

Route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq :

Développement des connaissances sur les propriétés du pergélisol et identification de solutions d'adaptation dans un contexte de changements climatiques.

CC01.1

Rapport final

Emmanuel L'Hérault, Michel Allard, Michael Lemay, Carl Barrette, Andrée-Sylvie Carbonneau et Marc-André Ducharme

Centre d'études nordiques, Université Laval

Rapport produit pour le compte du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec,
Ministère des Transports du Québec



UNIVERSITÉ
LAVAL

mars 2015

AVANT-PROPOS

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des Transports du Québec pour la confiance et le financement accordés en vue de la réalisation de cette étude. Nous soulignons également la collaboration de l'Administration Régionale Kativik pour avoir facilité les travaux par l'accès aux installations aéroportuaires. Finalement, on ne peut passer sous silence l'accueil amical que notre équipe a reçu dans la communauté de Tasiujaq.

Auteurs :

- Emmanuel L'Hérault, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Michel Allard, professeur-chercheur, Département de géographie, Université Laval
- Michael Lemay, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Carl Barrette, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Andrée-Sylvie Carbonneau, professionnelle de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Marc-André Ducharme, étudiant, Département de géographie, Université Laval

Citation recommandée :

E. L'Hérault, M. Allard, M. Lemay, C. Barrette, A-S. Carbonneau et M-A. Ducharme (2014), Route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq : Développement des connaissances sur les propriétés du pergélisol et identification de solutions d'adaptation dans un contexte de changements climatiques. Rapport final réalisé pour le compte du Ministère des Transports (Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 89 p.

Les auteurs tiennent à remercier également les personnes suivantes pour leur participation à la présente étude :

- Catherine Claveau Fortin, étudiante, Département de géographie, Université Laval
- Ariane B. St-Amour, étudiante, Département de géographie, Université Laval
- Guy Doré, professeur-chercheur, Département de génie civil, Université Laval
- Anick Guimond, coordonnatrice du projet de recherche, BCNQ, MTQ
- Hugo Ouellet, BCNQ, MTQ
- Jad Khalife, BCNQ, MTQ
- Joannie Poupart, BCNQ, MTQ
- Simon Carpentier, BCNQ, MTQ
- Andrée Marquis, BCNQ, MTQ
- Marc Fortier, BCNQ, MTQ
- Julie Langevin, BCNQ, MTQ
- Djibrirou Ndiaye, BCNQ, MTQ
- Bruno Paquet, MTQ

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	1
Liste des illustrations.....	3
Liste des tableaux.....	5
1 Introduction.....	6
2 Objectifs.....	8
3 Méthodologie :	9
3.1 Recensement des informations existantes.....	9
3.2 Données LIDAR.....	9
3.3 Cartographie améliorée des dépôts de surface.....	10
3.4 Validation et relevés de terrain	12
3.4.1 Relevés des défauts.....	14
3.4.2 Sondages, forages avec récupération et observations de surface.....	15
3.4.3 Relevés géophysiques	17
3.4.3.1 Géoradar.....	17
3.4.3.2 Résistivité électrique	17
3.5 Caractérisation des propriétés géotechniques du pergélisol	22
3.6 Simulations géothermiques	23
3.6.1 Construction, conditions limites et calibration du modèle géothermique	23
3.6.2 projection géothermique	27
4 Résultats:	29
4.1 Observations générales et synthèse des défauts.....	29
4.2 Répartition spatiale, épaisseurs et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface	32
4.2.1 Secteur 1 : Chaînage 0+000 m à 0+720 m	33
4.2.2 Secteur 2 : chaînage 0+720 m à 1+500 m	36
4.2.3 Secteur 3 : chaînage 1+500 m à 2+100 m	38
4.2.4 Secteur 4 : chaînage 2+100 m et au-delà	40
4.3 Analyses géothermiques du pergélisol et tassements à venir	42
4.3.1 Évolution récente : 1989-2014	42
4.3.2 Évolution future : période 2014-2050.....	46
4.3.2.1 Chaînage 1+600 m	46
4.3.2.2 Chaînage 2+874 m	48
4.3.3 Comportement géothermique anticipé selon différents designs envisagés pour le secteur 4	51
5 Synthèse, stratégie d'adaptation et conclusion	53
6 Références	56
Annexe 1 : Planche synthèse.....	58
Annexe 2 : Rapport de forages	60
Annexe 3 : Résultats des analyses en laboratoire	81

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : A) Localisation du village de Tasiujaq où se tiendra l'investigation géotechnique et caractérisation des conditions de pergélisol le long de la route d'accès. B) Section de la route d'accès fortement dégradé tel qu'observé au mois d'août 2014.....	7
Figure 2 : Couverture des données LIDAR acquises par le MTQ, le MAMROT et le MRNF pour le village de Tasiujaq (Polygone rouge). Zone d'intérêt de la présente étude (Polygone jaune).	9
Figure 3 : A) Carte des unités géologiques de surface de la communauté de Tasiujaq produite par Vinet <i>et al.</i> , 2012. B) Orthomosaique de 1985 utilisée pour cartographier les dépôts meubles sous les infrastructures existantes.....	11
Figure 4: Localisation des relevés géophysiques, sondages et forages dans le secteur de la route d'accès à la piste d'atterrissage de Tasiujaq réalisés lors d'études antérieures ainsi que durant la récente campagne de terrain du CEN dans le cadre de la présente étude.	13
Figure 5: A) Recensement des dépressions importantes qui affectent la route. B) et C) Caractérisation des dépressions observées le long de la route (profondeur et longueur). D) Accumulation d'eau aux abords d'un ponceau.....	14
Figure 6: A) Sondages de surface réalisés à la rétrocaveuse le long de la piste d'atterrissage et B) prélèvement d'échantillons. C) Forages superficiels avec récupération à l'aide d'une foreuse portative et D) Sondage superficiel.....	16
Figure 7: A) Relevé géoradar de 50 MHz dans l'axe et B) de 200 MHz transversal à la route d'accès. C) Relevé géoradar de 200 MHz en milieu naturel à proximité de la route d'accès. Aperçu d'un relevé géoradar de 200 MHz D) avant et E) après la correction topographique.	19
Figure 8: A) Schéma du système de résistivité électrique couplé capacitivement (tirée de Geometrics, 2014). B) et C) Aperçu de la configuration du système sur le terrain avec l'utilisation d'un véhicule pour la traction.	20
Figure 9 : A) Conditions de surface selon le type de surface et les conditions d'enneigement. B) Conditions limites, géométrie et stratigraphie du modèle géothermique de la route d'accès, chaînage 1+600 m.....	25
Figure 10 : Conditions limites, géométrie et stratigraphie du modèle géothermique de la route d'accès, chaînage 2+874 m.	26
Figure 11: Comparaisons des températures moyennes annuelles de l'air reconstituées (NARR), observées (HT-304) avec celles des séries MRCC AEV et AHA, Tasiujaq, Nunavik.	28
Figure 12: A) Aperçu général de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq. B), C) et D) Tassements différentiels et déformation subséquente de la surface pavée. E) Coin de glace qui traverse sous le remblai de la route. F) Fissures longitudinales qui suggèrent une fatigue de la chaussée par tassement. G) Accumulation d'eau au bord d'un ponceau. H) Série de dépressions de grande amplitude. I) Dépressions linéaires dont le patron géométrique semble attribuable à la présence d'un réseau de coins de glace. ...	31
Figure 13: A) et B) Stratigraphie superficielle au forage TAS-2014-F5 qui montre le contact entre le silt sablonneux brunâtre et le mélange de silt et sable grisâtre avec trace de gravier sous-jacent. C) Échantillon de silt et sable grisâtre gelé prélevé entre 1,96 et 2,4 m de profondeur. D) Image de densité du même échantillon obtenue par tomodynamométrie et mettant en évidence un réseau réticulé de fines lentilles millimétriques. E) Sédiments intertidaux diamictiques (Mi) avec de nombreuses lentilles de glace millimétriques échantillonnés au forage TAS_F2 entre 2,48 et 3 m de profondeur et F) Sédiments glaciomarins fins grisâtres et massifs (MGa) avec réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées par des lentilles de glace centimétriques horizontales et subverticales (Tirée de L'Hérault <i>et al.</i> , 2012).....	35

Figure 14: A) Environnement de surface et B) stratigraphie au site de l'excavation TAS-2014-T2 qui consiste en un sable grossier avec cailloux centimétriques arrondis où certaines sections du dépôt sont stratifiées. C) Secteur déprimé mal drainé entre les chaînages 0+900 et 1+000 m et D) excavation TAS-2014-T3 dans laquelle un diamicton a été rencontré près de la surface sous une mince couche de sable.....	37
Figure 15: A) Sillon de coin de glace qui traverse le milieu environnant. B) Échantillon de sable fin avec traces de silt dont le contenu en glace semble moyennement élevé (TAS-2014-F6). C) Échantillon traversant un coin de glace (TAS-2014-F1). D) et E) Échantillons de sable et gravier assez grossier. F) Coupe stratigraphique à proximité de la route où un diamicton grisâtre a été observé.....	39
Figure 16: Argile silteuse grisâtre et compacte (Sédiments intertidaux : Mit) recouverte d'une couche de sable et gravier brunâtre (Alluvion) observée à l'excavation TAS-2014-T1 (A), au forage TAS-2014-F3 (B) et TAS-2014-F3a (C). Échantillon gelé d'argile silteuse grisâtre (USCS : CL) prélevé au forage TAS-2014-F3a.	41
Figure 17 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales du sol de 2003 et 2014 mesurées dans le milieu naturel (câble HT-304).	44
Figure 18 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales du sol pour 2014 mesurées dans le remblai de la piste d'atterrissage (câble HT-181).....	45
Figure 19 : Simulation de l'évolution de la profondeur maximale du front de dégel au cours de la période 2014-2050 selon la sortie climatique MRCC AHA, centre ligne, chaînage 1+600 m.....	46
Figure 20 : Conditions géothermiques simulées au chaînage 1+600 à la fin de la saison de dégel (1er octobre) de A) 2014, B) 2024 et C) 2050 (scénario climatique AHA). D) Conditions géothermiques au milieu de l'hiver 2050 qui montre la présence d'un bulbe non-gelé sous la route qui tarde à regeler.	47
Figure 21 : Simulation de l'évolution de la profondeur maximale du front de dégel au cours de la période 2014-2050 selon les deux sorties climatiques MRCC utilisées (AEV et AHA), centre ligne, chaînage 2+874 m.	49
Figure 22 : Conditions géothermiques simulées au chaînage 2+874 m à la fin de la saison de dégel (1er octobre) de A) 2014, B) 2050 (scénario climatique AEV) et C) 2050 (scénario climatique AHA).....	50
Figure 23 : Géométrie et conditions limites pour les différents exercices de simulations numériques. A) surface non pavée (option #1), B) rehaussement du remblai de 30 cm et surface non pavée (option #2) et C) surface pavée (référence). D) différence entre la position de l'isotherme de 0 °C pour le 23 octobre 2024 selon les différents exercices de simulations numériques. Les lignes rouge, verte et bleue correspondent respectivement à l'isotherme 0 °C de la référence, de l'option #1 et de l'option #2.....	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Horaire et description sommaire des travaux réalisés par l'équipe technique du CEN lors de la campagne de terrain d'octobre 2014, route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq, Nunavik.....	12
Tableau 2: Caractéristiques des sondages et des forages réalisés au cours de la présente étude.	17
Tableau 3: Spécifications techniques des relevés géoradar réalisés dans le cadre de la présente étude..	20
Tableau 4: Spécifications techniques des relevés de résistivité électrique réalisés au cours de la présente étude.	21
Tableau 5 : Propriétés thermiques des matériaux et caractéristiques des conditions limites utilisées pour le modèle géothermique au chaînage 1+600 m.	25
Tableau 6 : Propriétés thermiques des matériaux et caractéristiques des conditions limites utilisées pour le modèle géothermique chaînage 2+874 m.	26
Tableau 7: Caractérisation de dix dépressions majeures observées le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq.	32
Tableau 8: Épaisseurs maximales de la couche active à l'emplacement des différents câbles à thermistances ou puits de forages au cours de la période 1989-2014, aéroport de Tasiujaq.	43
Tableau 9 : Facteur-n utilisés selon le type de surface et les conditions d'enneigement.	52
Tableau 10 : Profondeur maximale (en mètre) du front de dégel au centre ligne, chaînage 2+874 m, route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq.....	53

1 INTRODUCTION

Le Nunavik, avec une superficie d'environ 515 000 km², constitue le tiers nord de la province de Québec. Les quelque 11 000 personnes qui y habitent sont réparties à l'intérieur de 14 villages et l'intercommunication entre eux ainsi qu'avec le reste du Canada repose exclusivement sur les voies maritimes et aériennes. Dans ce contexte, les aéroports ainsi que leurs routes d'accès constituent des infrastructures essentielles qui doivent être maintenues opérationnelles et sécuritaires. Le suivi des températures dans le pergélisol montre que les profils thermiques continuent de se réchauffer et que la profondeur du dégel annuel sous les pistes et leurs routes d'accès continue d'augmenter (Allard *et al.*, 2013).

Durant et après la construction des infrastructures aéroportuaires, des études sur le pergélisol ont été menées par Transports Québec et le Centre d'études nordiques (CEN) (Lévesque *et al.*, 1990; Allard *et al.*, 1993; Beaulac et Doré, 2005; Beaulac, 2006; Savard, 2006; Allard *et al.*, 2007). Les objectifs de ces études étaient d'une part : d'acquérir le maximum de connaissances sur le pergélisol au Québec nordique en vue de fournir l'information nécessaire à la construction et à l'entretien à venir des pistes d'atterrissage et leurs routes d'accès, et d'autre part, de produire une description technique détaillée sur la façon dont les processus liés au réchauffement climatique et à la déstabilisation du régime thermique du pergélisol affecteront les pistes d'atterrissage et les routes d'accès. Tout récemment, afin de préciser l'étendue et les propriétés exactes des sols sensibles au dégel sous certaines pistes et routes d'accès jugées particulièrement à risque, le ministère des Transports du Québec (MTQ) a réalisé en 2008 et 2009 des campagnes de forages pour sept pistes d'atterrissage (Tasiujaq, Kangirsuk, Quaqtac, Salluit, Akulivik, Puvirnituc, Inukjuak) et deux routes d'accès (Salluit et Umiujaq) (Figure 1A). Appuyées sur ces nouvelles connaissances et en tenant compte des conditions locales (type de sol, température du sol, conditions de pergélisol, géométrie et type d'infrastructure, drainage, couverture nivale, etc.), une série de mesures ont été proposées permettant de prévenir ou d'atténuer le dégel du pergélisol en vue de préserver et de prolonger l'intégrité des infrastructures dans un contexte de réchauffement du climat (L'Hérault *et al.*, 2012). En utilisant une méthodologie similaire, les infrastructures aéroportuaires de Kangiqsualujjuaq ont également récemment fait l'objet d'une étude géotechnique approfondie permettant l'élaboration d'une stratégie d'adaptation optimisée (L'Hérault *et al.*, 2014). En conformité avec les stratégies d'adaptation proposées par ces études, des travaux correctifs ont été récemment réalisés, notamment à Salluit, Puvirnituc et Quaqtac, et certains autres le seront très prochainement.

Depuis quelques années, on observe un endommagement prématuré de la route d'accès de l'aéroport de Tasiujaq, qui est causé par le dégel du pergélisol (Figure 1A). En effet, fortement affectée par une dégradation du pergélisol qui altère considérablement la surface de roulement (Figure 1B), cette infrastructure nécessite des travaux de réfection. C'est donc en vue d'orienter ces travaux qu'une étude intégrée et complète s'impose afin de bien comprendre le système pergélisol sur lequel repose la route et les principales causes responsables de sa dégradation. Ainsi, en suivant une approche méthodologique comparable aux études antérieures réalisées par le CEN, nous avons procédé à la caractérisation du pergélisol le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq de manière à mieux cibler l'étendue et les propriétés des sols sensibles au dégel qui demeurent encore méconnues faute de sondages stratégiquement localisés et en nombre suffisant.

L'étude a consisté d'abord à réaliser un relevé de la littérature afin de recenser les informations géoscientifiques disponibles qui permettront de préciser les conditions initiales en périphérie et sous la route d'accès (articles scientifiques, rapports de forages, cartes géologiques, anciennes photographies aériennes, plans, etc.). Par la suite, ces informations ont été couplées à une mise à jour des données géothermiques, une cartographie améliorée et à haute résolution des dépôts de surface, aux

recensements des défauts effectués par le personnel du MTQ, aux images aériennes récentes et aux données LIDAR afin de dresser un portrait intégré des conditions récentes du pergélisol. Par la suite, une campagne de terrain a été réalisée afin de valider et préciser les propriétés du sol le long de la route d'accès (sondages et forages avec récupération). Des relevés de géoradar ont également été réalisés sur le centre-ligne de la route ainsi que transversalement à plusieurs endroits afin de préciser la stratigraphie des dépôts et en estimer leur épaisseur. Ces relevés serviront aussi à déterminer la position actuelle du front de dégel en-dessous et en marge de la route de même qu'à détecter les concentrations de glace dans le sol de fondation. L'intégration des connaissances géoscientifiques recensées et celles nouvellement acquises a permis de documenter les conditions de pergélisol actuelles et futures, sous et en périphérie de la route existante ainsi que d'évaluer les risques naturels et infrastructurels dans un contexte de changements climatiques.

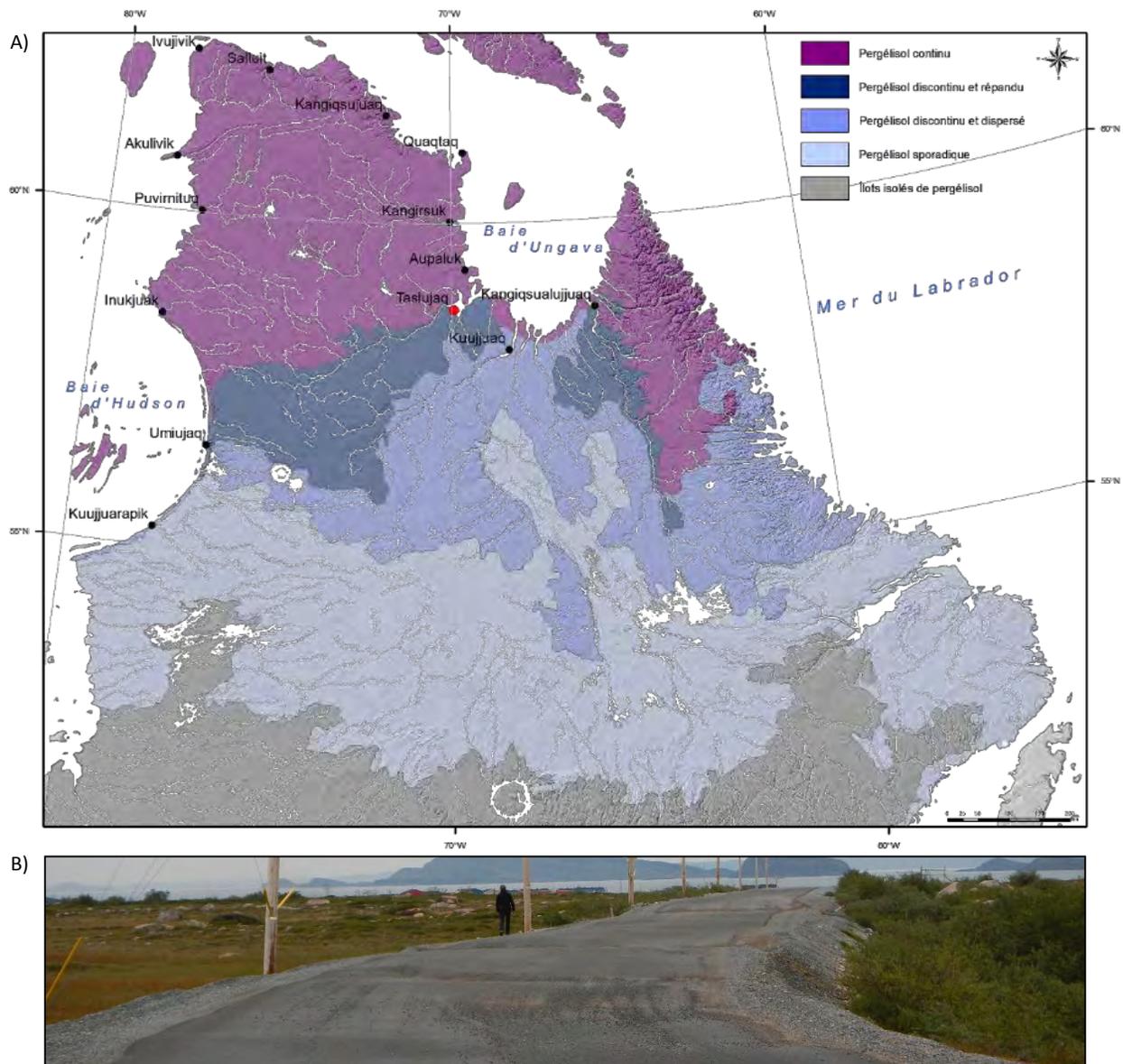


Figure 1 : A) Localisation du village de Tasiujaq où se tiendra l'investigation géotechnique et caractérisation des conditions de pergélisol le long de la route d'accès. B) Section de la route d'accès fortement dégradé tel qu'observé au mois d'août 2014.

2 OBJECTIFS

Les principaux objectifs du projet de recherche sont :

- Évaluer la vulnérabilité de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq, en lien avec le dégel du pergélisol, afin d'évaluer les risques naturels ainsi qu'infrastructurels dans un contexte de changements climatiques;
- Identifier les solutions d'adaptation optimales à mettre en œuvre pour réduire la vulnérabilité de celles-ci et afin de la maintenir sécuritaire et pérenne à long terme.

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

- Recenser, compiler et intégrer les informations géoscientifiques disponibles (articles scientifiques, rapports de forages, cartes géologiques, plans, etc.) afin de préciser les conditions géotechniques et du pergélisol initiales en périphérie et sous la route d'accès.
- Procéder à une cartographie améliorée des dépôts de surface et processus géomorphologiques à l'aide des photographies aériennes avant construction et celles de 2010.
- Procéder à une mise à jour des données géothermiques, puis à une analyse des conditions géothermiques et de leur évolution depuis la construction de la route d'accès.
- Valider et préciser les types de sols à l'aide de sondages et forages superficiels (<5 m) en périphérie de la route.
- Intégrer les résultats des sondages dans leur contexte topographique et géomorphologique en faisant usage des observations de terrain et des autres sources d'information disponibles (anciens sondages, données thermiques régionales et données géophysiques existantes). Comblar au besoin le manque d'information en ce qui concerne la répartition des unités géologiques de surface sous et en périphérie des infrastructures du MTQ (Cartographie) et la stratigraphie (Réalisation et interprétation de levés géoradar).
- Simuler numériquement le régime thermique du pergélisol à partir de scénarios climatiques en vue de quantifier et prédire les impacts de sa fonte en fonction de ses propriétés géotechniques déterminées en laboratoire (consolidation au dégel).
- Élaborer avec les professionnels du MTQ une stratégie d'adaptation visant à assurer la pérennité de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq et la sécurité des usagers dans un contexte de réchauffement climatique et de dégel du pergélisol.

3 MÉTHODOLOGIE :

3.1 RECENSEMENT DES INFORMATIONS EXISTANTES

Afin d'extraire les informations telles que l'épaisseur et les pentes des remblais ainsi que la topographie du terrain naturel sous la route d'accès, les plans d'origine « tel que construit » ont été numérisés. À partir de ces plans, il a été possible d'extraire les coordonnées d'élévation le long du chaînage et ainsi de produire des coupes longitudinales et transversales. Ces coupes permettent d'apporter des précisions sur la géométrie des remblais et la topographie du terrain naturel avant construction, information essentielle dans la validation des levés géophysiques et la construction des modèles d'analyses numériques du régime thermique.

3.2 DONNÉES LIDAR

À l'automne 2010, le MTQ, le MAMROT et le MRNF ont fait l'acquisition de photographies aériennes et de levés LIDAR pour la production d'orthophotographies et de modèles numériques d'altitude pour les 14 villages du Nord-du-Québec. Les relevés LIDAR ont une précision altimétrique et géographique en deçà de 10 cm et une résolution spatiale supérieure à 1 point/m². Les données LIDAR ont fait l'objet d'une série de traitements afin d'une part d'éliminer les erreurs et d'autre part diminuer le nombre de points de mesures redondant afin de faciliter la manipulation du jeu de données. Par la suite, un modèle numérique d'élévation d'une résolution de 1 m x 1 m a été généré à partir des levés LIDAR (Figure 2). Ce modèle couvre en totalité la superficie occupée par les infrastructures routières et aéroportuaires du MTQ à Tasiujaq.

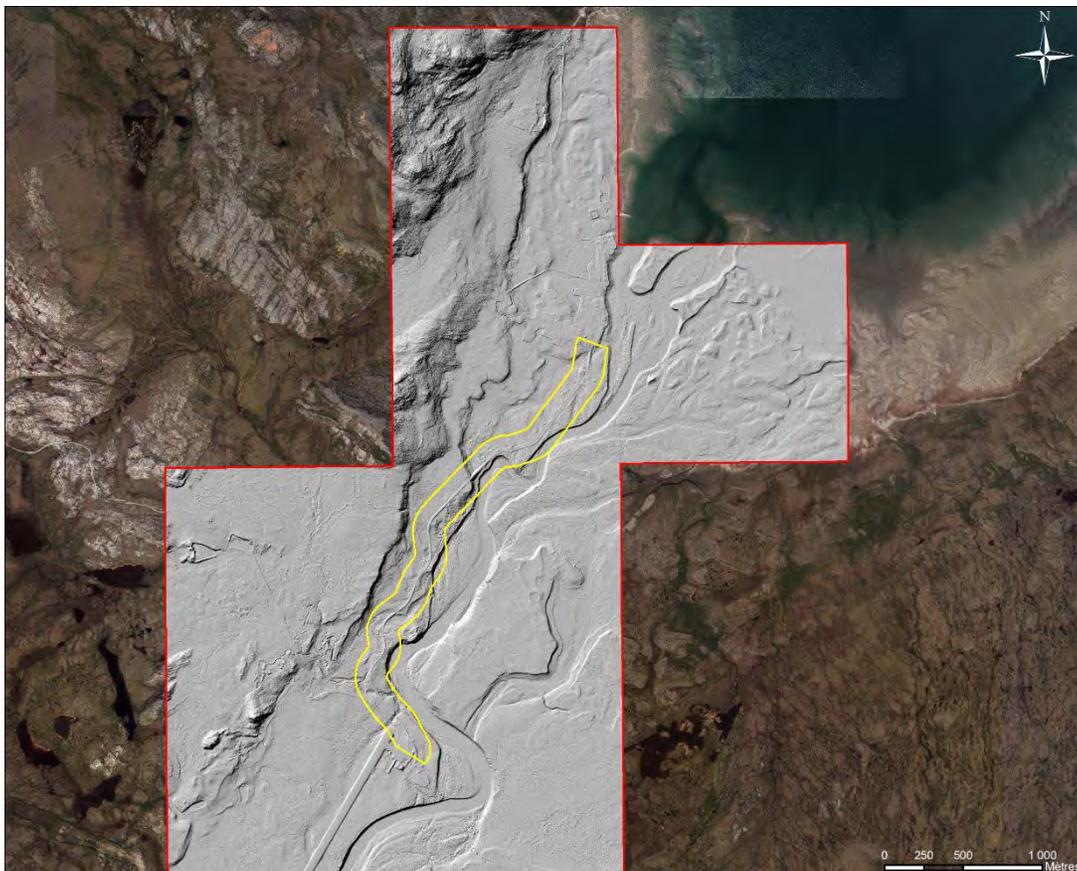


Figure 2 : Couverture des données LIDAR acquises par le MTQ, le MAMROT et le MRNF pour le village de Tasiujaq (Polygone rouge). Zone d'intérêt de la présente étude (Polygone jaune).

3.3 CARTOGRAPHIE AMÉLIORÉE DES DÉPÔTS DE SURFACE

Dans le présent rapport, un effort prioritaire a été porté à la réalisation d'une carte améliorée des dépôts de surface le long de la route d'accès. Cette nouvelle cartographie reprend la carte produite par Vinet *et al.*, (2012) (Figure 3A) et y intègre les informations géotechniques et stratigraphiques d'études antérieures ainsi que celles acquises lors de la campagne de terrain réalisée à l'automne 2014. Les photographies aériennes et données LIDAR acquises à l'automne 2010 pour cette communauté par le MTQ, le MAMROT et le MRNF ont été utilisées à titre de base cartographique pour la numérisation des nouvelles cartes de dépôts de surface. La photo-interprétation a été réalisée sur support numérique en utilisant le logiciel SUMMIT EVOLUTION de DAT/EM Systems International qui permet la numérisation des unités de terrain à l'écran dans une interface tridimensionnelle et une intégration directe dans le logiciel de cartographie ArcGIS. Afin d'accroître la précision de cette cartographie et d'étendre la caractérisation et la délimitation des dépôts de surface sous les infrastructures en place en continuité avec le milieu naturel, les anciennes photographies aériennes disponibles avant la construction ont été numérisées puis géoréférencées (Figure 3B). L'intégration de l'information géotechnique antérieure et récente a permis d'apporter certaines précisions sur les épaisseurs des couches stratigraphiques, la profondeur du roc et les caractéristiques géotechniques des dépôts meubles.

