

Le but du programme de recherche en ingénierie Arquluk 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. Il met l'accent sur le développement de solutions rentables pour la conception et la gestion. Il répond à la nécessité d'avoir une meilleure compréhension des facteurs qui contribuent à la dégradation du pergélisol; d'amélioration des techniques d'investigation pour identifier le pergélisol sensible au dégel; et de développement des outils d'ingénierie pour appuyer la conception et la gestion des infrastructures de transport dans le Nord canadien.

Les objectifs sont:

- 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.

Pour répondre à ces objectifs, le programme est divisé en trois thèmes 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;

THÈME 2: Identification et caractérisation des sols sensibles au dégel;

THÈME 3: Développement des techniques d'adaptation pour les infrastructures de transport construites sur un pergélisol instable

Durant les premières années de recherche, le programme Arquluk a évolué et les trois thèmes ont été réorganisés, tout en gardant comme cible les objectifs initiaux. Le thème 1 sert donc plutôt à fournir des données au thème 3. D'ailleurs, les deux projets de conception (neige et drainage) initialement dans le thème 1, ont été déplacés dans le thème 3, puisqu'ils ne font pas uniquement qu'améliorer les connaissances des facteurs qui influent sur la performance des chaussées (objectif 1), mais ils produisent également des outils de conception et guide d'adaptation. Tous les projets du programme sont maintenant terminés ou le seront dans les prochains mois, sauf deux projets de doctorats (drainage et mitigation) qui ont débuté en 2014 et 2015.

PROGRÈS RÉALISÉS DANS LE THÈME 2

Les quatre projets du thème 2 répondent à l'objectif 2, soit l'amélioration des techniques d'investigation pour identifier le pergélisol sensible au dégel.

- **PROJET 2a**

Détection de glaces massives en milieu pergélisolé par la technique géophysique de micro-gravimétrie.

Ce projet de maîtrise, codirigé par Daniel Fortier de l'Université de Montréal, a été réalisé par **Benoît Loranger**.

À l'origine le projet comprenait deux volets soit, l'utilisation d'une méthode géophysique de détection de massifs de glace enfouie par microgravimétrie, et l'analyse de températures sous la surface du terrain afin d'y déceler des anomalies thermiques. Le 2^e volet (profilage thermique) ne semblant pas être concluant, les efforts ont été concentrés sur la méthode de micro-gravimétrie qui a pour but de détecter des anomalies entre des matériaux de masse volumique différente dans le sol. La glace massive (contenu en glace > 250 %) ayant environ la moitié de la masse volumique du sol environnant, elle sera représentée par une anomalie négative. Des relevés sur le terrain ont été accomplis à l'aide d'un gravimètre à Beaver Creek et Dry Creek, au Yukon. La contribution en nature du partenaire Kryotek a permis de valider la présence de massifs de glace enfouie grâce à des forages effectués à ces sites. La collaboration avec Thomas Ingerman-Nielsen de l'Université technique du Danemark DTU, a également permis de faire des relevés au Groenland, près de Kangerlussuaq; d'abord sur un site de polygones à coins de glace bien documenté, ainsi qu'en marge de la calotte glaciaire où l'épaisseur de glace est mesurable. Les objectifs du projet ont été répondus. Un gravimètre de haute précision peut détecter la glace massive enfouie de différentes formes et volumes, pour des profondeurs (précision accrue entre 0 et 5 m) et des milieux de pergélisol variés. Puis, un modèle 2D (colonnes allongées verticalement) simple et rapide a été développé dans un chiffrier Excel et est cohérent avec les anomalies gravimétriques mesurées. La méthode offre une applicabilité intéressante dans divers domaines, mais particulièrement en génie civil tant au niveau de la conception, la construction, la maintenance et l'évolution des infrastructures de transport construites en région de pergélisol sensible au dégel, en contexte de changements climatiques.

- **PROJET 2b**

- Profils de chaussées : Effet du gel saisonnier et de la dégradation du pergélisol.**

- Ce projet a d'abord fait l'objet d'un court stage effectué par **Céline Carreau**, puis d'une maîtrise réalisée par **Laurie-Anne Grégoire** avec la supervision en entreprise de Nicolas Martel, Englobe.

