

Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour les aéroports d'Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqaq, Kangirsuk et Tasiujaq, Nunavik.

Rapport final

Emmanuel L'Hérault, Michel Allard, Carl Barrette, Guy Doré et Denis Sarrazin

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

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, en particulier de M. Jack Pappak, pour avoir facilité les travaux par l'accès aux garages et parfois aux logements de fonction dans les aéroports par des membres de notre personnel. Finalement, on ne peut passer sous silence l'accueil amical que notre équipe a reçu dans toutes les communautés du Nunavik.

Auteurs :

- Emmanuel L'Hérault, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Michel Allard, professeur-chercheur, Département de géographie, Université Laval
- Carl Barrette, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Guy Doré, professeur-chercheur, Département de génie civil, Université Laval
- Denis Sarrazin, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval

Citation recommandée :

L'Hérault E., M. Allard, C. Barrette, G. Doré, et D. Sarrazin (2012). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour les aéroports d'Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituaq, Akulivik, Salluit, Quaqtuaq, 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.

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

- Jean Verreault, étudiant à la maîtrise en génie civil, Université Laval
- Jérémie Doyon, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Andrée-Sylvie Carbonneau, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Anick Guimond, coordonnatrice du projet de recherche, BCNQ, MTQ
- Gilles Grondin, ingénieur, Service de la Géotechnique et de la Géologie, MTQ
- Maude Boucher, ingénieure, Service de la Géotechnique et de la Géologie, MTQ
- Guy Bergeron, ingénieur, Service des chaussées, MTQ
- Annick Poirier, agente de recherche, BCNQ, MTQ
- Claude Langlois, technicien en travaux publics, BCNQ, MTQ
- Mélinda Gagnon, technicienne en travaux publics, BCNQ, MTQ
- Marc Fortier, technicien en travaux publics, BCNQ, MTQ
- Yves Pilotte, technicien en travaux publics, BCNQ, MTQ
- Marie-Pier Lachance, étudiante au baccalauréat en géographie physique, Université Laval
- Marc-André Ducharme, étudiant au baccalauréat en géographie physique, Université Laval
- Valérie Mathon-Dufour, étudiante au baccalauréat en géographie physique, Université Laval
- Catherine Falardeau-Marcoux, étudiante au baccalauréat en géographie physique, Université Laval
- Tania Gibéryen, étudiante au doctorat en sciences géographiques, Université Laval
- Audrey Mercier Rémillard, étudiante au baccalauréat en géographie physique, Université Laval
- Marie-Ève Larouche, étudiante au doctorat en sciences géographiques, Université Laval
- M. Réal Tremblay, inspecteur géotechnicien, Groupe Qualitas-Techmat
- M. Carol Devost, foreur, Groupe Qualitas-Techmat
- M. Sylvain Gagnon, foreur, Groupe Qualitas-Techmat
- M. Pierre-Patrick Lecours, aide-foreur, Groupe Qualitas-Techmat
- M. Maxime Tremblay, aide-foreur, Groupe Qualitas-Techmat

TABLE DES MATIERES

Avant-propos	ii
Liste des illustrations.....	vi
Liste des tableaux.....	xii
Acronymes et symboles	xv
1 Introduction.....	1
2 Objectifs.....	2
3 Méthodologie :	3
3.1 Travaux de terrain	3
3.1.1 Sites à l'étude.....	3
3.1.2 Calendrier des opérations de forage	3
3.1.3 Méthodes d'investigations <i>in situ</i> utilisées.....	5
3.1.3.1 Forages profonds avec récupération	5
3.1.3.2 Sondages superficiels	6
3.1.3.3 Compilation des données de forages.....	6
3.1.3.4 Instrumentation pour le suivi des températures du sol.....	6
3.2 Essais en laboratoire	8
3.2.1 Analyses géotechniques.....	8
3.2.1.1 Essais de fluage	10
3.2.1.1.1 Théorie :	10
3.2.1.1.2 Procédure des essais	11
3.2.1.2 Essai de tassement et consolidation au dégel	13
3.2.2 Analyses par scanneur tomodensitométrie.....	15
3.3 Intégration des données préexistantes et nouvellement acquises.....	16
3.3.1 Relevés de défauts du MTQ	16
3.3.2 Relevés topographiques	16
3.3.2.1 Plans originaux	16
3.3.2.2 Relevés LIDAR.....	17
3.3.3 Cartographie améliorée des dépôts de surface sous les pistes	19
3.3.4 Coupe géologique synthèse.....	20
3.4 Simulations et projections géothermiques	22
3.4.1 Paramètres des modèles numériques	23
3.4.1.1 Température de l'air	23
3.4.1.1.1 Période 2000 à 2010.....	23
3.4.1.1.2 Période 2011-2050	23
3.4.1.2 Température de surface.....	26
3.4.1.2.1 Les conditions de surface et les facteurs-n	26
3.4.1.2.2 Considérations sur l'influence de la neige.....	27
3.4.1.3 Attribution des conditions limites.....	29
3.4.2 Calibration des modèles numériques	31
4 Résultats :	32
4.1 Umiujaq.....	33
4.1.1 Observations générales et synthèse des défauts.....	33
4.1.2 Répartition spatiale, épaisseur et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface.....	35
4.1.2.1 Complexe de sédiments éoliens sur sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Ed/Gs)	39
4.1.2.2 Complexe de sédiments littoraux et pré-littoraux sur sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Mb/Gs).....	39
4.1.2.3 Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Gs)	39

4.1.3	Conditions thermiques du pergélisol.....	40
4.1.3.1	Évolution récente : Période 1990-2010	40
4.1.3.2	Évolution future : Période 2010-2050.....	41
4.1.3.2.1	Calibration	41
4.1.3.2.1	Projections et tassements à venir	43
4.1.4	Stratégies d'adaptation envisagées :	46
4.2	Inukjuak.....	47
4.2.1	Observations générales et synthèse des défauts.....	47
4.2.1.1	Dépressions et tassements mesurés.....	48
4.2.1.2	Réseau de drainage, zones d'accumulation d'eau et épaisseurs de neige	48
4.2.2	Répartition spatiale, épaisseurs et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface ...	49
4.2.2.1	Sédiments littoraux et pré-littoraux (Mb)	53
4.2.2.2	Sédiments littoraux et pré-littoraux minces sur sédiments intertidaux (Mm/Mi).....	54
4.2.3	Conditions thermiques du pergélisol.....	58
4.2.3.1	Évolution récente : Période 1990-2010	58
4.2.3.2	Évolution future : Période 2010-2050.....	59
4.2.3.2.1	Calibration	59
4.2.3.2.2	Projections et tassements à venir	60
4.2.4	Stratégies d'adaptation envisagées :	67
4.3	Puvirnituk.....	69
4.3.1	Observations générales et synthèse des défauts.....	69
4.3.2	Répartition spatiale, épaisseurs et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface ...	71
4.3.2.1	Complexe de sédiments littoraux et pré-littoraux sur sédiments marins d'eau profonde (Mb/Ma)	74
4.3.2.2	Till remanié (Tr)	77
4.3.3	Conditions thermiques du pergélisol.....	78
4.3.3.1	Évolution récente : Période 1990-2010	78
4.3.4	Stratégies d'adaptation envisagées :	81
4.4	Akulivik.....	83
4.4.1	Observations générales et synthèse des défauts.....	83
4.4.2	Répartition spatiale, épaisseurs et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface ...	84
4.4.2.1	Complexe de sédiments littoraux et pré-littoraux sur sédiments marins d'eau profonde (Mb/Ma ou Mm/Ma)	87
4.4.2.2	Till remanié (Mb/Tr, Mm/Tr ou Tr)	90
4.4.3	Conditions thermiques du pergélisol.....	92
4.4.3.1	Évolution récente : Période 1990-2010	92
4.4.3.2	Évolution future : Période 2010-2050.....	97
4.4.3.2.1	Calibration	97
4.4.3.2.2	Projections et tassements anticipés.....	98
4.4.4	Stratégies d'adaptation envisagées :	104
4.5	Salluit.....	106
4.5.1	Observations générales et synthèse des défauts.....	106
4.5.1.1	Piste d'atterrissage.....	106
4.5.1.1	Route d'accès	106
4.5.2	Répartition spatiale, épaisseurs et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface .	109
4.5.2.1	Secteur de l'aéroport	112
4.5.2.2	Secteur de la route d'accès	116
4.5.3	Conditions thermiques du pergélisol.....	120
4.5.3.1	Évolution récente : Période 1990-2010	120
4.5.3.2	Évolution future : Période 2010-2050.....	123

4.5.3.2.1	Calibration	123
4.5.3.2.2	Projections et tassements à venir	123
4.5.4	Stratégies d'adaptation envisagées :	126
4.5.4.1	Piste d'atterrissage.....	126
4.5.4.2	Route d'accès	126
4.6	Quaqtaq	128
4.6.1	Observations générales et synthèse des défauts	128
4.6.2	Répartition spatiale, épaisseurs et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface .	131
4.6.3	Conditions thermiques du pergélisol	136
4.6.3.1	Évolution récente : Période 1988-2010	136
4.6.3.2	Évolution future : Période 2010-2050.....	139
4.6.3.2.1	Calibration	139
4.6.3.2.2	Projections et tassements à venir	140
4.6.4	Stratégies d'adaptation envisagées	143
4.7	Kangirsuk.....	145
4.7.1	Observations générales et synthèse des défauts	145
4.7.2	Répartition spatiale, épaisseurs et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface .	147
4.7.3	Conditions thermiques du pergélisol	153
4.7.3.1	Évolution récente : Période 1990-2010	153
4.7.3.2	Évolution future : Période 2010-2050.....	154
4.7.3.2.1	Calibration	154
4.7.3.2.2	Projections et tassements à venir	155
4.7.4	Stratégies d'adaptation envisagées	157
4.8	Tasiujaq	160
4.8.1	Observations générales et Synthèse des défauts	160
4.8.2	Répartition spatiale, épaisseurs et propriétés géotechniques des unités géologiques de surface .	162
4.8.1	Conditions thermiques du pergélisol	167
4.8.1.1	Évolution récente : Période 1990-2010	167
4.8.1.1.1	Calibration	171
4.8.1.1.2	Projections et tassements à venir	172
4.8.2	Stratégies d'adaptation envisagées	174
5	Synthèse et conclusion	177
	Glossaire.....	181
	Références	182
	Annexes:.....	185

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : A) Localisation des aéroports et route d'accès visés par la présente étude. B) Carte du pergélisol au Québec nordique (Allard et Seguin, 1987). C) Calendrier des opérations lors des campagnes de forage de 2008 et 2009.	4
Figure 2 : A) Foreuse et accessoires requis pour le prélèvement d'échantillons de sols. B) Système de refroidissement des boues de forage.	5
Figure 3 : Ordre des analyses en laboratoire selon l'état de l'échantillon.....	8
Figure 4 : Abaque de plasticité de Casagrande (Tirée de Holtz et Kovacs, 1991)	10
Figure 5 : A) Échantillon SAL_F2_461_475 (TG) taillé en vue d'un essai de fluage. B) Carotte posée sur la base de la cellule triaxiale. C) Tête de chargement installée sur l'échantillon. D) Échantillon recouvert d'une membrane de latex et réseau de liquide réfrigérant (en vert) qui entoure la carotte de sol. E) Couche isolante mise en place pour réduire les variations thermiques. F) Dessus et base de la cellule triaxiale. G) Cellule triaxiale installée et branchée dans la chambre froide. H) Presse hydraulique UTM-100, chambre froide et système d'acquisition.....	12
Figure 6 : A) Échantillon SAL_F6_290_304 (SA) posé sur la base de la cellule. B) Piston reposant sur la pierre poreuse et l'échantillon. C) Montage de l'équipement dans une chambre à température contrôlée (+2 °C). D) Échantillon SAL_F2_343_356 après consolidation au dégel.	14
Figure 7 : A) Carotte gelée extraite sur le terrain. B) Scanneur tomographique. C) Visualisation de la cryostructure avec le logiciel Osiris™ à partir d'une image en format DICOM. Reconstruction en trois dimensions des éléments discrétisés. On observe de gauche à droite les éléments suivants : l'air, la glace et le sédiment.	15
Figure 8 : Relevés des déficiences pour l'aéroport de Kangirsuk (MTQ, 2010).....	16
Figure 9 : Profil longitudinal (A) et profil transversal au chaînage 5+300 (B) de la piste d'atterrissage de Tasiujaq extraits à partir des plans originaux.....	17
Figure 10 : Couverture des données LIDAR acquises par le MTQ, le MAMROT et le MRNF pour le village d'Akulivik (Polygone rouge). Couverture utilisée dans le cadre de la présente étude (Polygone jaune).....	18
Figure 11 : 1) Périmètre de la zone préservée du jeu de données LIDAR pour l'aéroport d'Akulivik. Distribution des points de mesures brutes (2a), de surfaces (2b) et corrigés (2c) et leurs modèles numériques d'élévation respectifs générés par la méthode d'interpolation des voisins naturels (<i>Natural Neighbors</i>).	18
Figure 12 : A) Orthophoto de 2002-03 de la piste d'atterrissage d'Inukjuak utilisée initialement pour cartographier les unités géologiques de surface et conditions de pergélisol. B) Cartes des unités géologiques de surface produites dans une étude antérieure (Tirée de Allard <i>et al.</i> , 2007). C) Photographies aériennes de 1974 utilisées pour cartographier les dépôts meubles sous la piste d'Inukjuak. Carte des dépôts de surface améliorée du secteur de l'aéroport à Inukjuak produite dans le cadre de la présente étude.....	19
Figure 13 : A) Levé de géoradar à 50 MHz effectué sur la piste de Kangirsuk (Allard, Fortier et al. 2007). B) Réinterprétation du levé géoradar d'après les informations issues des nouveaux forages (les contacts stratigraphiques sont représentés par les lignes rouges). C) Coupe géologique synthèse avec les différentes unités géologiques et leurs contacts stratigraphiques approximatifs.....	21
Figure 14: Les six sorties du MRCC des températures de l'air entre 1961 et 2007 pour la région de Tasiujaq.....	24
Figure 15: A) Comparaison entre les données NARR et les sorties MRCC AEV et AHA pour la période 1979 à 2007, Salluit, Nunavik. Comparaison entre les températures moyennes annuelles à Inukjuak observées et provenant du NARR <i>versus</i> celles des séries MRCC AHA et AEV non corrigées (B) et corrigées (C).	25
Figure 16: A) Température moyenne annuelle de surface versus l'épaisseur de neige en marge de la piste d'atterrissage de Tasiujaq (Tirée de Allard <i>et al.</i> , 2007). B) Relation logarithmique entre la valeur du facteur-n et l'épaisseur de neige d'après les mesures de Allard <i>et al.</i> , (2007).	28
Figure 17 : A) Section type d'une piste d'atterrissage avec les différentes conditions de surface qui sont considérées dans les exercices de simulations numériques. B) L'influence des conditions de surface sur les températures superficielle du sol. C) L'influence de l'épaisseur de neige sur les températures de surface.	30

