiocre observée sur le terrain de certains de ces systèmes au cours d'hivers doux.
2. Essai de matériaux de revêtement possédant un albédo élevé sur le site expérimental routier de l'Université Laval (SERUL) situé 75 km au nord de la ville de Québec. (Fait partie du projet 3b)

La modélisation numérique thermique s'appuiera sur les résultats des tâches 1b. Les propriétés mécaniques obtenues à partir de la littérature, des essais à petite échelle et des sections d'essai seront utilisés pour alimenter le modèle thermique. L'efficacité des techniques de protection proposées sera évaluée en comparant un remblai protégé avec un remblai non protégé. Les

modèles calibrés à l'aide des données thermiques du site d'essai seront utilisées pour les analyses suivantes :

1. Variation des conditions thermiques aux limites afin de documenter le champ d'application
2. Variation des paramètres de conception des systèmes de protection afin de maximiser leur efficacité.

L'efficacité des techniques de protection sera évaluée sur une base à court terme (un cycle saisonnier complet) et sur une base à long terme (15-20 ans) basée sur des scénarios de réchauffement réalistes (scénarios régionaux d'Ouranos disponibles à l'Université de Montréal). La température du pergélisol, l'épaisseur de la couche active et leur évolution dans le temps (incluant le réchauffement climatique) seront utilisées pour évaluer l'efficacité des techniques de protection considérées par rapport à un remblai non protégé. Ce travail s'appuiera sur les travaux de recherche actuellement en cours à l'Université Laval et l'Université de Montréal.

b) Développement des matériaux et des techniques d'entretien pour les remblais touchés par la dégradation du pergélisol (maîtrise)

Les revêtements de routes et de pistes d'atterrissage touchés par la dégradation du pergélisol perdent rapidement leur capacité fonctionnelle due à la distorsion et la fissuration du remblai. Les techniques d'entretien et les matériaux couramment utilisés comprennent le nivellement de la surface et le remplissage avec des matériaux granulaires pour des infrastructures en gravier, la scarification, le nivellement et le resurfaçage des infrastructures à surface traitée ainsi qu'un retraitement à froid pour les surfaces pavées.

Malgré le fait que ces traitements de maintenance répondent adéquatement aux problèmes des capacités fonctionnelles, ils aggravent souvent la dégradation thermique due à la couleur foncée des matériaux de maintenance, ce qui rend ces traitements inefficaces pour la stabilisation à moyen et à long terme. Ce projet de recherche se concentrera sur le développement de stratégies de maintenance basées sur des approches d'utilisation de matériaux de couleurs claires et la stabilisation thermique. Il comprendra les tâches de recherche suivantes :

1. Identifier et documenter les propriétés d'une série de matériaux de maintenance ayant les propriétés de base suivantes : albédo élevé (pour la réduction du rayonnement solaire), adaptés aux environnements froids (la capacité d'adhérer à des surfaces existantes en gravier et en asphalte, de murir et de performer de façon adéquate à température froide), facile à transporter et à mettre en place avec le matériel disponible dans des régions éloignées.
2. Essai dans des environnements contrôlés (sur asphalte ou sur dalles de gravier dans le laboratoire (Université Laval et Université de Montréal)) et au site expérimental routier de l'Université Laval; activité réalisée dans le cadre du projet 3a) afin de documenter les propriétés mécaniques (résistance au dérapage, adhérence et l'albédo).
3. Élaborer une stratégie de maintenance complète pour la stabilisation thermique des sections de remblai touchées par la dégradation du pergélisol. La stratégie est susceptible d'impliquer un reprofilage de la surface de la chaussée, un rehaussement du profil et un surfaçage avec un matériau possédant un albédo élevé.
4. Expérimenter des stratégies de maintenance ainsi que des matériaux sur de nouvelles sections d'essai sur l'autoroute de l'Alaska au Yukon et sur les routes d'accès à Tasiujaq et à Salluit au Nunavik. L'expérimentation implique la documentation des problèmes pratiques

survenant pendant les opérations de maintenance, la surveillance du profil thermique dans la section traitée en comparaison avec une section de référence non traitée adjacente pendant 2 années de surveillance de l'état de surface suivant l'application.

c) Développement d'un cadre pour la gestion des infrastructures de transport construit sur un pergélisol en dégradation (doctorat)