L'objectif principal du projet était d'élaborer un outil d'analyse en profilométrie à partir de profils effectués sur les infrastructures de transport linéaires existantes. Il comporte deux volets distincts, soit la caractérisation de l'évolution de la dégradation du pergélisol et la problématique des dégradations reliées au gel saisonnier au Québec, réalisé en collaboration avec la Chaire de recherche industrielle i3c. Dans le cadre du programme Arquluk, seulement le premier volet est traité. Le projet utilise l'Indice de Rugosité Internationale (IRI), qui mesure le confort au roulement à l'aide d'un modèle mécanique relatif aux déviations verticales par rapport à un profil parfaitement droit. L'IRI a été mesuré à l'aide d'un profilomètre manuel (Surpro), sur trois sections d'un kilomètre de long sur l'autoroute de l'Alaska au Yukon, en avril (gel maximum) et en septembre (dégel maximum) 2015. Les données ont ensuite été filtrées pour différencier les longueurs d'onde : les courtes sont comprises entre 0,7 et 2,8 m et représentent des dégradations en surface, tels des fissures; tandis que les longues, entre 11,3 et 45,2 m, représentent plutôt des dégradations en profondeur qui pourraient être liées à l'instabilité du pergélisol. Les analyses des relevés de terrain ont permis d'obtenir des différences d'IRI entre septembre et avril et montrent une dominance des courtes longueurs d'onde où il y avait des rapiécages en surface; une dominance des grandes longueurs d'onde aux endroits où des dégradations en profondeur liées au pergélisol instable étaient observables et; un IRI négatif, donc une chaussée en meilleure condition en septembre qu'en avril, là où il n'y a pas de problématique reliée au pergélisol. Les résultats obtenus ont permis de déceler des tendances relatives aux problématiques reliées au pergélisol. Les coûts liés à la logistique de terrain sur les sites nordiques ont limité la quantité de

sites étudiés pour ce projet. Un plus grand nombre seraient nécessaire pour créer un outil de détection. Une méthode de traitement des données a toutefois été développée.

- PROJET 2c

Développement d'un carottier pour la caractérisation in-situ du pergélisol.

Ce projet de maîtrise a été réalisé par **Cédric Flécheux**, sous la codirection de Louis Gosselin, du Département de génie mécanique de l'Université Laval, qui a grandement collaboré à la supervision du design mécanique du carottier.

La caractérisation d'un pergélisol sensible au dégel n'est actuellement possible que par le biais d'échantillonnage par forage, opération difficile et coûteuse en régions éloignées. Ce projet avait donc pour but de développer un carottier capable de réaliser des essais in situ de consolidation de dégel. Au lieu de récupérer des échantillons gelés et de les transporter dans un laboratoire pour y effectuer les essais, le système doit permettre le dégel du sol dans le carottier et la mesure de ses propriétés de consolidation sous une contrainte verticale choisie. Le projet a permis de construire un prototype répondant à ces critères, auquel un brevet canadien est associé. Les essais en laboratoire ont mené à plusieurs améliorations du prototype et les essais sur le terrain n'ont donc pas pu être réalisés. Toutefois, seulement quelques modifications seront nécessaires pour rendre le carottier utilisable sur le terrain. La collaboration entre l'Université Laval (génie mécanique) et des partenaires du programme Arquluk permettra d'apporter les ajustements finaux au prototype et de faire des essais sur le terrain. Le produit final pourra ensuite être manufacturé et commercialisé par les partenaires. Finalement, le carottier oedométrique a été qualifié de "percée majeure dans l'ingénierie du pergélisol" lors de la Conférence internationale sur l'ingénierie des régions froides, au Utah, en 2015.

- PROJET 2d

Comportement mécanique des sols marginalement gelés.

Ce projet de maîtrise a été réalisé par **Mathieu Durand-Jézéquel**.