Figure 18: A) et B) Tassements différentiels le long de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq liés à la dégradation du pergélisol, été 2008. C) Ponceau déformé suite aux tassements. D) Accumulation de neige de chaque côté du remblai en date du 30 avril 2007 (Tirée de Fortier et Bolduc, 2008).	33
Figure 19: Tassement au dégel de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq pour la période de 1991 à 2006, 2008 et 2009 (tirée de Fortier et <i>al.</i> , 2011).	34
Figure 20 : Carte des dépôts de surface d'Umiujaq.	36
Figure 21 : Modèle de résistivité électrique (A), levé de géoradar de 100 MHz (B) et unités géologiques de surfaces interprétés (C) pour le terrain naturel entre les chaînages 2+300 et 2+600 de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq (Tirée de Fortier et Bolduc, 2008). Réinterprétation du même levé géoradar par Fortier et <i>al.</i> (2011).	37
Figure 22 : Coupe géologique en bordure de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq produite suite à l'intégration des informations stratigraphiques du forage UMI-F1 et la réinterprétation des levés géophysiques provenant de Fortier et Bolduc (2008).	38
Figure 23: Modèle numérique bidimensionnel pour une section transversale de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq montrant la stratigraphie et les différentes conditions de surface utilisées dans les exercices de simulations numériques. Le chiffre entre les flèches réfère aux zones dont les conditions de surface sont présentées au tableau 8.	42
Figure 24: Conditions géothermiques simulées à la fin de la saison de dégel (1 ^{er} octobre) : A) pour une TMAA de -4,8 °C et une couverture de neige mince et uniforme ; B) pour les mêmes conditions climatiques et d'enneigement qu'en (A), mais avec la présence d'un remblai ; C) pour une TMAA de -4,8 °C et une accumulation importante de neige des deux côtés du remblai; D) pour les mêmes conditions d'enneigement qu'en (C), mais en équilibre avec les conditions climatiques de 2008 (TMAA de -2,5°C). E) Migration du front de dégel (isotherme 0 °C) pour la période 2010 à 2050 selon les TMAA projetées par la sortie climatique AHA du MRCC. Les conditions d'enneigement sont les mêmes qu'en (C) et les températures du sol de départ sont celles simulées en (D).	45
Figure 25: A) et B) Accumulations d'eau à l'intérieur du fossé de drainage sur le côté nord-ouest de la piste d'Inukjuak. C) Fissures de tension longitudinales sur la bordure sud de la piste d'Inukjuak juin 2005 (Tirée de Allard et <i>al.</i> , 2007).	47
Figure 26 : A) Photographie aérienne de la piste d'Inukjuak prise à la troisième semaine de juillet 2006 (Tirée de Allard et <i>al.</i> , 2007). B) Affleurement rocheux exposé en marge de piste au chaînage 5+810 côté nord. ..	50
Figure 27 : Planche synthèse de la piste d'Inukjuak.	51
Figure 28 : Fente de gel dans une terrasse sableuse au sud de la piste (Tirée de Allard et <i>al.</i> , 2007).	53
Figure 29: Sédiments littoraux et pré-littoraux composés de sable avec un peu de silt (SM) échantillonné au forage INU_F1 entre 1,80 et 2,1 m (A), 3 et 3,3 m (B) et 3,6 et 3,8 m (C) de profondeur.	53
Figure 30 : A) Secteur mal drainé à l'extrémité sud-ouest de la piste d'Inukjuak où des buttes de pergélisol ont été identifiées. B) Même secteur photographié 3 ans plus tôt (Allard et <i>al.</i> , 2007).	55
Figure 31 : Sondages INU_T4 (A), INU_T6 (B) et INU_T7 (C) effectués à proximité de la piste d'Inukjuak (Figure 27A). B). D) Coquilles marines trouvée à l'intérieur des sédiments intertidaux (Mi) excavés au sondage INU_T7. E) Sédiments intertidaux composés de silts inorganiques et sables très fins non plastiques (USCS : ML) prélevés au forage INU_F4 entre 2,6 et 3 m (E) et 4 et 4,4 m (F) de profondeur.	56
Figure 32 : Variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur aux forages INU_F2, INU_F3 et INU_F4.	57
Figure 33 : Unité sableuse avec un peu de silt (USCS : SM) identifiée en tant que sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique. Échantillons prélevés au forage INU_F2 entre 9,15 et 9,75 m (A), INU_F3 entre 4,8 et 5 m (B) et INU_F4 entre 6,8 et 7 m (C).	57
Figure 34 : Variation journalière de la température dans le sol à l'emplacement du forage INU-F2 en fonction de la profondeur et du temps pour la période du 7 octobre 2008 au 12 octobre 2009, aéroport d'Inukjuak. ..	58
Figure 35: Températures du sol mesurées automatiquement par le chapelet de thermistances mis en place dans le puits de forage INU_F2 (A). Températures du sol mesurées manuellement à différentes profondeurs à l'emplacement des puits de forages INU_F3 (B) et INU_F5 (C) au mois d'octobre 2008.	59

Figure 36: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport d'Inukjuak, chaînage 4+989 m, vis-à-vis le forage INU-F2.....	62
Figure 37: Profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport d'Inukjuak, chaînage 4+989 m (INU-F2).	63
Figure 38: Projections de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport d'Inukjuak, chaînage 5+704 m, vis-à-vis le forage INU-F3.	64
Figure 39: Profils de température projetés pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport d'Inukjuak, chaînage 5+704 m (INU-F3).	65
Figure 40: Évolution potentielle de la couche de sol dégelé en pied de remblai et sous la piste d'Inukjuak entre 2010 et 2050 en fonction de la sortie AEV des températures MRCC.	66
Figure 41 : Plan d'adaptation pour la piste d'Inukjuak.	68
Figure 42 : Dépression majeure relevée en bordure de piste sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m.	70
Figure 43 : Écoulement d'eau sous la piste vis-à-vis le centre de la dépression majeure côté est.....	70
Figure 44: Accumulation de neige importante en bordure de piste sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m.	70
Figure 45: Planche synthèse de la piste de Puvirnituk.....	72
Figure 46: A) Vallée oblique comblée de sédiments littoraux et pré-littoraux sur sédiments marins d'eau profonde. B) Vue de la section aval de la vallée avec l'emplacement du forage PUV_FOR1A réalisé dans une étude antérieure. C) Lentilles de glace millimétriques observées au front de dégel lors d'une excavation réalisée à l'été 2008 à proximité du forage PUV_FOR1A. D) Dépôt de sables silteux beige (USCS : SM) avec lentilles de glace et E) matériel silto-argileux grisâtre (USCS : ML) prélevés respectivement entre 0,69 et 0,88 m et 1,22 et 1,45 m de profondeur au forage PUV_FOR1A (Tirée de Allard <i>et al.</i> , 2007).	75
Figure 47: Échantillons de silt et d'argile grisâtre très sensible prélevés entre 3,6 et 4,2 m au forage PUV_F1 (A) et entre 3 et 3,6 m au forage PUV_F2 (B). Échantillons de silt et argile à consistance molle avec quelques cristaux de glace et lentilles millimétriques très espacées prélevés entre 6 et 6,6 m (C) et 9 et 9,5 m (D) de profondeur au forage PUV_F2. Échantillons de silt et d'argile avec une structure en polyèdre prélevés entre 2,4 et 3 m (E) et espaces possiblement occupés par des lentilles de glace fondues entre 3,6 et 4,2 m (F) au forage PUV_F5.	76
Figure 48: A) ostioles à bourrelets dans le till. B) Ostioles silto-sableuse avec fragments de coquillages en surface. Diamicton grisâtre prélevé entre 11,50 et 11,80 m de profondeur à PUV_F2 (C) et entre 3 et 3,31 m de profondeur à PUV_F3 (D).	77
Figure 49 : Station automatisée en bordure de la piste sur le versant est du remblai.	79
Figure 50 : Températures du sol mesurées manuellement à différentes profondeurs dans les puits de forages PUV_F1 (A) et PUV_F5 (B). C) Températures du sol mesurées automatiquement par le chapelet de thermistances mis en place dans le puits de forage PUV_F2. D) Contours de la vitesse des ondes de cisaillements normalisées pour 100 kPa qui déterminent la position du front de dégel (ligne pointillée rouge) le long de la ligne MASW-01 (modifiée de Karray <i>et al.</i> , 2009).	80
Figure 51: Plan d'adaptation proposé pour la piste de Puvirnituk.	82
Figure 52 : Accumulations d'eau dans les dépressions thermokarstiques localisées entre les chaînages : 5+060 et 5+100 m (A), 5+980 m et 6+060 m (B) et 5+700 m et 5+760 m (C). La dépression linéaire (C) correspond à la fonte partielle d'un coin de glace.	83
Figure 53: Vue oblique de la piste d'Akulvik et les deux unités géologiques de surface principales. La ligne pointillée jaune indique la limite approximative où le till plonge sous la plaine de sable marin.	84
Figure 54: Planche synthèse de la piste d'Akulvik.....	85
Figure 55 : A) Sédiments littoraux et pré-littoraux (Mb) prélevé au forage AKU_F2 entre 2,4 et 3 m de profondeur ; sable uniforme, bien trié, avec trace de silt (USCS : SP-SM). B) Contact stratigraphique observé à 1,95 m de profondeur (AKU_F4) entre les sédiments littoraux et pré-littoraux et les sédiments marins d'eau profonde. C) Sédiments marins d'eau profonde (Ma) prélevés au forage AKU_F4 entre 3,87 et 4,2 m ;	

mélange de silt et de sable très fin peu plastique (USCS : ML-CL) dont la structure suggère la présence de glace de ségrégation. D) Fines lentilles de glace de ségrégation identifiées dans les sédiments marins d'eau profonde pergélisolés à partir d'une image tomodynamométrique. E) Sédiments marins d'eau profonde riches en glace prélevés en 2010 à environ 300 m au nord du forage AKU_F4. 88

Figure 56: Excavation d'un coin de glace en bordure de la piste d'atterrissage d'Akulivik à l'été 1991.	89
Figure 57: A) Ostioles à bourrelets dans le till qui traversent la mince couche de sédiments littoraux et pré-littoraux. B) Diamicton grisâtre (till) avec lentilles de glace millimétriques. Échantillons de till gelé prélevés entre : C) 4,16 m et 4,60 m (forage AKU_F1), D) 5,80 et 6 m (forage AKU_F2), E) 8,70 et 8,93 m (forage AKU_F3) et 4,86 et 5,10 m (forage AKU_F4). L'encadré rouge en (C) indique la section de la carotte qui a été soumise à un essai de consolidation au dégel.	91
Figure 58 : A) Station automatisée à l'emplacement du puits de forage AKU_F4. B) Station dans le milieu naturel à l'extrémité est-sud-est de la piste d'Akulivik.	92
Figure 59: Température du sol journalière dans le till (HT-162) (A) et dans la piste (HT-183) (B) en fonction de la profondeur et du temps pour la période de juin 2004 à octobre 2010.	95
Figure 60 : Température du sol journalière au câble AKU_F4 (A) et AKU_F1 (B) en fonction de la profondeur et du temps pour la période de d'octobre 2008 à octobre 2010. C) Températures du sol mesurées au câble AKU_F1. Températures du sol mesurées manuellement à différentes profondeurs à l'emplacement des puits de forages AKU_F2 (D) et AKU_F3 (E).	96
Figure 61: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport d'Akulivik, chaînage 5+115 m, vis-à-vis le forage AKU_F4.	100
Figure 62: Profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport d'Akulivik, chaînage 5+115 m (AKU_F4).....	101
Figure 63: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport d'Akulivik, chaînage 5+960 m, vis-à-vis le câble HT-183.	102
Figure 64: Profils des températures minimums, maximums et moyennes projetés pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport d'Akulivik, chaînage 5+960 m.....	103
Figure 65: Plan d'adaptation proposé pour la piste d'Akulivik.	105
Figure 66 : A) Dépression importante sur le côté est de la piste au niveau des deux ponceaux superposés situés au chaînage 2+030 m. Fissures (B) et effondrement (C) dans la zone affectée par la dépression. D) Accumulations d'eau côté est, chaînage 2+510 m.....	107
Figure 67 : A) Déformation de la chaussée survenue dans un secteur sur till entre les chaînages 2+200 m et 3+200 m. B) Fissures longitudinales dans le revêtement entre les chaînages 1+550 m et 1+580 m. C) Tuyau de pvc incliné et bourrelet en pied de remblai côté est qui suggèrent un mouvement latéral lent du talus de remblai. D) Mares en pied de remblai côté ouest. E) Rupture du mollisol en bordure de la route d'accès au chaînage 0+960 m côté ouest.	108
Figure 68 : Tassements localisés le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. Ces tassements se retrouvent préférentiellement au passage des chenaux humides sous l'infrastructure. Les chenaux sont facilement identifiables sur l'image satellite par leurs teintes verdâtres (image de gauche).	109
Figure 69 : Planche synthèse de la piste de Salluit.....	110
Figure 70: Coins de glace à l'intérieur du till exposés lors d'une excavation.....	114
Figure 71 : A) Échantillon de till avec lentilles de glace millimétriques stratifiées prélevé au forage SAL_F1 entre 2,40 m et 2,70 m de profondeur. Au forage SAL_F3, B) till riche en glace avec structure lenticulaire entre 1,97 et 2,25 m de profondeur, C) couche riche en glace rencontrée entre 2,25 et 2,51 m de profondeur et D) till riche en glace prélevé juste avant d'atteindre le socle rocheux à 4,20 m de profondeur. Au forage SAL_F5, E) plafond du pergélisol riche en glace entre 1,92 m à 2,12 m et F) dépôt très riche en glace entre 2,7 et 3 m de profondeur avec fragments de till suspendus.....	114
Figure 72: A) Courbe de fluage (déformation en fonction du temps) obtenue lors d'un essai réalisé sur un échantillon de till gelé (SAL_F2_244-257). Encadré jaune : Phases de fluage en fonction du temps (Ladanyi, 1972). B) Courbe de fluage pour quatre paliers de température (-4, -3, -2 et -1°C) pour SAL_F2_461_475 (TG) à 200 kPa. C) Abaque du taux de déformation au fluage pour le till de Salluit. ...	115