Pour la réalisation des cartes des dépôts géologiques de surface, la légende utilisée est celle de la Commission géologique du Canada. Cette légende permet une discrétisation des différentes unités de terrain selon les caractéristiques sédimentaires et l'expression morphologique (plage, levée alluviale, delta, esker, drumlins, moraine, etc.) qui permettent d'en déterminer l'origine. Dans cette légende, la description de chacune des unités de terrain cartographiée contient également des informations sur la granulométrie, la composition lithologique, les structures sédimentaires, la couleur et l'épaisseur propres à chacun des dépôts. Une cartographie préliminaire des dépôts de surface, en ciblant les secteurs peu documentés au point de vue de la géologie de surface et des conditions de pergélisol, a permis d'orienter la campagne de terrain en vue de valider et compléter l'information à l'aide d'observations de terrain (forages, sondages, excavations, coupes stratigraphiques).

Il est important de mentionner que la délimitation des zones de répartition des unités géologiques de surface et l'estimation de leur épaisseur que présentent les cartes des unités géologiques de surface comportent certaines incertitudes en raison de la grande variabilité locale à Tasiujaq des conditions de terrain comme les inégalités de la topographie du roc sous-jacent aux dépôts meubles et les mélanges produits dans la couche superficielle du terrain par les processus de gel et de dégel (cryoturbations). En conséquence, les cartes produites dans ce rapport sont des images d'ensemble qui doivent être utilisées comme un outil général susceptible d'orienter la planification.

3.4 VALIDATION ET RELEVÉS DE TERRAIN

Une campagne de terrain a été réalisée au mois d'octobre 2014 afin de valider la cartographie des différentes unités géologiques de surface et également d'acquérir de nouvelles informations stratigraphiques et géotechniques dans le secteur de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq. Cette campagne de terrain s'est déroulée entre le 01 et 8 octobre 2014. Un échancier accompagné d'une description sommaire des travaux réalisés par l'équipe technique du CEN est présenté au tableau1.

Tableau 1: Horaire et description sommaire des travaux réalisés par l'équipe technique du CEN lors de la campagne de terrain d'octobre 2014, route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq, Nunavik.

01-oct	7h00 - 15h00 : mobilisation sur place de l'équipement et de l'équipe du CEN 18h00 - 20h00 : Préparation de l'équipement
02-oct	7h00 - 11h00 : Préparation de l'équipement et localisation des forages et des excavations 12h00-18h00 : Forages <ul style="list-style-type: none"> Forages : TAS-2014-F1 et TAS-2014-F2
03-oct	7h00 - 14h00 : Géophysique <ul style="list-style-type: none"> Relevé GPR : Lignes 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12 14h00 - 18h00 : validation de la cartographie des dépôts de surface
04-oct	7h00 - 10h00 : Géophysique <ul style="list-style-type: none"> Relevé GPR : Ligne 13 (route d'accès) 10h00 - 14h00 : Relevé des défauts <ul style="list-style-type: none"> Recensement des dépressions et accumulations d'eau le long de la route. 14h00 - 18h00 : validation de la cartographie des dépôts de surface
05-oct	7h00 - 15h00 : Géophysique <ul style="list-style-type: none"> CCR line 1 15h00 - 18h00 : Relevé des défauts <ul style="list-style-type: none"> Recensement des dépressions et accumulations d'eau le long de la route.
06-oct	7h00 - 10h00 : Géophysique <ul style="list-style-type: none"> CCR line 2 10h00 - 18h00 : Forages et excavations <ul style="list-style-type: none"> Excavation TAS-2014-F3, TAS-2014-F3a, TAS-2014-F4, TAS-2014-T1, TAS-2014-T2
07-oct	7h00 - 9h00 : Géophysique <ul style="list-style-type: none"> CCR line 2 9h00 - 17h00 : Forages et excavations <ul style="list-style-type: none"> Excavations : TAS-2014-T3, TAS-2014-T4, TAS-2014-T5 et TAS-2014-T6 Forages : TAS-2014-F5, TAS-2014-F6 18h00 - 20h00 : Préparation de l'équipement pour démobilisation
08-oct	7h00 - 10h00 : Expédition de l'équipement et des échantillons congelés 10h00 - 17h00 : Démobilisation de l'équipe du CEN vers Québec



Figure 4: Localisation des relevés géophysiques, sondages et forages dans le secteur de la route d'accès à la piste d'atterrissage de Tasiujaq réalisés lors d'études antérieures ainsi que durant la récente campagne de terrain du CEN dans le cadre de la présente étude.

3.4.1 RELEVÉS DES DÉFECTUOSITÉS

Un relevé de défauts a été réalisé par les membres de l'équipe du CEN afin de localiser, documenter et mesurer les signes de dégradation le long de la route d'accès. Ainsi, les principales dépressions, fissures et zones d'accumulation d'eau en marge de la route ont été recensées puis géolocalisées (Figure 5A, B, C et D). Les informations ainsi recueillies ont été intégrées et superposées aux couches d'informations déjà existantes (cartes de dépôts de surface, topographie, ruissellement des eaux de surface) afin de produire un outil synthèse qui permet de cerner les zones problématiques et de poser un diagnostic sur les causes probables de la dégradation de l'infrastructure. Dans les différents projets antérieurs du CEN réalisés pour le MTQ, ce type de relevé s'est avéré indispensable dans l'évaluation de la sensibilité de l'infrastructure à la dégradation thermique du pergélisol.



Figure 5: A) Recensement des dépressions importantes qui affectent la route. B) et C) Caractérisation des dépressions observées le long de la route (profondeur et longueur). D) Accumulation d'eau aux abords d'un ponceau.

3.4.2 SONDAGES, FORAGES AVEC RÉCUPÉRATION ET OBSERVATIONS DE SURFACE

Au total, plus d'une dizaine de sondages à la rétrocaveuse ont été réalisés en bordure de la route d'accès (Figure 6A). Limités à la couche active, ces sondages superficiels ne permettent pas de fournir de l'information sur les conditions de pergélisol, toutefois, ils apportent des précisions sur le type de dépôt, le niveau de la nappe phréatique et la profondeur de dégel (Figure 6B). Ces sondages ont permis de procéder à un échantillonnage sélectif des différentes unités de sol rencontrées dans la couche active, mais également de réaliser des forages avec récupération à l'intérieur même de l'excavation (Figure 6C). Au total, sept forages stratégiquement localisés ont été réalisés à l'aide d'une foreuse portative (Calmels et *al.*, 2005) (Figure 6C). Les carottiers utilisés ont permis la récupération d'échantillons gelés non perturbés d'un diamètre maximal de 100 mm et ce, jusqu'à une profondeur pouvant atteindre près de 3,5 m. Les forages ont été réalisés suivant un protocole précis qui consiste en premier lieu à procéder à une excavation à la pelle jusqu'à l'atteinte du front de dégel pour ensuite y déposer un tubage de 300 mm afin de retenir les parois de l'excavation lors du forage. Pour minimiser les pertes et les risques de dégradation de l'échantillon, des courses moyennes de 30 cm ont été réalisées. Une description sommaire de chaque échantillon, incluant la profondeur, le type de sédiment et les cryostructures, a été réalisée sur le terrain. Les échantillons gelés ont ensuite été expédiés au laboratoire de sédimentologie de l'Université Laval pour y effectuer des analyses géotechniques. Les observations de forages ainsi que les données issues des analyses en laboratoires ont été compilées à l'intérieur de rapports de forages. Pour compiler les informations de forages et reproduire la stratigraphie, le logiciel Logplot™ de la compagnie Rockware® a été utilisé. Les caractéristiques techniques des sondages et des forages sont résumées au tableau 2 et leurs localisations présentées à la figure 4. Fait à noter, en raison de la période tardive d'investigation, l'épaisse couche active et les températures chaudes dans le sol ont limité considérablement le taux de succès des forages ainsi que des excavations. En effet, de l'eau s'accumulait dans les excavations et les carottes dégelaiement ou s'effritaient. Outre les sondages et les forages, de nombreuses observations de surface ont été réalisées par l'équipe technique (Figure 6D) apportant ainsi des précisions sur le type de dépôt de surface, le type de végétation, les conditions de drainage, la profondeur de dégel et la présence de formes de terrain en surface (ostioles, soulèvements gélivaux, fentes de gel, buttes, cordons de blocs glaciels, *etc.*) qui peuvent être révélateurs des conditions du pergélisol.

Les coordonnées géographiques de chacune des observations de terrain ont été relevées à l'aide de GPS portatifs dont la précision est d'environ 3 m. En plus de valider la cartographie des dépôts de surface par photo-interprétation, les observations de terrain ont permis, par corrélation, d'attribuer aux différentes unités de terrain cartographiées des conditions de pergélisol observées et documentées lors des forages. Toutes les informations récoltées sur le terrain ainsi que celles provenant d'études antérieures ont été regroupées à l'intérieur d'une table d'attributs à référence spatiale où chaque élément possède des coordonnées géographiques qui permettent de le localiser précisément. L'exploitation de cette table d'attributs dans un système d'information géographique (ArcGIS® version 10.2) offre l'avantage de pouvoir exécuter des requêtes afin de consulter rapidement l'information, visualiser et positionner les observations de terrain et les représenter sous forme de cartes thématiques.

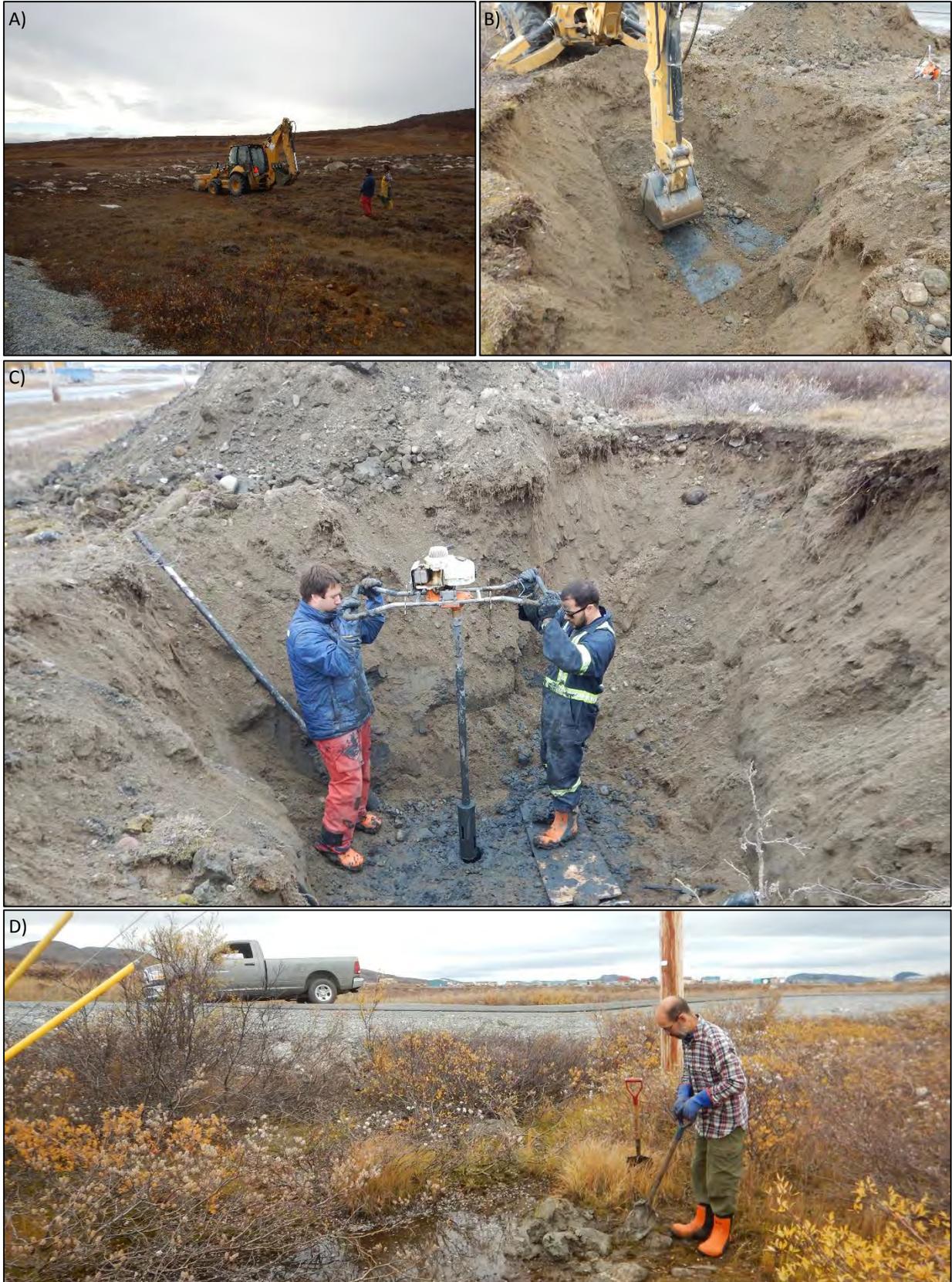


Figure 6: A) Sondages de surface réalisés à la rétrocaveuse le long de la piste d'atterrissage et B) prélèvement d'échantillons. C) Forages superficiels avec récupération à l'aide d'une foreuse portable et D) Sondage superficiel.

Tableau 2: Caractéristiques des sondages et des forages réalisés au cours de la présente étude.

Nom	Type	Secteur	localisation		Altitude (m)	Chaînage (m)	Profondeur atteinte (m)
			longitude	latitude			
TAS-2014-F1	Forage	Route d'accès	-69.945887	58.683671	23.8	1+602	2.05
TAS-2014-F2	Forage	Route d'accès	-69.945880	58.683610	23.6	1+590	2.27
TAS-2014-F3	Forage	Route d'accès	-69.930515	58.691091	11.8	2+870	2.6
TAS-2014-F3a	Forage	Route d'accès	-69.930515	58.691091	11.8	2+870	3.6
TAS-2014-F4	Forage	Route d'accès	-69.942746	58.686307	27.1	1+960	1.52
TAS-2014-F5	Forage	Route d'accès	-69.950968	58.674215	25.4	0+385	2.7
TAS-2014-F6	Forage	Route d'accès	-69.946517	58.683696	24.6	1+610	2.40
TAS-2014-T1	Sondage	Route d'accès	-69.936387	58.688608	12.2	2+405	3
TAS-2014-T2	Sondage	Route d'accès	-69.947801	58.680962	27.9	1+265	2.4
TAS-2014-T3	Sondage	Route d'accès	-69.950940	58.678329	26.7	0+900	2
TAS-2014-T4	Sondage	Route d'accès	-69.942756	58.686215	26.9	1+950	1
TAS-2014-T5	Sondage	Route d'accès	-69.942679	58.686258	27.0	1+960	1
TAS-2014-T6	Sondage	Route d'accès	-69.942585	58.686380	26.9	1+970	1

3.4.3 RELEVÉS GÉOPHYSIQUES

3.4.3.1 GÉORADAR

Plusieurs relevés de géoradar orientés dans l'axe (Figure 7A), perpendiculairement à la route d'accès (Figure 7B) ainsi que dans le milieu naturel (Figure 7C) ont été réalisés afin de visualiser la stratigraphie et évaluer la profondeur du front de dégel sous l'infrastructure (Figure 7D). Le système géoradar utilisé est un pulseEKKO PRO de Sensors and Software avec lequel trois fréquences (50, 100 200 MHz) ont été utilisées selon la résolution spatiale et la profondeur de l'exploration désirées. L'extraction de données d'élévation LIDAR le long des levés Géoradar a permis un ajustement topographique de haute qualité afin de bien représenter la géométrie réelle des différents réflecteurs (Figure 7E). Au total, 9 relevés géoradar ont été réalisés et sont localisés à la figure 4. Leurs spécifications techniques sont résumées au tableau 3. Afin de convertir l'échelle du temps en échelle de profondeurs, une vitesse de propagation de 0,141 m/ns a été utilisée sur tous les levés. Cette vitesse, quoiqu'assez élevée, avait été déterminée par Savard (2006) en réalisant des levés de géoradar du point milieu commun (CMP) sur la piste de Tasiujaq.

3.4.3.2 RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Afin d'assurer une complémentarité dans les relevés géophysiques, des levés de résistivité électrique (profilage de résistivité électrique couplé capacitivement) ont été réalisés dans l'axe du centre ligne de la route aux mêmes emplacements que les levés géoradar no. 05, 06 et 13 (Figure 4). Le couplage d'imageries électriques avec des levés de géoradar et des données géomorphologiques recueillies sur le terrain avait été utilisé au Nunavik pour caractériser les conditions du pergélisol sous les pistes d'atterrissage de Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk et Quaqlaq (Allard et al., 2007 ; Savard, 2006). Dans les cas où la géologie et la géocryologie sont complexes, comme à Tasiujaq, ce couplage permet de mieux définir les conditions physiques du pergélisol sous les infrastructures telles que les zones gelées et dégelées et la stratigraphie des dépôts quaternaires. Le système d'imageries électriques utilisé est le OhmMapper TR5 de la compagnie Geometrics (Figure 8A). Ce système, muni d'un émetteur et de cinq récepteurs, a été fixé à un véhicule afin de permettre sa traction sur de longues distances (Figure 8B et C). L'inversion des pseudosections de résistivité électrique apparente a été réalisée à partir du logiciel RES2DINV™ afin de produire des modèles en coupe de la variation de la résistivité électrique vraie dans le remblai de la route et le milieu pergélisolé sous-jacent. Les spécifications techniques des levés de résistivité électrique sont résumées au tableau 4.

Les pseudosections et les images électriques présentées dans ce rapport ont été générées par le logiciel ArcGIS 10.2. Ce logiciel permet, à partir de la grille régulière de points de mesure de résistivité électrique en fonction de la distance et de la profondeur produites par le logiciel RES2DINV™, de réaliser une interpolation de la distribution de cette variable en 2D sous la forme de courbes d'isolignes. Afin de permettre une bonne visualisation de la variabilité verticale de résistivité électrique le long des lignes de levé et faciliter l'interprétation des images électriques, une exagération verticale de 6 a été utilisée pour produire les modèles de résistivité électrique. Sur chacune des images électriques sont également présentés les divers points de repère le long de la route d'accès tels que les dépressions, ponceaux, les forages et les sondages, etc. Compte tenu de la plage étendue des valeurs de résistivité, une échelle logarithmique en base 10 a été utilisée. Ainsi, des valeurs de résistivité électrique de 10 ohm-m, 100 ohm-m et 1000 ohm-m correspondent respectivement à 1 (10^1), 2 (10^2) et 3 (10^3).

Il est important de noter que la coupe géologique synthèse produite à partir des relevés géophysiques est une schématisation de l'organisation des unités géologiques sous la route d'accès. Les contacts stratigraphiques entre les unités géologiques sont le résultat d'un exercice de corrélation entre les principaux réflecteurs observés sur les levés de géoradar, les propriétés électriques des matériaux mesurées par profilage de résistivité électrique couplé capacitivement et les informations stratigraphiques disponibles. L'utilisation des levés de géoradar permet de visualiser la continuité latérale et l'organisation des unités géologiques de surface entre des observations ponctuelles de terrain, mais demeure un outil d'interpolation. Par conséquent, il est nécessaire de rester prudent sur les pseudoépaisseurs des différentes unités qui apparaissent dans la coupe géologique synthèse, car sa précision dépend du nombre d'observations stratigraphiques distribuées le long du levé et de leur validité. Par exemple, les forages et excavations réalisés dans le cadre de ce projet sont tous localisés dans le milieu naturel en pied de remblai ou à une certaine distance de la route, tandis que les levés de géoradar ont été, dans la majorité, réalisés au centre ligne. Cette discordance de localisation entre les observations stratigraphiques et les levés géophysiques entraîne nécessairement un décalage entre les réflecteurs identifiés et leur correspondance avec les unités stratigraphiques observées lors des forages. Ce décalage entre les deux sources d'informations, même si la distance du centre ligne et du pied de remblai n'est que d'une dizaine de mètres, peut affecter sensiblement la position des différents contacts stratigraphiques et forcément les épaisseurs des unités géologiques.

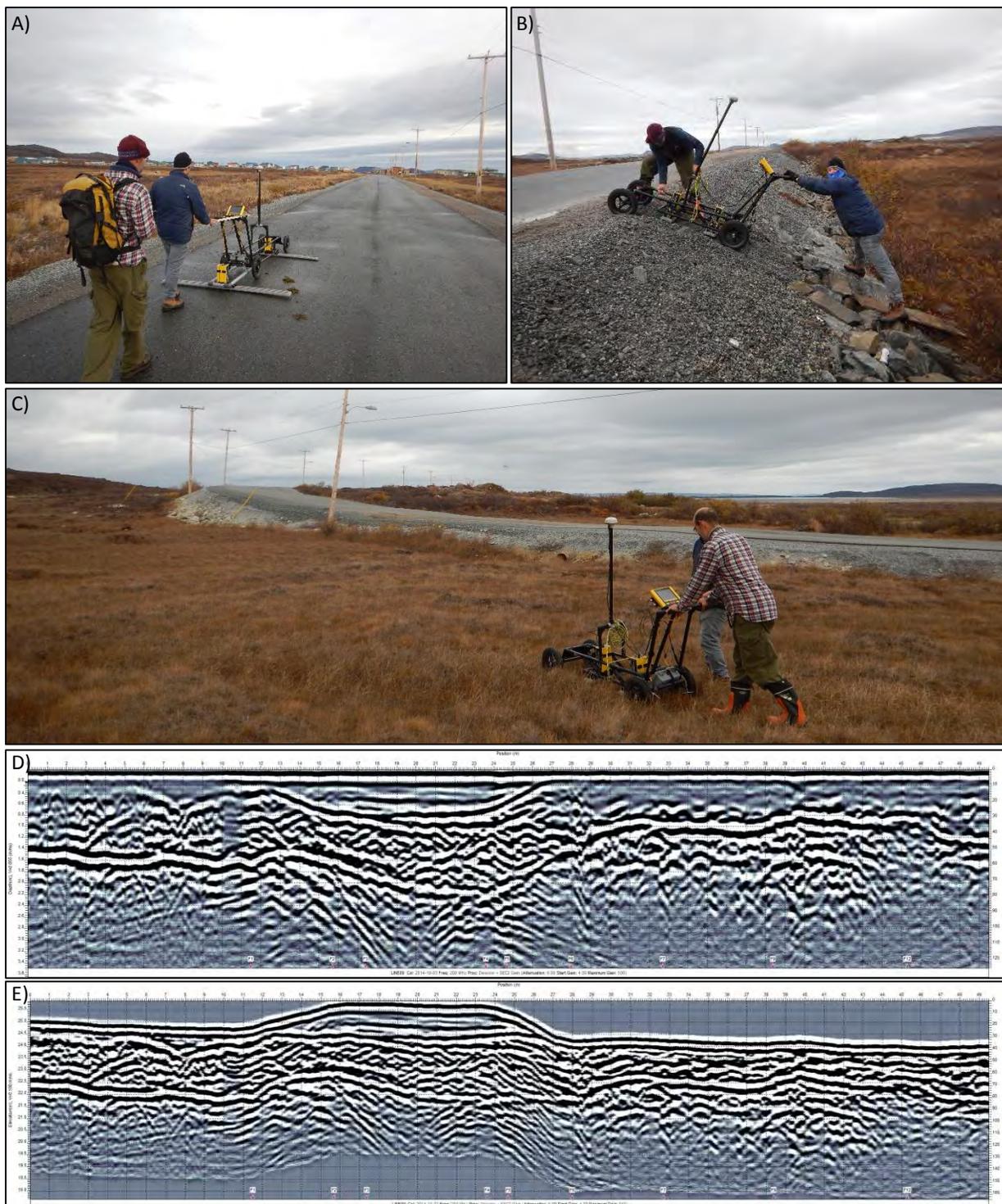


Figure 7: A) Relevé géoradar de 50 MHz dans l'axe et B) de 200 MHz transversal à la route d'accès. C) Relevé géoradar de 200 MHz en milieu naturel à proximité de la route d'accès. Aperçu d'un relevé géoradar de 200 MHz D) avant et E) après la correction topographique.

Tableau 3: Spécifications techniques des relevés géoradar réalisés dans le cadre de la présente étude.

No. ligne	Fréquence	Longueur	Localisation	Orientation
05	50	3270.5	Route d'accès, centre-ligne	Parallèle au centre-ligne
06	100	3263.5	Route d'accès, centre-ligne	Parallèle au centre-ligne
07	200	77	Route d'accès et terrain naturel	Transversale au centre-ligne
08	200	85.2	Route d'accès et terrain naturel	Transversale au centre-ligne
09	200	49.5	Route d'accès et terrain naturel	Transversale au centre-ligne
10	200	77.4	Route d'accès et terrain naturel	Transversale au centre-ligne
11	200	39.8	Route d'accès et terrain naturel	Transversale au centre-ligne
12	200	42.1	Route d'accès et terrain naturel	Transversale au centre-ligne
13	200	3251.6	Route d'accès, centre-ligne	Parallèle au centre-ligne

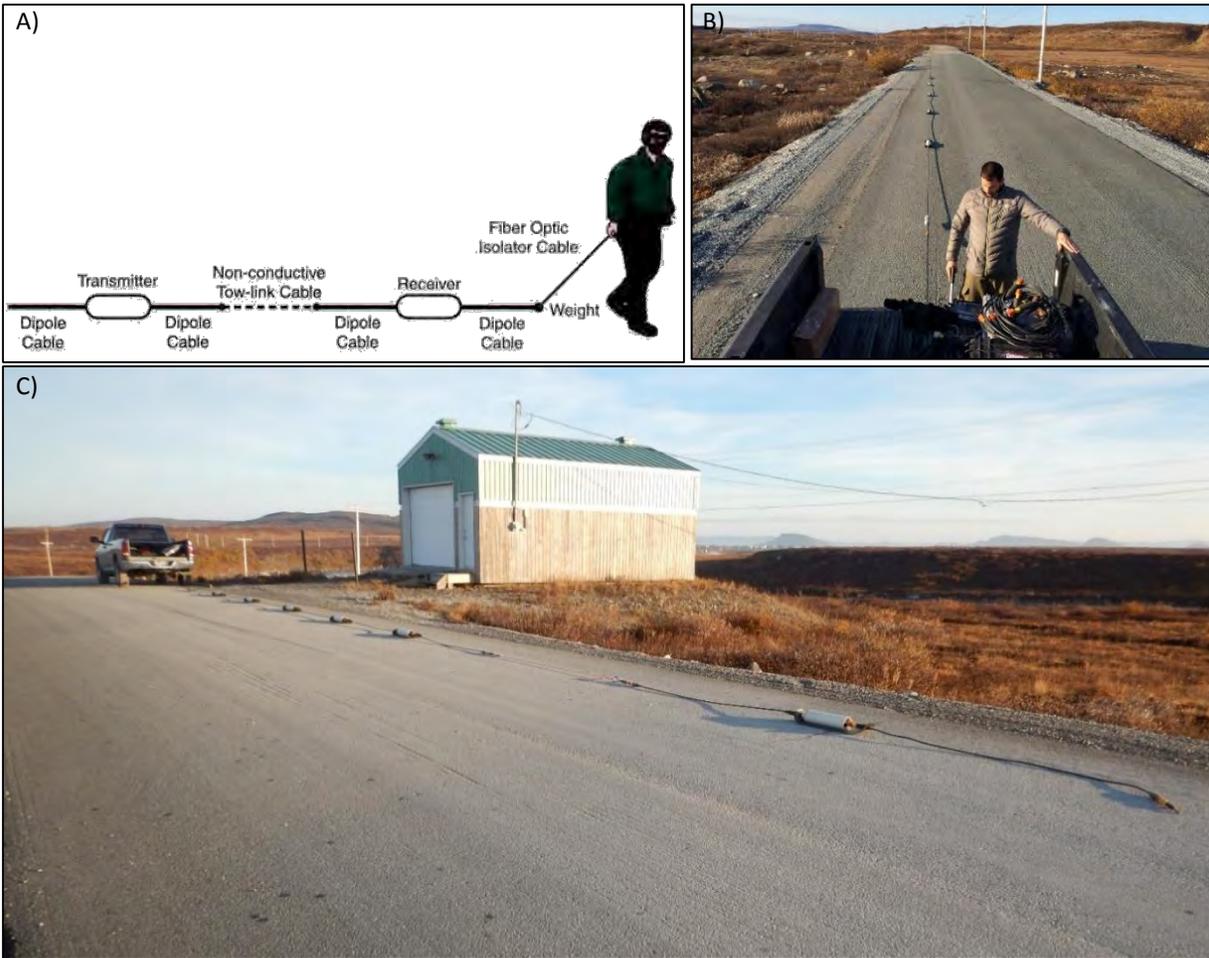


Figure 8: A) Schéma du système de résistivité électrique couplé capacitivement (tirée de Geometrics, 2014). B) et C) Aperçu de la configuration du système sur le terrain avec l'utilisation d'un véhicule pour la traction.

Tableau 4: Spécifications techniques des relevés de résistivité électrique réalisés au cours de la présente étude.