L'étalement des remblais par rotation et fluage des épaulements est un problème important en régions de pergélisol. Le problème, relativement bien documenté dans la littérature, est généralement attribué au fluage des épaulements sous le poids statique du remblai. Peu d'informations sont disponibles sur l'effet de la charge dynamique induite par le passage répété des véhicules lourds et des trains circulant sur ces remblais. Les objectifs de ce projet étaient de développer une méthodologie pour caractériser le comportement mécanique des sols marginalement gelés (entre 0° et -2° C) et de quantifier l'effet de charge déviatorique répétée sur ce comportement pour valider si les véhicules lourds ont une influence sur le fluage. Le montage innovateur développé en laboratoire pour réaliser les essais avec un grand contrôle des températures à -0,5 ° C a nécessité plusieurs ajustements. Une nouvelle méthodologie permettant de réaliser des essais triaxiaux de fluage en condition drainée sur des échantillons gelés a été développée. Il a été montré que l'effet du passage des véhicules lourds est à considérer pour les remblais de faible épaisseur. Deux abaques ont été produits. Le premier pour le fluage statique, utilise les données des trois essais effectués et celles de la littérature pour permettre d'évaluer le taux de déformation minimum (% / année) en fonction de la température. Le deuxième abaque représente le fluage dynamique d'un remblai de 1 m d'épaisseur et permet l'évaluation de la déformation axiale (%) en fonction du nombre de cycle, donc du passage de véhicules lourds. Puisque les conditions peuvent grandement varier d'un site à l'autre, cet abaque nécessiterait l'apport d'essais additionnels qui n'ont pu être réalisés dans cette étude dû à la complexité du montage développé. Ces deux abaques permettent d'évaluer les tassements statique et dynamique et ainsi de constater que pour un remblai de 1 m d'épaisseur et des

conditions spécifiques (durée de l'été, trafic, pergélisol chaud), l'apport relatif des charges dynamiques compte pour environ 68% du tassement total.

PROGRÈS RÉALISÉS DANS LE THÈME 3

Les cinq projets du thème 3 répondent aux objectifs 3 et 4, soit l'élaboration d'outils, de méthodes et de lignes directrices pour l'application de différentes stratégies de conception, construction et maintenance ainsi que pour aider la gestion des infrastructures de transport construites sur un pergélisol sensible au dégel.

- **PROJET 3a**

Stabilisation thermique des infrastructures de transport construites sur pergélisol instable à l'aide de surface à albédo élevé.

Le premier projet de maîtrise, réalisé par **Simon Dumais**, a rapidement montré des possibilités d'étendre les recherches au-delà du mandat initial. Suivant l'intérêt des partenaires impliqués et leur grande contribution en nature, une seconde maîtrise a été réalisée par **Caroline Richard**, ainsi qu'un stage de 6 mois par **Jade Haure-Touzé** de l'Université de technologie de Troyes, France.