Figure 73 : Au forage SAL_F6 ; A) couche importante de glace située entre 0,76 m et 0,9 m de profondeur et identifiée comme étant le plafond actuel du pergélisol ; section riche en glace entre 1,20 et 1,54 m (B), entre 3,85 et 4,27 m (C) et entre 11,91 et 12,38 m de profondeur (D).	118
Figure 74 : A) Courbes de fluage pour SAL_F6_233_247 (SA) à 200 kPa et -4°C. B) Abaque simplifié du taux de déformation au fluage du silt argileux de Salluit.	119
Figure 75 : Températures du sol mesurées manuellement à différentes profondeurs à l'emplacement des puits de forages SAL_F1, SAL_F2, SAL_F3, SAL_F4 et SAL_F5. Températures du sol mesurées automatiquement par le câble HT-155.	121
Figure 76: Variation de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel en terrain naturel (HT-155 et HT-160) et dans le remblai de la piste (HT-172) pour la période 1989-2008, aéroport de Salluit.....	122
Figure 77: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel (A) et profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le centre-piste selon les scénarios AEV (B) et AHA (C), aéroport de Salluit, chaînage 2+645 m (HT-172).	125
Figure 78: Plan d'adaptation proposé pour la piste de Salluit.	127
Figure 79 : Problèmes de drainage des eaux de fonte printanières le long de la piste de Quaqtq tels qu'observés en juin 2009.....	129
Figure 80 : Dépression entre les chaînages 1+290 et 1+310 telle qu'observée au mois de septembre 2010. A) Vue vers l'est. B) Vue vers l'ouest. C) Résurgence d'eau en pied de remblai vis-à-vis le câble HT-178 observée au mois de juin 2009.	130
Figure 81 : Planche synthèse de la piste de Quaqtq.	133
Figure 82 : Équipement de forage en pied de remblai à l'emplacement des forages QUA_F1 (A) et QUA_F2 (B)....	135
Figure 83 : Échantillons gelés prélevés au forage QUA-F2. A) Sable moyen à grossier brunâtre avec traces de silt (alluvions (AP)) prélevé entre 0,52 et 0,85 m de profondeur. Matériel hétérométrique non trié grisâtre (Till (T)) avec glace interstitielle prélevé entre 1,43 et 1,90 m (B) et entre 1,90 et 2,22 m (C) de profondeur.	135
Figure 84 : Variations des températures dans le sol en fonction du temps et de la profondeur entre janvier et octobre pour l'année 2010, aéroport de Quaqtq, Nunavik.	138
Figure 85: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport de Quaqtq, chaînage 1+290 m, vis-à-vis le câble HT-178.....	141
Figure 86: Profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport de Quaqtq, chaînage 1+290 m (QUA-F1 et HT-178).	142
Figure 87: Plan d'adaptation proposé pour la piste de Quaqtq.	144
Figure 88: Figure de synthèse sur le processus de perturbation du pergélisol provoquée par le nivellement du terrain lors de la construction de la piste de Kangirsuk (modifiée de Allard <i>et al.</i> , 2007). Terrain avant (1) et après nivellement (2). Remblai de piste après construction (3) et suite au réajustement du régime thermique du pergélisol et consolidation du matériel dégelé (4).....	145
Figure 89: A) Historique des tassements cumulatifs dans la section en déblai de la piste d'atterrissage de Kangirsuk (Beulac (2005) ; Tremblay et Doré (1988)). B) Mesures de nivellements réalisées par le personnel du MTQ, aéroport de Kangirsuk (MTQ, 2010). C) Problème de drainage et signes de dégradation tels qu'observés en juin 2009 le long de piste de Kangirsuk.	146
Figure 90 : Planche synthèse de la piste de Kangirsuk.....	149
Figure 91: A) Excavation jusqu'au till réalisé en 2005 en bordure de la piste de Kangirsuk à travers les sédiments littoraux et pré-littoraux (Mb) (Allard <i>et al.</i> , 2007). Échantillons de sables et graviers prélevés entre : B) 0,66 et 1,16 m (KANGIR_F1), C) 1,20 et 1,57 m (KANGIR_F2), D) 0,65 et 1,15 m (KANFIR_F3) et E) 0,60 et 1,10 m (KANGIR_F4).....	151
Figure 92: Stratigraphie du remblai et du terrain naturel sus-jacent tel qu'observé lors de l'excavation réalisé en 2005 par Allard <i>et al.</i> , (2007).	151

Figure 93 : Échantillons de till prélevés dans la couche active entre : A) 2,20 et 2,95 m de profondeur au forage KANGIR_F1, B) 1,65 et 2,05 m et C) 2,05 et 2,40 m de profondeur au forage KANGIR_F2. Échantillons de till gelé avec lentilles de glace plurimillimétriques prélevés au forage KANGIR_F3 entre : D) 3,10 et 3,60 m, E) 3,65 et 4,2 m et F) 6,58 et 7,10 m de profondeur.....	152
Figure 94: Variation de l'épaisseur de la couche active au centre-piste (KANGIR_HT-1) et valeurs de tassement mesurées pour la période 2007 à 2010, piste d'atterrissage de Kangirsuk.	153
Figure 95: Température du sol journalière en fonction de la profondeur et du temps (juin 2005 à octobre 2010), câble KANGIR_HT-1. La fluctuation interannuelle de la profondeur maximale atteinte par le dégel est mise en évidence par la ligne pointillée rouge.....	154
Figure 96: A) Projection de la variation de la profondeur du front de dégel au centre-piste pour la période 2011-2050, aéroport de Kangirsuk, chaînage 0+895 m (câble à thermistances KANGIR_HT-1). Profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le centre-piste selon les scénarios AEV (B) et AHA (C), aéroport de Kangirsuk, chaînage 0+895 m (KANGIR_HT-1).	156
Figure 97: Plan d'adaptation proposé pour la piste de Kangirsuk.	159
Figure 98: Importante dépression (A) et fissures longitudinales (B) telles qu'observées en 2004 sur le côté est de la piste entre les chaînages 5+100 et 5+140 m (Allard et <i>al.</i> , 2007). C) Planches d'essais de diverses méthodes de protection contre la dégradation du pergélisol. D) Accumulation d'eau au pied du remblai côté est au mois de juillet 2009. E) Géométrie de la pente des remblais côté ouest après les travaux d'adoucissement. F) Rupture de l'angle de la pente côté est telle qu'observée en 2009.	161
Figure 99 : Planche synthèse de la piste de Tasiujaq.	164
Figure 100 : A) Unité 2 : sédiments intertidaux diamictiques (Mi) grisâtres composés de sable et silt avec trace de gravier échantillonnés au forage TAS_F1 entre 3 et 3,54 m de profondeur. B) Sédiments intertidaux diamictiques (Mi) avec de nombreuses lentilles de glace millimétriques échantillonnés au forage TAS_F2 entre 2,48 et 3 m de profondeur. C) Transition graduelle entre les sédiments intertidaux diamictiques (unité 2) et le dépôt de sable grossier et de gravier avec fragments de coquillages (Unité 3). D) Unité 3 : dépôt de sable et gravier grossier (Mb) avec fragments de coquillages et glace interstitielle. E) Unité 4 : sédiments fins d'eau profonde grisâtres et massifs (MGa) avec réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées par des lentilles de glace centimétriques horizontales et subverticales. F) Unité 5 : sable fin à moyen silteux grisâtre (MG) très compact entrecoupé de quelques couches minces de silt argileux.	166
Figure 101: A) Tentative de forage lors de l'instrumentation de la section de référence (tirée de Lemelin et <i>al.</i> , 2008). B) Accumulation d'eau au pied de la section de référence au mois de juillet 2009. Température du sol journalière en fonction de la profondeur et du temps (septembre 2007 à octobre 2010) pour C) la section de référence et D) le centre-piste (câble HT-181). Le contact entre le remblai et le terrain naturel est illustré par la ligne pointillée.	170
Figure 102: Couverture de neige à l'extrémité nord de la piste côté ouest (A) et à l'extrémité sud de la piste côté ouest (B). (Tirée de Savard, 2006) (Photos : Frédéric Vinet, 2005).	171
Figure 103: Projections de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au c entre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport de Tasiujaq, chaînage 5+300 m.	173
Figure 104 : Plan d'adaptation proposé pour la piste de Tasiujaq.....	176
Figure 105: A) Situation initiale après la construction des pistes. B) Situation actuelle pour la plupart des pistes à l'étude aux endroits où le remblai favorise l'accumulation de neige ou entrave le drainage naturel.	179
Figure 106: Cellule triaxiale utilisée pour les essais de fluage.	194
Figure 107: Cellule oedométrique utilisée pour les essais de consolidation au dégel.....	195

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composantes des infrastructures aéroportuaires du MTQ à l'étude.....	3
Tableau 2: Nombre de forages réalisés, de mètres parcourus et d'échantillons gelés récupérés par aéroport visité..	5
Tableau 3: Description sommaire des câbles à thermistances aux abords et dans les pistes d'atterrissage du MTQ au Nunavik.	7
Tableau 4 : Définitions des composantes du sol, de leurs limites granulométriques et des symboles employés dans le système USCS (Tiré de Holtz et Kovacs, 1991).	9
Tableau 5 : Exemple de mesures de nivellements, aéroport de Kangirsuk, Nunavik (MTQ, 2010).	16
Tableau 6 : Changements de température de l'air projetés aux aéroports du MTQ pour l'horizon 2050.	24
Tableau 7: Valeurs de facteur-n en saison de gel et de dégel selon les conditions de surface (Tiré de Andersland et Ladanyi, 2004)	26
Tableau 8: Propriétés physiques programmées dans le modèle bidimensionnel de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq. Les paramètres climatiques et conditions de surface pour chaque exercice de simulation numérique y sont également présentés.	42
Tableau 9 : Épaisseurs de neige mesurées annuellement en marge de la piste d'Inukjuak par le personnel du MTQ.	49
Tableau 10 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage d'Inukjuak à l'été 2008.	50
Tableau 11: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol en marge et sous la piste d'Inukjuak.	60
Tableau 12 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Puvirnituk.	71
Tableau 13: Stratigraphie synthèse des dépôts meubles présents dans la vallée transversale (chaînages 6+125 m et 6+290 m). Réalisée à partir des observations aux forages PUV_F1, PUV_F2 et PUV_F5.....	71
Tableau 14 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage d'Akulivik à l'été 2008.	84
Tableau 15: Profondeurs maximales atteintes par le front de dégel au cours de la période 1992-2010 à l'emplacement des différents câbles à thermistances ou puits de forages, aéroport d'Akulivik.	94
Tableau 16: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol en pied de remblai et au centre-piste de la piste d'Akulivik.	97
Tableau 17: Épaisseurs de la couche active observées et simulées, piste d'Akulivik.	97
Tableau 18: Profondeurs maximales du dégel projetées d'ici 2050 pour le centre-piste et le pied du remblai selon les exercices de modélisations numériques alimentés par les sorties climatiques AEV et AHA.....	99
Tableau 19 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Salluit et sa route d'accès.....	109
Tableau 20 : Sommaire des résultats des essais au fluage pour le till glaciaire.....	113
Tableau 21 : Stratigraphie au forage SAL_F6.	116
Tableau 22: Sommaire des résultats des essais au fluage pour le silt argileux de Salluit.	119
Tableau 23: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol en marge et sous la piste de Salluit.	123
Tableau 24: Épaisseurs de la couche active observées et simulées, piste de Salluit.	123
Tableau 25 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Quaqtak au printemps 2009.....	135
Tableau 26 : Épaisseurs (en mètres) de la couche active mesurées pour différents câbles à thermistances installés dans la piste de Quaqtak et dans le terrain naturel.....	136
Tableau 27: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol en pied de remblai et au centre-piste de la piste de Quaqtak.....	139