Cette activité de recherche consistera à l'élaboration d'outils intégrés pour appuyer la gestion des réseaux routiers et/ou pistes d'atterrissage dans les régions de pergélisol en tenant compte du contexte local ainsi que des changements climatiques. Le cadre de gestion reposera sur des principes de gestion d'actifs de base largement documentés [Cowe chutes et al., 2001] et la gestion des risques [van Staveren M., 2007]. La gestion d'actifs de chaussée est une combinaison d'activités intégrées permettant la maximisation de la valeur des actifs en transport. Il comprend les activités principales suivantes :

1. Inventaire des actifs et de leurs conditions : Dans un contexte d'infrastructures de transport nordique, cette activité consiste principalement au développement d'une méthodologie pour la caractérisation de la valeur et des conditions des routes et des pistes d'atterrissage ainsi que pour l'identification et la caractérisation des couches vulnérables. Une procédure a été développée et utilisée par Transports Québec [Boucher et al., 2010] pour la surveillance des pistes d'atterrissage et des routes d'accès au Nunavik. Cette activité s'appuiera sur cette expérience et sur l'état actuel des connaissances sur la gestion d'actifs des chaussées pour développer une méthodologie pratique adaptée aux infrastructures de transport dans les environnements de pergélisol éloignés.
2. Analyse des scénarios d'investissement : cette activité clé comporte deux types d'analyse :
 - a) Analyse coût-bénéfice : Ce type d'analyse nécessite une bonne connaissance de la faisabilité et des coûts des différents investissements applicables aux routes et aux pistes d'atterrissage en milieu de pergélisol (maintenance, stabilisation thermique, relocalisation, etc.). Elle implique également une bonne connaissance de l'évolution probable d'une section de chaussée donnée, avec ou sans investissement. L'analyse s'appuie ensuite sur une évaluation coûts-bénéfices pour un cycle de vie des différentes stratégies envisagées. Le coût, la faisabilité et la performance des différentes stratégies pour les routes et les pistes d'atterrissage seront documentés dans le cadre de cette activité de recherche. L'information sera principalement obtenue à partir des dossiers existants avec la coopération de Yukon Highways and Public Works, de Transports Québec et du gouvernement régional Kativik. Si nécessaire, des informations complémentaires seront recueillies dans le cadre de ce projet.
 - b) Analyse de risque : En plus du coût et du niveau de service qui sont les deux facteurs dominants dans la plupart des processus de décision, le risque doit également être pris en considération pour les collectivités nordiques éloignées, où les voies d'accès alternatives sont souvent inexistantes. La probabilité d'une rupture causant la fermeture d'une route ou d'une piste d'atterrissage et les conséquences possibles sur les communautés locales doivent être prises en considération dans le processus décisionnel. Basée sur les dernières connaissances concernant les méthodes d'analyse de risque, une procédure sera développée dans le cadre de cette activité de manière à pondérer adéquatement le risque de rupture en plus de l'analyse coûts-bénéfices dans le processus décisionnel.
3. L'analyse des impacts sociaux et économiques : Les impacts d'un mauvais état ou d'une rupture de chaussée (routes ou des pistes d'atterrissage) peuvent être considérables pour les collectivités du Nord. Les impacts possibles comprennent une augmentation des coûts de

fonctionnement ainsi qu'une réduction de l'efficacité et de la fiabilité des transports terrestres et aériens. D'autres impacts moins tangibles comprennent la réduction de la qualité de vie ainsi que l'augmentation de risques pour la santé et la sécurité. Ces impacts seront documentés et, lorsque disponibles, les modèles existants permettant la quantification de ces impacts seront utilisés et intégrés dans le cadre de gestion. Dans les autres cas, les impacts seront évalués en fonction de l'évaluation subjective des gestionnaires locaux (réunis au moyen d'un processus d'entrevue). Cette activité de recherche résultera en l'élaboration d'un cadre de gestion des infrastructures de transport. La méthode sera validée à la fin du projet de recherche à travers deux projets pilotes réalisés sur une route et sur une piste d'atterrissage au Yukon et au Nunavik, en collaboration avec les administrations locales.

LIVRABLES DU PROGRAMME

La recherche mènera au développement d'une expertise, de procédures et de techniques pour la détection et la caractérisation du dégel du pergélisol sensible, pour l'atténuation de la dégradation du pergélisol et la gestion des infrastructures de transport dans les milieux de pergélisol. Plus précisément, les résultats suivants seront produits :