No. ligne	Longueur	Localisation	Orientatation	Nombre de receveurs	passages	Configuration
01	2980	Route d'accès	Parallèle au centre-ligne	5	Passage 1	a = 5 n = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 s = 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5
					Passage 2	a = 5 n = 1, 1.5, 2, 2.5, 3 s = 15, 17.5, 20, 22.5, 25
					Passage 3	a = 10 n = 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25 s = 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5
					Passage 4	a = 10 n = 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 s = 15, 20, 25, 30, 35
					Passage 5	a = 10 n = 1, 1.5, 2, 2.5, 3 s = 10, 15, 20, 25, 30
02	600	Route d'accès	Parallèle au centre-ligne	5	Passage 1	a = 5 n = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 s = 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5
					Passage 2	a = 5 n = 1, 1.5, 2, 2.5, 3 s = 5, 7.5, 10, 12.5, 15
					Passage 3	a = 5 n = 2, 2.5, 3, 3.5, 4 s = 10, 12.5, 15, 17.5, 20
					Passage 4	a = 10 n = 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25 s = 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5
					Passage 5	a = 10 n = 1, 1.5, 2, 2.5, 3 s = 10, 15, 20, 25, 30
					Passage 6	a = 10 n = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 s = 5, 10, 15, 20, 25
					Passage 7	a = 10 n = 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 s = 15, 20, 25, 30, 35

3.5 CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DU PERGÉLISOL

Lors des campagnes sur le terrain, deux types d'échantillons ont été prélevés : les échantillons remaniés et non gelés provenant de la couche active et prélevés lors des sondages à la rétrocaveuse (Figure 6B) et les échantillons intacts et gelés récupérés lors des forages dans le pergélisol (Figure 6C). Selon l'état des échantillons, ceux-ci ont été soumis à différentes analyses en laboratoire en suivant un protocole précis de manière à optimiser le nombre d'analyses pertinentes possibles par échantillon. Le protocole utilisé est décrit en détail par L'Hérault et *al.*, (2012; 2013).

Les carottes gelées récoltées lors des forages ont été systématiquement numérisées à l'aide d'un scanner tomodensitométrique de type médical, propriété de l'Institut National de la Recherche Scientifique Eau-Terre-Environnement (INRS-ETE) à Québec. Au total, 19 échantillons de sol gelé provenant des 6 forages réalisés le long de la route d'accès ont été numérisés pour une longueur totale de 5,3 m. Cette méthode non destructive de caractérisation (Calmels et Allard, 2004; Calmels, 2005; L'Hérault, 2009; L'Hérault et *al.*, 2009; 2012; 2013) permet d'obtenir une image numérique à haute résolution de la cryostructure et des cryofaciès du pergélisol selon un plan médian longitudinal (coupe sagittale ou coronale). Sur ces images, les matériaux de faible densité sont présentés par des teintes foncées et ceux de fortes densités par des teintes claires. L'acquisition d'une image transversale de 512 pixels par 512 pixels à tous les 0,6 mm le long de la carotte permet d'obtenir une résolution de voxel de 0,2 mm x 0,2 mm x 0,6 mm. Avec cette résolution, les reconstitutions tomographiques internes des carottes permettent la description des différents cryofaciès selon: 1) la forme, l'épaisseur, la longueur, et l'inclinaison des cryostructures; 2) la forme et l'orientation des bulles d'air, indicatrices du sens des flux thermiques; 3) le type de sédiment; et 4) la présence de matière organique. Ces observations permettent aussi de noter la profondeur des discontinuités (s'il y a lieu) correspondantes aux limites entre les différentes couches cryostratigraphiques, d'obtenir de bonnes images de l'échantillon facilitant la sélection des analyses subséquentes et de compléter les informations notées sur le terrain, qui sont souvent minimales afin de limiter toute dégradation thermique des échantillons. La description des cryofaciès a été réalisée en conformité avec la norme ASTM-D4083 (2007) et la méthode de classification développée par Murton et French (1994). Outre de dresser un portrait détaillé de la stratigraphie et de la cryostratigraphie, les reconstitutions tomographiques internes ont également permis d'effectuer une discrétisation très précise des différentes valeurs de densité à l'aide des logiciels ORS™. Grâce à cette discrétisation, les éléments tels la glace, l'air et le sol ont été différenciés et délimités selon leurs plages de densités respectives. Une fois la discrétisation complétée, il a été possible d'estimer le volume occupé par les différentes composantes, c'est-à-dire le sédiment, la glace et l'air, pour l'ensemble de la carotte et pour différentes profondeurs.

Certains échantillons jugés représentatifs des conditions de pergélisol retrouvées sous la route d'accès ont été soumis à des essais de tassement et consolidation au dégel. Ces essais consistent à dégeler un échantillon de sol et à mesurer le tassement total subséquent. Une charge supplémentaire (contrainte) a également été appliquée sur les échantillons afin d'estimer l'influence d'un remblai ou d'un bâtiment sur la valeur de tassement total. Les essais de consolidation au dégel réalisés ont été effectués dans une cellule œdométrique standard légèrement modifiée. Lors des expérimentations, une contrainte verticale initiale de 25 kPa, correspondant à peu près au poids de la couche active dégelée, a été appliquée au cours du dégel de l'échantillon. Une fois le dégel et la consolidation initiale complétés, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a plus de déformations verticales sous une même contrainte, la contrainte est augmentée à 100 kPa pour une période minimale de 24h afin de simuler le poids d'un remblai ou d'un bâtiment de dimensions moyennes.

La teneur en eau gravimétrique (w) en pourcentage a été mesurée systématiquement sur tous les échantillons selon la norme CAN/BNQ 2501-170-M-86. Par la suite, certains échantillons ont été soumis à

une analyse granulométrique par la méthode des tamis (norme BNQ 1530-060/1978) pour la fraction supérieure à 400 microns et à l'aide d'un réfractomètre laser modèle Horiba pour la fraction inférieure à 400 microns. La limite de liquidité (W_L) et la limite de plasticité (W_P) ont été déterminées en respect avec la norme CAN/BNQ 2501-092-M86 sur la fraction du sol dont le diamètre des particules est inférieur à 400 microns. En fonction des limites et des résultats granulométriques obtenus en laboratoire, les échantillons de sol ont été classifiés selon le système de classification unifiée des sols (USCS).

3.6 SIMULATIONS GÉOTHERMIQUES

Dans ce rapport, des simulations thermiques en vue de projeter l'évolution potentielle du régime thermique sous un secteur sensible de la route d'accès ont été réalisées à l'aide d'un modèle bidimensionnel programmé dans le logiciel TEMP/W de Geo-Slope International. Les exercices de modélisation numérique entrepris dans cette étude ont pour objectif général de simuler le régime thermique sous et en périphérie d'une section transversale de la route d'accès afin d'évaluer, selon les scénarios de changements climatiques, les mutations à venir dans le pergélisol (augmentation des températures dans le sol, épaissement de la couche active, formation de taliks, etc.). C'est à partir de ces changements dans le régime thermique, plus spécifiquement ceux liés à la position de l'isotherme 0 °C, qu'une estimation de l'amplitude des tassements à venir suite au dégel du pergélisol a été réalisée.

3.6.1 CONSTRUCTION, CONDITIONS LIMITES ET CALIBRATION DU MODÈLE GÉOTHERMIQUE

Les simulations et les projections thermiques ont été effectuées à partir d'un modèle bidimensionnel dont la distance entre les nœuds qui divisent le modèle est de 0,10 m près de la surface et augmente graduellement en fonction de la profondeur sans excéder 0,75 m. Au départ des exercices de calibration, les modèles ont été paramétrés sur la base de propriétés thermiques (conductivité thermique et capacité calorifique) estimées à partir des équations développées par Kersten (1949) et par Johnston (1981). La stratigraphie ainsi que les teneurs en eau volumétriques et la granulométrie propres aux différentes couches de sol ont été établies à partir des données observations de forages réalisés à proximité de la route ainsi que les interprétations géophysiques et analyses géotechniques obtenues dans la présente étude, mais également celles tirées des travaux de L'Hérault et *al.* (2012). Les teneurs en eau non gelée ont été estimées à l'aide des relations préprogrammées dans le logiciel TEMP/W selon la granulométrie des différentes unités. En surface, les modèles ont été forcés par des températures de l'air enregistrées localement. Afin de considérer l'influence des conditions de surface sur la transmission de la chaleur entre l'atmosphère et le sol, les températures de surface ont été estimées par un coefficient empirique nommé « facteur-n » (Johnston, 1981). Dans la présente étude, l'influence des conditions de surface sur le régime thermique du pergélisol a donc été considérée par l'utilisation d'un facteur-n saisonnier, soit un facteur-n de gel (n_f) et de dégel (n_t). Afin de bien représenter dans le modèle les conditions de surface variables et leur influence sur le transfert de chaleur entre l'air et le sol, l'environnement bâti a été discrétisé en différentes zones selon le type de surface (gravier, tourbe, asphalte, etc.) et les conditions d'enneigement (Figure 9A). Pour chacune de ces zones, des facteur-n de gel (n_f) et de dégel (n_t) traduisant le plus fidèlement possible l'influence thermique des conditions de surface ont été appliqués sur les températures de l'air en utilisant l'équation suivante :

$$TMJS_f(t) = TMJA_f(t) \cdot n_f \quad (1)$$

$$TMJS_t(t) = TMJA_t(t) \cdot n_t \quad (2)$$

Où, pour une journée (t), $TMJS_f$ et $TMJA_f$ représentent respectivement la température moyenne journalière de surface et de l'air en hiver tandis que $TMJS_t$ et $TMJA_t$ correspondent respectivement à la température moyenne journalière de surface et de l'air en été. Pour ce qui est des conditions aux limites

des modèles en profondeur, elles représentent un flux géothermique équivalant à $q = 34 \text{ mW/m}^2$. Ce flux correspond à une valeur régionale pour le nord du Québec tirée de la carte des flux géothermiques du Canada (Blackwell et Richards, 2004). Les flux latéraux ne sont pas considérés dans ces modèles ($q = 0 \text{ W/m}^2$). La géométrie, la stratigraphie ainsi que les propriétés thermiques des différentes couches de matériau qui caractérisent les modèles géothermiques utilisés pour les exercices de modélisation réalisées aux chaînages 1+600 et 2+874 sont présentées respectivement à la figure 9B et à la figure 10. Les valeurs des propriétés thermiques des matériaux et caractéristiques des conditions limites utilisées pour ces deux modèles apparaissent au tableau 5 et au tableau 6.

En raison de l'absence de données thermiques dans le secteur de la route, le modèle a été calibré à partir de données enregistrées par des câbles à thermistances installés dans des dépôts similaires dans le secteur de l'aéroport (HT-304 et HT-181) et également selon la position du front de dégel identifiée sur les relevés géoradar ou lors des excavations et forages. Ces données disponibles ont permis, dès le départ de la calibration, de contraindre le modèle à adopter un profil thermique qui s'apparente à celui mesuré. Selon le comportement thermique du modèle par rapport aux variations climatiques de surface ou de l'air, les propriétés thermiques (conductivité thermique) estimées ont par la suite été réajustées en prenant soin de demeurer à l'intérieur d'une gamme de valeurs plausibles selon le type matériau.

Il est important de mentionner que malgré leur capacité à simuler adéquatement la réponse thermique d'un sol à des stimuli climatiques, les modèles restent une schématisation de la réalité où la stratigraphie et les propriétés thermiques des sols qui les définissent sont estimées et simplifiées et où l'intégration de la variabilité spatiale et temporelle des variables environnementales locales (précipitations, écoulement d'eau, couverture nivale) est déficiente. Pour ces raisons, d'importantes sources d'incertitudes subsistent, particulièrement dans le cas de la route d'accès de Tasiujaq où l'absence de données géothermiques au travers de la route et du pied de remblai ainsi que le manque de mesures d'épaisseur de neige limitent la compréhension du système pergélisol dans le secteur et la capacité de calibration du modèle. Par conséquent, les projections géothermiques obtenues par les exercices de modélisation numérique présentés dans ce rapport, malgré leur grande cohérence, doivent être considérées avec prudence. Néanmoins, elles permettent de donner un ordre de grandeur quant aux réactions thermiques potentielles des sols dans un contexte climatique changeant et difficilement prévisible.

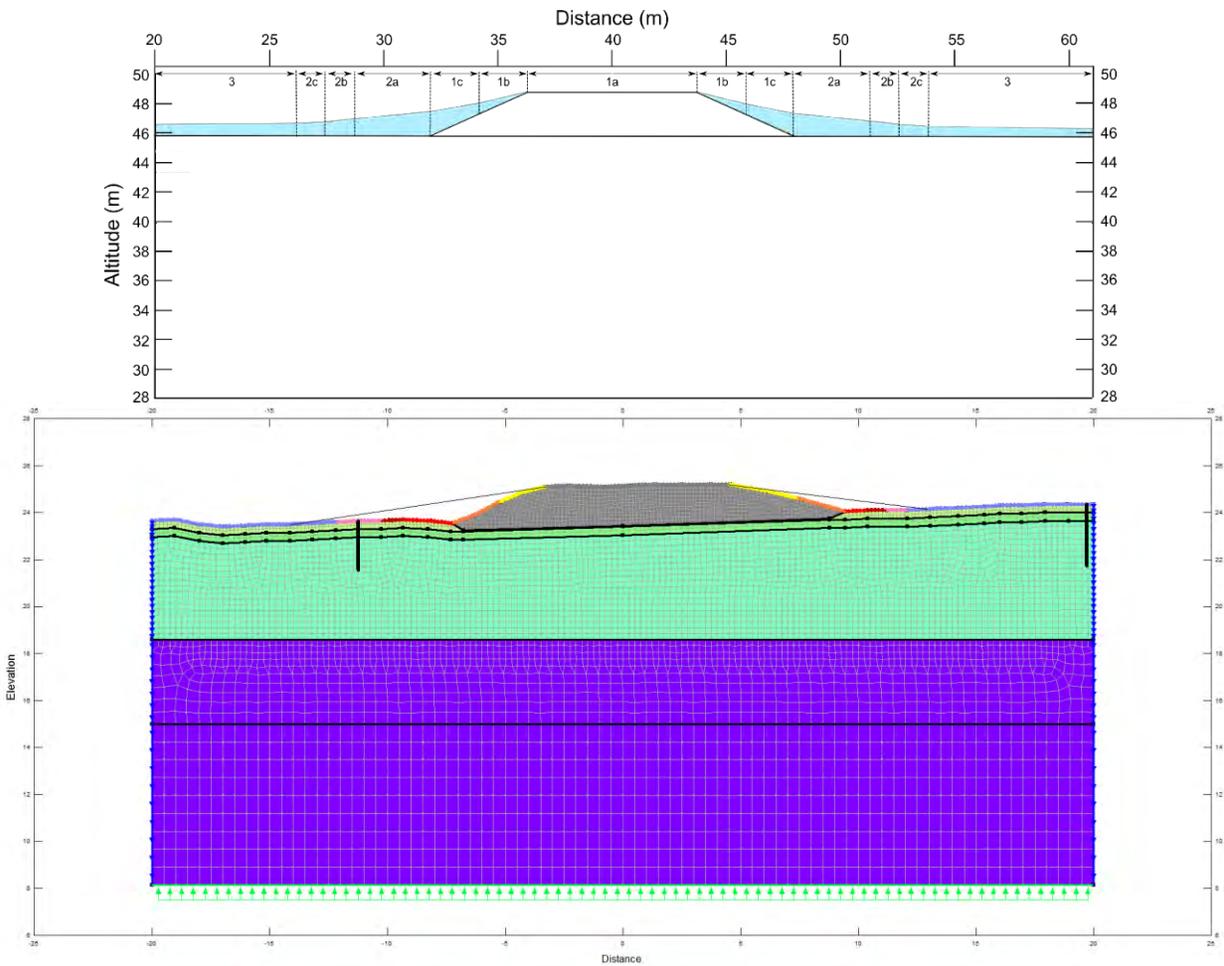


Figure 9 : A) Conditions de surface selon le type de surface et les conditions d'enneigement. B) Conditions limites, géométrie et stratigraphie du modèle géothermique de la route d'accès, chaînage 1+600 m.

Tableau 5 : Propriétés thermiques des matériaux et caractéristiques des conditions limites utilisées pour le modèle géothermique au chaînage 1+600 m.

Propriétés thermiques des matériaux							
Matériau	Conductivité KJ/jour/m/°C		Chaleur spécifique KJ/m³/°C		Teneur en eau (m³/m³)		
	Non-gelé	gelé	Non-gelé	gelé			
Remblai	370,4	364,8	2500	2000	0,05		
Tourbe	30	90	4300	2400	0,3		
Silt sableux (couche active)	243	248	2300	1800	0,15		
Silt sableux (pergélisol)	243	248	2965	2212	0,35		
Diamicton (pergélisol)	202	286	3378	1937	0,25		
Conditions limites							
Flux latéraux	0 kJ/days						
Flux géothermique	2.9376 kJ/days/m						
Conditions de surface	1a	1b	1c	2a	2b	2c	3
Type de surface (été)	asphalte	gravier	gravier	végétation	végétation	végétation	végétation
Couverture de neige	absente	≈ 25-50 cm	≈ 50-75 cm	≈ 50-75 cm	≈ 25-50 cm	≤ 25 cm	≤ 25 cm
n_f	0.5	0.7	0.5	0.5	0.7	0.8	0.85
n_t	1.8	1.4	1.4	1.25	1.25	1.25	1.25

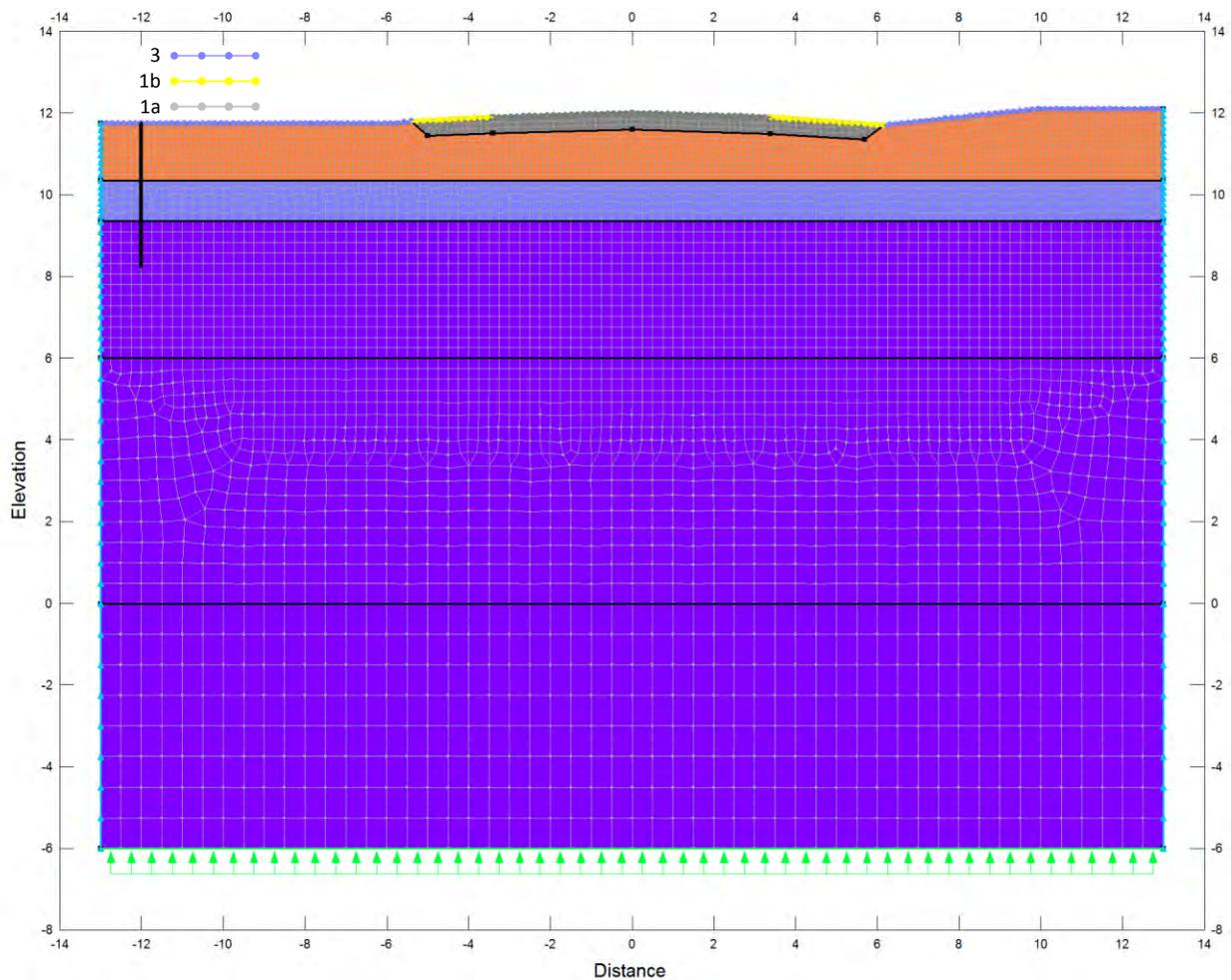


Figure 10 : Conditions limites, géométrie et stratigraphie du modèle géothermique de la route d'accès, chaînage 2+874 m.

Tableau 6 : Propriétés thermiques des matériaux et caractéristiques des conditions limites utilisées pour le modèle géothermique chaînage 2+874 m.

Propriétés thermiques des matériaux					
Matériau	Conductivité KJ/jour/m/°C		Chaleur spécifique KJ/m³/°C		Teneur en eau (m³/m³)
	Non-gelé	gelé	Non-gelé	gelé	
Remblai	370,4	364,8	2500	2000	0,05
Sable et gravier	230	340	2971	1631	0,1
Silt argileux (couche active)	202	286	3378	1937	0,25
Silt argileux (pergélisol)	202	286	3378	1937	0,35
Conditions limites					
Flux latéraux	0 kJ/days				
Flux géothermique	2.9376 kJ/days/m				
Conditions de surface	1a	1b	3		
Type de surface (été)	asphalte	gravier	Sable/végétation		
Couverture de neige	absente	absente	≤ 25 cm		
n_f	0.5	0.95	0.85		
n_t	1.8	1.4	1.25		

3.6.2 PROJECTION GÉOTHERMIQUE

Afin de projeter les changements du régime thermique du pergélisol jusqu'en 2050, deux sorties ont été sélectionnées sur un ensemble de six sorties de projections MRCC version 4.2.3 disponibles, afin de forcer le modèle géothermique à ces conditions de surfaces. Ce sont les sorties AEV et AHA qui ont été sélectionnées, car elles représentent approximativement les deux extrêmes climatiques pour l'ensemble des données disponibles (Figure 11). Les données climatiques qui alimentent les deux séries MRCC retenues proviennent de deux modèles globaux différents. La série AEV, pilotée à ses limites latérales par le CGCM3, présente les projections les plus froides et est considérée comme un scénario optimiste. Par conséquent, l'utilisation de cette série dans les simulations géothermiques entraîne des changements moins importants et plus graduels dans le régime thermique du pergélisol. À l'opposé, la série AHA, pilotée à ses limites par le modèle global ECHAM5 (Institut Max Plank), constitue la sortie du MRCC la plus chaude (scénario pessimiste), donc celle qui entraîne les changements les plus importants dans le régime thermique du pergélisol. Les deux sorties MRCC utilisent le même scénario de gaz à effet de serre (GES) A2 qui est considéré comme pessimiste (Nakisenovic *et al.*, 2000).

Afin de produire des projections géothermiques qui, à leur point de départ, ne montrent pas ou très peu de divergences avec les profils thermiques observés, les données MRCC qui alimentent les exercices de simulation numérique doivent impérativement être corrigées en raison d'un biais froid exprimé dans les jeux de données (L'Hérault *et al.*, 2012). La méthode utilisée pour la correction des températures de l'air du MRCC est celle dérivée de Salzman *et al.* (2007a et b) et consiste à déterminer la valeur du biais à partir de l'équation suivante :

$$Biais = xobs_{tma} - xsim_{tma} \quad (3)$$

où $xobs_{tma}$ représente la température moyenne annuelle pour une période donnée et $xsim_{tma}$ la température moyenne annuelle de toutes les simulations pour la même période. Le biais ainsi calculé est ensuite appliqué aux données quotidiennes de chacune des séries $MRCC_{corr}$ à l'aide de l'équation suivante :

$$MRCC_{corr} = Sim_{quoti} + Biais \quad (4)$$

où Sim_{quoti} représente les températures quotidiennes d'une série MRCC auxquelles est additionnée la valeur du biais. La correction des séries MRCC est réalisée en additionnant le biais aux valeurs quotidiennes de chacune des séries MRCC. De cette façon, les séries MRCC correspondent mieux aux extrêmes des températures annuelles observés durant la période d'enregistrement pour un site donné. Cette façon de procéder permet aussi de conserver la variabilité originale entre les séries MRCC du fait qu'elles sont corrigées quotidiennement à l'aide de la même valeur. Pour la période qui s'étend de 2005 à 2014 (période de couverture des données observées à Tasiujaq), la superposition des données observées et des données reconstituées (NARR) avec celles corrigées provenant des deux séries MRCC a permis d'évaluer la capacité de ces dernières à représenter le climat de la région de Tasiujaq (Figure 11). Outre que pour les années particulièrement chaudes de 2009 et 2010, le climat de Tasiujaq s'aligne davantage sur les données de la série AEV et demeure dans la fourchette des valeurs proposées par le MRCC. De manière générale, les séries AEV et AHA corrigées qui ont été utilisées pour forcer les modèles géothermiques projettent une augmentation moyenne des températures de l'air comprise entre 2,4 °C et 2,9 °C respectivement d'ici l'horizon 2050. Ces augmentations de température ont été calculées en faisant la différence entre la normale climatique de la période future (2041 à 2070) et celle de la période de référence qui est celle de 1971 à 2000.

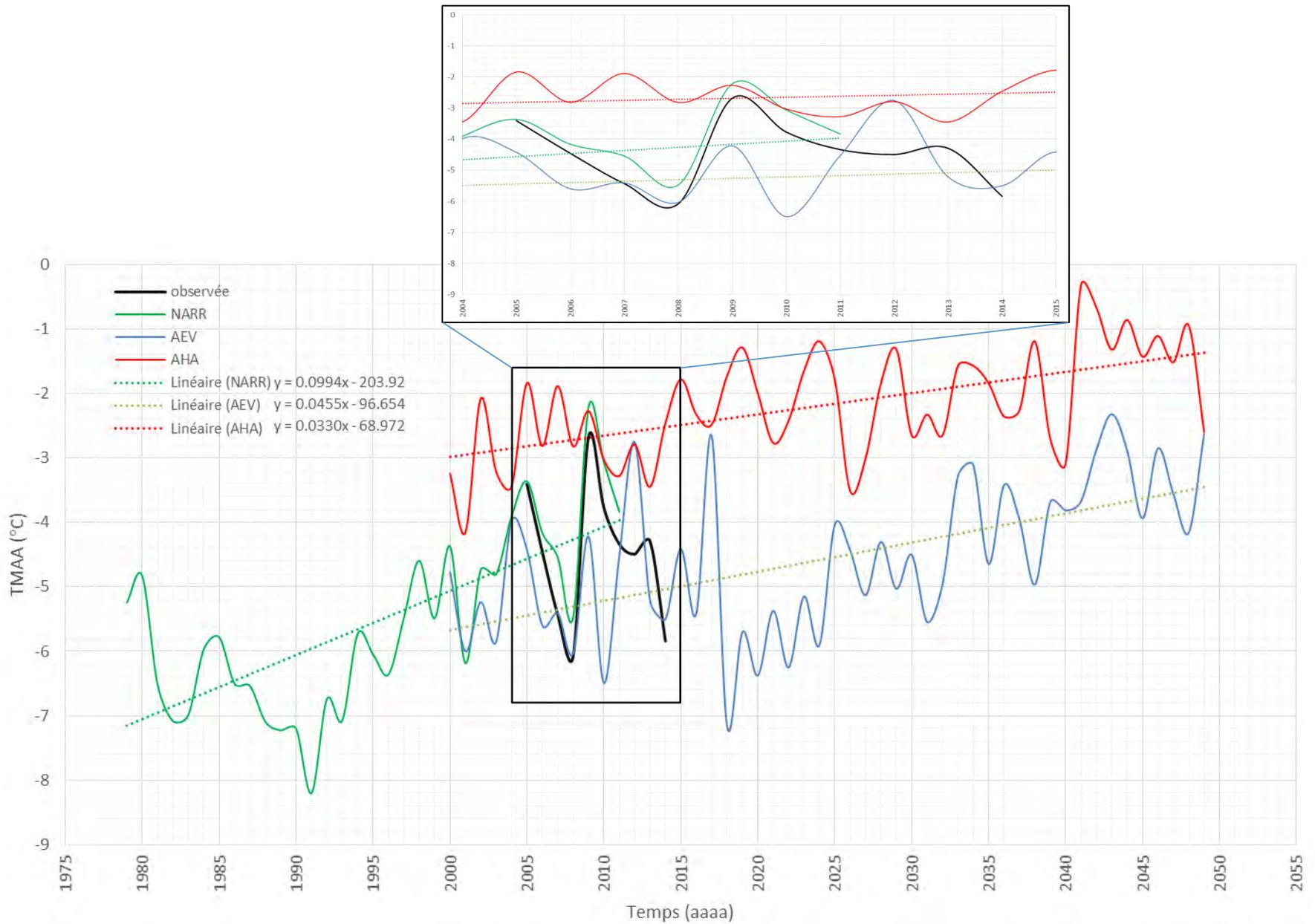


Figure 11: Comparaisons des températures moyennes annuelles de l'air reconstituées (NARR), observées (HT-304) avec celles des séries MRCC AEV et AHA, Tasiujaq, Nunavik.