Tableau 28: Épaisseurs de la couche active observées et simulées au centre-piste, aéroport de Quaqtaq.	139
Tableau 29: Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d’atterrissage de Kangirsuk au printemps 2009.	151
Tableau 30: Sommaire des résultats des essais de consolidation réalisés sur le till à l’aéroport de Kangirsuk.	152
Tableau 31: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol au centre-piste de la piste de Kangirsuk.	154
Tableau 32: Épaisseurs de la couche active observées (KANGIR_HT-1) et simulées au centre-piste, aéroport de Kangirsuk.	155
Tableau 33 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d’atterrissage de Tasiujaq.	166
Tableau 34: Sommaire des résultats des essais de consolidation réalisés à l’aéroport de Tasiujaq.	167
Tableau 35: Épaisseurs maximales de la couche active à l’emplacement des différents câbles à thermistances ou puits de forages au cours de la période 1992-2010, aéroport d’Akulivik.	169
Tableau 36: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol au centre-piste de la piste de Tasiujaq.	171
Tableau 37: Épaisseurs de la couche active observées (HT-181) et simulées au centre-piste, aéroport de Tasiujaq.	172
Tableau 38: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage UMI_F1.	196
Tableau 39: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés aux forages INU_F1, INU_F2 et INU_F3.	196
Tableau 40: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage INU_F4.	197
Tableau 41: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F1.	198
Tableau 42: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F2.	199
Tableau 43: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F3, PUV_F4 et PUV_F5.	200
Tableau 44: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage AKU_F1.	201
Tableau 45: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage AKU_F2.	202
Tableau 46: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage AKU_F3.	203
Tableau 47: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage AKU_F4.	204
Tableau 48: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage SAL_F1 et SAL_F2.	205
Tableau 49: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage SAL_F3, SAL_F4 et SAL_F5.	206
Tableau 50: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage SAL_F6.	207
Tableau 51: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage QUA_F1 et QUA_F2.	208
Tableau 52: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage KANGIR_F1 et KANGIR_F2.	208
Tableau 53: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage KANGIR_F3 et KANGIR_F4.	209

Tableau 54: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage TAS_F1.	209
Tableau 55: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage TAS_F2.	210
Tableau 56: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage TAS_F3 et TAS_F4.	211
Tableau 57: Données de l'essai de consolidation au dégel réalisé sur l'échantillon AKU_F1_431_442.	212
Tableau 58: Données de l'essai de consolidation réalisé sur SAL_F2_328_338.	213
Tableau 59 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur SAL_F3_343_356.	214
Tableau 60 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur SAL_F6_290_304.	215
Tableau 61 :Données de l'essai de consolidation réalisé sur QUA_F2_178_190.....	216
Tableau 62 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur KANGIR_F2_188_199.....	217
Tableau 63: Données de l'essai de consolidation réalisé sur KANGIR_F2_265_280, KANGIR_F2_280_292 et KANGIR_F3_238_248.	218
Tableau 64: Données de l'essai de consolidation réalisé sur KANGIR_F3_250_265, KANGIR_F3_440_454 et KANGIR_F3_457_472.	219
Tableau 65: Données de l'essai de consolidation réalisé sur KANGIR_F3_675_690 et KANGIR_F3_690_705.	220
Tableau 66 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur TAS_F1_310_323.	221
Tableau 67 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur TAS_F3_321_333.	222
Tableau 68: Données de l'essai de consolidation réalisé sur TAS_F1_643_658, TAS_F2_252_261 et TAS_F2_522_533.....	223
Tableau 69: Données de l'essai de consolidation réalisé sur TAS_F2_1675_1690, TAS_F2_1697_1706 et TAS_F3_375_385.....	224

ACRONYMES ET SYMBOLES

- AHA – AEV : Projections issues du MRCC
- A2 : Scénario d'émission de gaz à effet de serre
 - Biais : Différence entre la moyenne climatique calculée par le MRCC et la moyenne climatique observée
 - CGCM3 : Canadien Global Climat Model version 3
 - CRU : Modèle de réanalyse climatique du *Climate Research Unit* (Grande-Bretagne)
 - DJG : Cumul des degrés jours de gel
 - DJD : Cumul des degrés jours de dégel
 - ECHAM5 : Modèle global du climat produit par l'institut Max Plank (Allemagne)
 - GES : Gaz à effet de serre
 - GCM : Modèle global du climat
 - G/D : Ratio des degrés jour de gel sur degrés jours de dégel
 - MAMROT : Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire
 - MRC : Modèle régional du climat
 - MRCC : Modèle régional canadien du climat
 - MRCC_{corr} : Températures quotidiennes d'une série MRCC corrigées
 - MTQ : Ministère des Transports du Québec
 - mW : Milliwatts
 - NARR : Modèle de réanalyse climatique du *North American Regional Reanalysis*
 - q : flux thermique
 - TEMP/W : Logiciel de simulation de transfert de chaleur (suite GeoSlope International Ltd.)
 - TMAA : Température moyenne annuelle de l'air
 - TMJA : Température moyenne journalière de l'air
 - Scénario CC : Scénario de changement climatique
 - W : Watts
 - $x_{obs_{tma}}$: Température moyenne annuelle d'une série observée pour une période donnée
 - $x_{sim_{tma}}$: Température moyenne annuelle d'une série (ou un ensemble si il y a plus qu'une série) simulée pour une période donnée

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 déterminantes qui doivent assurément être maintenues opérationnelles.

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. Les objectifs de ces études étaient d'une part : d'acquérir le maximum de connaissance 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'aviation et des 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. Ces études précédentes ont mis en lumière le fait que l'étendue et les propriétés exactes des sols sensibles au dégel sous certaines pistes demeurent encore méconnues faute de sondages stratégiquement localisés.

Ce rapport final présente les résultats obtenus dans le cadre du projet intitulé « Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik ». Le présent rapport constitue, par l'intégration des données géotechniques, géomorphologiques, géophysiques et géothermiques déjà existantes (Lévesque *et al.*, 1990; Allard *et al.*, 1993; Beaulac et Doré, 2005; Beaulac, 2006; Savard, 2006; Allard *et al.*, 2007) ainsi que celles nouvellement acquises (Allard *et al.*, 2009; L'Hérault *et al.*, 2009; Sarrazin *et al.*, 2010), une mise à jour importante de l'état et des caractéristiques du pergélisol aux aéroports du Nunavik. Ce rapport fait la synthèse des paramètres de l'environnement physique dans lequel évoluent les infrastructures. Ces paramètres servent également à alimenter une série d'exercices de modélisation thermique qui tentent, selon les conditions actuelles de drainage et d'enneigement, d'estimer l'amplitude de la dégradation du pergélisol sous et en bordure des infrastructures aéroportuaires en réponse à différents scénarios de changements climatiques. Les résultats des exercices de modélisation, couplés aux résultats des essais de tassement et de consolidation au dégel réalisés en laboratoire, permettent de cibler les zones sensibles et d'y estimer l'ampleur des tassements à venir en raison du dégel du pergélisol.

Ultimement, la caractérisation géotechnique du pergélisol présent en périphérie et sous les infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik a permis de proposer, sous forme de plan d'adaptation intégré et optimisé, une série de mesures pour prévenir ou atténuer le dégel du pergélisol en vue de préserver et de prolonger l'intégrité des infrastructures dans un contexte de réchauffement du climat.

2 OBJECTIFS

Les objectifs du projet sont :

1. Caractériser les propriétés cryogéologiques et géotechniques du pergélisol aux endroits sondés et déterminer la profondeur du socle rocheux sous les dépôts meubles.
2. Intégrer les résultats des forages dans leur contexte topographique et géomorphologique en faisant usage des observations de terrain et des autres sources d'information disponibles lorsqu'il y en a, par exemple les anciens sondages existants dans des sites voisins ou comparables, les données thermiques régionales, les levés de géoradar et les autres données géophysiques existantes.
3. Caractériser et étudier plus en détail les tills gelés qui seront forés, en raison de l'abondance spatiale de ce matériau de surface au Nunavik et pour lequel il existe un manque de connaissances géotechniques.
4. Installer des plaques de tassements additionnelles à celles déjà existantes là où il y a des évidences d'affaissements pour documenter les tassements à venir. (Puvirnituk (1), Quaqtaq (1)).
5. Profiter des nouveaux forages pour installer des câbles à thermistances pour combler les manques identifiés dans le réseau de monitoring existant au Nunavik. Les sites à instrumenter sont :
 - a. dans un puits de forage à Tasiujaq pour obtenir la température de l'argile marine en dessous des dépôts grossiers au-delà de 12 m de profondeur (nécessaire en vue de prévoir à long terme la stabilité de la terrasse sur laquelle l'aéroport est construit).
 - b. dans un puits de forage en bordure de piste à Kangirsuk où aucune donnée de référence n'est disponible pour interpréter le régime thermique mesuré par le court câble existant dans la piste elle-même.
 - c. dans le secteur de l'aérogare de la piste d'Akulivik où des tassements sont observés.
 - d. Dans un puits de forage le long de la piste d'atterrissage d'Inukjuak où aucune donnée thermique du sol n'est disponible actuellement et où des dommages évidents sont visibles.
6. Simuler numériquement les effets de la fonte du pergélisol à partir des données géotechniques et de scénarios climatiques (profils de consolidation au dégel) pour les pistes étudiées afin de quantifier et prédire les impacts.
7. Élaborer avec les professionnels du MTQ une stratégie d'adaptation des infrastructures aéroportuaires du Nunavik au réchauffement climatique en tenant compte des besoins d'expansion des sites aéroportuaires afin d'assurer la pérennité des infrastructures et la sécurité des usagers.

3 MÉTHODOLOGIE :

3.1 TRAVAUX DE TERRAIN

3.1.1 SITES À L'ÉTUDE

Lors de la signature de la Convention de la Baie James et du Nord québécois en 1975, un programme de construction d'un réseau de 13 aéroports a été proposé afin de desservir les différentes communautés inuites. Le programme de construction des aéroports nordiques a débuté en 1984 avec la piste d'Ivujivik et fut terminé en 1992. Chaque aéroport comprenait une piste d'atterrissage en gravier, une route d'accès, un terminal et un garage. Au moment de la conception de ces ouvrages, le pergélisol était considéré comme un sol de fondation stable (Boucher et Grondin, 2010). Afin d'éviter le dégel du pergélisol, les pistes et routes d'accès ont été dimensionnées avec des remblais de pierres concassées épais directement placés sur la surface du sol naturel non perturbée. La plupart des pistes d'atterrissage du MTQ ont une longueur de 1090 m, une largeur de 44 m et sont recouvertes de gravier. Les routes d'accès qui assurent le lien entre l'infrastructure aéroportuaire et la communauté étaient initialement recouvertes de gravier, mais elles ont été pavées au cours des dernières années.

Sur les 13 infrastructures aéroportuaires du Nunavik qui appartiennent au Ministère des Transports du Québec (MTQ) et sont exploitées par l'Administration régionale Kativik (ARK), 8 ont été ciblées pour faire l'objet d'investigations géotechniques et caractérisation du pergélisol approfondies en vue d'élaborer des stratégies d'adaptation optimisées et personnalisées (Figure 1A). Les infrastructures aéroportuaires à l'étude, à l'exception de celles implantées dans les communautés d'Umiujaq et de Tasiujaq, sont toutes situées dans la zone de pergélisol continu (Figure 1B). Les composantes des infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik visées par la présente étude sont présentées au tableau 1.

Tableau 1: Composantes des infrastructures aéroportuaires du MTQ à l'étude.

Localités	Route d'accès	Piste d'atterrissage
Umiujaq	x	
Inukjuak		x
Puvirnituq		x
Akulivik		x
Salluit	x	x
Quaqtaq		x
Kangirsuk		x
Tasiujaq		x

3.1.2 CALENDRIER DES OPÉRATIONS DE FORAGE

Deux campagnes de forages ont été nécessaires pour la réalisation de l'investigation géotechnique aux aéroports nordiques commandée par MTQ. Les campagnes de forages se sont respectivement déroulées entre le 16 juillet et le 30 octobre 2008 et entre le 4 juin et le 16 juillet 2009. À l'intérieur de cette période, les huit aéroports visés par l'étude ont été visités par l'équipe technique du CEN/GRINCH. La répartition des jours de forages pour les campagnes de 2008 et 2009 est présentée à la figure 1C.