- Un document de discussion décrivant et discutant des stratégies d'adaptation pour soutenir la planification du développement des infrastructures de transport pour les administrations locales. Le document examinera la pertinence de différents scénarios tels que la protection du pergélisol et l'adaptation des pratiques de maintenance dans différents contextes du Nord canadien afin d'obtenir des services de transport stables et économiques à long terme.
- Des lignes directrices techniques pour la préparation des projets de transport, pour la préservation des installations existantes et pour la gestion des routes et des réseaux de pistes d'atterrissage dans un contexte de changements climatiques. La caractérisation de site pour la planification et la préparation de projet, la conception, la construction et ainsi que la maintenance des infrastructures de transport seront abordés dans un guide pratique.
- Une partie importante du projet sera la production de matériel pédagogique pour les cours d'ingénierie. Cela permettra de soutenir les programmes réguliers d'ingénierie et de sciences de la terre, les cours de deuxième cycle en ligne ainsi que les cours de formation continue pour les ingénieurs en exercice. Le matériel produit comprend le matériel de présentation et les travaux pratiques basés sur des études de cas construits dans le cadre du projet.

Le projet permettra également de produire plusieurs publications de haut niveau présentées lors de conférences scientifiques spécialisées et soumis à des revues scientifiques.

Les produits du programme devraient appuyer l'analyse des différents scénarios d'adaptation en fournissant des outils pour évaluer l'état des infrastructures de transport et en fournissant des informations précieuses sur la performance des différentes techniques de protection.

EXPERTISE DE L'ÉQUIPE DE RECHERCHE

Les chercheurs et les praticiens impliqués dans le projet ont une solide connaissance et compréhension des processus liés au pergélisol et de l'interaction pergélisol-remblai à la fois d'un point de vue pratique et théorique. L'équipe multidisciplinaire comprend un spécialiste d'ingénierie

du pergélisol, un spécialiste en transfert de chaleur et en modélisation thermique ainsi qu'un spécialiste en géomorphologie périglaciaire et en science du pergélisol.

L'équipe sera sous la direction du professeur Guy Doré, qui possède une solide expérience en ingénierie des infrastructures de transport soumis au gel saisonnier et en contextes de pergélisol. Entre autres activités, Guy Doré a travaillé sur la conception et la construction des infrastructures de transport au Nunavik. Au cours des dix dernières années, il a développé un programme de recherche important portant sur la performance et sur la protection des routes, des chemins de fer et des pistes d'atterrissage construits sur du pergélisol sensible au dégel. Parmi plusieurs autres publications sur le sujet, il a coécrit le livre « Cold regions pavement engineering » (McGraw-Hill / ASCE presse) et « Guidelines for development and management of transportation infrastructure in permafrost regions » publié récemment par l'Association des Transports du Canada.

Louis Gosselin est un professeur de génie mécanique (Université Laval), avec une expertise reconnue dans la modélisation des mécanismes de transfert de chaleur et l'optimisation des systèmes thermiques. Ses récents intérêts comprennent, entre autres sujets, les travaux reliés aux problèmes de changement de phase solide-liquide, le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide dans les milieux poreux, le pergélisol, et l'énergie géothermique.

Daniel Fortier est professeur de géomorphologie (Université de Montréal), professeur de recherche affilié à l'Institute of Northern Engineering (University of Alaska Fairbanks), et directeur du Laboratoire de géomorphologie et géotechnique des régions froides (UdeM). Au cours des dix dernières années, les recherches du professeur Fortier ont été axées sur la géodynamique des régions de pergélisol. Au Yukon et au Nunavik, il dirige des projets de recherche sur l'impact de la dégradation du pergélisol sur la stabilité des infrastructures dans un contexte de réchauffement climatique. Il a été impliqué dans le choix du site, la caractérisation du pergélisol, la conception, la construction et le suivi de la section de route expérimentale de Beaver Creek (Yk) pour tester les techniques d'atténuation de la dégradation du pergélisol.

Les efforts de l'équipe seront soutenus par un groupe de collaborateurs de l'industrie (partenaires du programme). Ces collaborateurs sont des experts en ingénierie des chaussées participant à l'investigation des sols, la conception des chaussées, la construction et la maintenance des routes et des pistes d'atterrissage dans les zones de pergélisol. Ils fourniront un point de vue technique pratique et une connaissance approfondie des problèmes liés à la gestion des infrastructures de transport en milieu de pergélisol.