La chaleur absorbée par un revêtement foncé contribue à réchauffer le sol, ce qui entraîne la dégradation du pergélisol. Une solution envisagée pour contrer ce problème est l'utilisation de matériaux de revêtement à albédo élevé qui réduisent l'absorption de la radiation solaire. L'objectif principal de ce projet était de développer une méthode de stabilisation basée sur l'albédo de la surface. Comme il existe une relation entre la température superficielle d'un revêtement routier et son albédo, un modèle simple de calcul des températures de surface des revêtements routiers en fonction de leur albédo a d'abord été développé en utilisant le bilan d'énergie simplifié. Ce modèle a été validé pour plusieurs sites et permet d'évaluer rapidement la pertinence d'utiliser un revêtement à albédo élevé à partir des températures de surface et de la pénétration du dégel. Puis, un cadre d'évaluation des propriétés techniques des revêtements à albédo élevé, en laboratoire et in-situ, a été proposé, garantissant ainsi une utilisation efficace, durable et sécuritaire de ces produits dans un contexte nordique. Une relation entre l'albédo et l'âge du revêtement avec plusieurs mesures sur le terrain a été développée et les différences d'albédo suivant le type de granulats ont été explorées. Trois sites d'essais réalisés en collaboration avec des partenaires du programme, ont fournis plusieurs informations et données essentielles à la réalisation de ce projet. Ces sites sont situés à la Forêt Montmorency (Québec), où l'accessibilité a permis de tester et améliorer les procédures d'application des produits, ainsi que de choisir l'instrumentation la mieux adaptée. Puis, les produits ont été installés sur l'autoroute de l'Alaska (Yukon) et à Salluit (Nunavik). Finalement, des modélisations thermiques ont été effectuées à l'aide du logiciel TEMP/W de Geo-Slope, pour déterminer le gradient de température entre le pergélisol (zéro variation annuelle) et l'interface du remblai avec le sol naturel. L'approche de stabilisation thermique développée pour les infrastructures de transport construites sur un pergélisol instable au dégel compte donc un modèle thermique sous forme d'abaque, qui permet d'évaluer la différence de température requise entre l'interface et le pergélisol pour limiter l'apport de chaleur et stabiliser thermiquement le pergélisol et ce, en fonction de différentes hauteurs de remblai. Ce modèle a été validé pour le cas de Beaver Creek, mais l'ajout de simulations pour différents cas, variations des températures de l'air et du pergélisol, améliorera la précision. Les gestionnaires pourront ainsi utiliser la hauteur du remblai (rechargement) et l'albédo pour atteindre une stabilisation thermique.

- PROJET 3b

- Développement d'une procédure de conception tenant compte de l'accumulation de neige le long des remblais sur pergélisol.**

- Ce projet de maîtrise, codirigé par Daniel Fortier de l'Université de Montréal, a été réalisé par **Florence Lanouette**.

L'objectif du projet est de comprendre et de documenter l'impact de la rétention de chaleur dans le sol, due à l'accumulation de neige, sur la dégradation des remblais construits sur le pergélisol sensible au dégel; ceci afin de développer un outil d'ingénierie guidant la conception et la gestion des infrastructures de transport. La réalisation de cet objectif a impliqué l'analyse du régime thermique dans le remblai et dans le sol, à la piste d'atterrissage de Tasiujaq au Nunavik, de même que des mesures de la hauteur et des températures de neige en bordure de la piste, ainsi que le long de l'autoroute de l'Alaska au Yukon. Les données collectées aux deux sites d'essais ont servi à développer et à calibrer un modèle thermique 2D réalisé sur le logiciel TEMP/W, à partir duquel le comportement mécanique des remblais pourra être évalué. L'impact des paramètres géométriques du remblai, tels que la hauteur et l'angle des pentes, a été quantifié. Un abaque de conception a été développé pour déterminer les proportions requises de la pente du remblai, soit le rapport entre la hauteur et la largeur ($V : H$), pour respecter une différence de température entre l'interface remblai/sol naturel et le pergélisol, pour ainsi limiter l'apport de chaleur dans l'infrastructure. Les concepteurs disposent donc d'une méthode de conception adéquate pour les remblais où le vent et l'orientation de l'infrastructure favorisent l'accumulation de neige. L'efficacité de la méthode dépend également de la hauteur du remblai.

- PROJET 3c

- Développement d'une méthodologie pour la conception de système de drainage à faible impact le long des infrastructures de transport construites en milieux de pergélisol.**

- Ce projet de doctorat a été cofinancé par le programme ADAPT. Il est réalisé par **Julie Malenfant-Lepage** et codirigé par Daniel Fortier de l'Université de Montréal.