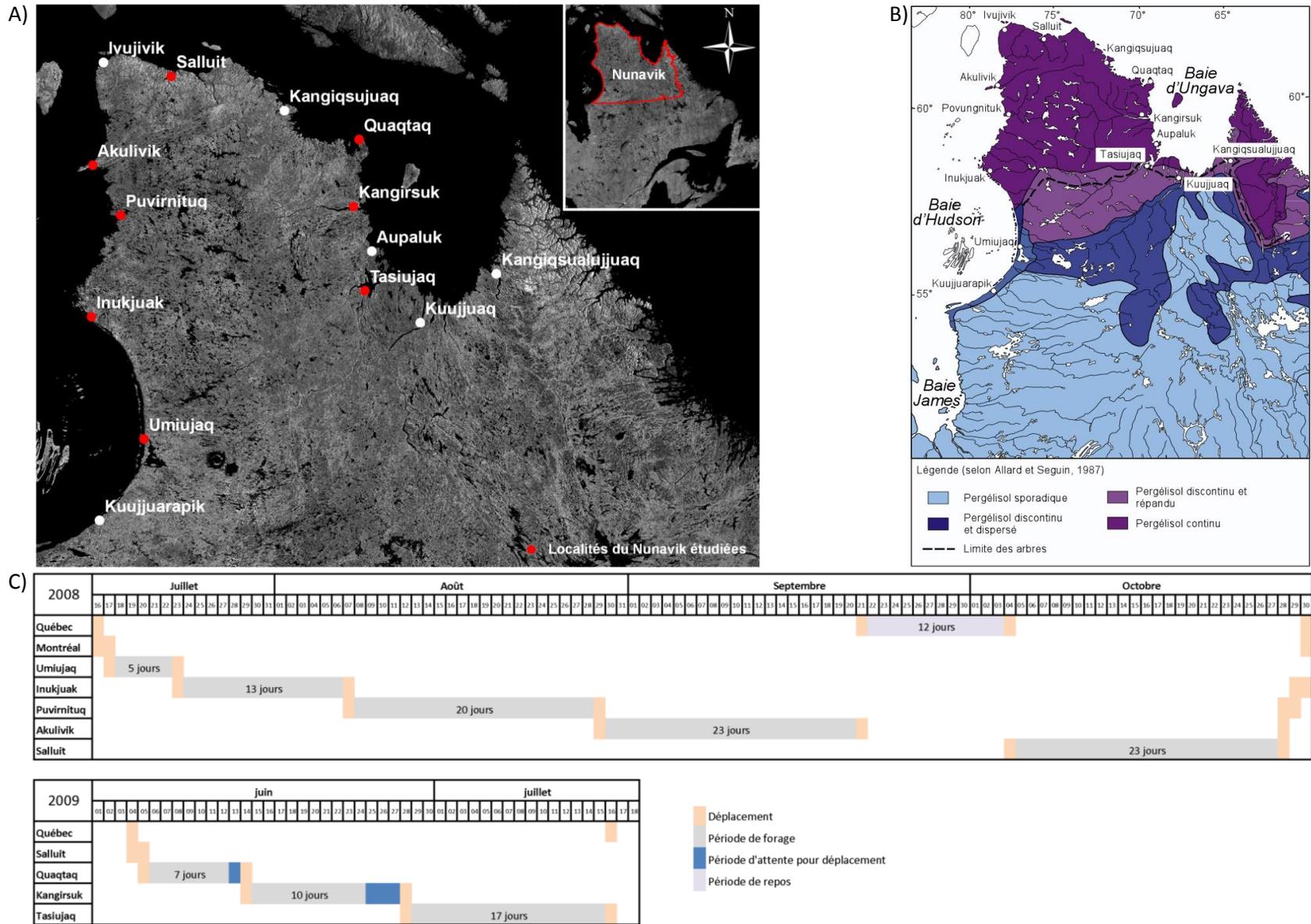


Figure 1 : A) Localisation des aéroports et route d'accès visés par la présente étude. B) Carte du pergélisol au Québec nordique (Allard et Seguin, 1987). C) Calendrier des opérations lors des campagnes de forage de 2008 et 2009.

3.1.3 MÉTHODES D'INVESTIGATIONS *IN SITU* UTILISÉES

3.1.3.1 FORAGES PROFONDS AVEC RÉCUPÉRATION

Les forages localisés le long des pistes d'atterrissage ont été réalisés par l'équipe technique du Groupe Qualitas-Techmat. Une foreuse rotative à diamants de marque Acker, modèle Ace, munie de tous les accessoires requis pour le prélèvement d'échantillons de sols jusqu'à une profondeur maximale de 25 mètres a été utilisée (Figure 2A). Le système de circulation des boues de forages est doté d'une unité de refroidissement (Figure 2B). En utilisant un fluide de forage composé d'eau et de glycol pour un ratio de 1 : 1, il a été possible d'abaisser la température du mélange sous le point de congélation. Le système de refroidissement, dans des conditions optimales, a été en mesure de refroidir le mélange jusqu'à des températures inférieures à -15 °C.



Figure 2 : A) Foreuse et accessoires requis pour le prélèvement d'échantillons de sols. B) Système de refroidissement des boues de forage.

Les forages ont été réalisés en été en suivant un protocole précis qui consiste en premier lieu à procéder à un échantillonnage par cuillère fendue jusqu'à l'atteinte du front de dégel. Par la suite, un train de tubage de calibre HW est avancé par rotation et par lavage dans la couche active jusqu'au niveau atteint par la cuillère fendue. Une fois le trou de forage nettoyé, l'échantillonnage est effectué à l'aide d'un carottier de calibre HQ (63,5 mm de diamètre intérieur). Afin de minimiser la perturbation thermique induite par la friction du carottier sur le sol gelé, la température du fluide de forage est abaissée sous le point de congélation à des températures qui varient entre -7 °C et -17 °C. Pour minimiser les pertes et les risques de dégradation de l'échantillon, des courses moyennes de 60 centimètres ont été favorisées de manière à optimiser l'échantillonnage. Une fois le socle rocheux atteint, la nature de celui-ci a été confirmée en continuant le forage sur une distance supérieure à un mètre afin de s'assurer qu'il ne s'agissait pas d'un bloc. Le tableau 2 présente, par aéroport, le nombre de forages réalisés, de mètres parcourus et d'échantillons gelés récupérés dans le cadre de ce projet.

Tableau 2: Nombre de forages réalisés, de mètres parcourus et d'échantillons gelés récupérés par aéroport visité.

Village	Nombre de forage	Mètres de forage	Échantillons gelés récupérés
Umiujaq	1	8,6	0
Inukjuak	6	44,6	0
Puvirnituq	5	49,5	0
Akulivik	4	50	5
Salluit	6	47,4	71
Quaqtaq	2	7,4	3
Kangirsuk	4	33,9	19
Tasiujaq	4	79,5	83

3.1.3.2 SONDAGES SUPERFICIELS

À titre d'analyses complémentaires, plusieurs sondages superficiels ont été réalisés à l'aide d'une pelle à proximité des forages profonds. L'objectif de ces sondages superficiels était d'évaluer la profondeur du front de dégel dans un milieu naturel non soumis aux perturbations thermiques induites par l'interaction de l'infrastructure avec les facteurs environnementaux locaux (accumulation de neige, apport de chaleur latente par l'eau).

3.1.3.3 COMPILATION DES DONNÉES DE FORAGES

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. L'information compilée au cours de l'étude a été mise à jour continuellement au fur et à mesure que les essais en laboratoire étaient complétés.

3.1.3.4 INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DES TEMPÉRATURES DU SOL

Afin d'offrir la possibilité de mesurer le régime thermique dans les trous de forages, des tuyaux en PVC d'un diamètre de 1 pouce et ¼ ont été insérés à l'intérieur de ceux-ci. Par la suite, afin d'assurer un contact thermique entre les parois du tuyau et le sol adjacent, les trous ont été remblayés avec le matériel extrait du forage afin de respecter le mieux possible les caractéristiques thermiques *in situ* initiales. Les tuyaux ont été remplis d'huile de silicone afin d'assurer le contact thermique entre les thermistances, le tuyau et le sol adjacent.

Certains de ces puits de forages ont été instrumentés avec un câble à thermistances, puis connecté à une station d'enregistrement automatisée ou simplement munit d'un connecteur pour effectuer des lectures ponctuelles. Une station automatisée consiste en boîtier d'aluminium fixé sur un pieu ou sur une structure pyramidale à base rectangulaire construite avec des tiges d'acier perforées. Ce boîtier contient le système d'acquisition automatique de donnée auquel sont branchés les différents instruments tels que les câbles à thermistances et le capteur de mesure de la température de l'air. Le capteur de mesure de la température de l'air est dans un abri qui permet l'aération du capteur et prévient le rayonnement solaire direct sur la thermistance.

Le système de charge de la station regroupe la batterie, le chargeur régulateur et le panneau solaire. La station est alimentée à l'aide d'une batterie de 12 V qui est maintenue chargée par le panneau solaire. Le régulateur de tension distribue la charge de façon uniforme et permet l'alimentation du système d'acquisition de données.

Le système d'acquisition automatique de données est l'élément central de la station. Ce module de contrôle est activé avec une programmation qui lui est propre et permet de mesurer le signal des différents capteurs et d'enregistrer celui-ci dans une mémoire pendant plusieurs mois. Le modèle utilisé couramment est le CR10X 2 M -55 pour la majorité des sites bien qu'une nouvelle génération (CR1000) a fait son apparition sur les sites instrumentés depuis 2008 (Inukjuak et Akulivik). Un module d'extension (AM 16/32) est utilisé sur certaines stations afin de multiplier le nombre de canaux pour mesurer les températures. Cet élément augmente la capacité de mesure des systèmes d'acquisition de données. Un ordinateur portable est nécessaire afin d'écrire un programme pour le système d'acquisition de données, de communiquer avec les stations, d'observer l'acquisition en direct et de procéder à la récupération des données à chaque visite. La programmation est propre à ces systèmes et diffère selon les équipements en fonction sur un site donné.

L'instrumentation utilisée dans le cadre de ce projet se compose de câbles à thermistances. Le modèle de thermistance utilisé est le YSI 44033. Chaque thermistance est soudée à un câble Belden 88761 qui est protégé à l'intérieur d'un tubage PVC. Une thermistance est utilisée afin de mesurer la température de l'air tandis que les autres ont été placées dans des puits de forage. La température de l'air est mesurée à 1,5 m au-dessus du niveau du sol.

À la demande du Ministère des Transports du Québec, des lectures manuelles ponctuelles de température du sol ont été prises à l'intérieur des trous de forage réalisés en bordure des pistes d'atterrissage d'Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik et Salluit. Les températures ont été mesurées à l'aide d'une thermistance fixée le long d'un ruban à mesurer puis d'un multimètre. Les mesures ont été prises du sommet vers la base du tuyau à tous les 50 cm, et ce, en descendant tranquillement la thermistance afin de ne pas provoquer de turbulence dans l'huile de silicone. Une fois la résistance électrique stabilisée (entre 5 et 10 minutes par mesure), la valeur a été notée, puis convertie en température.

Les câbles à thermistances qui ont servi à évaluer l'état du pergélisol ainsi qu'à la calibration des modèles numériques de transferts de chaleur pour les différents aéroports à l'étude sont présentés au tableau 3.

Tableau 3: Description sommaire des câbles à thermistances aux abords et dans les pistes d'atterrissage du MTQ au Nunavik.

ID forages	Localités	Coordonnées géographiques		Type d'environnement	Installation	Type de mesures
		Lat (°N)	Long (°W)			
INU-F2	Inukjuak	58,468853	78,084268	Pied de remblai	2008-10-07	En continu (horaire)
INU-F3	Inukjuak	58,473168	78,075357	Pied de remblai	2008-10-30	Ponctuelle unique
INU-F4	Inukjuak	58,474684	78,070808	Pied de remblai	2008-10-30	Ponctuelle unique
HT-177	Puvirnituk	60,054068	-77,288141	Remblai, accotement	1991-10-06	Sporadique/En continu (horaire)
HT-296	Puvirnituk	60,054093	-77,287931	Remblai, accotement	1991-10-06	Sporadique/En continu (horaire)
HT-297	Puvirnituk	60,05411	-77,287734	Remblai, accotement	1991-10-06	Sporadique/En continu (horaire)
HT-303	Puvirnituk	60,056693	-77,286964	Terrain naturel	2006-06-24	Sporadique
PUV-F1	Puvirnituk	60,054738	77,287763	Pied de remblai	2008-10-29	Ponctuelle unique
PUV-F2	Puvirnituk	60,054367	-77,287571	Pied de remblai	2007-10-16	Sporadique/En continu (horaire)
PUV-F5	Puvirnituk	60,05216	-77,29005	Pied de remblai	2008-10-29	Ponctuelle unique/En continu (horaire)
REF	Puvirnituk	60,053882	-77,285349	Terrain naturel	2005-07-02	En continu (horaire)
HT-162	Akulivik	60,82023	78,14136	Terrain naturel	1990-06-21	Sporadique/En continu (horaire)
HT-183	Akulivik	60,820589	78,14179	Remblai, centre ligne	1990-08-01	Sporadique/En continu (horaire)
HT-232	Akulivik	60,818999	78,149855	Terrain naturel	1990-04-01	Sporadique
AKU-F1	Akulivik	60,820474	78,140662	Pied de remblai	2008-10-13	En continu (horaire)
AKU-F2	Akulivik	60,820269	78,144244	Pied de remblai	2008-10-28	Ponctuelle unique
AKU-F3	Akulivik	60,821146	78,141604	Pied de remblai	2008-10-28	Ponctuelle unique
AKU-F4	Akulivik	60,817287	78,154939	Pied de remblai	2008-10-11	En continu (horaire)
SAL-F1	Salluit	62,182968	-75,666963	Pied de remblai	2008-10-26	Ponctuelle unique
SAL-F2	Salluit	62,180291	-75,666375	Pied de remblai	2008-10-26	Sporadique
SAL-F3	Salluit	62,176011	-75,667453	Pied de remblai	2008-10-26	Ponctuelle unique
SAL-F4	Salluit	62,177413	-75,667299	Pied de remblai	2008-10-26	Ponctuelle unique
SAL-F5	Salluit	62,181626	-75,668874	Terrain naturel	2008-10-26	Ponctuelle unique
HT-154	Salluit	62,180034	-75,668969	Terrain naturel	1987-07-17	Sporadique/En continu (horaire)
HT-155	Salluit	62,181649	-75,668551	Terrain naturel	1987-07-17	Sporadique
HT-160	Salluit	62,183733	-75,665269	Terrain naturel	1987-07-17	Sporadique
HT-172	Salluit	62,181597	-75,666841	Remblai, centre ligne	1987-07-16	Sporadique
HT-179	Salluit	62,183751	-75,665945	Remblai, accotement	1987-07-17	Sporadique
HT-156	Quaqtaq	61,044065	-69,613946	Terrain naturel	1988-06-26	En continu (horaire)
HT-158	Quaqtaq	61,046936	-69,619594	Terrain naturel	1988-06-26	Sporadique
HT-175	Quaqtaq	61,043283	-69,614551	Remblai, centre ligne	1988-06-26	En continu (horaire)
HT-178	Quaqtaq	61,046038	-69,617233	Remblai, centre ligne	1988-06-26	En continu (horaire)
Kangir-HT1	Kangirsuk	60,025110	69,999337	Remblai, centre ligne	2005-06-21	En continu (horaire)
Kangir-F2	Kangirsuk	60,025275	69,999378	Pied de remblai	2010-10-15	En continu (horaire)
HT-157	Tasiujaq	n.d	n.d	Terrain naturel	1988-09-29	Sporadique/En continu (horaire)
HT-180	Tasiujaq	58,671188	-69,951843	Remblai, centre ligne	1989-06-17	Sporadique/En continu (horaire)
HT-181	Tasiujaq	58,669536	-69,953904	Remblai, centre ligne	1989-06-18	Sporadique/En continu (horaire)
HT-304	Tasiujaq	58,669843	-69,951915	Terrain naturel	1993-08-27	Sporadique/En continu (horaire)

3.2 ESSAIS EN LABORATOIRE

Lors des forages, deux types d'échantillons ont été prélevés, soit des échantillons non gelés et des échantillons gelés. Selon l'état de l'échantillon, celui-ci a été soumis à différentes analyses en laboratoire suivant un ordre bien particulier de manière à extraire le plus d'information possible par échantillon. L'ordre de ces analyses en laboratoires est présenté à la Figure 3.