4 RÉSULTATS:

4.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

La route d'accès qui relie le village de Tasiujaq à l'aéroport mesure 8 m de largeur et 3410 m de longueur, du chaînage 2+610 m (extrémité sud-ouest, aéroport de Tasiujaq) jusqu'au chaînage-0+800 m (extrémité nord-est, village) (Figure 12A). Afin de faciliter le repérage des travaux d'investigation récents effectués le long de la route d'accès et éviter toute confusion possible en lien avec l'utilisation du chaînage initial ayant des valeurs positives et négatives, le chaînage initial apparaissant sur les plans « tel que construit » a été remplacé par un nouveau chaînage arbitraire. Le nouveau chaînage débute à 0+000 m, soit l'extrémité nord-est du stationnement du terminal anciennement 2+450 m et se termine à 3+270 m, soit l'intersection de la route d'accès avec la première rue perpendiculaire du village anciennement -0+820 m.

L'épaisseur du remblai de la route d'accès n'excède pas 2 mètres en général à l'exception de quelques endroits où celui-ci peut atteindre plus de 5 mètres afin d'accommoder d'importantes discordances topographiques dans le paysage, héritage du contexte géologique et historique quaternaire de la région. Aucune section de la route ne repose sur une zone en déblai, toutefois, pour certaines, le remblai y est très mince (< 1 m) comme c'est le cas entre les chaînages 0+320 m à 0+420 m, 0+480 m à 0+760 m et 2+160 m à 3+080 m. D'une sinuosité relativement faible, la route d'accès est en général orientée sud-sud-ouest nord-nord-est à l'exception de la section qui couvre les 550 premiers mètres au départ de l'aéroport dont l'orientation est plutôt sud-ouest nord-ouest. Malgré que la route d'accès soit généralement orientée perpendiculairement au drainage de surface, aucun fossé de drainage ne longe la route à l'exception d'une toute petite section d'une soixante de mètres de longueur qui s'étend entre les chaînages 0+320 m et 0+380 m. Néanmoins, cette particularité ne semble pas être problématique à l'exception d'une portion de la route (chaînage 1+520 m à 1+820 m) ou vraisemblablement le drainage diffus semble à l'origine des défauts observés. Pour permettre à l'écoulement de surface de traverser en aval de l'infrastructure, on retrouve plusieurs ponceaux et également un pont.

Longtemps non pavée, la surface de roulement de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq a été pavée en 2006. Depuis, de nombreux signes de dégradation ont été observés suite à une dégradation soutenue du pergélisol sous et en périphérie du remblai. En effet, au fil des visites sur le terrain dans le cadre des tournées annuelles tenues par le MTQ, plusieurs sections de la route affichaient dès lors des signes de détérioration prématurés. Actuellement, les défauts reliés à la dégradation du pergélisol se concentrent dans trois sections de la route délimitées respectivement par les chaînages 0+360 m à 0+500 m, 1+520 m à 2+000 m et 2+240 m à 2+920 m (Figure 12A). Ces deux dernières sections de la route se distinguent par la fréquence et l'amplitude des tassements observés. La section entre les chaînages 1+520 m et 2+000 m est affectée par de nombreuses dépressions (Figure 12B, C et D) dont l'une est directement adjacente à un sillon de coin de glace qui traverse sous le remblai au chaînage 1+550 m (Figure 12E). La subsidence du terrain dans ce secteur est également confirmée par la présence de nombreuses fissures longitudinales dans la chaussée qui témoigne d'une fatigue par tassement (Figure 12F). Le drainage déficient, particulièrement entre les chaînages 1+680 m et 1+820 m où l'on retrouve de nombreuses accumulations d'eau et une surface du sol fréquemment saturée (Figure 12G), suggère une probable dégradation thermique du pergélisol par flux de chaleur advectif (écoulement d'eau). Dans cette section, l'épaisseur du remblai est d'environ deux mètres, ce qui est légèrement plus élevé qu'ailleurs à l'exception bien sûr de quelques endroits très circonscrits où celui-ci excède les cinq mètres. L'orientation de cette section de la route est sensiblement la même que la piste d'atterrissage où, selon Allard *et al.* (2007) et L'Héroult *et al.* (2012), d'importantes accumulations de neige se retrouvent et seraient la cause primaire de la dégradation thermique du pergélisol en pied de remblai. Par conséquent, les dépressions importantes qui affectent actuellement cette section de la route pourraient possiblement résulter

également d'une dégradation thermique du pergélisol entraînée par l'accumulation de neige. Malheureusement, quoique forte plausible, l'absence de relevés d'épaisseur de neige le long de la route d'accès ne permet pas de confirmer cette hypothèse.

Entre les chaînages 2+240 m et 2+920 m, juste après la station de pompage, une série de dépressions majeures affectent considérablement la qualité de l'infrastructure (Figure 12H). Dans cette section, le remblai très mince et le bon drainage de part et d'autre de l'infrastructure excluent la possibilité d'une dégradation thermique du pergélisol par l'accumulation de neige ou d'eau en marge de la route. Ainsi, la dégradation du pergélisol semble attribuable à un transfert de chaleur unidimensionnel par conduction accentuée par le faible albédo de la surface pavée. Les transferts convectifs de chaleur par écoulement d'eau souterraine ne sont pas à exclure, mais nécessiteraient des données moins fragmentaires afin d'en valider l'importance dans le processus de dégradation du pergélisol. À partir du chaînage 2+580 m, plusieurs petites dépressions de faibles amplitudes ont été recensées (Figure 12A). Certaines de ces dépressions affichent un patron géométrique linéaire qui semble attribuable à la présence d'un réseau de coins de glace (Figure 12I).

Lors des travaux d'auscultations réalisés par l'équipe technique du CEN à l'automne 2014, dix des principales dépressions recensées le long de la route ont été mesurées afin d'en déterminer la longueur ainsi que l'amplitude des tassements. D'après ces mesures (Tableau 7), les dépressions majeures ont une longueur et profondeur moyenne de 17 m et 23,4 cm respectivement dont plus de la moitié ont une longueur supérieure à 18 m et une profondeur supérieure à 27 cm. L'importance de ces dépressions confirme la gélivité des dépôts pergélisolés sous l'infrastructure, fait également confirmé par les excavations, forages et levés de géophysiques réalisés dans le cadre de cette étude et dont les résultats seront abordés en détail dans la section suivante.



Figure 12: A) Aperçu général de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq. B), C) et D) Tassements différentiels et déformation subséquente de la surface pavée. E) Coin de glace qui traverse sous le remblai de la route. F) Fissures longitudinales qui suggèrent une fatigue de la chaussée par tassement. G) Accumulation d'eau au bord d'un ponceau. H) Série de dépressions de grande amplitude. I) Dépressions linéaires dont le patron géométrique semble attribuable à la présence d'un réseau de coins de glace.

Tableau 7: Caractérisation de dix dépressions majeures observées le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq.

No. dépression	Chaînage (m)	Secteur	Longueur (m)	Profondeur (cm)
1	1+598	3	12	34
2	1+640	3	7	15
3	1+766	3	25	28
4	1+797	3	21	27
5	1+880	3	7	8
6	2+252	4	18	32
7	2+383	4	19	30
8	2+402	4	15	19
9	2+430	4	26	29
10	2+687	4	20	12

4.2 RÉPARTITION SPATIALE, ÉPAISSEURS ET PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DES UNITÉS GÉOLOGIQUES DE SURFACE

Spatialement hétérogène et diversifiée, la géologie de surface de la région présente une complexité qui résulte d'une succession d'environnements sédimentaires au sein d'une vallée soumise à des conditions macrotidales au cours de la régression marine postglaciaire. Plusieurs observations de terrain, sondages superficiels, forages profonds et levés géophysiques lors de récentes études ont permis de réaliser la grande hétérogénéité spatiale des conditions de terrain (Savard, 2006; Allard *et al.* ; 2007a; 2007b; Vinet, 2008; L'Hérault *et al.*, 2012; 2013). Cette hétérogénéité est typique de la sédimentation en zone intertidale nordique où les courants de marée apportent les sédiments fins alors que les glaces flottantes charrient les blocs et les cailloux et que les vagues mélangent et redistribuent le tout. Ainsi, des lentilles de silt riches en glace de quelques mètres carrés de superficie et quelques mètres d'épaisseur alternent avec des sols pierreux et sableux (Allard *et al.*, 2007b). Cette complexité constitue un défi de taille dans l'élaboration d'une cartographie précise des dépôts de surface, assise essentielle dans la détermination des conditions du pergélisol et l'évaluation du risque d'instabilité au dégel. La carte initialement dressée par Vinet (2008) puis mise à jour par L'Hérault et a été reprise, puis modifiée en tenant compte des nouvelles observations de terrain et connaissances stratigraphiques et géotechniques récemment acquises lors des forages profonds réalisés à l'aéroport (L'Hérault *et al.*, 2012), les forages superficiels réalisés à proximité du village (L'Hérault *et al.*, 2013) et ceux réalisés dans le cadre de la présente étude (Figure 4).

La route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq débute à une altitude de 30,6 m puis se termine à une altitude de 11,6 m, soit quelques mètres au-dessus du niveau actuel des hautes mers. La route traverse une série d'environnements quaternaires différents suivant une toposéquence caractéristique d'une vallée soumise à des conditions macrotidales en période de régression. La présence de deltas glaciomarins mis en place en aval d'eskers suggère une déglaciation en contact avec la mer sous forme d'une marge stagnante (Vinet, 2008). Le relèvement glacio-isostatique suivant la déglaciation a mené à la régression des eaux marines d'environ 180 m par rapport au niveau marin actuel donnant naissance aux formes littorales répertoriées dans la vallée, notamment les nombreuses terrasses marines qui témoignent de pauses dans l'émersion des terres. Parallèlement, de part et d'autre de la rivière Bérard, l'encaissement du chenal fluvial a mené à la formation de talus d'érosion et de terrasses fluviales sculptées à même les dépôts meubles antérieurs préservés à l'occasion entre les chenaux abandonnés. Le long du cours fluvial inférieur, les dépôts littoraux et pré-littoraux s'étendent de façon discontinue sur les replats qui n'ont pas été affectés par les processus alluviaux et reposent généralement sur d'anciennes plateformes intertidales. De manière générale, il est possible de distinguer quatre principaux secteurs le long de cette toposéquence. Ces secteurs se distinguent les uns des autres par leurs conditions géologiques et stratigraphiques différentes malgré qu'ils affichent certaines similitudes au point de vue géotechnique et géocryologique.

4.2.1 SECTEUR 1 : CHAÎNAGE 0+000 M À 0+720 M

Dans ce secteur, la route repose entièrement sur une séquence de couches de dépôts meubles d'origine fluviale et marine mise en place au cours de l'Holocène et dont l'épaisseur est évaluée à plus de 25 m (L'Hérault *et al.*, 2012). En raison de sa proximité avec la piste d'atterrissage, la répartition spatiale, les épaisseurs et les propriétés géotechniques des unités géologiques de surface pour ce secteur sont les mêmes que celles décrites par L'Hérault *et al.* (2012). En surface, on retrouve essentiellement une couverture discontinue de sédiments fluviaux d'une épaisseur inégale comprise entre 1 et 2 m (Ax) et caractérisée par une alternance de chenaux évasés peu profonds souvent mal drainés et de barres alluviales basses et plates généralement bien drainées composées de sédiments sablo-graveleux stratifiés pauvres en glace. Dans son ensemble, ce dépôt d'origine fluviale repose sur des sédiments intertidaux (Ax/MiT). Les sédiments intertidaux (MiT), non visibles en surface, avaient été rencontrés dans chacun des forages réalisés en 2009 de part et d'autre de la piste (L'Hérault *et al.* 2012), mais également lors de sondages et forages géotechniques réalisés avant la construction de la route par Lupien, Rosenberg, Journeaux et Assoc. Inc. (1984). Dans cette même étude, les sondages LBP-208 à LBP-212 (Figure 4) ont révélé la présence d'un dépôt de silt et sable grisâtre (SM) avec trace de gravier. Lors de ces excavations vers la fin du mois de juillet 1984, la position du front de dégel était généralement inférieure à 1 mètre. La section gelée du dépôt superficiel présentait des cristaux et des lentilles de glace. Deux forages profonds avaient également été réalisés de part et d'autre des assises du pont révélant la présence d'un silt sablonneux brunâtre dans les 2,8 premiers mètres devenant progressivement un silt et sable grisâtre en profondeur avec trace de gravier (SM) et présence de lentilles de glace de 3 à 10 mm d'épaisseur espacée d'environ 50 mm. Les teneurs en eau mesurées dans cette dernière unité étaient d'environ 20%. Dans le cadre de la présente étude, un forage (TAS-2014-F5) a été réalisé à proximité du pont actuel (chaînage 0+385 m) (Figure 4). La stratigraphie de ce forage se résume à une couche de silt sablonneux brunâtre d'environ 1 mètre d'épaisseur qui recouvre un mélange de silt et sable grisâtre (Figure 13A et B). Le front de dégel a été atteint à 1,70 m. Dans la section gelée, le dépôt de silt et sable grisâtre (Figure 13C) présente un réseau réticulé de fines lentilles de glace millimétriques (Figure 13D). De toute évidence, ce dépôt de silt et sable grisâtre correspond aux dépôts intertidaux échantillonnés à l'aéroport par L'Hérault *et al.* (2012). D'après ces derniers, l'épaisseur de ces dépôts intertidaux varie entre 1,6 et 6 m dans le secteur de l'aéroport. La composition granulométrique se résume à un mélange de sable et de silt (USCS : SM) avec un peu de gravier. Dans la section pergélisolée, la structure de la glace se présente essentiellement sous forme interstitielle avec quelques lentilles de glace millimétriques localisées (Figure 13E) qui totalisent une teneur en eau d'environ 20 %. D'après Allard *et al.* (2007), l'eau interstitielle y est saumâtre avec des concentrations en sel dissous de 4,6 à 18,2 g Na Cl/L, pour une moyenne de 8 g/L. En raison de cette salinité, l'abaissement du point de fusion est évalué à -0,5°C. Des essais de consolidation réalisés sur ce type de dépôt par L'Hérault *et al.* (2012) ont mesuré des valeurs de tassement total pouvant atteindre près de 15 % sous des contraintes de 100 kPa. Dans la présente étude, deux essais de consolidation ont été réalisés sur des échantillons prélevés respectivement entre 2,07 et 2,14 m et 2.3 et 2.38 m de profondeur au forage TAS-F5. Avec des teneurs en eau d'environ 22 %, les valeurs de tassement total sous contraintes de 100 kPa mesurées sur ces échantillons sont tous inférieures à 15 %, soient similaires à celles mesurées par L'Hérault *et al.* (2012). Les faibles valeurs de résistivité électrique, généralement inférieures à $10^{2,5}$ ohm-m, confirment l'étendue de ce dépôt silteux sous l'entière de cette section de la route où certaines poches de très faibles résistivités ($< 10^{1,5}$ ohm-m) sont clairement identifiables (ex. chaînage 0+100 m et 0+350 m) (voir planche synthèse en annexe). Pour cette même section de la route, la perte de pénétration du signal sur les levés géoradar, typique de la présence d'un dépôt à granulométrie fine (silt ou argile), vient renforcer cette déduction. Sous le centre ligne de la route, la position du front de dégel, clairement visible sur le levé de géoradar (voir planche synthèse en annexe), suggère une épaisseur de la couche active comprise entre 3,5 et 4,25 m. Quelques coins de glace ont été identifiés à partir de leur

signature typique observée sur les levés de géoradar, dont la position de certains a été confirmée en surface entre les chaînages 0+50 et 0+100 m.

Malgré l'absence de sondage profond en marge de cette section de la route, le contexte géologique local appuyé par des forages profonds réalisés dans le secteur de l'aéroport par L'Hérault *et al.* (2012) suggère la présence d'un dépôt glaciomarin composé de sédiments fins d'eau profonde massifs et grisâtres (MGa). Ce dépôt consiste en un mélange de sables et de particules fines (silts et argiles) de faible plasticité (USCS : CL ou SC-CL) dont les proportions moyennes sont de 34 % et 65 % respectivement avec moins de 1 % de graviers. Ce dépôt présente un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées parfois entrecoupé par des lentilles de glace horizontales et subverticales centimétriques espacées (Figure 13F). La teneur en eau moyenne est de 33 % avec des valeurs maximales pouvant atteindre près de 50 %. L'Hérault *et al.* (2012) ont procédé à deux essais de consolidation sur ce type de sédiment et les valeurs de tassement total mesurées sont généralement inférieures à 13 % en présence d'un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées peu développé.



Figure 13: A) et B) Stratigraphie superficielle au forage TAS-2014-F5 qui montre le contact entre le silt sablonneux brunâtre et le mélange de silt et sable grisâtre avec trace de gravier sous-jacent. C) Échantillon de silt et sable grisâtre gelé prélevé entre 1,96 et 2,4 m de profondeur. D) Image de densité du même échantillon obtenue par tomodynamétrie et mettant en évidence un réseau réticulé de fines lentilles millimétriques. E) Sédiments intertidaux diamictiques (Mi) avec de nombreuses lentilles de glace millimétriques échantillonnés au forage TAS_F2 entre 2,48 et 3 m de profondeur et F) Sédiments glaciomarins fins grisâtres et massifs (MGa) avec réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées par des lentilles de glace centimétriques horizontales et subverticales (Tirée de L'Hérault *et al.*, 2012).

4.2.2 SECTEUR 2 : CHAÎNAGE 0+720 M À 1+500 M

Dans ce secteur, les valeurs de résistivité électrique les plus élevées, de l'ordre de $10^{4,3}$ ohm-m, se retrouvent dans les premiers mètres et correspondent essentiellement au remblai formé de dolomie concassée avec de nombreux vides. Sous le remblai et pratiquement sur la totalité de la route dans ce secteur, on retrouve une autre unité de résistivité électrique élevée ($10^{3,9}$ à $10^{4,3}$ ohm-m) laissant présager la présence d'un matériau résistif tel qu'un dépôt de sable et gravier épais. En surface, le terrain est bien drainé et présente une végétation herbacée avec des îlots arbustifs bas (Figure 14A). C'est également dans ce secteur qu'on observe un changement dans la signature des réflecteurs sur le levé géoradar. D'une part, le signal pénètre davantage, ce qui est attribuable à une permittivité plus grande du dépôt (dépôt plus sec ou granulométrie grossière) et d'autre part, la signature des réflecteurs révèle la présence de lits qui s'entrecroisent avec de nombreux blocs. L'ensemble de ces indices géophysiques permet de supposer qu'il s'agit vraisemblablement de dépôts littoraux pré-littoraux d'origine marine (Mn) ayant une composition granulométrique plutôt grossière. L'excavation réalisée au chaînage 1+265 (TAS-2014-T2) confirme la présence d'un dépôt grossier (sable grossier avec cailloux arrondis) sec et bien drainé dont certaines sections stratifiées et bien triées certifient l'origine marine du dépôt (Figure 14B). Les sondages et forages géotechniques réalisés dans le secteur par Lupien, Rosenberg, Journeaux et Assoc. Inc. (1984) (LBP-202, LBP-205, LBP-206) confirment également la présence d'une couche d'au moins deux mètres d'épaisseur composée de sable bien trié avec une fraction de fines comprise entre 5 et 12 % (SP-SM). Sous cette unité de sables et graviers, on retrouve une couche discontinue dont la résistivité électrique affiche des valeurs autour de $10^{1,5}$ à 10^2 ohm-m qui pourrait correspondre au diamicton intertidal similaire à celui rencontré non loin de la piste d'atterrissage. Cette couche plonge graduellement dans l'axe nord-nord-est et se retrouve enfouie sous une épaisseur de plus en plus importante de sable et gravier non gélif, ce qui pourrait expliquer en partie pourquoi la route dans ce secteur ne montre aucun signe de dégradation pour l'instant. À noter, deux zones de faible résistivité comprises respectivement entre les chaînages 0+850 m à 0+900 m et 1+150 m à 1+200 m suggèrent la présence de poches isolées composées de matériau potentiellement gélif plus près de la surface, en l'occurrence le diamicton intertidal. Aux mêmes endroits, le signal géoradar y est également fortement atténué ce qui renforce cette hypothèse d'autant plus qu'au chaînage 0+900 m, le diamicton grisâtre a été atteint sous une mince couche de sable dans une excavation (TAS-2014-T3) réalisée dans un secteur déprimé en marge de la route (Figure 14C et D).

Dans cette section, aucun sillon de coins de glace n'a été recensé, ce qui n'exclut pas la possibilité que la route en chevauche un ici et là, mais la probabilité demeure faible. La présence d'un dépôt stratifié et les réflecteurs horizontaux et subhorizontaux qui en résultent sur le levé géoradar complexifient à quelques endroits la distinction du réflecteur associé au front de dégel à ceux attribuables à la structure du dépôt. Néanmoins, la position du front de dégel a été identifiée et celle-ci se situe entre 4 à 6 m de profondeur sous le centre de la route, soit plus profond que dans le secteur 1 en raison des propriétés thermiques conductrices du sable.



Figure 14: A) Environnement de surface et B) stratigraphie au site de l'excavation TAS-2014-T2 qui consiste en un sable grossier avec cailloux centimétriques arrondis où certaines sections du dépôt sont stratifiées. C) Secteur déprimé mal drainé entre les chaînages 0+900 et 1+000 m et D) excavation TAS-2014-T3 dans laquelle un diamicton a été rencontré près de la surface sous une mince couche de sable.

4.2.3 SECTEUR 3 : CHAÎNAGE 1+500 M À 2+100 M

Dans ce secteur, la route traverse une légère dépression pour ensuite surmonter un bombement topographique. Ce secteur est en général mal drainé et on y observe la présence de coins de glace dans le milieu environnant (Figure 15A). Dans le cadre de ce projet, trois forages ont été réalisés dans le secteur (TAS-2014-F1, TAS-2014-F2 et TAS-2014-F6). Ces forages confirment la présence d'un sable fin silteux (USCS : SM) en surface dont le contenu en glace semble moyennement élevé sans toutefois montrer une cryostructure impressionnante (Figure 15B). Un forage a également traversé un coin de glace, confirmant hors de tout doute que certains de ces coins de glace se retrouvent sous le remblai de la route (Figure 15C). Généralement, la présence de coins de glace laisse des évidences de leur existence dans le milieu environnant par la présence de sillons clairement visible en surface. Toutefois, étant donné que le forage qui a atteint ce coin de glace n'était pas localisé sur l'un de ces sillons, ceci laisse entrevoir la possibilité que d'autres coins de glace enfouis puissent se retrouver dans le secteur. Sous cette couche de sable fin et de silt, tous les forages ont atteint une couche de sable et gravier assez grossier (Figure 15D) qui présentait, étonnamment, certaines zones riches en glace (Figure 15E).

Sur le levé de résistivité, cette couche superficielle possède des valeurs de résistivité relativement élevées autour de $10^{3,5}$ ohm-m et son épaisseur demeure limitée (≈ 2 à 4 m). Sous cette couche, les valeurs de résistivités diminuent graduellement plus en profondeur se rapprochant de celles du diamicton intertidal glaciaire échantillonné dans le secteur 1 voir celles du silt argileux glaciomarin échantillonné à l'aéroport par l'Hérault *et al.* (2012). Malheureusement, aucun forage n'a permis d'atteindre ce dépôt de faible résistivité sous-jacent. Toutefois, une coupe stratigraphique réalisée dans une ancienne gravière située un peu en retrait à l'est de la route a permis d'observer un dépôt de toute évidence assez similaire au diamicton intertidal qui pourrait expliquer ces faibles valeurs de résistivité (Figure 15F). À partir du levé de géoradar, on estime que la position du front de dégel dans le secteur se situe généralement à une profondeur inférieure à 4 m sous le centre ligne de la route. Avec une épaisseur du remblai généralement comprise entre 1 et 2 m d'épaisseur, la position du front de dégel actuelle dans la route pénètre vraisemblablement le plafond du pergélisol riche en glace ce qui explique l'ampleur des tassements dans le secteur. D'après les nombreux essais de consolidation qui ont été réalisés à partir des échantillons prélevés dans le secteur aux forages TAS-2014-F1, TAS-2014-F2 et TAS-2014-F6 (voir annexe 3), le pergélisol affiche des valeurs de tassement total mesurées comprises entre 23 % et 73 %, dont la valeur moyenne est de 42 %. De manière générale, les valeurs de tassements les plus élevées ont été mesurées dans les premiers mètres du pergélisol (plafond du pergélisol) où l'enrichissement en glace au fil des années explique ces teneurs en eau pondérale après fusion aussi élevées.



Figure 15: A) Sillon de coin de glace qui traverse le milieu environnant. B) Échantillon de sable fin avec traces de silt dont le contenu en glace semble moyennement élevé (TAS-2014-F6). C) Échantillon traversant un coin de glace (TAS-2014-F1). D) et E) Échantillons de sable et gravier assez grossier. F) Coupe stratigraphique à proximité de la route où un diamicton grisâtre a été observé.

4.2.4 SECTEUR 4 : CHAÎNAGE 2+100 M ET AU-DELÀ

La section de la route dans ce secteur repose sur une ancienne terrasse intertidale qui surplombe les rives de la baie Profonde à l'embouchure de la rivière Bérard. Derrière l'estran actuel, cette terrasse intertidale est recouverte de dépôts intertidaux anciens (Mit) qui forment plusieurs petites buttes sablo-graveleuse séparées entre elles par des alluvions littorales silto-sableuses déposées à marée haute (voir planche synthèse en annexe). Au cours de la construction du nouvel aréna, des excavations réalisées dans ce type de dépôt ont révélé la présence d'un silt argileux grisâtre gelé (Mit) recouvert d'environ 2,5 m de sable et gravier brunâtre (At) (Journeaux, Bédard et Associés, 1990). Cette stratigraphie fut confirmée par de récentes excavations réalisées en 2010 à l'aide d'une pelle mécanique ici et là dans la communauté (L'Hérault *et al.*, 2013) et également lors d'excavations et de forages réalisés pour cette étude (TAS-2014-T1, TAS-2014-F3 et TAS-2014-F3a) (Figure 16A, B et C). Ces sédiments intertidaux consistent en un mélange de particules fines (silts et argiles) et de sables dont les proportions moyennes sont de 65 % et 28 % respectivement avec moins de 5 % de graviers. Le comportement de cette unité s'apparente à celui d'une argile inorganique de faible plasticité (USCS : CL ou SC-CL). Dans la section gelée de ce dépôt (pergélisolée), la structure de la glace se présente essentiellement sous forme poreuse non visible avec quelques lentilles de glace millimétriques qui totalisent une teneur en eau généralement inférieure à 25 % (Figure 16D). Des essais de consolidation ont été réalisés sur ce type de sédiment et sous une contrainte de 100 kPa, les valeurs de tassement total obtenues sont toutes inférieures à 12 % (voir annexe 3). Lors d'un forage dans le secteur, la firme Journeaux, Bédard et associées Inc. (1990) avait observé sensiblement les mêmes caractéristiques soit : une proportion de sable, silt et argile de 25, 60 et 15 % respectivement, la présence de minces lentilles de glace de 2 à 3 mm d'épaisseur, une teneur en eau une fois dégelée autour de 20 % et une teneur en sel de 3,369 ppm. L'Hérault *et al.* (2012) avait rencontré une unité similaire dans le secteur de l'aéroport à 12 m de profondeur, soit pratiquement au niveau du lit actuel de la rivière Bérard.

Sur le levé de résistivité électrique (voir planche synthèse en annexe), cette couche de sédiments argilo-silteux est clairement visible et distincte de par ses valeurs de très faible résistivité ($< 10^{2,4}$ ohm-m). Ce même levé confirme que dans ce secteur, ces sédiments argilo-silteux sont présents sous l'ensemble de la route et sont recouverts par une couche résistive d'environ deux mètres d'épaisseur et composée de sable et gravier brunâtre d'origine Alluviale (At). La profondeur du front de dégel identifiée sur le profil géoradar ne dépasse généralement pas les 4 m à l'exception d'une petite section de la route entre les chaînages 2+350 à 2+450 m où celui-ci atteint les 5 m. Cette section de la route, affectée par des tassements importants, traverse une légère dépression dans le paysage où la couche active y est gorgée d'eau. En effet, lors de la réalisation de l'excavation TAS-2014-T1, une arrivée d'eau à l'interface de la couche de sable et gravier et celle silto-argileuse sous-jacent a forcé l'abandon du trou (Figure 16A). Cette présence d'eau pourrait expliquer pourquoi la position du front de dégel dans cette section de la route y est plus importante. Pour renforcer cette hypothèse, des valeurs de résistivité très faible ont également été mesurées ($< 10^{1,0}$ ohm-m), ce qui est souvent le cas dans un sol saturé où l'eau interstitielle favorise la circulation des ions.