Une des causes principales de la dégradation des remblais construits sur pergélisol est la chaleur transférée au remblai et au sol d'infrastructure par le ruissellement de surface et par les eaux souterraines. Cette dégradation réduit les capacités structurelles et fonctionnelles de l'infrastructure et, dans certains cas, peut entraîner la rupture des remblais. Le projet vise à évaluer la quantité admissible d'eau pouvant être concentrée dans un canal pour prévenir et contrôler le transfert de chaleur au pergélisol, ainsi que l'érosion des sols. Pour se faire, deux relations sont en développement, soit la relation entre l'écoulement et l'érosion en utilisant un érodimètre (en collaboration avec l'Université norvégienne des sciences et de la technologie NTNU à Trondheim), ainsi que la relation entre l'écoulement et le transfert de chaleur convectif à l'aide du Nombre de Péclet. Des mesures ont été effectuées à trois sites expérimentaux situés au Groenland (en collaboration avec Thomas Ingerman-Nielsen, Université technique du Danemark DTU), au Yukon et à Salluit au Nunavik, pour déterminer l'influence du débit et de la température de l'eau sur les températures du sol et les flux de chaleur. Ces données serviront à calibrer un modèle thermique en deux dimensions qui sera développé à l'aide du logiciel SVHeat. La résistivité électrique a également été utilisée et montre bien la dégradation du pergélisol due à l'écoulement de l'eau. Cette méthode de géophysique a le potentiel de devenir un outil utile et rentable pour la conception de système de drainage sur le pergélisol. Les deux relations développées combinées au modèle thermique permettront d'élaborer une approche basée sur de nouvelles stratégies et techniques de conception. Cette approche permettra aux concepteurs de déterminer la géométrie du système de drainage et le nombre optimal de passages (ponceaux)

à considérer pour une section donnée de l'infrastructure, pour minimiser l'impact sur le pergélisol.

- PROJET 3d

Développement d'une méthode d'analyse quantitative du risque pour les infrastructures de transport linéaires construites sur pergélisol.

Ce projet de doctorat est réalisé par **Heather Brooks**, en codirection avec Michel Allard du département de géographie et en collaboration avec Ariane Locat du département de génie civil et de génie des eaux, tous deux de l'Université Laval.

La conception des infrastructures de transport linéaires construites sur pergélisol, ainsi que les sommes allouées à leur entretien, utilisent actuellement des procédés qualitatifs. L'objectif de ce projet était donc de mettre au point une méthodologie d'analyse quantitative du risque. Le risque correspond à la probabilité qu'un danger (ex : défaillance de ponceau, tassement au dégel) se produise durant un intervalle de temps, ainsi qu'aux conséquences associées, calculées en fonction des dommages anticipés. La méthode développée prend en considération les aléas qui peuvent affecter la viabilité de la structure, ainsi que les conséquences que peuvent entraîner le mauvais fonctionnement ou l'interruption de service, sur les coûts d'opération et sur les populations qui dépendent de l'infrastructure. Elle est fondée sur une évaluation quantitative du risque géotechnique associée à une infrastructure linéaire construite sur le pergélisol, utilisant une approche probabiliste, ainsi que sur l'évaluation des conséquences. Elle tient également compte du réchauffement climatique. Les conséquences directes sont quantifiables, par exemple la perte d'un équipement; tandis que les conséquences indirectes, telles les blessures, étant difficiles à quantifier, un facteur d'échelle sociétale est utilisé permettant aux gestionnaires d'adapter en fonction du site. Un outil pratique d'évaluation du risque utilisable par les gestionnaires des infrastructures de transport en régions nordiques été développé dans le logiciel Excel. L'outil d'analyse développé est en cours de validation avec le site très bien documenté de l'aéroport d'Iqaluit au Nunavut.

- PROJET 3e

Développement des stratégies et techniques de mitigation pour adapter les remblais construits sur pergélisol sensible au dégel.

Ce projet de doctorat est réalisé par **Xiangbing Kong**. Il a été partiellement financé par le Yukon Highways and Public Works via le Yukon Research Centre et bénéficie actuellement d'autres financements connexes.