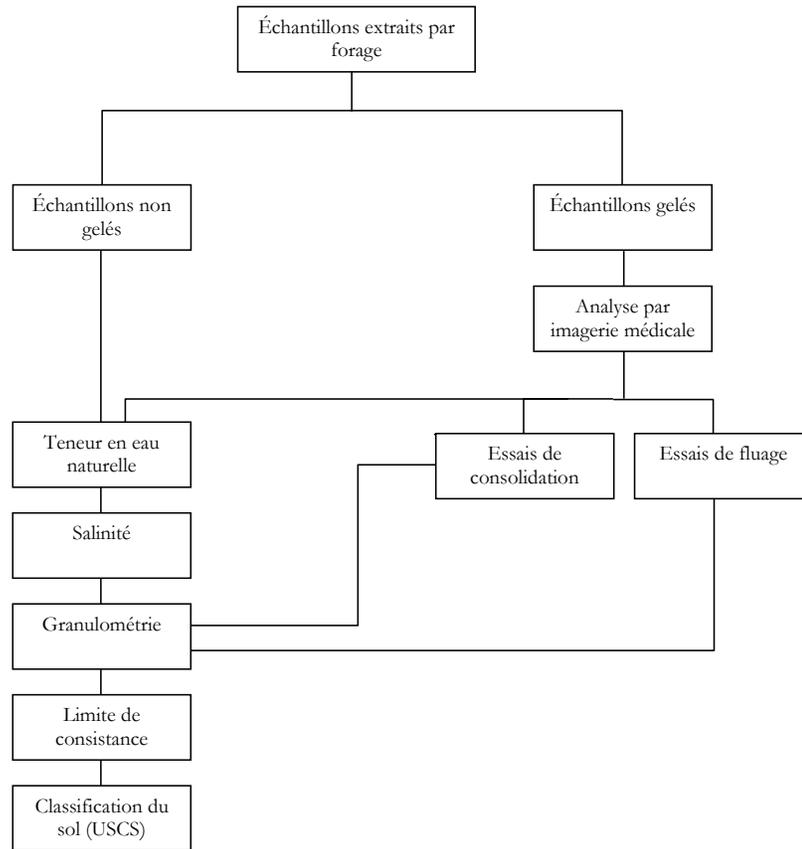


Figure 3 : Ordre des analyses en laboratoire selon l'état de l'échantillon

3.2.1 ANALYSES GÉOTECHNIQUES

Les teneurs en eau ont été mesurées systématiquement sur tous les échantillons, soit initialement non gelés soit après dégel, afin d'évaluer, par forage, la variation du contenu en eau du sol en fonction de la profondeur. Une fois la teneur en eau naturelle déterminée, chacun des échantillons a été placé dans un four à 550 °C pour une durée d'environ 15 minutes afin d'éliminer la matière organique. Ce traitement préalable aux analyses granulométriques a permis de déterminer par pesée la quantité de matière organique dans le sédiment. Par la suite, la distribution granulométrique a été déterminée par deux méthodes : soit la méthode des tamis pour la fraction supérieure à 400 microns (norme BNQ 1530-060/1978) et la méthode par diffraction laser pour la fraction inférieure à 400 microns.

Les résultats obtenus par les deux méthodes ont été compilés puis intégrés dans un graphique. La mise en relation du diamètre, rapporté en abscisse, avec le pourcentage cumulé, porté en ordonnée,

permet d'obtenir une courbe granulométrique qui illustre la distribution des particules du sol en fonction de leur diamètre.

Les limites d'Atterberg des échantillons de sol analysés telles que : 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-M-86. Déterminée à l'aide du cône suédois, la limite de liquidité correspond à la teneur en eau qui marque la limite arbitraire entre l'état liquide et l'état plastique d'un sol. La limite de plasticité, quant à elle, correspond à la teneur en eau qui marque la limite entre l'état plastique et l'état semi-solide d'un sol. À l'aide de ces deux paramètres, il a été possible de déterminer l'indice de plasticité (I_p) et l'indice de liquidité (I_L). L'indice de plasticité est la différence entre les limites de plasticité et de liquidité d'un échantillon de sol, tandis que l'indice de liquidité est la différence entre la teneur en eau naturelle (w) d'un sol et sa limite de plasticité, rapportée à son indice de plasticité. En fonction des limites d'Atterberg et des résultats granulométriques obtenus en laboratoire, les échantillons de sol ont été classifiés selon le système de classification unifiée des sols (USCS), qui est couramment utilisé dans la pratique du génie civil.

Le principe de base de ce système consiste à classer les sols à grains grossiers (50 % des grains en poids est supérieur à 0,075 mm) selon leur granulométrie et les sols à grains fins (50 % des grains en poids est inférieur à 0,075 mm) d'après leur comportement plastique. Les grandes divisions du système sont illustrées au tableau 4. Les sols à grains fins (M et C) ont été subdivisés suivant leur limite de liquidité et leur indice de plasticité. L'abaque de plasticité de Casagrande a été utilisé afin de déterminer les matériaux dont le comportement se rapproche de celui des argiles des autres matériaux dont le comportement se rapproche de celui des silts (Figure 4). La ligne A de l'abaque représente la limite arbitraire entre les valeurs de w_L et I_p propres aux matériaux argileux (valeurs situées au-dessus de la ligne A) de celles associées aux matériaux silteux (valeurs situées en-dessous de la ligne A). Une fois le type de matériel déterminé, silts ou argiles, sa limite de liquidité a permis de lui attribuer le suffixe L pour limite de liquidité faible ou le suffixe H pour limite de liquidité élevée. La ligne de démarcation entre la limite de liquidité faible et celle élevée est fixée arbitrairement à 50.

Tableau 4 : Définitions des composantes du sol, de leurs limites granulométriques et des symboles employés dans le système USCS (Tiré de Holtz et Kovacs, 1991).

Fraction de sol ou composante	Symbole	Limites granulométriques
Blocs erratiques	Aucun	- plus de 300 mm
Cailloux	Aucun	- de 75 mm à 300 mm
(1) Sols à grains grossiers		
Gravier	G	- de 75 mm à 4,75 mm
Grossier		- de 75 mm à 19 mm
Fin		- de 19 mm à 4,75 mm
Sable	S	- de 4,75 mm à 0,075 mm
Grossier		- de 4,75 mm à 2 mm
Moyen		- de 2 mm à 0,425 mm
fin		- de 0,425 mm à 0,075 mm
(2) Sols à grains fins		
Silts	M	- moins de 0,075 mm - sans dimension spécifique – utiliser les limites d'Atterberg
Argiles	C	- sans dimension spécifique – utiliser les limites d'Atterberg
(3) Sols organiques	O	- sans dimension spécifique
(4) Tourbe	Pt	- sans dimension spécifique
Symboles d'étalement		Symboles des limites de liquidité
Bien étalé, W		Élevée, H
Peu étalé, P		Faible, L

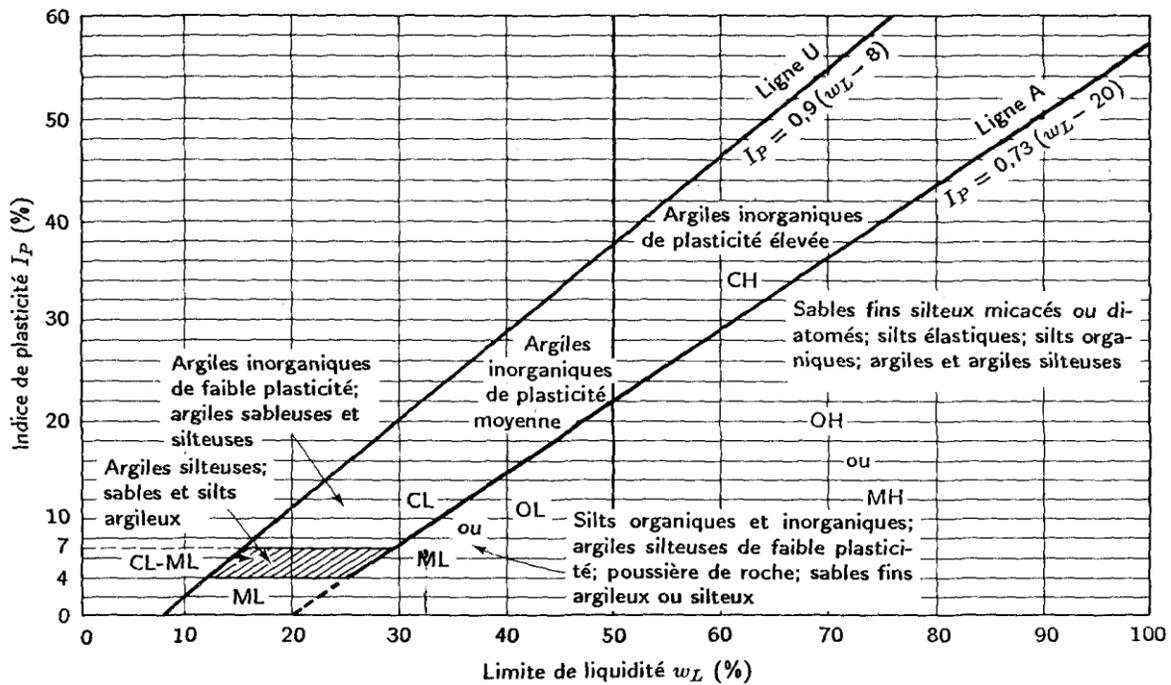


Figure 4 : Abaque de plasticité de Casagrande (Tirée de Holtz et Kovacs, 1991)

3.2.1.1 ESSAIS DE FLUAGE

Certaines des carottes gelées extraites ont été soumises à des essais de fluage et de consolidation au dégel. Comme le fluage survient principalement lorsque la contrainte verticale est élevée, ces essais ont été préférentiellement réalisés sur des échantillons gelés prélevés en bordure des pistes où le remblai atteint des épaisseurs considérables.

3.2.1.1.1 THÉORIE :

Le fluage est défini comme étant un phénomène physique qui provoque une déformation irréversible et lente d'un matériau soumis à de très fortes pressions, comparable à celle d'un fluide visqueux. Dans le cas des pistes d'atterrissage du Nunavik, le tassement en fluage pourrait survenir principalement dans les sols gelés aux endroits où la contrainte appliquée est élevée et où la température du sol est près de son point de fusion. Lorsqu'une contrainte est appliquée sur une longue période, on atteint une phase (II) où le taux de déformation est constant pour une contrainte et une température définies (Ladanyi, 1972). Certaines propriétés du sol accélèrent la vitesse de fluage. C'est le cas de la température et de la salinité du sol qui, en plus d'augmenter la vitesse de fluage, réduisent la résistance au cisaillement d'un sol gelé par suite de l'accroissement d'eau non gelée dans les pores (Nixon et Lem, 1984).

Différents articles traitent d'essais de fluage sur sols gelés et même sur des zones de pergélisol littoral de l'arctique canadien, mais il ne semble pas y en avoir qui concernent directement des sols du Nunavik et les tills glaciaires (Savigny et Morgenstern, 1986; Wijeweera et Joshi, 1991). Les principaux résultats publiés concernent des sols argileux relativement homogènes ou bien des sols reconstitués en laboratoire tels que des sables, silts et de la glace pure. Par contre, on décrit très bien dans ces différents textes la façon d'effectuer un essai de fluage en laboratoire ; les mêmes procédures pourront s'appliquer dans le cas des sols du Nunavik.

Le but de ces essais est d'arriver à déterminer avec précision les paramètres de fluage du silt argileux et du till de Salluit (Andersland et Ladanyi, 1994). Une fois ces valeurs obtenues, il sera possible de mettre

en relation directe le taux de déformation annuel au fluage en fonction de la contrainte appliquée et de la température.

3.2.1.1.2 PROCÉDURE DES ESSAIS

Des essais de fluage ont été réalisés sur certains échantillons récupérés lors de la campagne de forage d'été 2008. Ces expérimentations font suite à la mise au point d'une procédure permettant d'évaluer le taux de déformation à long terme du pergélisol sous l'influence d'une contrainte verticale et d'une température définies. Ces expérimentations, échelonnées sur une période d'environ huit mois, ont permis d'évaluer les paramètres de fluage de deux différents types de sol. Ces sols consistent en un silt argileux (SA) que l'on retrouve en bordure de la route d'accès à l'aéroport de Salluit (SAL_F6) et en un till glaciaire (TG) provenant du sol naturel en bordure de la piste d'atterrissage de Salluit (SAL_F2 et SAL_F5).