Figure 16: Argile silteuse grisâtre et compacte (Sédiments intertidaux : Mit) recouverte d'une couche de sable et gravier brunâtre (Alluvion) observée à l'excavation TAS-2014-T1 (A), au forage TAS-2014-F3 (B) et TAS-2014-F3a (C). Échantillon gelé d'argile silteuse grisâtre (USCS : CL) prélevé au forage TAS-2014-F3a.

4.3 ANALYSES GÉOTHERMIQUES DU PERGÉLISOL ET TASSEMENTS À VENIR

4.3.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : 1989-2014

La région de Tasiujaq dispose de quatre câbles à thermistances présentement en opération dont trois ont été installés lors de la construction de l'aéroport en 1989. Ces câbles assurent un suivi du régime thermique du pergélisol et sont localisés exclusivement dans l'enceinte de l'aéroport. Le câble HT-304 est situé dans le milieu naturel à une quarantaine de mètres de la piste, les câbles HT-180 et HT-181 traversent le remblai de piste au chaînage 5+090 et 5+300 respectivement et le câble REF-A, installé en 2007 afin de fournir un site de référence pour l'évaluation des méthodes de mitigation contre la fonte du pergélisol (Lemelin et *al.*, 2008), se situe au chaînage 5+250 m dans la pente du talus côté aérogare. Les emplacements exacts des câbles sont présentés sur la planche synthèse placée en annexe. Malgré que ces câbles ne se trouvent pas exactement dans le secteur de la route, ceux-ci permettent de dresser les grandes lignes des caractéristiques thermiques locales du pergélisol en milieu bâti et en milieu naturel. C'est également à partir des données géothermiques mesurées par ces câbles que les modèles géothermiques utilisés dans les différents exercices de simulations numériques ont été validés puis calibrés.

L'Hérault et *al.* (2012) avaient réalisé une analyse thermique approfondie de ces différents câbles afin d'évaluer l'évolution thermique récente du pergélisol en milieu naturel et sous l'infrastructure aéroportuaire. Dans la présente étude, une mise à jour des données a permis d'étendre cette analyse jusqu'au mois d'octobre 2014. Sommairement, en milieu naturel (HT-304), la couche active, d'une épaisseur de 152 cm en 1993, a atteint une épaisseur maximale de 256 m en 2014, ce qui représente une augmentation de 68,4 % (Tableau 8). Au câble HT-180, l'épaisseur de la couche active est passée de 253 à 313 cm entre 1989 et 2014. Ceci correspond à une augmentation de l'épaisseur de la couche active de 23,7 % par rapport à l'année de référence qui est 1989 (Tableau 8). Pour la même période, la couche active dans la section de la piste non isolée (câble HT-181) est passée d'une épaisseur de 313 à 363 cm, soit une augmentation d'une soixantaine de centimètres (19,1 %) par rapport à l'épaisseur initiale de 1989. À la lueur de ces résultats, l'épaisseur de la couche active pour la période de 1989 à 2014 a augmenté de manière similaire entre les deux sections de piste instrumentées (section isolée et section non isolée). En milieu naturel, l'augmentation de l'épaisseur de la couche active plus importante s'explique par l'influence de la couverture nivale qui limite les échanges de chaleur entre le sol et l'atmosphère, mais aussi par la présence plus importante d'eau dans la couche active qui retarde le regel du sol à l'automne.

En comparant les profils thermiques du sol mesurés en 2003 et ceux mesurés en 2014 en milieu naturel (câble HT-304), on observe un déplacement des profils de températures du pergélisol vers les valeurs plus chaudes (Figure 17). Toutefois ce déplacement n'est pas uniforme. Dans les premiers mètres de la surface, les températures moyennes minimales ont été plus froides en 2014 qu'en 2003, ce qui pourrait s'expliquer par les hivers plus froids qui ont sévi au cours des dernières années au Nunavik. En contrepartie, les températures maximales mesurées en 2014 sont nettement plus chaudes que celles de 2003 inévitablement en réponse à des températures estivales de l'air plus élevées. Malgré ce léger refroidissement des températures du sol dans les premiers mètres, on observe une augmentation des températures moyennes à partir de 4 m et plus en profondeur (Figure 17). Par exemple, à 11 m de profondeur, la température moyenne du sol est passée de -3,15 °C à -2,45 °C ce qui correspond à une augmentation de plus de 0,7 °C (Figure 17).

Les profils des températures minimales, moyennes et maximales mesurées dans le remblai de la piste en 2014 (câble HT-181) sont présentés à la figure 18. Malheureusement, les données disponibles ne permettent pas de réaliser une analyse temporelle approfondie en vue d'évaluer les changements de

températures en profondeur pour ce site. Toutefois, ces profils montrent que les températures du sol y sont actuellement plus chaudes qu'en milieu naturel. Par exemple, la température moyenne à 11 m de profondeur au câble HT-181 est à -1,8 °C, soit environ 0,65 °C plus chaud qu'au câble HT-304 pour la même profondeur.

Tableau 8: Épaisseurs maximales de la couche active à l'emplacement des différents câbles à thermistances ou puits de forages au cours de la période 1989-2014, aéroport de Tasiujaq.

Années	HT-180 Remblai (section isolée)			HT-181 Remblai (section non isolée)			REF-A (talus de remblai)			HT-304 Unité Ax/Mi (milieu naturel)		
	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)
1989	253	n.a	n.a	313	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1990	253	0	0,0	289	-24	-7,7	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1991	256	3	1,2	304	15	5,2	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1992	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1993	256	0	0,0	n.d	n.a	n.a	152 ¹	n.a	n.a	152	n.a	n.a
1994	251	-5	-1,7	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	159	7	4,4
1995	257	6	2,1	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	170	11	6,9
1996	263	6	2,4	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	175	5	2,7
1997	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1998	261	-2	-0,6	327	23	7,5	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1999	261	0	0,0	324	-3	-1,0	n.d	n.a	n.a	185	10	5,6
2000	267	6	2,3	330	6	2,1	n.d	n.a	n.a	187	2	1,4
2001	269	1	0,7	335	5	1,3	n.d	n.a	n.a	195	8	4,0
2002	n.d	n.a	n.a	331	-4	-1,0	n.d	n.a	n.a	186	-9	-4,7
2003	276	7	2,4	343	12	3,5	n.d	n.a	n.a	194	8	4,5
2004	280	4	1,7	322	-21	-6,1	n.d	n.a	n.a	191	-3	-1,4
2005	288	8	2,8	341	19	5,8	n.d	n.a	n.a	208	17	8,7
2006	296	8	2,9	351	10	3,0	n.d	n.a	n.a	224	16	7,8
2007	298	2	0,5	333	-18	-5,2	>313 ²	>161	>106,0	210	-14	-6,1
2008	301	2	1,0	352	19	5,7	>313 ²	n.a	n.a	223	13	6,2
2009	297	-4	-1,2	316	-35	-10,0	>313 ²	n.a	n.a	251	28	12,5
2010	308	11	3,6	363	47	14,8	>313 ²	n.a	n.a	239	-12	-4,9
2011	307	-1	-0,5	367	4	1,1	n.d	n.a	n.a	233	-6	-2,4
2012	310	3	1,2	373	6	1,6	n.d	n.a	n.a	251	18	7,8
2013	305	-5	-1,7	360	-13	-3,5	n.d	n.a	n.a	250	-1	-0,3
2014	313	8	2,6	363	3	0,8	n.d	n.a	n.a	256	6	2,1
Total:		60³	23,7³		60³	19.1³		>161³	>106,0³		104³	68.4³

1 Épaisseur de la couche active observée dans le milieu naturel HT-304.

2 Épaisseur de la couche dégelée sous le remblai d'une épaisseur de 1,92 m.

3 Différence entre l'épaisseur de la couche active pour l'année de référence de 1989 et l'épaisseur maximale atteinte au cours de la période 1989-2014.

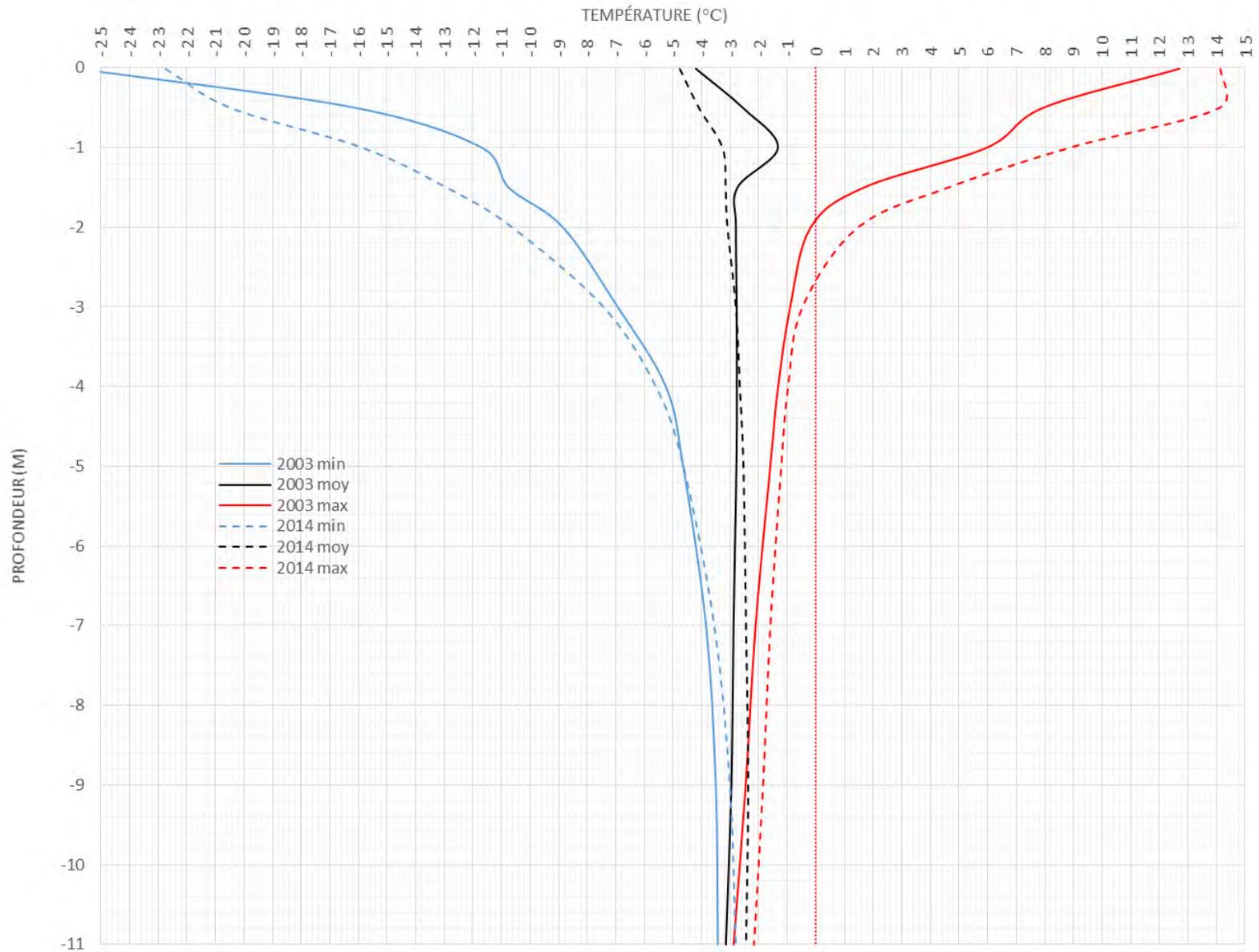


Figure 17 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales du sol de 2003 et 2014 mesurées dans le milieu naturel (câble HT-304).

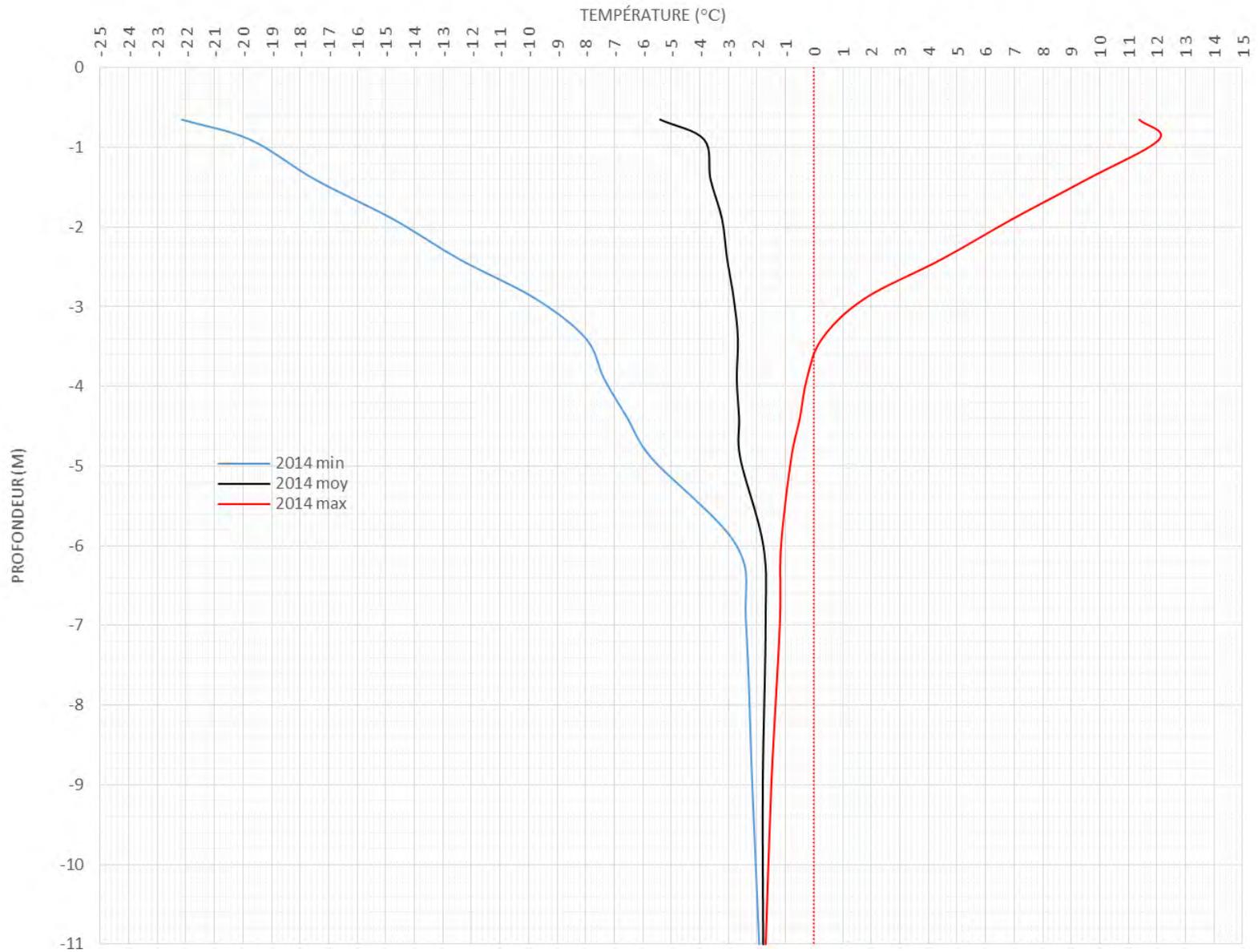


Figure 18 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales du sol pour 2014 mesurées dans le remblai de la piste d'atterrissage (câble HT-181).

4.3.2 ÉVOLUTION FUTURE : PÉRIODE 2014-2050

4.3.2.1 CHAÎNAGE 1+600 M

D'après les exercices de simulations numériques, le front de dégel au centre de la route continuera sa progression plus en profondeur au cours de la période 2014-2050. En effet, en utilisant les températures de l'air proposées par le scénario AHA, la position du front de dégel actuellement estimée à 4,86 m devrait atteindre d'ici 2050 une profondeur sous la route de 7,6 m, soit une augmentation de 2,74 m. Cette progression n'est pas linéaire comme le démontre la figure 19 où l'on remarque des remontées de la profondeur maximale du front de dégel au cours des années froides. Sous la projection AEV, le réchauffement du régime thermique sera beaucoup moins marqué, mais une augmentation légère de la profondeur maximale du front de dégel est certes à anticiper. D'après les résultats des exercices de modélisation, la profondeur maximale atteinte par le front de dégel au cours de la période 2014-2050 sera autour de 5,4 m (2028), soit une augmentation de 54 cm. Fait à noter, autour de 2030, les températures de l'air plus froides proposées par la sortie AEV semblent favoriser une diminution de la profondeur du front de dégel.

La figure 20 présente l'évolution bidimensionnelle du régime thermique du sol entre 2014 et 2050 en fonction de la sortie des températures de l'air AHA. À partir de cette figure, il est possible de constater que l'augmentation de la profondeur atteinte par le front de dégel en milieu naturel sera beaucoup moins marquée que sous la route, mais doublera tout de même d'ici 2050 (Figure 20C). Cette augmentation de la profondeur du front de dégel, d'après les teneurs en glace importantes mesurées sur les échantillons prélevés aux forages TAS-2014-F1 et TAS-2014-F6, entrainera des tassements considérables du terrain en bordure de la route et également à une certaine distance. Ceci provoquera une modification de la topographie et certes du drainage dans le secteur. Suite à la dégradation de certains coins de glace présentement non visibles en surface, des sillons (dépressions linéaires) devraient également apparaître et marquer le paysage. Sous la route, les modélisations thermiques suggèrent qu'il se développera au fil des années un bulbe non gelé qui tardera à regeler à l'hiver (Figure 20D). Une fois regelée, la température du sol à cet endroit demeurera nettement plus chaude qu'en milieu naturel et sera comprise entre 0 °C et -1 °C (Figure 20D).

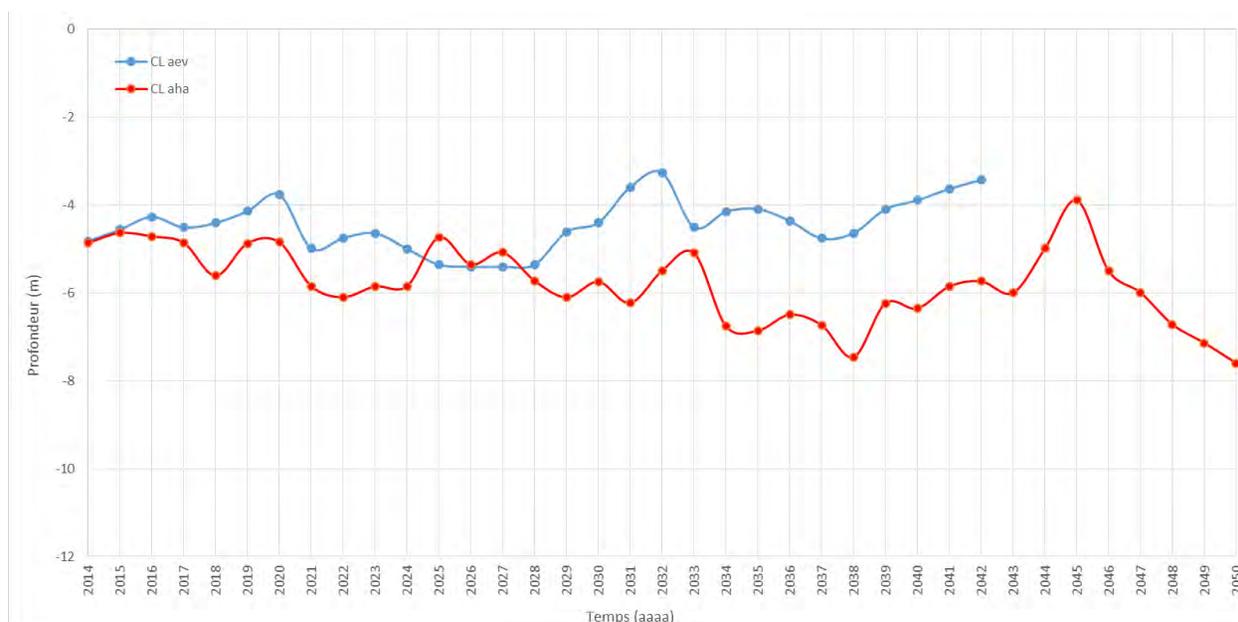


Figure 19 : Simulation de l'évolution de la profondeur maximale du front de dégel au cours de la période 2014-2050 selon la sortie climatique MRCC AHA, centre ligne, chaînage 1+600 m.

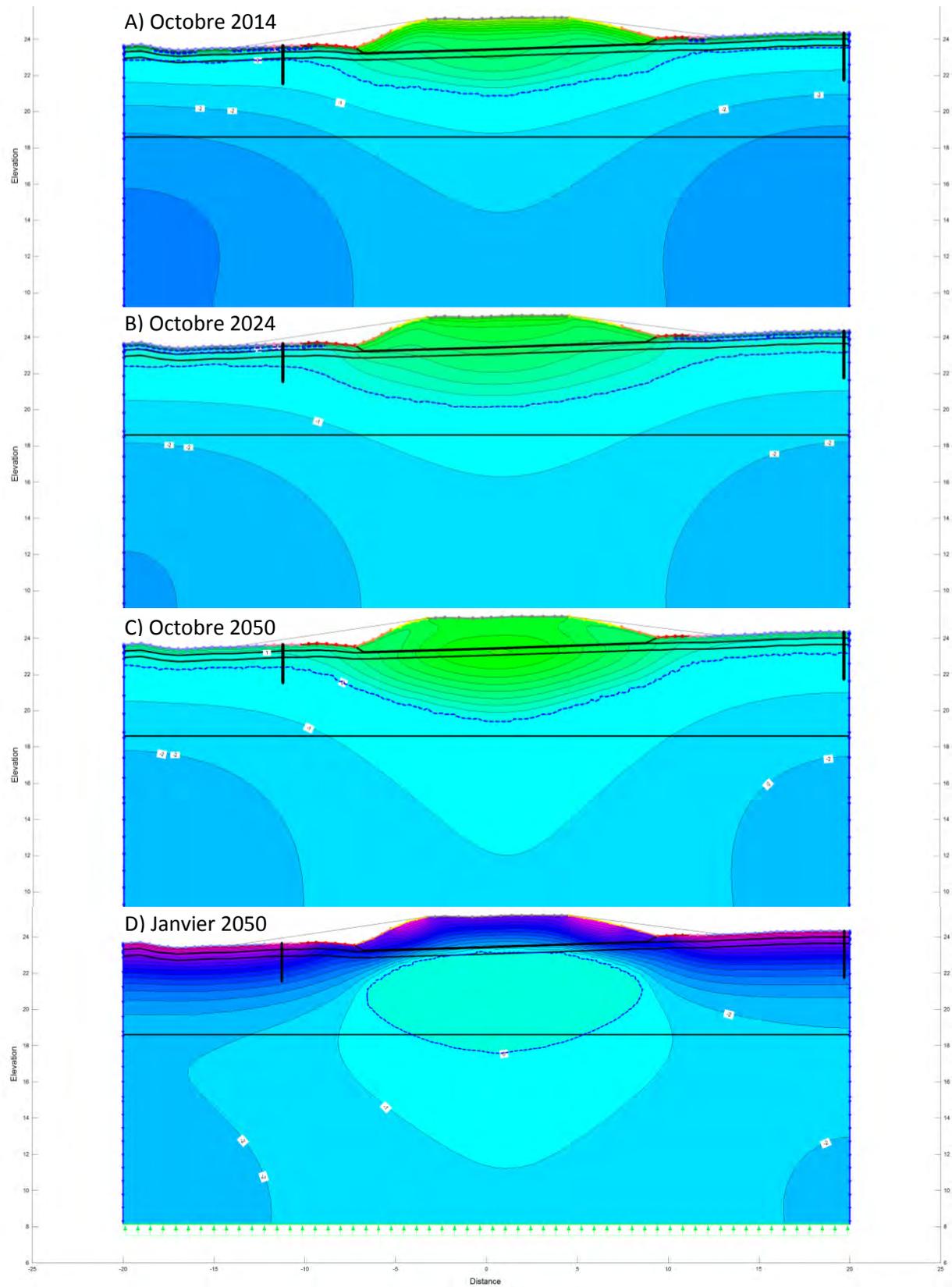


Figure 20 : Conditions géothermiques simulées au chaînage 1+600 à la fin de la saison de dégel (1^{er} octobre) de A) 2014, B) 2024 et C) 2050 (scénario climatique AHA). D) Conditions géothermiques au milieu de l’hiver 2050 qui montre la présence d’un bulbe non-gelé sous la route qui tarde à regeler.

Pour ce secteur, la profondeur actuelle du front de dégel sous la route (4,86 m) ainsi que les conditions de pergélisol locales permettent d'expliquer l'ampleur des tassements observés (≈ 30 cm). En effet, avec une épaisseur du remblai estimée à environ 1,7 m, le front de dégel pénètre désormais de 3,16 m dans le terrain naturel sous-jacent. Par conséquent, la section du pergélisol échantillonnée en bordure de la route aux forages TAS-2014-F1 et TAS-2014-F6 est pratiquement complètement dégelée sous la route. Si l'on estime que la valeur de tassement total pour les premiers mètres du pergélisol est en moyenne de 40 %, la fonte graduelle de cette section de sol pourrait avoir entraîné un tassement total de près de 1,26 m depuis la construction de la route. Si l'on précise l'analyse en soustrayant la profondeur maximale du front de dégel de 2014 avec celle de 2006 (année du pavage) qui a été estimée à 4,26 m par le modèle géothermique, le pergélisol aurait dégelé d'une soixantaine de centimètres depuis le pavage de la route. D'après nos estimations, ce dégel récent pourrait avoir entraîné des tassements de plus de 24 cm, ce qui correspond à l'amplitude des plus grosses dépressions recensées dans le secteur. À plus long terme, l'absence de forages profonds dans le secteur ne permet pas d'estimer avec plus de précision l'amplitude des tassements à venir, particulièrement lorsque le front de dégel atteindra la couche peu résistive identifiée plus en profondeur sur le levé de résistivité et qui a été interprétée comme étant un diamicton grisâtre d'origine inconnue.

4.3.2.2 CHAÎNAGE 2+874 M

D'après les exercices de simulations alimentés par les températures de l'air de la série AEV, la variation de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel sera relativement stable tout au long de la période 2014-2050 (Figure 21). Atteignant actuellement environ 3,25 m de profondeur, le front de dégel devrait augmenter tout au plus de 22 cm. Cette faible augmentation se traduira par un tassement très faible estimé à moins de 3 cm d'après les valeurs de tassement total mesurées en laboratoire.

Les simulations numériques alimentées par les températures de l'air de la série AHA suggèrent un comportement thermique complètement différent. D'après ces simulations, d'ici 2032, le front de dégel atteindra une profondeur de 12 m sous la route et sera rejoint par la base du pergélisol. Ceci signifie que le pergélisol disparaîtra dans le secteur. Cette disparition sera retardée légèrement en milieu naturel, mais demeure inévitable si les conditions climatiques s'arriment avec celles projetées par le scénario AHA. Cette période charnière marquera un changement dans le régime thermique, c'est-à-dire que celui-ci passera sous un régime absent de pergélisol caractérisé par un gel saisonnier pénétrant un substrat qui demeurera non gelé en profondeur (Figure 22C). Dans ce scénario, les tassements seront alors importants, non pas en raison de valeurs de tassement total élevées, mais découlant plutôt de l'importante épaisseur de la couche de matériau qui sera dégelée. Avec un dégel complet du profil de sol et considérant une valeur uniforme de tassement total pour le dépôt silto-argileux d'environ 10 %, les tassements pourraient atteindre plus de 85 cm. Il est à noter qu'un dégel à des températures légèrement inférieures à 0 °C résultant de l'effet de la salinité n'est pas considéré dans l'évaluation de la profondeur du front de dégel. Il est toutefois possible, selon les teneurs en sel dissous présentes dans les sédiments silto-argileux, que le dégel atteigne des profondeurs plus importantes que celles proposées par les exercices de modélisation. Par conséquent, les tassements estimés seront plus importants.