REFERENCES

- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P., Tarrussov, A., (2009), L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes, Rapport de recherche, Centre d'études Nordiques, Université Laval, 198 p
- Boucher M., Grondin G., and Guimond A., 2010, Auscultation et investigations du pergélisol sous les infrastructures du ministère des Transports du Québec au Nunavik : vers une stratégie d'adaptation, Proceedings of Geo2010, Calgary, Alberta
- Cheng G.D. and Li X., 2003, Constructing the Qinghai-Tibet Railroad: new challenges to Chinese permafrost scientists, Permafrost, Phillips, Springma & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, pp.131-134

- Cole, H., Colonell, V., Esch D., Economic impacts and consequences of global climate change on Alaska's infrastructure, *Assessing the Consequences of Climate Change for Alaska and the Bering Sea Region*, Edited by Weller and Anderson, Fairbanks, USA, 1999, p. 43-57
- Cowe-Falls L., Haas R., Mcneil S., And Tighe S., 2001, Using Common Elements Of Asset Management and Pavement Management to Maximize Overall Benefits, *Transportation Research Board Annual Meeting*, Paper No. 01-2415
- de Grandpré I., Fortier D., and Stephani E., 2010 Impact of groundwater flow on permafrost degradation: implications for transportation infrastructures, *Proceedings of Geo2010*, Calgary, Alberta
- Doré G., Flamand M., et Pierre P., 2001, Analysis of wavelength content of the longitudinal profiles for C-LTPP test sections, *Can. J. Civ. Eng.*, vol.29, no. 1, p.50-57
- Dysli, M., Lunardi V., and Stenberg L., 1997, Related effects of frost action: Freezing and solar radiation indices, *Ground Freezing 97*, Knutsson S., (ed), A.A. Balkema, Rotterdam.
- Esch, D., *Road and Airfield Design for Permafrost Conditions*, ASCE Monograph, *Roads and Airfields in Cold Regions*, Edited by Vinson, New York, 1996, p.121-149
- Etzelmüller B., Farbrot H., Humlum O., Christiansen H., Juliussen H., Isaksen K., Schuler T.V., Ødegård R.S., and Ridefelt H., 2008, Mapping and Modeling the Distribution of Permafrost in the Nordic Countries, *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, Fairbanks AK
- Humlum O., Instanes A., and Sollid J.L., 2003, Permafrost in Svalbard: a review of research history, climatic background and engineering challenges, *Polar research* 22 (2), pp.191-215
- Gavrilova M.K., 2008, Climate Change in Permafrost Regions in North America. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, Fairbanks, AK
- Goering D.J., 2003, Passively Cooled Railway Embankments for Use in Permafrost Areas, *J. Cold Reg. Engrg.* Volume 17, Issue 3, pp. 119-133
- Instanes A., 2003, Climate change and possible impacts on Arctic infrastructure, *Permafrost*, Phillips, Springman & Arenson (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, pp.461-466
- Kneisel C., Hauck C., Fortier R., and Moorman B., 2008, Advances in Geophysical Methods for Permafrost Investigation, *Permafrost and periglacial processes*, 19: 157-178
- Kondratiev V.G., 1998, Geokryological problems associated with railroads and highways, *Proceedings of the 9th international conference on permafrost*, Fairbanks AK, vol.1, pp.977-982
- Lunardi V.J., 1978, Theory of n-Factor and correlation of data, *Proceedings of the third international conference on permafrost*, National research council of Canada, Ottawa, Canada, Vol.1, pp.41-46
- Ma W., Cheng G., and Wu Q., 2009, Construction on permafrost foundations: Lessons learned from the Qinghai-Tibet railroad *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 59-1, October 2009, Pages 3-11
- Reimchen D., Doré G., Fortier D., Stanley B., and Walsh R., 2009, Cost and Constructability of Permafrost Test Sections Along the Alaska Highway, Yukon, *Proceedings of the 2009 Annual Conference of Transportation Association of Canada*, Vancouver, British Columbia
- Slater A.G., and Lawrence D.M., 2008, Permafrost, Parameters, Climate Change, and Uncertainty, *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, Fairbanks, AK

- Smith S.L., Lewkowicz A.G., and Burn C.R., 2008, Thermal State of Permafrost in Canada: A Contribution to the International Polar Year, Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, AK
- Vaillancourt, M., Perraton, P., Dorchies, D. et Doré, G., 2003, Décomposition du pseudo-profil et analyse de l'Indice de Rugosité International (IRI), Can. J. Civ. Eng. 30: 923-933
- Van Staveren M., 2007, Extending to Geotechnical Risk Management, First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, Tongji University, China
- Verreault j., 2011, Caractérisation du pergélisol et stratégie d'intervention pour les aéroports du Nunavik, Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Département de génie civil
- Yoshikawa K., Leuschen C., Ikeda A., Harada K., Gogineni P., Hoekstra P., Hinzman L., Sawada Y., and Matsuoka N., 2006, Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice), Journal of Geophysical Research, vol. 111, E06S19, doi:10.1029/2005JE002573, 10p.