Les essais ont été réalisés au laboratoire du département de génie civil de l'université Laval dans une cellule triaxiale telle que schématisée en annexe à la figure 106. Les carottes de sol gelé étaient entourées d'une membrane de latex et placées dans un environnement confiné sous une pression d'air constante. Ces carottes devaient préalablement respecter certaines règles élémentaires pour satisfaire les critères d'essai. D'après Nixon et Lem (1984), ces critères sont:

- Avoir une longueur qui est supérieure à deux fois le diamètre.
- Être foré de manière à ne pas remanier le sol.
- Avoir des parois relativement parallèles et dépourvues de trous ou de protubérances.
- Le sommet et la base doivent être parfaitement parallèles et perpendiculaires à l'axe de l'échantillon.

Afin de bien préciser la cryostructure avant les essais, les carottes de pergélisol, préalablement numérisées avec un scanner tomodynamométrique, ont fait l'objet d'une analyse par imagerie médicale. Cette méthode non destructive permet de sélectionner les carottes ou les zones de la carotte qui ne présentent pas de failles ou de vides. Par la suite, les carottes ont été taillées dans une chambre froide à l'aide d'une scie circulaire et de papier à sabler pour assurer un alignement parfait.

Lors de l'essai de fluage, l'échantillon était confiné latéralement par pression d'air équivalente aux conditions *in situ*. Cette valeur est estimée, d'après les recherches et discussions, à 0,5 fois la contrainte verticale appliquée. Dans le cas présent, où on considère un remblai important d'une hauteur de 10 m avec un poids volumique de 20 kN/m³, la charge appliquée sur la tête de l'échantillon est de 200 kPa. Cette valeur de contrainte correspond à σ_1 et celle du confinement, ici fixé à 100 kPa, à σ_3 . À des fins terminologiques, il est important de mentionner que la contrainte déviatorique $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ pour un essai triaxial confiné représente la pression appliquée directement par la presse hydraulique. Lors des essais, l'échantillon était maintenu à la température désirée par la circulation d'un liquide réfrigérant autour de l'échantillon. De plus, toutes les étapes de la préparation de l'échantillon et de l'essai sont réalisées à l'intérieur d'une chambre froide où la température ambiante est inférieure à 0 °C. Les principales étapes effectuées pour le montage de la cellule triaxiale employée pour l'essai de fluage sont présentées aux figures suivantes :



Figure 5 : A) Échantillon SAL_F2_461_475 (TG) taillé en vue d'un essai de fluage. B) Carotte posée sur la base de la cellule triaxiale. C) Tête de chargement installée sur l'échantillon. D) Échantillon recouvert d'une membrane de latex et réseau de liquide réfrigérant (en vert) qui entoure la carotte de sol. E) Couche isolante mise en place pour réduire les variations thermiques. F) Dessus et base de la cellule triaxiale. G) Cellule triaxiale installée et branchée dans la chambre froide. H) Presse hydraulique UTM-100, chambre froide et système d'acquisition.

3.2.1.2 ESSAI DE TASSEMENT ET CONSOLIDATION AU DÉGEL

L'essai de tassement et consolidation au dégel consiste à faire dégeler un échantillon de sol et à mesurer le tassement total associé. Une charge supplémentaire peut également être appliquée verticalement (contrainte) sur l'échantillon afin de simuler l'influence d'un remblai ou d'un bâtiment sur la consolidation. Le tassement total est la somme de deux phénomènes distincts soit : 1) le tassement associé au changement de phase de l'eau qui entraîne une diminution volumétrique importante (environ 9 %) et 2) la consolidation du sol sous une contrainte appliquée suite à l'évacuation de l'eau et le réarrangement des particules. D'ordre général, le tassement prédomine lorsque la glace se présente sous la forme ségrégée (lentilles) tandis que la consolidation primera en présence de glace interstitielle.

Certains essais de consolidation ont déjà été effectués au Nunavik par des chercheurs de l'Université Laval (Leroueil *et al.*, 1991). Par contre, ces essais ne concernaient pas directement le sol sous les pistes d'atterrissage et ils ont été effectués dans un village (Kangiqualujjuaq) où la piste d'atterrissage n'est pas à l'étude dans le cadre de ce projet. L'objectif de ces essais est donc de déterminer une valeur de tassement total (s) pour différents types de matériau sur lesquels reposent les pistes et sous différentes contraintes appliquées. Les résultats de ces essais permettent de mieux comprendre le processus de tassement qui affecte présentement certaines pistes d'atterrissage au Nunavik et ultimement, d'estimer l'ampleur des tassements à venir au rythme de l'augmentation des températures de l'air projetée par les différents scénarios climatiques.

Afin d'évaluer le tassement total (s), la somme du tassement au dégel (s_t) et de la consolidation du sol subséquente (s_c) est calculée par l'équation suivante :

$$s = s_t + s_c \quad (1)$$

Lorsque l'épaisseur de la couche de sol gelée originale (H_f) est soumise à la contrainte effective (σ'), les composantes du tassement total s'expriment par les équations suivantes :

$$s_t = A_0 H_f \quad (2)$$

$$s_c = m_v \sigma' H_f \quad (3)$$

Le paramètre de tassement au dégel (A_0) s'exprime en pourcentage et consiste en un rapport entre l'indice des vides à l'état gelé (e_f) et dégelé (e_t) qui se résume par l'équation suivante:

$$A_0 = \frac{e_f - e_t}{1 + e_f} \quad (4)$$

En ce qui concerne le coefficient de changement de volume (m_v), celui-ci se définit comme une unité de changement de volume par unité de contrainte effective ajoutée. Lorsque la contrainte effective augmente de σ' à σ'_0 et que l'indice des vides décroît de e_t à e , ce coefficient s'exprime sous la forme suivante :

$$m_v = \frac{1}{1 + e_t} \cdot \left(\frac{e_t - e}{\sigma' - \sigma'_0} \right) \quad (5)$$

Dans l'optique de déterminer le tassement total suite au dégel du pergélisol sous les pistes d'atterrissage et des routes d'accès, des valeurs de A_0 et de m_v doivent être déterminées à partir d'essais de consolidation réalisés sur des échantillons de sol représentatifs. Une fois ces valeurs déterminées, le tassement total advenant une fonte partielle ou totale de couches de sol initialement gelées se détermine par l'équation suivante :

$$s = \sum_{i=1}^n A_{0,i} H_i + \sum_{i=1}^n m_{v,i} H_i \sigma'_i \quad (6)$$

Afin de simplifier l'évaluation des tassements totaux à venir en relation avec le dégel graduel du pergélisol, aucune distinction entre les valeurs des tassements et celles de consolidation n'a été effectuée. Les carottes de sol gelé récupérées lors des campagnes de forage de 2008 et 2009 devaient préalablement respecter les mêmes règles élémentaires énoncées précédemment pour satisfaire les critères d'essai. Les essais de consolidation au dégel réalisés ont été effectués dans une cellule œdométrique légèrement modifiée (voir annexe, figure 107). Lors des expérimentations, une contrainte verticale initiale de 100 kPa a été appliquée sur les échantillons gelés. À l'aide de deux bains thermiques qui contrôlent les températures supérieures et inférieures, le segment de sol est dégelé par le haut en imposant une température de $2 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$. Ultimement, la température des deux bains thermiques est augmentée pour assurer un dégel complet de l'échantillon. Une fois le dégel complété, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a plus de déformations verticales, la contrainte est augmentée à 150 kPa, puis finalement à 200 kPa pour entraîner une consolidation supplémentaire à contraintes plus élevées. En procédant en condition quasi-œdométrique, il est possible d'évaluer l'indice des vides final (e_f) du sol lorsque le dégel et la consolidation des grains sont complétés. Mis en relation avec l'indice des vides initial à l'état gelé (e_f), calculé à l'aide de la masse volumique gelée et de la teneur en eau, il est possible d'obtenir une valeur de tassement total sous différentes contraintes pour un même échantillon. La figure 6 suivante montre les principales étapes de montage de la cellule pour la réalisation d'essais de consolidation au dégel.



Figure 6 : A) Échantillon SAL_F6_290_304 (SA) posé sur la base de la cellule. B) Piston reposant sur la pierre poreuse et l'échantillon. C) Montage de l'équipement dans une chambre à température contrôlée (+2 °C). D) Échantillon SAL_F2_343_356 après consolidation au dégel.

3.2.2 ANALYSES PAR SCANNEUR TOMODENSITOMÉTRIQUE

Les carottes gelées récoltées lors des forages ont été systématiquement numérisées à l'aide d'un scanner tomodensitométrique de type médical (Figure 7B), propriété de l'Institut National de la Recherche Scientifique Eau-Terre-Environnement (INRS-ETE) à Québec. Cette méthode non destructive de caractérisation (Calmels et Allard, 2004; Calmels, 2005) permet d'obtenir une image numérique à très haute résolution de la cryostructure du pergélisol selon un plan médian longitudinal (coupe sagittale ou coronale). Les images obtenues ont été sauvegardées en format DICOM. Sur ces images, les matériaux de faible densité sont présentés par des teintes foncées et ceux de fortes densités par des teintes claires (Figure 7C). Avec une résolution de 0,5 mm, les images DICOM acquises avec le scanner médical ont permis, outre de dresser un portrait détaillé de la stratigraphie et de la cryostratigraphie, d'effectuer une discrétisation des différentes valeurs de densité. Grâce à cette discrétisation, les éléments tels la glace, l'air et le sol sont différenciés et délimités selon leurs plages de densités. Une fois la discrétisation complétée, il est 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.

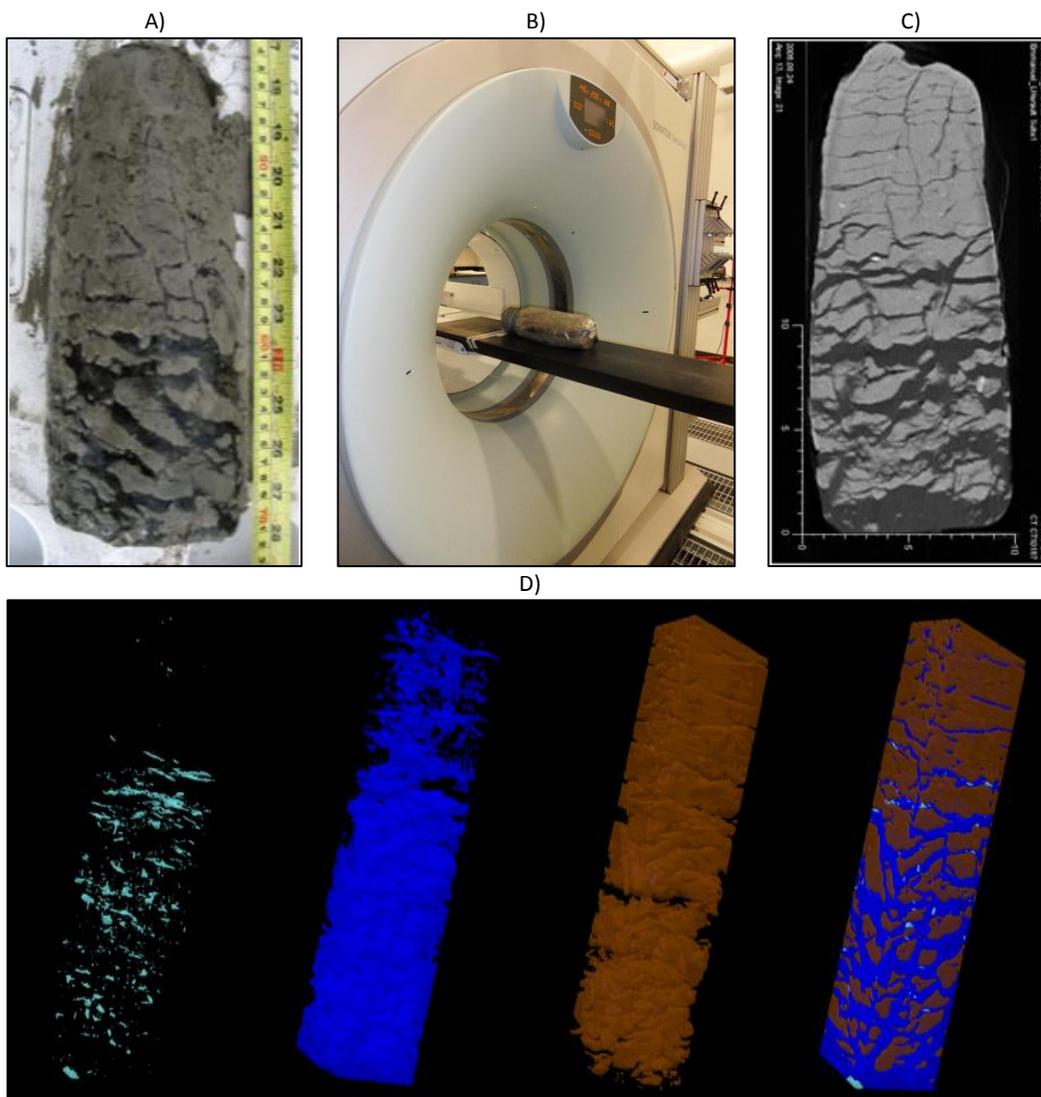


Figure 7 : A) Carotte gelée extraite sur le terrain. B) Scanneur tomodensitométrique. C) Visualisation de la cryostructure avec le logiciel OsirisTM à partir d'une image en format DICOM. Reconstruction en trois dimensions des éléments discrétisés. On observe de gauche à droite les éléments suivants : l'air, la glace et le sédiment.