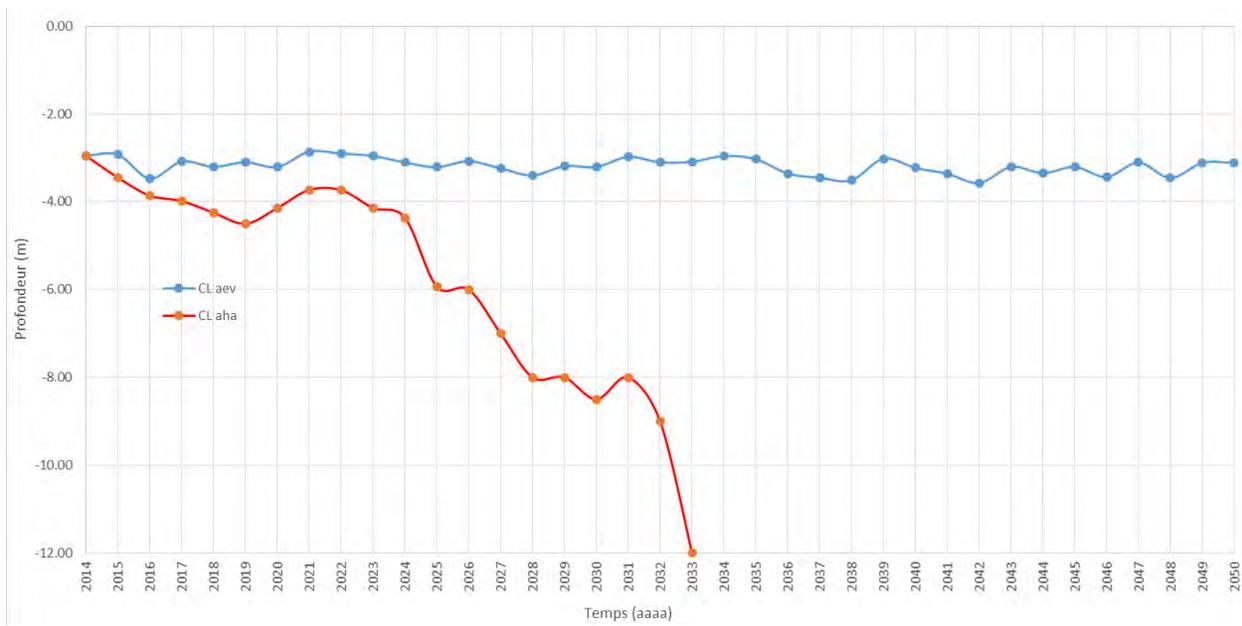


Figure 21 : Simulation de l'évolution de la profondeur maximale du front de dégel au cours de la période 2014-2050 selon les deux sorties climatiques MRCC utilisées (AEV et AHA), centre ligne, chaînage 2+874 m.

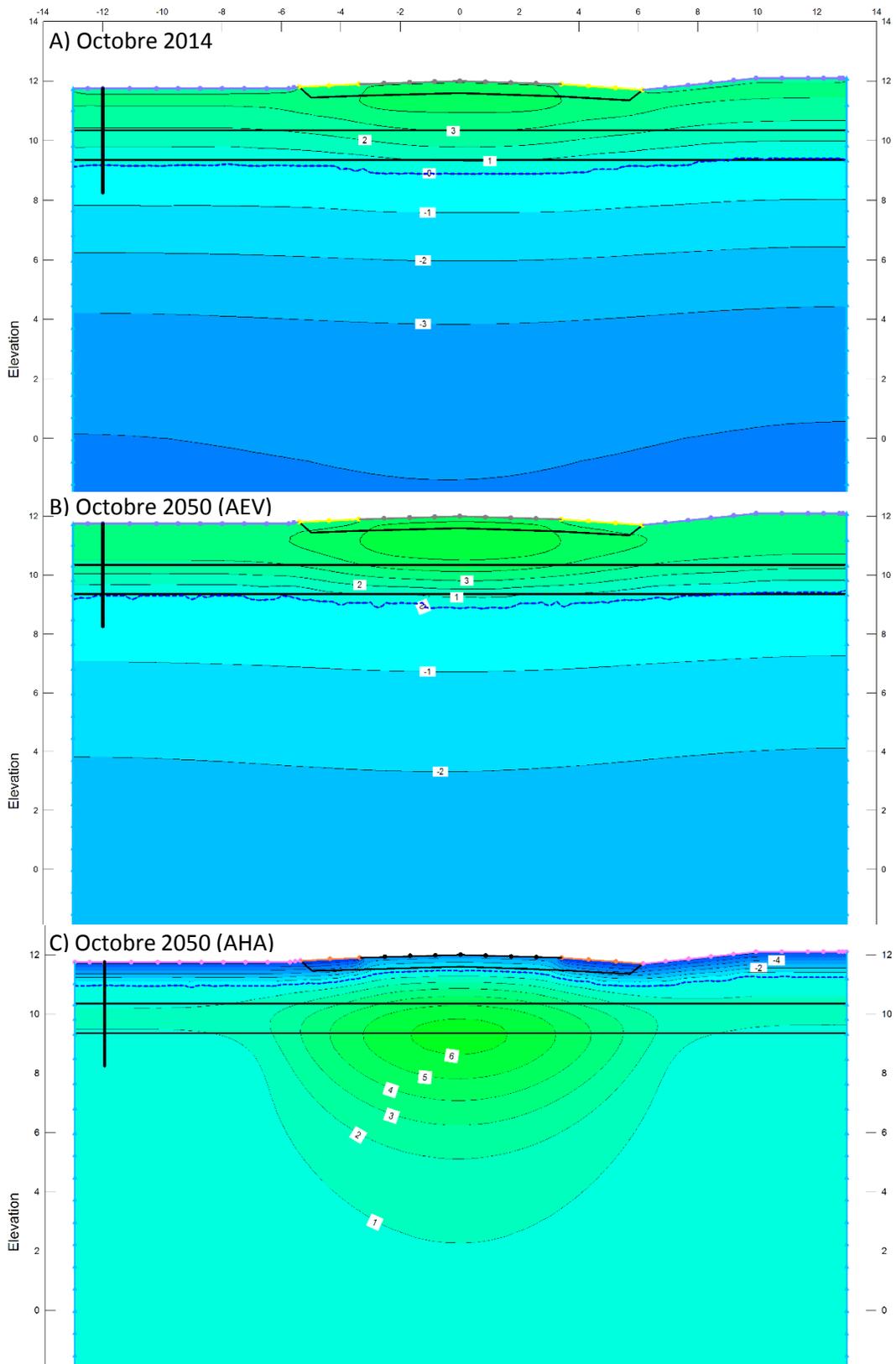


Figure 22 : Conditions géothermiques simulées au chaînage 2+874 m à la fin de la saison de dégel (1^{er} octobre) de A) 2014, B) 2050 (scénario climatique AEV) et C) 2050 (scénario climatique AHA).

4.3.3 COMPORTEMENT GÉOTHERMIQUE ANTICIPÉ SELON DIFFÉRENTS DESIGNS ENVISAGÉS POUR LE SECTEUR 4

Afin d'optimiser la solution d'adaptation de la route d'accès pour le secteur no 4, soit la section comprise entre les chaînages 2+100 m et au-delà, deux exercices de modélisation numérique ont été réalisés afin d'évaluer leurs impacts sur le régime thermique du pergélisol. La première option consiste à enlever le pavage de la route d'une part afin de faciliter son entretien dans les années à venir et d'autre part pour diminuer l'impact thermique de l'asphalte sur le régime thermique (Figure 23A). La seconde option vise à rehausser le profil de la route de 30 cm en vue de rehausser la position du front de dégel afin de préserver davantage le pergélisol tout en gardant la surface non pavée afin de bénéficier des avantages énumérés précédemment (Figure 23B). Tous les exercices de simulations numériques ont été alimentés par les données MRCC provenant du scénario optimiste AEV. Les simulations thermiques s'étendent sur une dizaine d'années (2015 à 2024) de manière à pouvoir comparer une dizaine de saisons de gel et de dégel. Pour ces exercices de simulations numériques, l'influence des conditions de surface sur le régime thermique du pergélisol a été considérée en appliquant un facteur-n de gel (n_f) et de dégel (n_d) sur les températures de l'air tel que décrit dans la section 3.6.1. Les valeurs de facteur-n utilisées propres au type de surface et aux conditions d'enneigement sont présentées au tableau 9. Les résultats des deux options ont été comparés à ceux issus d'une simulation de référence qui elle a considéré la géométrie et les conditions de surface de la route telles qu'observées actuellement dans le secteur (Figure 23C). Les résultats de cette comparaison en ce qui a trait à la profondeur maximale atteinte par le front de dégel selon les différentes options sont présentés au tableau 10. À la lueur de ces résultats, en préservant la géométrie actuelle de la route et en enlevant l'asphalte afin de laisser une surface en gravier (option #1), on observe une diminution de la pénétration du front de dégel (remontée du pergélisol) de 26 cm comparativement à une surface pavée. Cette remontée du pergélisol s'explique exclusivement par la différence des valeurs de facteur-n de gel et de dégel entre une surface pavée et non pavée (gravier) et leur incidence directe sur les températures de surface utilisées comme intrant dans les exercices de modélisation. Dans le cas où le profil de la route serait rehaussé de 30 cm et la surface non-pavée, la pénétration maximale moyenne du front de dégel pour la période 2015-2024 diminuerait de 38 cm comparativement à celle simulée sous le maintien d'une surface pavée et la géométrie actuelle de la route. Le fait de rehausser le profil de la route contribue à faire remonter le pergélisol de 12 cm supplémentaire en moyenne comparativement au simple fait de remplacer la surface pavée par une surface en gravier. Il est également possible de rehausser davantage le profil de la route afin de minimiser encore plus la pénétration maximale du front de dégel, toutefois, un rehaussement trop important (> 80 cm) pourrait favoriser des accumulations de neige en pied de remblai ce qui viendrait contrecarrer les bénéfices thermiques sur le pergélisol.

De manière générale, l'option #1 et l'option #2 offrent des avantages thermiques non négligeables pour le maintien du pergélisol sous la route dans le secteur no 4. Toutefois, il est fort probable que ces deux options aient pour effet que de retarder la dégradation du pergélisol sous la route sur le moyen terme. D'après la hausse de la température de l'air anticipée par le scénario pessimiste (AHA), le pergélisol sera mis à dure épreuve d'ici l'horizon 2050. En effet, les simulations thermiques alimentées par ce scénario suggèrent une disparition du pergélisol sous la route dans ce secteur au tournant de l'année 2032. Fait encourageant, les valeurs de tassement total mesurées dans le dépôt silto-argileux sur lequel repose la route à cet endroit sont relativement faibles ($\approx 10\%$) ce qui devrait limiter l'amplitude des tassements à venir. Bref, les détériorations devraient être significativement moins importantes d'ici au prochain cycle d'entretien. Pour conclure, outre le gain thermique qu'offre une surface non pavée, celle-ci permettra également de faciliter l'entretien en comblant les dépressions au fur et à mesure.

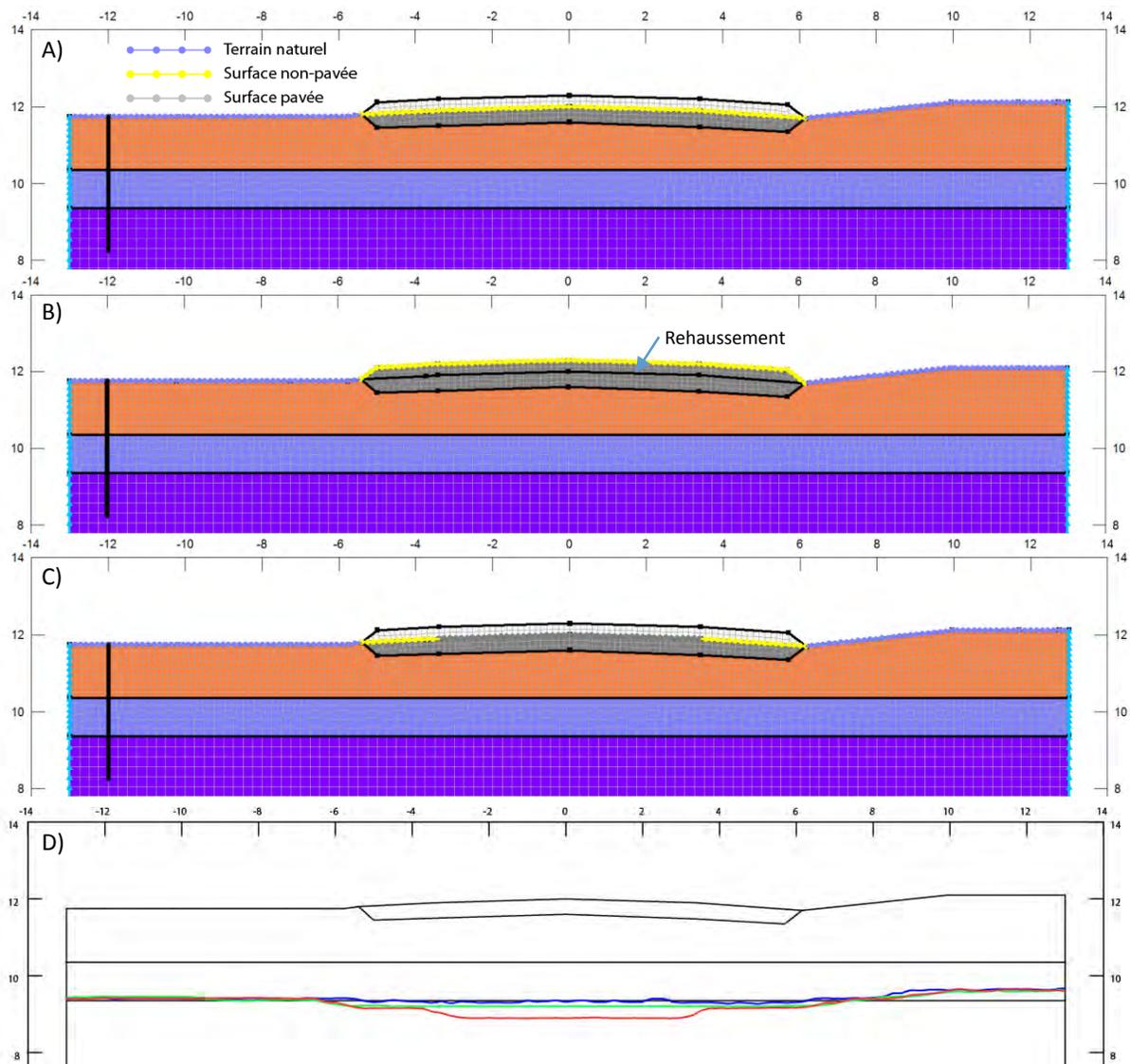


Figure 23 : Géométrie et conditions limites pour les différents exercices de simulations numériques. A) surface non pavée (option #1), B) rehaussement du remblai de 30 cm et surface non pavée (option #2) et C) surface pavée (référence). D) différence entre la position de l'isotherme de 0 °C pour le 23 octobre 2024 selon les différents exercices de simulations numériques. Les lignes rouge, verte et bleue correspondent respectivement à l'isotherme 0 °C de la référence, de l'option #1 et de l'option #2.

Tableau 9 : Facteur-n utilisés selon le type de surface et les conditions d'enneigement.

Conditions de surface	Surface pavée ●—●—●	Surface non-pavée ●—●—●	Terrain naturel ●—●—●
Type de surface (été)	asphalte	gravier	végétation
Couverture de neige	absente	absente	≤ 25 cm
n_f (Gel)	0.5	0.95	0.85
n_t (Dégel)	1.8	1.4	1.1

Tableau 10 : Profondeur maximale (en mètres) du front de dégel au centre ligne, chaînage 2+874 m, route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq.

Années	Surface pavée (Référence)	Surface non-pavée (Option #1)	Surface non-pavée + rehaussement (option #2)	Δ Réf / option #1	Δ Réf / option #2	Δ option #1/ option #2
2015	2.84	2.60	2.46*	0.24	0.38	-0.14
2016	3.42	2.95	2.85*	0.47	0.57	-0.10
2017	2.85	2.60	2.37*	0.24	0.47	-0.23
2018	2.99	2.85	2.77*	0.14	0.22	-0.08
2019	2.84	2.60	2.48*	0.24	0.36	-0.12
2020	2.84	2.59	2.61*	0.25	0.23	0.02
2021	2.85	2.58	2.42*	0.26	0.42	-0.16
2022	2.84	2.60	2.47*	0.24	0.37	-0.13
2023	2.85	2.61	2.50*	0.24	0.35	-0.11
2024	3.10	2.85	2.71*	0.25	0.38	-0.13
moyenne	2.94	2.68	2.56*	0.26	0.38	-0.12

* Profondeur par rapport au niveau de la route actuelle sans le rehaussement.

5 SYNTHÈSE, STRATÉGIE D'ADAPTATION ET CONCLUSION

Actuellement, les défauts reliés à la dégradation du pergélisol se retrouvent essentiellement dans trois secteurs : le secteur 1 (0+360 m à 0+500 m), le secteur 3 (1+520 m à 2+000 m) et secteur 4 (2+240 m à 2+920 m). De ces trois secteurs, les secteurs 3 et 4 se distinguent par la fréquence et l'amplitude des tassements observés. Pour le secteur 3, l'épaisseur du remblai ainsi que son orientation pourraient favoriser une certaine accumulation de neige. Malheureusement, quoique fortement plausible, l'absence de relevés d'épaisseur de neige le long de la route d'accès ne permet pas de confirmer le rôle de la neige dans la dégradation du pergélisol dans ce secteur. Dans le secteur 4, la faible épaisseur de remblai (< 0,75 m) confirme que de manière générale, les dégradations sont directement le résultat de transfert de chaleur unidimensionnel par conduction favorisé par le faible albédo de la surface pavée. Pour ces deux secteurs, il ne faut toutefois pas exclure que certaines grosses dépressions puissent découler d'une dégradation du pergélisol par transfert de chaleur par conduction et convection (écoulements d'eau de sous-surface). En effet, outre les spécificités géotechniques le long de la route, l'une des principales hypothèses qui permettraient également d'expliquer le patron de dégradation circonscrit à ces secteurs bien définis serait la présence d'écoulement d'eau dans la couche active. Lors de la campagne de terrain tenue dans le cadre de la présente étude, plusieurs forages et excavations ont dû être abandonnés en raison d'importantes arrivées d'eau déstabilisant les parois et neutralisant les chances de récupération. Cet aspect d'écoulement souterrain complexifie grandement le choix optimal des solutions d'adaptation à envisager en raison d'une connaissance assez fragmentaire du phénomène. Chose certaine, plusieurs ponceaux devront être refaits afin de faciliter le transfert du ruissellement de surface et minimiser ainsi les accumulations d'eau. La réfection de certains ponceaux devra être réalisée de façon prudente, particulièrement celui au chaînage 1+540 m où un coin de glace se trouve à proximité.

D'après le contexte topographique de la vallée et comme le suggèrent les levés géophysiques, les excavations et les forages récemment réalisés, les diamictons intertidaux et sédiments glaciomarins fins sensibles au dégel que l'on retrouve à plusieurs endroits le long de la route vont continuer à dégeler et engendrer des tassements dans les années à venir. À la lumière de ces observations, la stratégie d'adaptation proposée pour la route doit viser à contrôler le drainage et peut-être l'enneigement dans le secteur 2 (1+520 m à 2+000 m). Pour le secteur 4 (2+240 m à 2+920 m), en raison de la faible épaisseur du remblai et la présence d'une couche sensible au dégel très épaisse sous toute la route, l'enlèvement du pavage et le rehaussement du remblai semblent pour l'instant les solutions qui permettraient de ralentir la fonte du pergélisol et prolonger la durée de l'infrastructure. À la lueur des résultats des exercices de modélisation obtenus dans la présente étude, de telles mesures permettraient de diminuer la profondeur maximale atteinte par le front de dégel de 38 cm par rapport à celle atteinte en cas de maintien de la géométrie actuelle de la route et de la surface pavée. Toutefois, ces deux options n'auront pour effet que de retarder la dégradation du pergélisol sous la route de manière temporaire, car d'après la hausse de la température de l'air anticipée pour la région selon le scénario AHA, le pergélisol sera mis à dure épreuve d'ici l'horizon 2050. Chose certaine, le choix de ne pas repaver les sections de la route sensibles permettra de faciliter l'entretien en comblant les dépressions au fur et à mesure qu'elles se développeront.

De concert avec le personnel du MTQ lors de réunion visant à faire le point sur le développement des connaissances sur les propriétés du pergélisol, des solutions d'adaptation spécifiques par secteur ont été identifiées et se résument à :

Secteur 1 :

- Enlever le pavage entre les chainages 0+350 m et 0+550 m.
- Remplacer les deux ponceaux situés au chaînage 0+450 m.

Secteur 2 :

- Aucuns travaux prévus.

- Maintenir un suivi.

Secteur 3 :

- Enlever le pavage entre les chaînages 1+500 m et 2+000 m.
- Remplacer les ponceaux situés aux chaînages 1+575 m et 1+780 m.
- Aménager des pentes douces (1V :4H ou 1v :6H selon l'endroit).

Secteur 4 :

- Enlever le pavage entre les chaînages 2+200 m et 3+000 m.
- Rehausser le profil de la route de 30 à 50 cm.
- Aménager des pentes douces (1v :4H ou 1v :6H selon l'endroit).

Au cours des prochaines années, une intensification de l'entretien annuel est à prévoir, particulièrement dans les secteurs 3 et 4. Pour ce faire, une augmentation des quantités de granulats disponibles dans la réserve du MTQ est à prévoir.

Parallèlement à la stratégie d'adaptation proposée, les actions supplémentaires suivantes sont recommandées afin d'assurer une évaluation approfondie de l'étendue du problème, de combler le manque de connaissances sur les conditions du pergélisol et d'évaluer, au besoin, l'efficacité à long terme des méthodes de mitigation mises en place.

- Instrumenter avec des câbles à thermistances le centre ligne de la route dans les secteurs sensibles (secteur 1, 3 et 4). Ces câbles permettraient d'assurer un suivi de la progression du front de dégel et également des changements de températures plus en profondeur. Ces données thermiques permettraient également de valider les exercices de modélisation numériques effectués dans le présent rapport.
- Réaliser des relevés d'épaisseurs de neige, particulièrement dans le secteur 3, afin de vérifier si les conditions d'enneigement pourraient contribuer à une dégradation du pergélisol.
- Ausculter davantage les caractéristiques des sols sensibles présents plus en profondeur dans le secteur 3 (couche peu résistive).

Bien que les solutions d'adaptation proposées pour la route d'accès de Tasiujaq s'appuient actuellement sur des mesures climatiques, géothermiques, géophysiques et géotechniques de qualité, le comportement futur du climat et du pergélisol a été estimé qu'à partir de modèles de simulation numérique qui reposent sur des hypothèses de changement climatique qui comportent une marge d'erreur non négligeable de sorte qu'il demeure de grandes incertitudes quant à la vitesse et l'amplitude des changements à survenir. L'approche la plus sécuritaire pour le développement et le maintien des infrastructures de transports sur pergélisol est sans contredit de continuer à assurer les suivis climatiques, géothermiques et géomorphologiques avec de l'instrumentation en place et des visites sur le terrain afin d'informer les gestionnaires et ingénieurs de l'état de la situation au fur et à mesure de son évolution et, éventuellement, de revoir les prévisions de changement. Bref, maintenir ces infrastructures sous observation.

6 RÉFÉRENCES

- Allard M., Calmels F., Fortier D., Laurent C., L'Hérault E. et Vinet F. (2007a). Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique. Réalisé pour le compte d'Ouranos, Ressources Naturelles Canada. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 42 pp.
- Allard, M., Doré, G., L'Hérault, E., Verreault, J., Sarrazin, D. (2009). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport d'étape 2, Centre d'études nordiques, Université Laval, 83 p.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P. et Tarussov, A. (2007b). L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik: caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. Université Laval, Centre d'études nordiques, 192 p.
- Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E., Sarrazin, D. et al. (2012). Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: Importance for municipal and transportation infrastructures. In: Allard, M. and M. Lemay (Eds), Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization. ArcticNet Inc., Quebec City, Canada, p. 171-197.
- Allard, M., R. Lévesque, M. K. Seguin et J. Pilon (1993). Les caractéristiques du pergélisol et les études préliminaires aux travaux de génie au Québec nordique, Centre d'études nordiques, Université Laval, 94 p.
- Allard, M., Pilon, J. A. et Frydecki, J. (1994). Le pergélisol et les aéroports du Québec nordique. Centre d'études nordiques, Université Laval, 72 p.
- Allard, M., Sarrazin, D. et Roger, J., (2013). Monitoring des thermistances – collecte et interprétation des données : aéroports de Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtuaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq au Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 147 p.
- Beulac, I. (2006). Impacts de la fonte du pergélisol et adaptations des infrastructures de transport routier et aérien au Nunavik. Département de génie civil. Québec, Université Laval. Thèse (M.Sc.), 250 p.
- Beulac, I. et G. Doré (2005). Bilan de la condition des pistes et des chemins d'accès menant aux aéroports du Nunavik, Université Laval, Département de génie civil, rapport GCT-2005-09, 123 p.
- Ben-Miloud, K. et Seguin, M. K. (1990). Stratigraphy, distribution of active layer and discontinuous permafrost in Kangiqsualujjuaq basin, Northern Quebec. Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. Centre d'études nordiques. Université Laval, Québec.
- Bouchard, C. (1990). Simulation du régime thermique de sols pergélisolés : essai du modèle Tone. Département de géographie, Université Laval. Thèse (M.Sc.), 137 p.
- Calmels, F. (2005). Genèse et structure du pergélisol : étude de formes périglaciaires de soulèvement au gel au Nunavik (Québec nordique), Canada. Québec, Université Laval. Thèse (Ph. D.): xviii, 169 p.

- Calmels, F. and M. Allard (2004). "Ice segregation and gas distribution in permafrost using tomographic analysis." *Permafrost and Periglacial Processes* 15(4): 367-378.
- Calmels, F., Gagnon, O., et Allard, M. (2005). A portable earth-drill system for permafrost studies. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(3), 311–315.
- Journeaux, Bédard & Associés Inc. (1990). Forage et analyse de sol pour projet d'alimentation en eau potable, Tasiujaq, N.Q. Rapport S-90-261. Réalisé pour le compte de Vezina Fortier et Associés. Dorval, Québec, 45 pp.
- Lévesque, R., Allard, M., Séguin M. K. et Pilon, J. (1990). Données préliminaires sur le régime thermique du pergélisol dans quelques localités du Nunavik, Québec. *Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference*. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 54: 207-213.
- L'Hérault, E. (2009). Contexte climatique critique favorable au déclenchement de ruptures de mollisol dans la vallée de Salluit, Nunavik. Département de Géographie, Université Laval, Québec. Thèse (M. Sc.), 149 p.
- L'Hérault, E., Allard, M., Barrette, C., Doré, G. et Sarrazin, D. (2012). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour les aéroports d'Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk et Tasiujaq, Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 224 p.
- L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A-S., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M-P., Ducharme, M-A., Larrivée, K., Grandmont, K., et Lemieux, C. (2013). Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik. Rapport final. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 90 p.
- L'Hérault, E., M. Allard, M. Lemay, C. Barrette et A-S. Carbonneau (2014), Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour la route d'accès et l'aéroport de Kangiqsualujjuaq, Nunavik. Rapport final au Ministère des Transports (Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 77 p.
- Lupien, Rosenberg, Journeaux et Associés. Inc. (1984). Étude géotechnique, Tasiujaq, Option #3, rapport S-84-710, 135 p.
- Murton, J.B. and French, H.M. (1994). Cryostructures in permafrost, Tuktoyaktuk coastlands, western Arctic, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31: 737-747.
- Savard, C. (2006). Imagerie électrique de la sous-fondation pergélisolée des pistes d'atterrissage au Nunavik. Québec, Université Laval. 244 p.
- Vinet F. (2008). Géomorphologie, stratigraphie et évolution du niveau marin holocène d'une vallée soumise à des conditions macrotidales en régression forcée, région de Tasiujaq, Nunavik. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 97 pp.
- Vinet, F., Allard, M. et L'Hérault, E., (2012). Dépôts de surface, TASIUJAQ, Québec, Nunavik; Centre d'études nordiques, échelle 1:10 000.

ANNEXE 1 : PLANCHE SYNTHÈSE



Dépôts de surface

Sédiments alluviaux

- Ap** ALLUVIONS ACTUELLES: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers contenant parfois de la matière organique; marquées par des levées, barres alluviales et plaines alluviales actuelles.
- At** ALLUVIONS DES TERRASSES FLUVIALES: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers contenant occasionnellement de la matière organique; surface généralement marquée par des levées et barres alluviales parfois remaniées par l'action éolienne; présence fréquente de fentes de gel en surface; l'abaissment du niveau de base est visible par l'étagement des terrasses.
- R** BARRES ALLUVIALES: Buttes profilées et allongées, basses et plates d'origine fluviale caractérisées par des sédiments plus grossiers que les sédiments environnants; dépôt essentiellement sableux et graveleux; mis en place entre d'anciens chenaux alluviaux; présence fréquente de fentes de gel en surface.