Ce projet n'était pas dans le programme de recherche initial, mais la disponibilité d'un étudiant et l'apport financier additionnel provenant d'autres sources, a permis de l'intégrer puisque sa problématique rejoint entièrement celle du thème 3, soit de développement des techniques d'adaptation des infrastructures de transport construites sur pergélisol sensible au dégel. L'objectif du projet est donc d'améliorer les outils d'ingénierie pour concevoir les systèmes de protection du pergélisol par extraction de chaleur utilisant la convection d'air. Les objectifs spécifiques sont de déterminer le champ d'application de chaque technique développée; de produire un arbre de décision pour aider à choisir la meilleure méthode à appliquer compte tenu du contexte et des besoins locaux; puis d'améliorer la conception de deux techniques d'extraction de chaleur du sol utilisant la convection d'air (drain thermique et remblai à convection d'air). Un modèle thermique par éléments finis à deux dimensions, réalisé avec le logiciel SVOOffice (modules SVHeat et SVAir) de la compagnie Soil Vision, est utilisé pour simuler la distribution de température dans la section transversale du remblai de route et dans le sol d'infrastructure. Cette modélisation permettra de comparer l'efficacité des différentes techniques de mitigation

convectives en fonction de leurs paramètres de conception et utilisant le bilan d'énergie (chaleur absorbée par le remblai et le sol vs la chaleur extraite), et ainsi d'en optimiser la conception. Le produit final guidera les intervenants dans leur choix d'adaptation des infrastructures de transport nordiques afin de préserver le pergélisol sous-jacent.

Par ailleurs, les rencontres annuelles avec les partenaires ont servi à faire le point et à échanger sur les différents projets. Elles ont eu lieu à Whitehorse, avec les partenaires de l'ouest, puis à Québec, avec les partenaires de l'est. En 2015, une seule rencontre a eu lieu à Québec profitant de la présence de plusieurs partenaires à la conférence GéoQuébec et offrant le service de vidéo conférence pour ceux à distance. Ce mode de communication a d'ailleurs été utilisé pour la rencontre annuelle de 2016 et pour plusieurs comités de suivi de projet. Ces comités ont été formés afin de permettre aux partenaires de mieux s'investir dans les projets qui les intéressent particulièrement, leur permettant de se prononcer sur les orientations du projet, et d'orienter les résultats en fonction des besoins des utilisateurs. Cet apport des partenaires assure que les outils et méthodes développés soient accessibles et facile d'utilisation.

D'ailleurs, dans le but d'informer les intervenants du Nord de la disponibilité de ces nouveaux outils et nouvelles méthodes, nous avons tenu un premier Symposium Arquluk, en français, à l'Université Laval en mai 2017. Cet événement a été très apprécié par les 70 participants, dont près de 50% étaient des ingénieurs. Afin de bien couvrir les enjeux, les défis, la science et l'ingénierie liés aux infrastructures de transport construites sur pergélisol, nous avons invité à présenter les équipes de recherche de Michel Allard (Université Laval) et Daniel Fortier (Université de Montréal), ainsi que le Bureau de la coordination du Nord-du-Québec du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET). Un second symposium, en anglais, est planifié pour février 2018, à Whitehorse au Yukon pour ainsi faciliter la présence des intervenants nordiques de l'ouest du Canada. Puis, tous les outils (chiffrier Excel, abaque, ...) et documents finaux seront rendus disponibles sur le site web Arquluk à arquluk.gci.ulaval.ca.

Finalement, malgré quelques légers ajustements au niveau des objectifs de certains projets, les quatre objectifs du programme de recherche ont été atteints. En effet, les projets ont permis d'améliorer les connaissances des facteurs qui influent sur la performance des chaussées construites sur un pergélisol sensible au dégel (objectif 1), ainsi que les techniques de détection et de caractérisation des sols et des remblais instables (objectif 2). Le programme de recherche a également fourni des outils, méthodes et lignes directrices permettant d'adapter la conception et la maintenance des infrastructures pour ainsi atténuer la dégradation du pergélisol associée à la construction et aux changements climatiques (objectifs 3 et 4). Enfin, la méthode d'analyse du risque développée permettra une meilleure gestion des infrastructures de transport construites sur le pergélisol et ce, avant même sa conception (objectif 4). L'amélioration des capacités actuelles d'adaptation par le développement d'une expertise sur la stabilisation thermique du pergélisol sous les infrastructures de transport permettra aux intervenants (décideurs et ingénieurs) de mieux gérer tant au niveau de la planification, de la conception, de la répartition des fonds disponibles, qu'au niveau de la maintenance.