Sédiments marins

- Mi** SÉDIMENTS INTERTIDIAUX ACTUELS: Silt et silt sableux avec un peu de sable et graviers; importante quantité de blocs glaciels (jusqu'à 6 m de diamètre); mis en place en zone intertidale dans les baies ou bras de mer abrités; présence de
- Mr** SÉDIMENTS DES PLAGES ACTUELLES: Sable, silt sableux, sable graveleux, graviers, galets émoussés et quelques blocs glaciels; mis en place au niveau des hautes mers actuelles.
- Mn** SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers, parfois grossièrement stratifiés; mis en place en eau peu profonde au moment de l'émersion; présence fréquente de plages soulevées et de fentes de gel en surface.
- Mit** SÉDIMENTS DES TERRASSES INTERTIDALES: Silt et silt sableux, généralement mal drainé; mis en place en zone intertidale dans les baies et bras
- BT** BUTTES INTERTIDALES: Buttes basses et plates d'origine intertidale; dépôt hétérométrique composé de sable, de graviers, de blocs et de couches de silt discontinues d'épaisseurs variables; mis en place par l'action combinée des vagues, des courants, des marées et des glaces flottantes; présence fréquente de

Sédiments glaciomarins

- GMd** SÉDIMENTS GLACIOMARINS DELTAÏQUES: Sable, graviers et galets émoussés stratifiés et non-fossilifères; mis en place dans un delta glaciomarins situé à
- GMf** SÉDIMENTS GLACIOMARINS D'ÉPANDAGE SOUS-MARIN: Dépôt silto-argileux massif et compact contenant des blocs glaciels; mis en place dans un environnement dominé par des processus marins non loin de la marge glaciaire

Substrat rocheux

- R** ROC: Affleurements de roche nue ou avec un couvert épars de dépôt meuble.
- C** Contact géologique
- S** Sillon de fente de gel (Coin de glace probable)

Hydrologie

- Z** Zone mal drainée
- R** Ruisseaux

Infrastructures

- I** Infrastructures
- R** Route
- D** Grosse dépression
- P** Petite dépression

Observations géoscientifiques

- L** Levé Géoradar 50, 100, 200 MHz (CEN, 2014)
- L** Levé Géoradar 200 MHz (CEN, 2014)
- L** Levé de résistivité (CEN, 2014)
- F** Forage avec récupération (CEN, 2014)
- S** Sondage (CEN, 2014)
- C** Coupe stratigraphique (CEN, 2014)
- F** Forage avec récupération (CEN, 2011)
- S** Sondage (CEN, 2010 et 2011)
- F** Forage avec récupération (CEN, 2009)
- F** Forage avec récupération (Lupien, Rosenberg, Journeaux et Assoc. Inc. 1984)
- S** Sondage (Lupien, Rosenberg, Journeaux et Assoc. Inc. 1984)
- C** Câble à thermistances

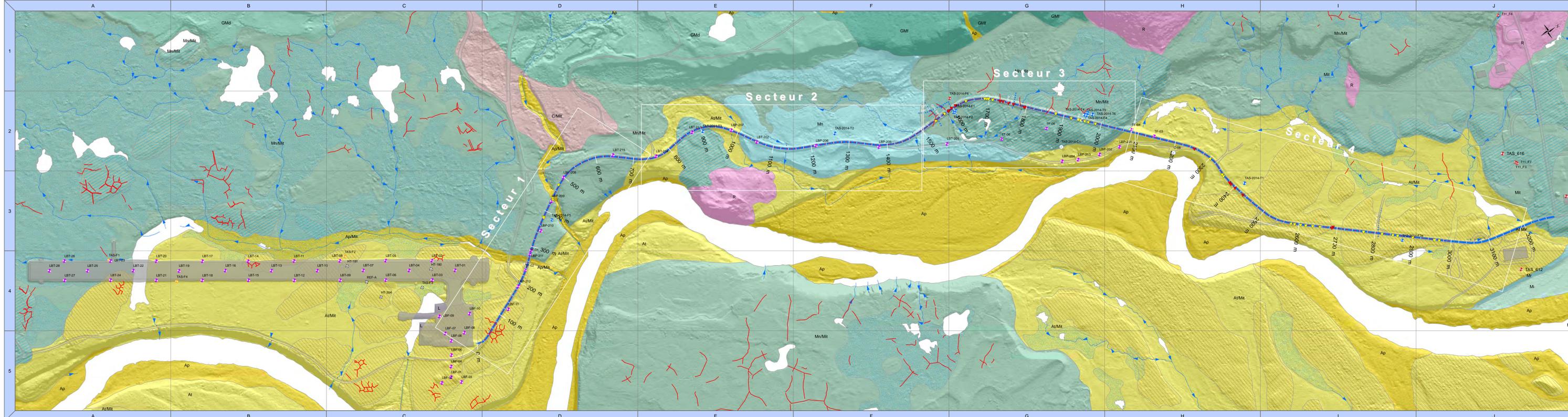
Image de résistivité électrique



Interprétations stratigraphiques et cryologiques

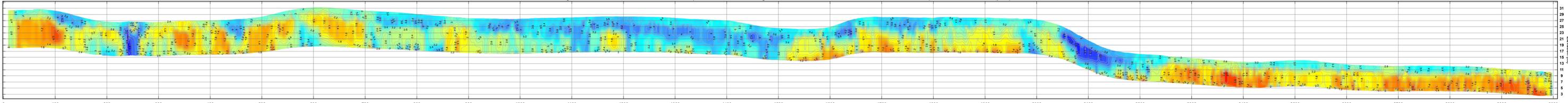
- R** Remblai
- S** Matériau à résistivité élevée (> log10 (3.4) ohm-m): Sable et gravier
- M** Matériau à résistivité modérée (< log10 (3.4) et > log10 (2.4) ohm-m): Sable siltueux, diamicton intertidal
- L** Matériau à résistivité faible (< log10 (2.4) ohm-m): Silt argileux, argiles avec forte proportion d'eau non-gelée
- P** Ponceau
- C** Coin de glace probable
- F** Observations stratigraphiques (forages, sondages ou coupes stratigraphiques)
- D** Position du front de dégel (automne 2014)

Interprétations stratigraphiques et cryologiques, centre ligne de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq



Secteur 1 Secteur 2 Secteur 3 Secteur 4

Image de résistivité électrique, centre ligne de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq



Profil de géoradar en mode réflexion de 100 MHz, centre ligne de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq

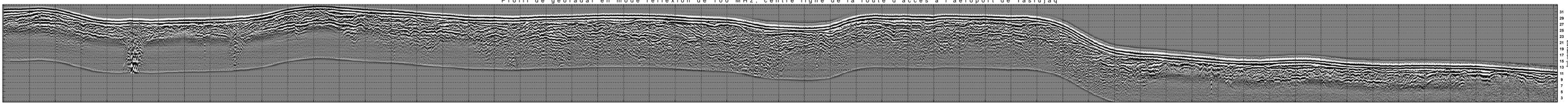
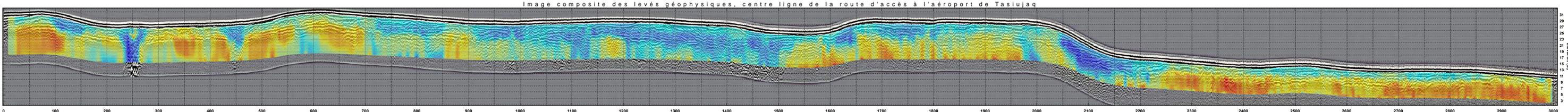
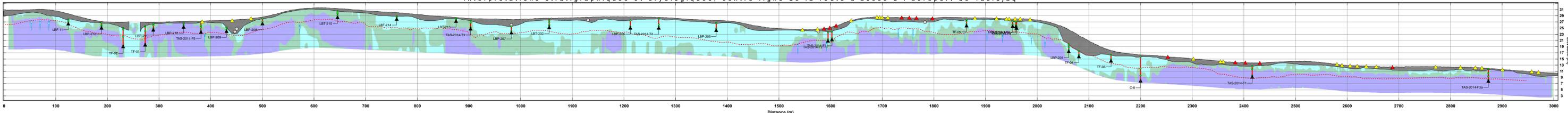


Image composite des levés géophysiques, centre ligne de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq



Interprétations stratigraphiques et cryologiques, centre ligne de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq



ANNEXE 2 : RAPPORT DE FORAGES

RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: TAS_2014_F1
COORDONNÉES: X: -69.945887 Y: 58.683671
ÉLÉVATION: 23.82 m.
DATE DÉBUT: 2014-10-02
DATE FIN: 2014-10-02

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

Instrumentation

Tubage PVC

Méth. d'échan.

- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

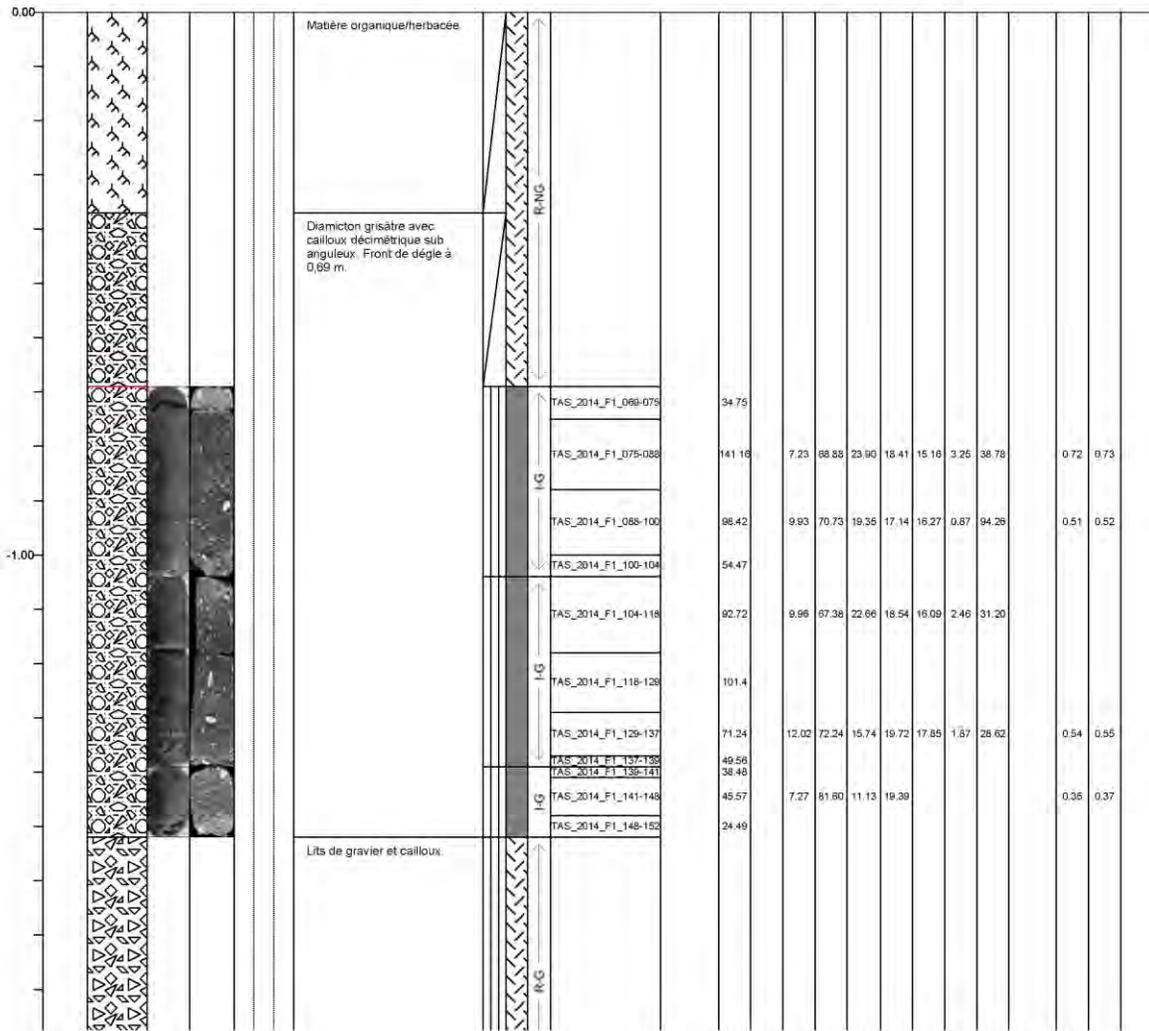
Récupéré

Perdu

État

- I-G** Intact et gelé
- I-NG** Intact et non-gelé
- R-G** Remanié et gelé
- R-NG** Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique			Caractéristique d'échan.			Analyse en laboratoire															
		Stratigraphie	Image	CT (0.01-20.71)	IT (0.05-30.71)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.	C/H/N
														C	S	M-C	wl	wp	lp	IL			



RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: TAS_2014_F3
COORDONNÉES: X: -69,930515 Y: 58,691091
ÉLÉVATION: 11,76 m.
DATE DÉBUT: 2014-10-06
DATE FIN: 2014-10-06

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

Instrumentation

- Tubage PVC

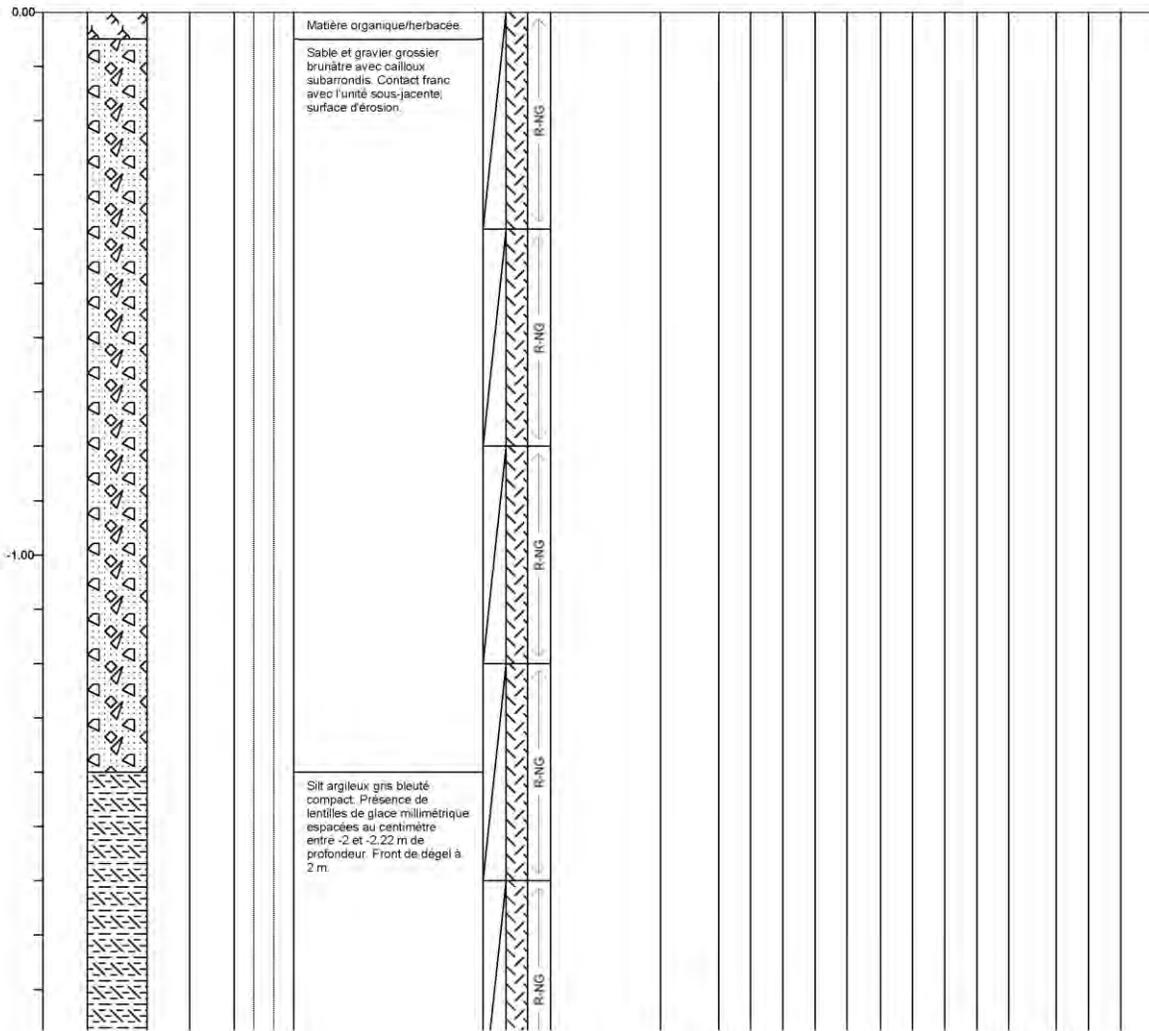
Méth. d'échan.

- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

- Récupéré
- Perdu
- État
- Intact et gelé
- Intact et non-gelé
- Remanié et gelé
- Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique				Caractéristique d'échan.				Analyse en laboratoire													
		Stratigraphie	Image	CT (0.01-20.7)	IT (0.05)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.	C/H/N
														C	S	M-C	wl	wp	lp	IL			



RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: TAS_2014_F3a
COORDONNÉES: X: -69,930515 Y: 58,691091
ÉLÉVATION: 11.76
DATE DÉBUT: 2014-10-06
DATE FIN: 2014-10-06

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

Instrumentation

Tubage PVC

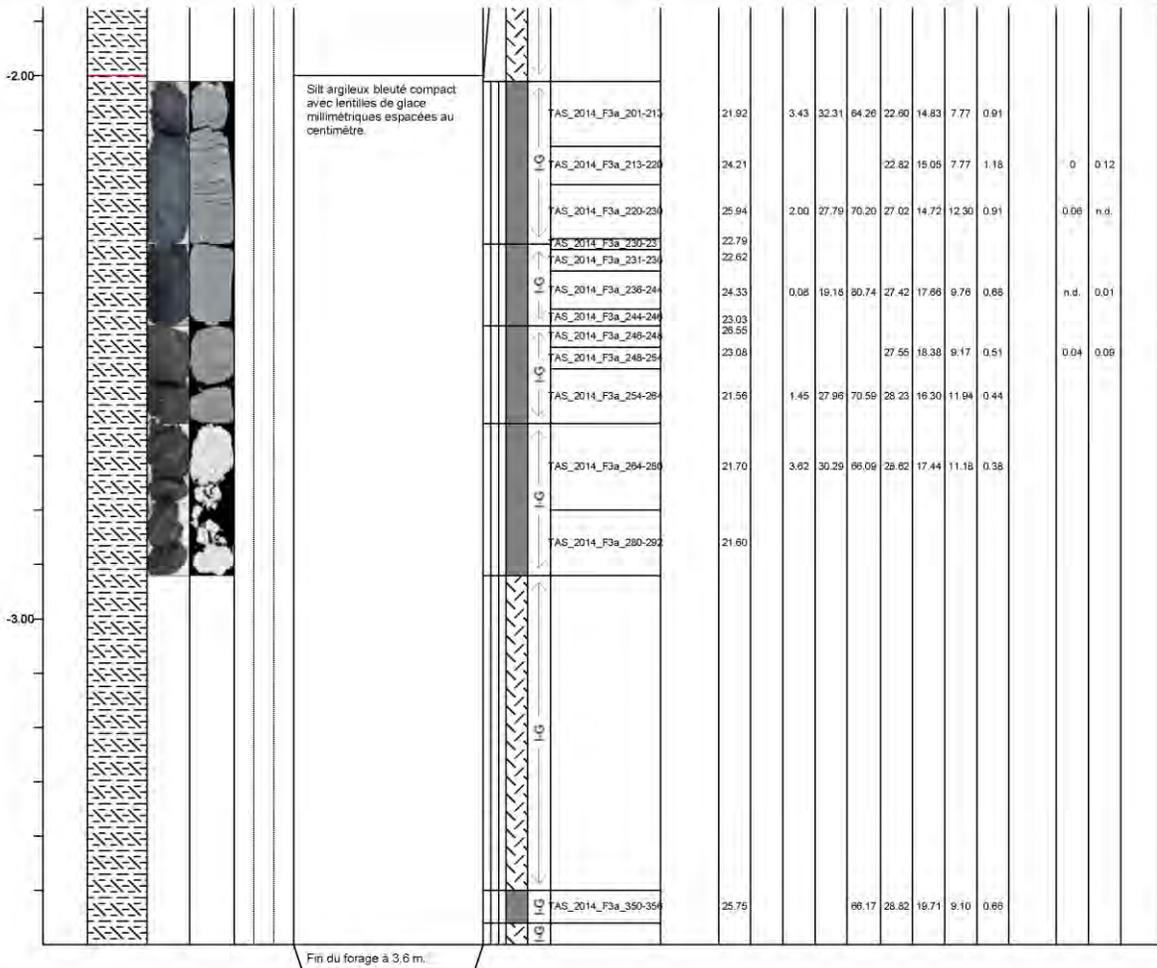
Méth. d'échan.

- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

- Récupéré
- Perdu
- État
- I-G Intact et gelé
- I-NG Intact et non-gelé
- R-G Remanié et gelé
- R-NG Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique				Caractéristique d'échan.			Analyse en laboratoire												
		Stratigraphie	Image	CT (0/1) (0/1)	IT (0/1) (0/1)	Description du sol	Méth. échan. Récupération État	Nom d'échantillon	Volume Sol Glace Air	Teneur en eau (%) Saliinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.		C/H/N
											G	S	M-C	wi	wp	lp	IL		25	100	



RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: TAS_2014_F5
COORDONNÉES: X: -69.950968 Y: 58.674215
ÉLÉVATION: 25,36 m.
DATE DÉBUT: 2014-10-06
DATE FIN: 2014-10-06

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

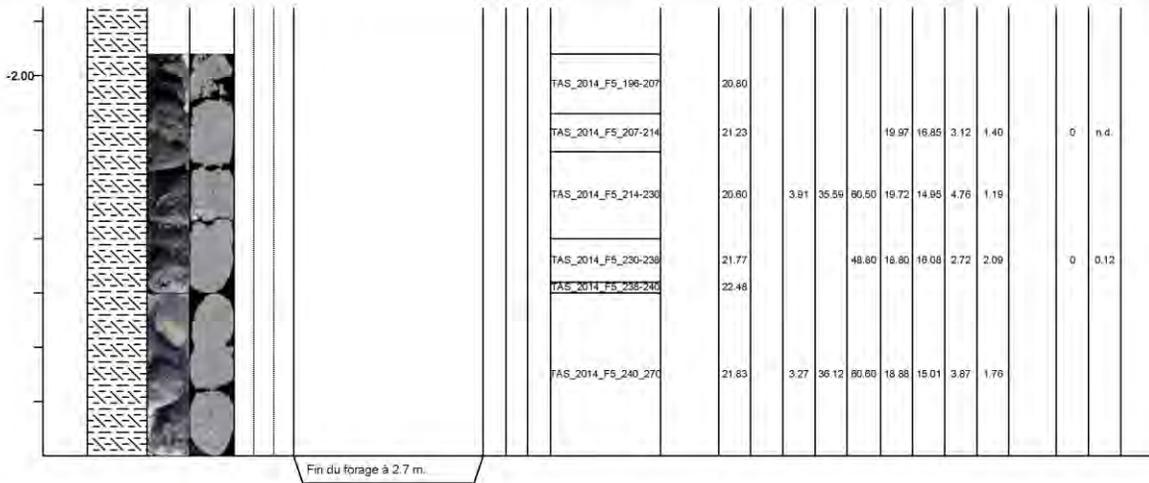
Instrumentation

- Tubage PVC
- Méth. d'échan.**
- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

- Récupéré
- Perdu
- État**
- I-G Intact et gelé
- I-NG Intact et non-gelé
- R-G Remanié et gelé
- R-NG Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique				Caractéristique d'échan.			Analyse en laboratoire															
		Stratigraphie	Image	CT (0.01-20.7)	IT (0.05-30.7)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.		C/H/N
														G	S	M-C	wi	wp	lp	IL		25	100	



RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: TAS_2014_F6
COORDONNÉES: X: -69.946517 Y: 58.683696
ÉLÉVATION: 24.63 m.
DATE DÉBUT: 2014-10-07
DATE FIN: 2014-10-07

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

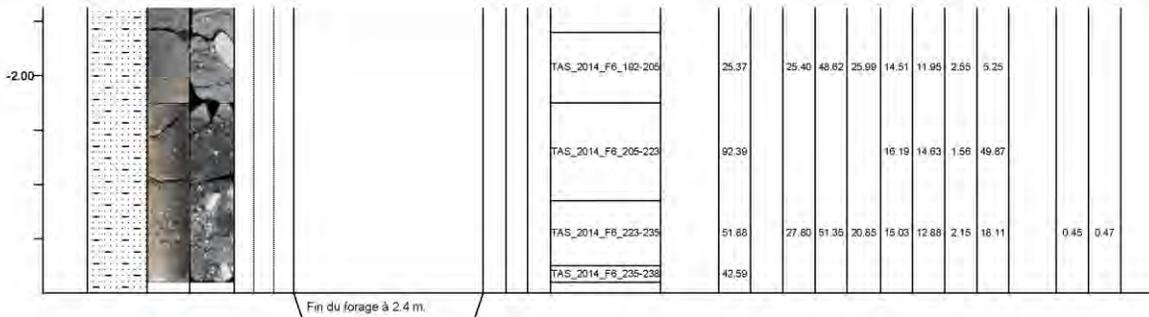
Instrumentation

- Tubage PVC
- Méth. d'échan.**
- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

- Récupéré
- Perdu
- État**
- I-G Intact et gelé
- I-NG Intact et non-gelé
- R-G Remanié et gelé
- R-NG Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique				Caractéristique d'échan.			Analyse en laboratoire															
		Stratigraphie	Image	CT (0/1/2/3)	IT (0/1/2)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.		C/H/N
														C	S	M-C	wl	wp	lp	IL		25	100	



RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: T2
COORDONNÉES: X: -69.947801 Y: 58.680962
ÉLEVATION:
DATE DÉBUT: 2014-10-06
DATE FIN: 2014-10-06

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

Instrumentation

Tubage PVC

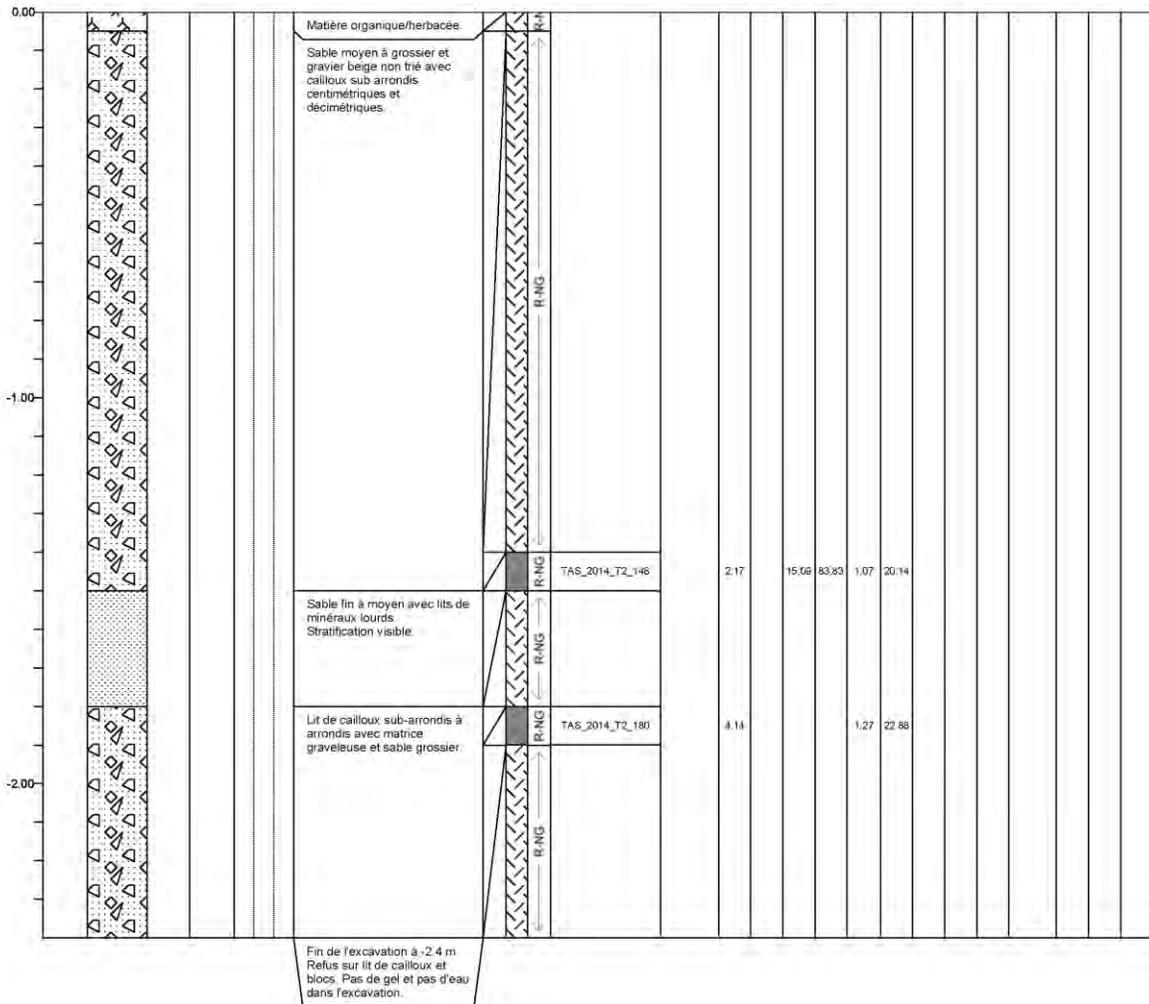
Méth. d'échan.

- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

- Récupéré
- Perdu
- État**
- I-G Intact et gelé
- I-NG Intact et non-gelé
- R-G Remanié et gelé
- R-NG Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique			Caractéristique d'échan.			Analyse en laboratoire													
		Stratigraphie	Image	IT (m/s)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance			USCS	Consol.	C/H/N
									Soil			C	S	M-C	wl	wp	Ip	IL			





RAPPORT DE FORAGE

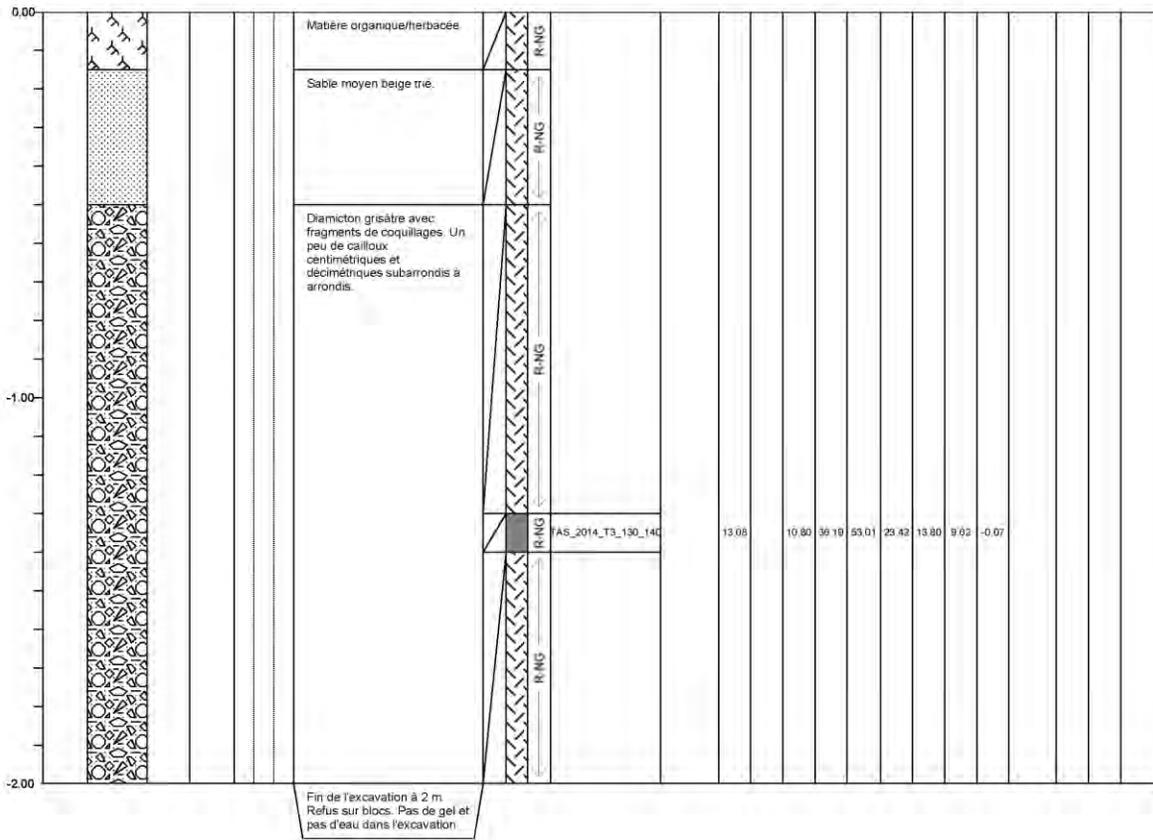
PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: T3
COORDONNÉES: X: -69.95094 Y: 58.678329
ÉLEVATION:
DATE DÉBUT: 2014-10-06
DATE FIN: 2014-10-06

Instrumentation
 - Sonde de température (Decagon ECT)
 - Sonde de température (YSI 44033)
 - Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
 - Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
 - Sonde à pression

Instrumentation
 - Tubage PVC
Méth. d'échan.
 Excavation
 Carottier
 Cuillère fendue
 Destructif

Récupération
 Récupéré
 Perdu
État
 I-G Intact et gelé
 I-NG Intact et non-gelé
 R-G Remanié et gelé
 R-NG Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique				Caractéristique d'échan.			Analyse en laboratoire														
		Stratigraphie	Image	CT (g/g)	IT (g/g)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.	C/H/N
										Soil			C	F	M-C	wl	wp	Ip	IL				



RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: T4
COORDONNÉES: X: -69.942756 Y: 58.686215
ÉLÉVATION:
DATE DÉBUT: 2014-10-04
DATE FIN: 2014-10-04

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

Instrumentation

- Tubage PVC

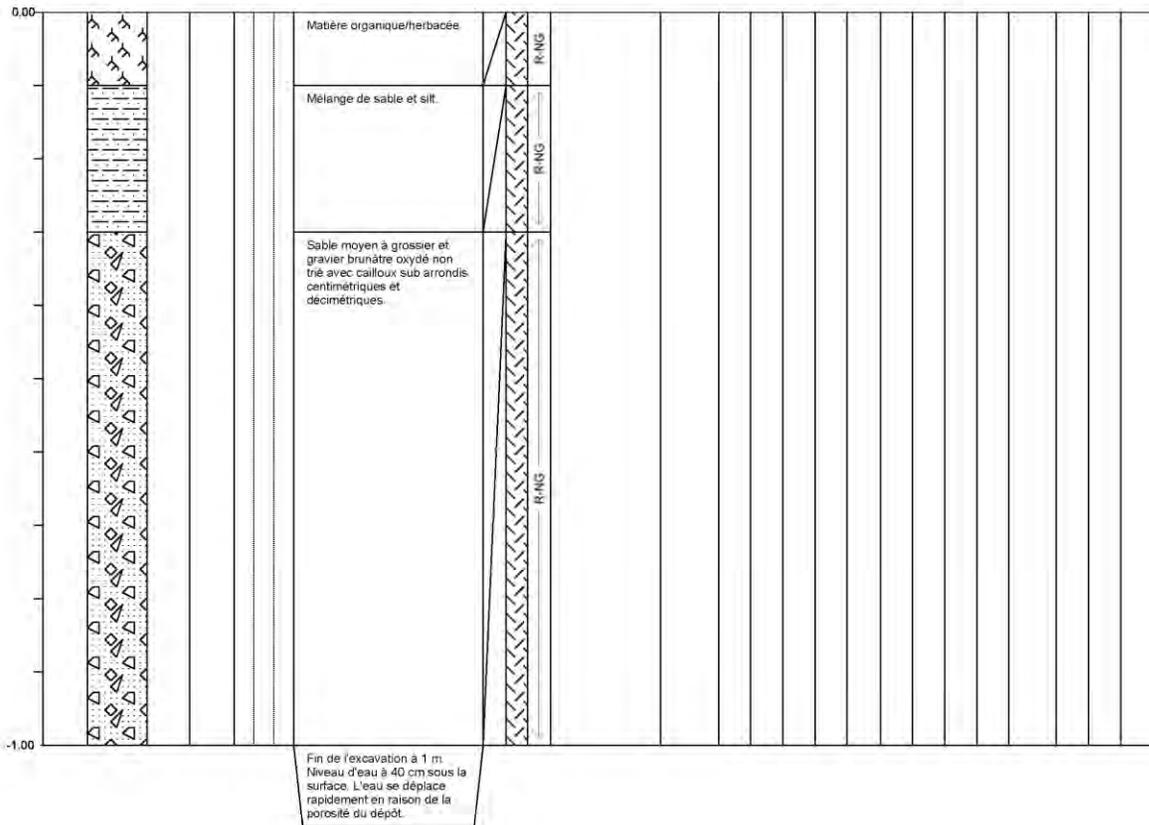
Méth. d'échan.

- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

- Récupéré
- Perdu
- État
- Intact et gelé
- Intact et non-gelé
- Remanié et gelé
- Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique				Caractéristique d'échan.				Analyse en laboratoire													
		Stratigraphie	Image	CT (0.1)	IT (0.5)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.	C/H/N
														C	S	M-C	wi	wp	lp	IL			





RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: T5
COORDONNÉES: X: -69.942679 Y: 58.686258
ÉLEVATION:
DATE DÉBUT: 2014-10-04
DATE FIN: 2014-10-04

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

Instrumentation

- Tubage PVC

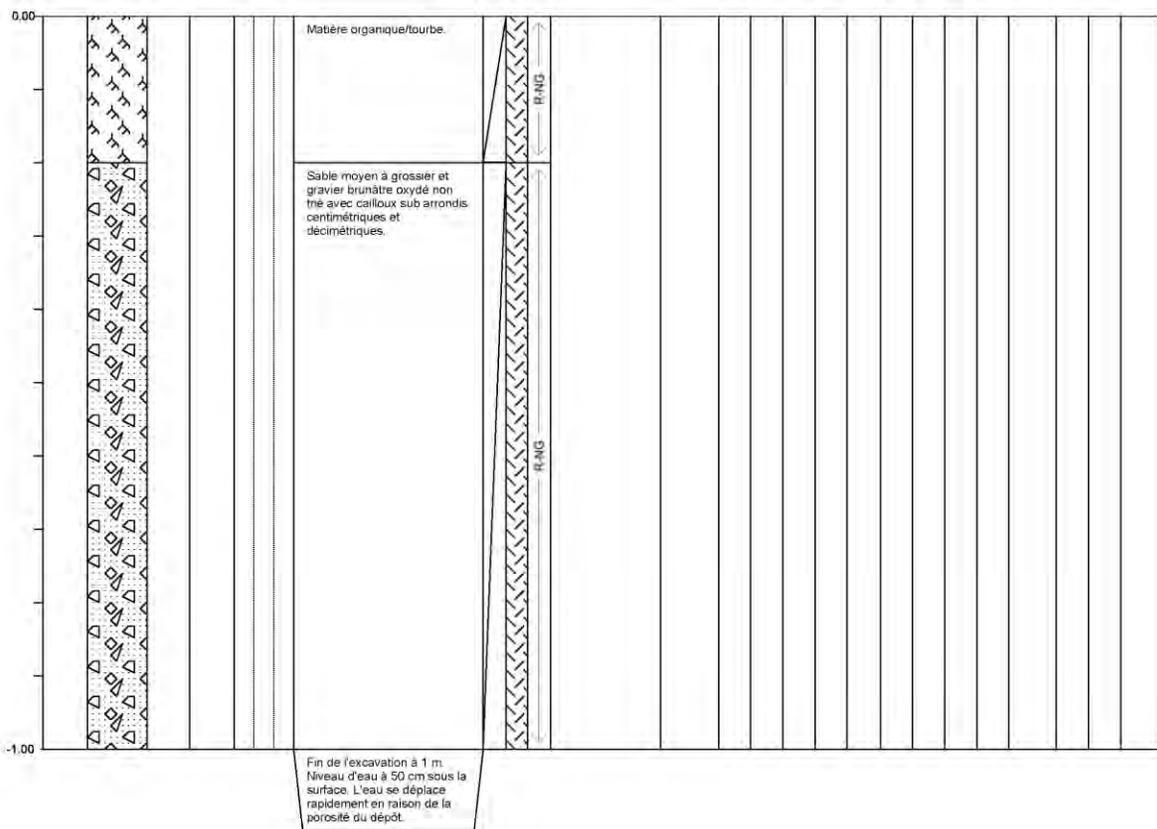
Méth. d'échan.

- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

- Récupéré
- Perdu
- État
- Intact et gelé
- Intact et non-gelé
- Remanié et gelé
- Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique			Caractéristique d'échan.			Analyse en laboratoire														
		Stratigraphie	Image	IT (m/s)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.	C/H/N
									Soil						wl	wp	lp	IL				
									Air			C	S	M-C								



RAPPORT DE FORAGE

PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: T6
COORDONNÉES: X: -69.942585 Y: 58.68638
ÉLEVATION:
DATE DÉBUT: 2014-10-04
DATE FIN: 2014-10-04

Instrumentation

- Sonde de température (Decagon ECT)
- Sonde de température (YSI 44033)
- Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
- Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
- Sonde à pression

Instrumentation

- Tubage PVC

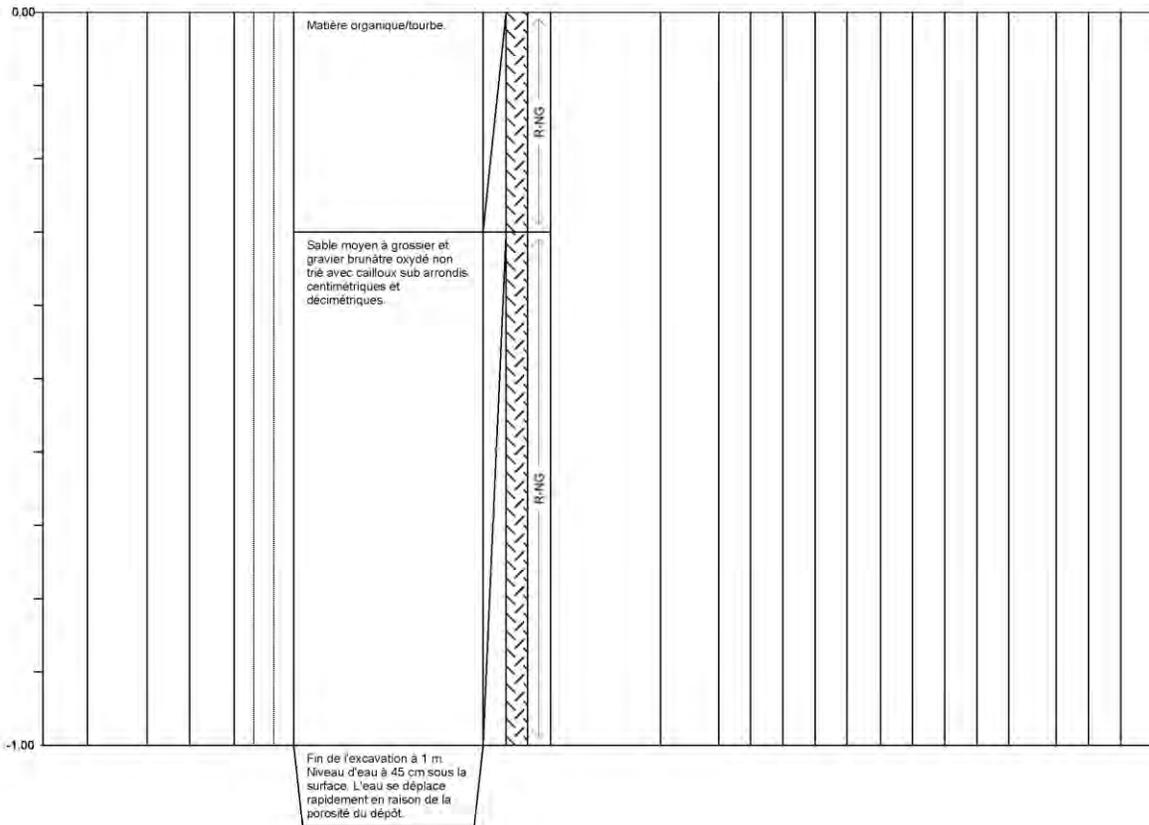
Méth. d'échan.

- Excavation
- Carottier
- Cuillère fendue
- Destructif

Récupération

- Récupéré
- Perdu
- État
- Intact et gelé
- Intact et non-gelé
- Remanié et gelé
- Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique				Caractéristique d'échan.				Analyse en laboratoire													
		Stratigraphie	Image	CT (0.01-20.7)	IT (0.01-30.7)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.	C/H/N
														C	S	M-C	wi	wp	lp	IL			



RAPPORT DE FORAGE

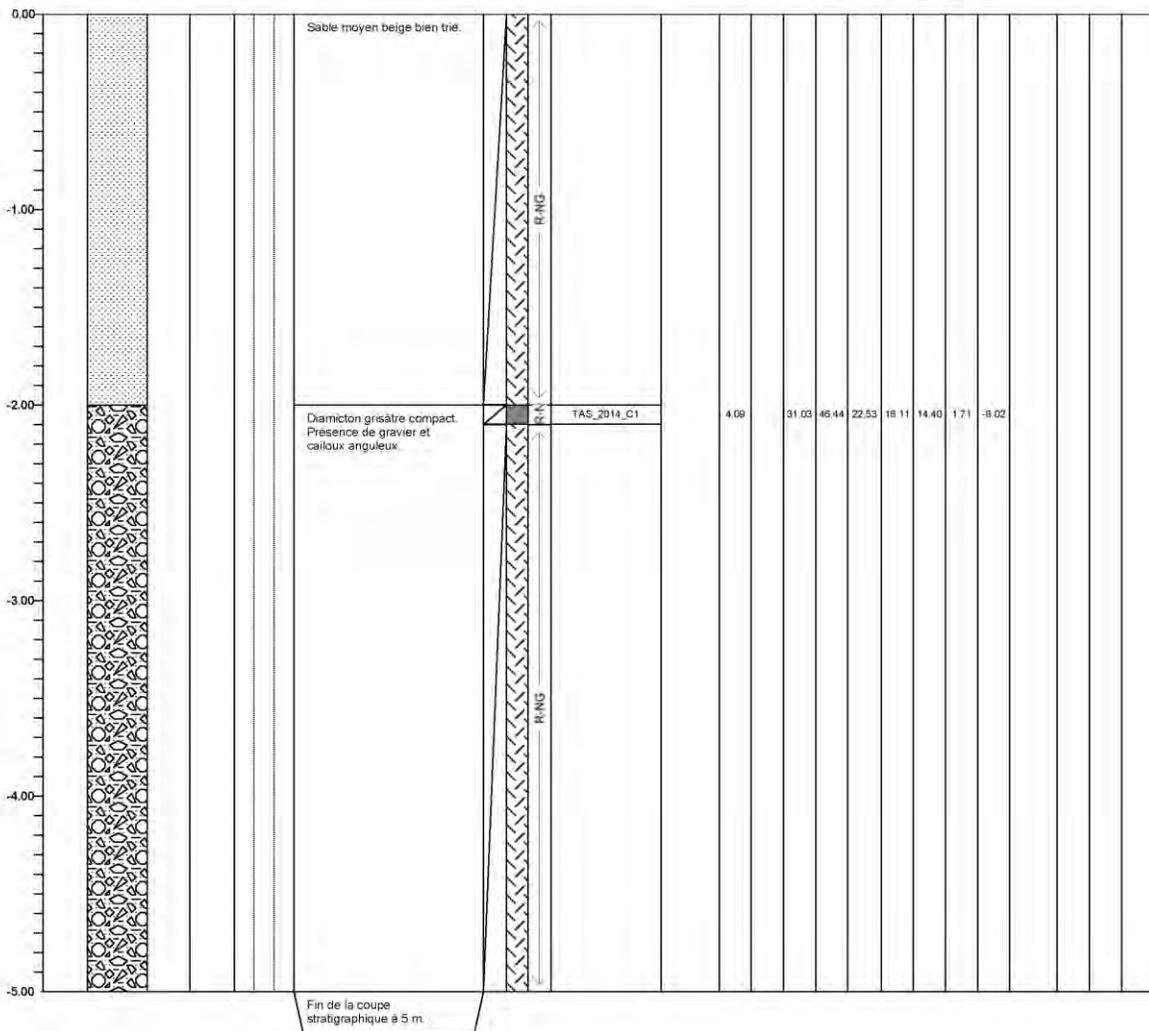
PROJET: MTQ
SITE: Tasiujaq
NO. DE FORAGE: C1
COORDONNÉES: X: -69.942041 Y: 58.68536
ÉLEVATION:
DATE DÉBUT: 2014-10-04
DATE FIN: 201-10-04

Instrumentation
— Sonde de température (Decagon ECT)
— Sonde de température (YSI 44033)
— Teneur en eau volumétrique, conductivité électrique et température (Decagon 5ET)
— Sonde de teneur en eau volumétrique (Decagon EC-5)
— Sonde à pression

Instrumentation
 Tubage PVC
Méth. d'échan.
 Excavation
 Carottier
 Cuillère fendue
 Destructif

Récupération
 Récupéré
 Perdu
État
I-G Intact et gelé
I-NG Intact et non-gelé
R-G Remanié et gelé
R-NG Remanié et non-gelé

Profondeur (m)	Instrumentation	Information stratigraphique			Caractéristique d'échan.			Analyse en laboratoire														
		Stratigraphie	Image	IT (m/s)	Description du sol	Méth. échan.	Récupération	État	Nom d'échantillon	Volume	Teneur en eau (%)	Salinité (ppm)	Granulométrie			Consistance				USCS	Consol.	C/H/N
									Soil	Glacé	Air	G	S	M-C	wi	wp	lp	IL				



ANNEXE 3 : RÉSULTATS DES ANALYSES EN LABORATOIRE

	TAS_2014_F1_075-088			TAS_2014_F1_088-100			TAS_2014_F1_129-137		
Type d'essai	consolidation			consolidation			consolidation		
Date de début	4/1/2015 11:25:56			5/4/2015 10:27:34			4/22/2015 09:40:59		
Date de fin	4/7/2015 09:16:23			5/7/2015 09:00:34			4/27/2015 09:16:26		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	1247.11			1321			934.19		
Volume (cm³)	1031.7			983.055			655.508		
Densité des grains (g/cm³)	2,65			2,65			2,65		
Indice des vides (e₀)	4.287			2.912			2.184		
Hauteur moyenne (mm)	129.65			123.68			84.96		
Diamètre moyen (mm)	100.19			99.65			97.04		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Hauteur (mm)	37.42	36.54	35.22	61.07	60.92	60.63	38.48	38.19	37.75
Diamètre (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Volume (cm³)	293.88	286.97	276.60	479.64	478.46	476.19	302.25	299.97	296.52
Indice des vides final (e_r)	0.506	0.471	0.417	0.909	0.904	0.895	0.468	0.457	0.440
Tassement total (%)	71.5	72.2	73.2	51.2	51.3	51.6	53.9	54.2	54.8
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Masse de sol sec (g)	517.13			665.86			545.56		
Masse d'eau (g)	729.98			655.14			388.63		
Teneur en eau	141.16			98.3901			71.2351		
									

	TAS_2014_F1_141-148			TAS_2014_F2_129-140			TAS_2014_F3_205-215		
Type d'essai	consolidation			consolidation			consolidation		
Date de début	3/18/2015 11:01:05			4/10/2015 10:21:15			3/27/2015 16:00:48		
Date de fin	3/23/2015 09:26:05			4/14/2015 10:06:15			4/1/2015 09:29:48		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	818.97			1603			1358.56		
Volume (cm³)	504.333			861.79			715.48		
Densité des grains (g/cm³)	2.65			2.65			2.65		
Indice des vides (e₀)	1.376			0.808			0.709		
Hauteur moyenne (mm)	70.92			113.04			100.42		
Diamètre moyen (mm)	95.55			97.71			95.00		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Hauteur (mm)	41.74	40.86	40.28	86.65	85.04	84.60	91.62	86.05	81.80
Diamètre (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Volume (cm³)	327.81	320.90	316.34	680.52	667.87	664.42	719.55	675.80	642.42
Indice des vides final (e_r)	0.544	0.512	0.490	0.428	0.401	0.394	0.719	0.614	0.534
Tassement total (%)	35.0	36.4	37.3	21.0	22.5	22.9	0	5.5	10.2
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Masse de sol sec (g)	562.52			1263.14			1109.48		
Masse d'eau (g)	256.45			339.86			249.08		
Teneur en eau	45.59			26.91			22.45		
									

	TAS_2014_F3a_213-220			TAS_2014_F3a_220-230			TAS_2014_F3a_236-244		
Type d'essai	consolidation			consolidation			consolidation		
Date de début	5/19/2015 10:25:54			4/27/2015 10:07:41			4/17/2015 10:09:03		
Date de fin	5/21/2015 09:54:54			4/30/2015 14:09:29			4/22/2015 08:59:39		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	845.59			1331			821		
Volume (cm³)	452.943			712.192			436.382		
Densité des grains (g/cm³)	2.65			2.65			2.65		
Indice des vides (e₀)	0.763			0.785			0.749		
Hauteur moyenne (mm)	68.20			95.41			78.31		
Diamètre moyen (mm)	90.46			94.98			84.44		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Hauteur (mm)	60.14	54.86	50.60	85.29	81.92	n.d	n.d	n.d	55.00
Diamètre (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	n.d	n.d	n.d	100.00
Volume (cm³)	472.31	430.84	397.38	669.87	643.40	n.d	n.d	n.d	431.98
Indice des vides final (e_r)	0.838	0.677	0.547	0.678	0.612	n.d	n.d	n.d	0.731
Tassement total (%)	0	4.9	12.3	5.9	9.7	n.d	n.d	n.d	0.1
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Masse de sol sec (g)	680.78			1057.60			661.35		
Masse d'eau (g)	164.81			273.40			159.65		
Teneur en eau	24.21			25.85			24.14		
									

	TAS_2014_F3a_248-254			TAS_2014_F4_142-151			TAS_2014_F5_207-214		
Type d'essai	consolidation			consolidation			consolidation		
Date de début	5/21/2015 10:27:06			4/30/2015 15:04:27			5/25/2015 10:28:45		
Date de fin	5/25/2015 09:57:06			5/4/2015 09:10:27			5/28/2015 11:25:00		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	931.42			1262.46			966		
Volume (cm³)	501.437			671.377			507.481		
Densité des grains (g/cm³)	2.65			2.65			2.65		
Indice des vides (e₀)	0.756			0.736			0.688		
Hauteur moyenne (mm)	65.20			95.43			71.49		
Diamètre moyen (mm)	97.77			93.83			92.37		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Hauteur (mm)	61.53	60.36	57.87	86.63	84.72	83.55	64.31	56.10	n.d
Diamètre (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	n.d
Volume (cm³)	483.29	474.10	454.54	680.42	665.42	656.23	505.06	440.58	n.d
Indice des vides final (e_r)	0.692	0.660	0.592	0.759	0.720	0.697	0.679	0.465	n.d
Tassement total (%)	3.6	5.5	9.4	0	0.09	0.23	0.05	13.2	n.d
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Masse de sol sec (g)	756.76			1025.05			796.93		
Masse d'eau (g)	174.66			237.41			169.07		
Teneur en eau	23.08			23.1608			21.2152		
									
							Nd		

	TAS_2014_F5_230-238			TAS_2014_F6-083-092			TAS_2014_F6-092-105		
Type d'essai	consolidation			consolidation			consolidation		
Date de début	5/15/2015 15:22:15			4/7/2015 10:07:10			5/13/2015 15:25:06		
Date de fin	5/19/2015 09:51:15			4/10/2015 09:19:10			5/15/2015 14:51:06		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	1010.04			1192.48			1422		
Volume (cm³)	523.675			670.904			996.499		
Densité des grains (g/cm³)	2.65			2.65			2.65		
Indice des vides (e₀)	0.673			0.929			2.165		
Hauteur moyenne (mm)	79.08			93.40			125.62		
Diamètre moyen (mm)	89.86			94.34			99.05		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Hauteur (mm)	67.94	61.04	58.55	66.56	65.98	64.80	63.45	62.43	61.69
Diamètre (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Volume (cm³)	533.62	479.42	459.87	522.75	518.19	508.92	498.32	490.31	484.50
Indice des vides final (e_r)	0.705	0.532	0.469	0.503	0.490	0.463	0.582	0.557	0.539
Tassement total (%)	0	8.5	12.2	22.1	22.8	24.1	50.0	50.8	51.4
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Masse de sol sec (g)	829.44			921.56			834.48		
Masse d'eau (g)	180.6			270.92			587.52		
Teneur en eau	21.7737			29.398			70.4055		
									

	TAS_2014_F6_118-133			TAS_2014_F6_133-146			TAS_2014_F6-167-180		
Type d'essai	consolidation			consolidation			consolidation		
Date de début	3/23/2015 10:33:55			4/14/2015 10:58:06			5/7/2015 10:55:10		
Date de fin	3/26/2015 16:23:52			4/17/2015 09:02:49			5/11/2015 10:46:42		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	1894.38			1627			1774		
Volume (cm³)	1152.5			1002.29			1056.2		
Densité des grains (g/cm³)	2.65			2.65			2.65		
Indice des vides (e₀)	1.248			1.294			1.245		
Hauteur moyenne (mm)	147.99			126.72			134.74		
Diamètre moyen (mm)	98.74			99.90			98.49		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Hauteur (mm)	100.92	100.33	99.60	85.23	84.64	84.06	89.74	89.74	88.74
Diamètre (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Volume (cm³)	792.66	788.02	782.29	669.41	664.78	660.22	704.82	704.82	696.96
Indice des vides final (e_r)	0.546	0.537	0.526	0.532	0.521	0.511	0.498	0.498	0.481
Tassement total (%)	31.2	31.6	32.1	33.2	33.7	34.1	33.3	33.3	34.0
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Masse de sol sec (g)	1358.38			1157.91			1246.8		
Masse d'eau (g)	536			469.09			527.2		
Teneur en eau	39.4588			40.5118			42.2842		
									

	TAS_2014_F6-223-235							
Type d'essai	consolidation							
Date de début	5/11/2015 11:35:26							
Date de fin	5/13/2015 14:22:49							
	Avant l'essai							
Poids gelé (g)	1566							
Volume (cm ³)	947.459							
Densité des grains (g/cm ³)	2.65							
Indice des vides (e ₀)	1.435							
Hauteur moyenne (mm)	120.60							
Diamètre moyen (mm)	99.44							
	Après l'essai							
Contrainte (kPa)	25	50	100					
Hauteur (mm)	65.91	64.74	64.15					
Diamètre (mm)	100.00	100.00	100.00					
Volume (cm ³)	517.67	508.48	503.85					
Indice des vides final (e _r)	0.330	0.307	0.295					
Tassement total (%)	45.4	46.3	46.8					
	Teneur en eau							
Masse de sol sec (g)	1031.23							
Masse d'eau (g)	534.77							
Teneur en eau	51.8575							
								
	nd							