3.3 INTEGRATION DES DONNEES PREEXISTANTES ET NOUVELLEMENT ACQUISES

3.3.1 RELEVÉS DE DÉFECTUOSITÉS DU MTQ

Depuis 2005, une équipe technique du MTQ effectue des relevés de défauts afin de documenter et mesurer les signes de dégradation des infrastructures aéroportuaires au Nunavik. Ces relevés constituent une source d'information indispensable au suivi des zones sensibles à la dégradation du pergélisol sous les pistes et routes d'accès. Ces relevés recensent et documentent les zones d'accumulation d'eau, les dépressions, les fissures, les épaisseurs du couvert nival en marge des pistes et les tassements du sol sous les pistes. 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 réaliser un diagnostic des causes probables de la dégradation de l'infrastructure. La figure 8 présente un exemple de relevé de défauts qui est accompagné de mesures de nivellement précises pour l'évaluation des tassements (tableau 5).

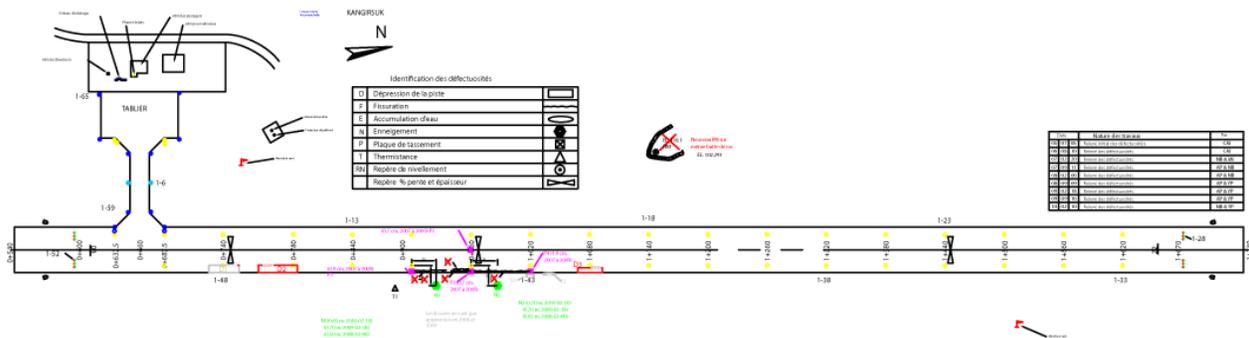


Figure 8 : Relevés des défauts pour l'aéroport de Kangirsuk (MTQ, 2010).

Tableau 5 : Exemple de mesures de nivellements, aéroport de Kangirsuk, Nunavik (MTQ, 2010).

Date	Plaques	Élévation (m)	Tassement (cm)	Tassement total (cm)	Remarques	Relevé par :
2010-09-23	P-1	101,033	-4,3	-5,0		C.L., Y.P. & R.P.
2009-09-16	P-1	101,076	1			N.B. & Y.P.
2008-09-08	P-1	101,066	-1,7			B.B. & R.P.
2007-09-11	P-1	101,083				N.B. & A.P.
2010-09-23	P-2	100,747	-1,9	-2,6		C.L., Y.P. & R.P.
2009-09-16	P-2	100,766	-0,1			N.B. & Y.P.
2008-09-08	P-2	100,767	-0,6			B.B. & R.P.
2007-09-11	P-2	100,773				N.B. & A.P.
2010-09-23	P-3	99,677	-1,2	-2,1		C.L., Y.P. & R.P.
2009-09-16	P-3	99,689	0,2			N.B. & Y.P.
2008-09-08	P-3	99,687	-1,1			B.B. & R.P.
2007-09-11	P-3	99,698				N.B. & A.P.
2010-09-23	P-1	101,696	-3,3	-5,2		C.L., Y.P. & R.P.
2009-09-16	P-4	101,729	0,2			N.B. & Y.P.
2008-09-08	P-4	101,727	-2,1			B.B. & R.P.
2007-09-11	P-4	101,748				N.B. & A.P.

3.3.2 RELEVÉS TOPOGRAPHIQUES

3.3.2.1 PLANS ORIGINAUX

Afin d'extraire les informations topographiques telles que la hauteur et la pente de la piste ainsi que la topographie du terrain naturel sous la piste, les plans d'origine « tel que construit » ont été numérisés (Figure 9). 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 quant aux différentes épaisseurs du remblai ainsi qu'à la topographie du terrain naturel. Ces informations ont été compilées puis intégrées dans les coupes topographiques et ont servi à définir la géométrie de l'infrastructure et du terrain naturel lors des exercices de modélisation du régime thermique.

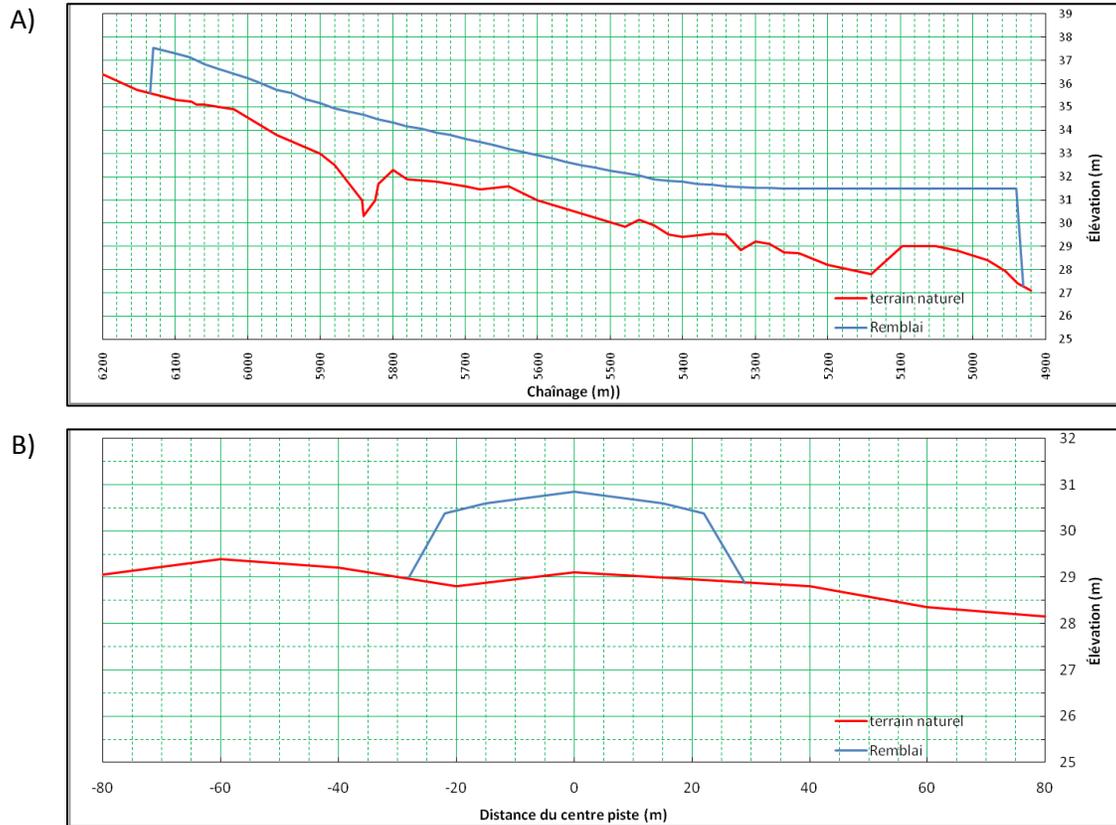


Figure 9 : Profil longitudinal (A) et profil transversal au chaînage 5+300 (B) de la piste d'atterrissage de Tasiujaq extraits à partir des plans originaux.

3.3.2.2 RELEVÉS 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 inférieure à 10 cm et une résolution supérieure à 1 point/m². Afin d'accroître la vitesse de traitement des données, un périmètre autour de chaque piste a été établi à l'intérieur duquel les données LIDAR ont été préservées. Ce périmètre consiste en un rectangle dont la longueur et la largeur sont respectivement de 1390 m et 400 m. Les données LIDAR préservées couvrent latéralement 200 m de part et d'autre du centre-piste et 100 m aux extrémités pour une superficie totale de 556 000 m². Les données LIDAR ont fait l'objet d'une série de traitement afin d'une part d'éliminer les erreurs et d'autre part diminuer le nombre de points de mesures pour en faciliter leur manipulation. La figure 11 montre la distribution des points de mesures LIDAR dans l'enceinte de l'aéroport d'Akulivik avant traitement (Figure 11.2a) et après traitement (Figure 11.2c) ainsi que leurs grilles d'élévation numérique respectives (Figure 11.3a et c).



Figure 10 : Couverture des données LIDAR acquises par le MTQ, le MAMROT et le MRNF pour le village d’Akulivik (Polygone rouge). Couverture utilisée dans le cadre de la présente étude (Polygone jaune).

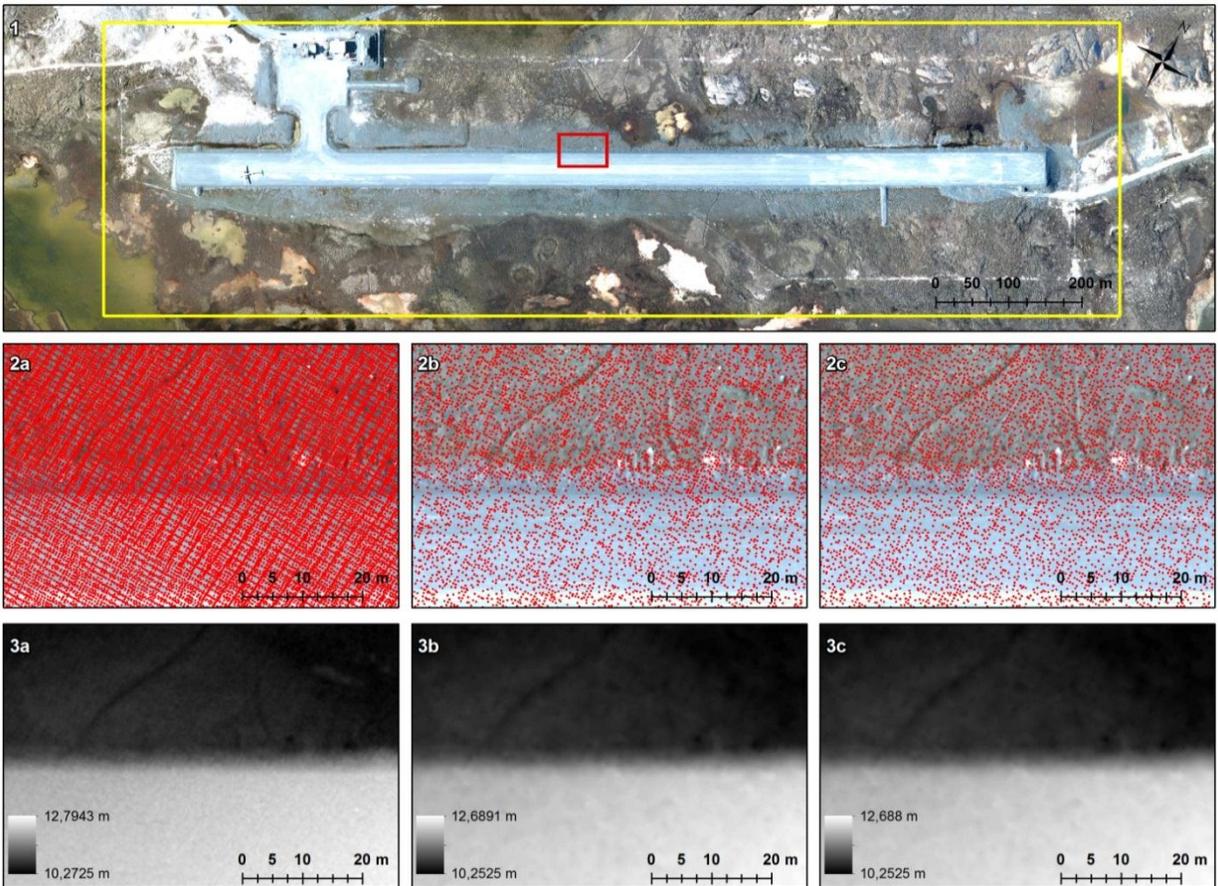


Figure 11 : 1) Périmètre de la zone préservée du jeu de données LIDAR pour l’aéroport d’Akulivik. Distribution des points de mesures brutes (2a), de surfaces (2b) et corrigés (2c) et leurs modèles numériques d’élévation respectifs générés par la méthode d’interpolation des voisins naturels (*Natural Neighbors*).

3.3.3 CARTOGRAPHIE AMÉLIORÉE DES DÉPÔTS DE SURFACE SOUS LES PISTES

Dans le présent rapport, un effort considérable a été porté afin de réaliser une cartographie améliorée des dépôts de surface dans les secteurs des aéroports. Cette nouvelle cartographie reprend les cartes produites antérieurement par le CEN (Allard *et al.*, 2007) (Figure 12B) et y intègre les informations géotechniques et stratigraphiques acquises lors des campagnes de forages réalisées au cours des étés de 2008 et 2009. 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, les anciennes photographies aériennes disponibles avant la construction des pistes d'atterrissage ont été numérisées, puis géoréférencées. De cette manière, il a été possible d'étendre la photo-interprétation à la section couverte par l'infrastructure actuelle et ainsi de délimiter l'étendue des dépôts de surface en continuité avec le milieu naturel. L'intégration de l'information géotechnique nouvellement acquise lors de la campagne de forages de 2008 et 2009 a permis d'apporter certaines précisions sur les épaisseurs des couches stratigraphiques, la profondeur du roc et les caractéristiques géotechniques des dépôts meubles. Un exemple d'amélioration de la cartographie des dépôts de surface est présenté à la figure 12D.

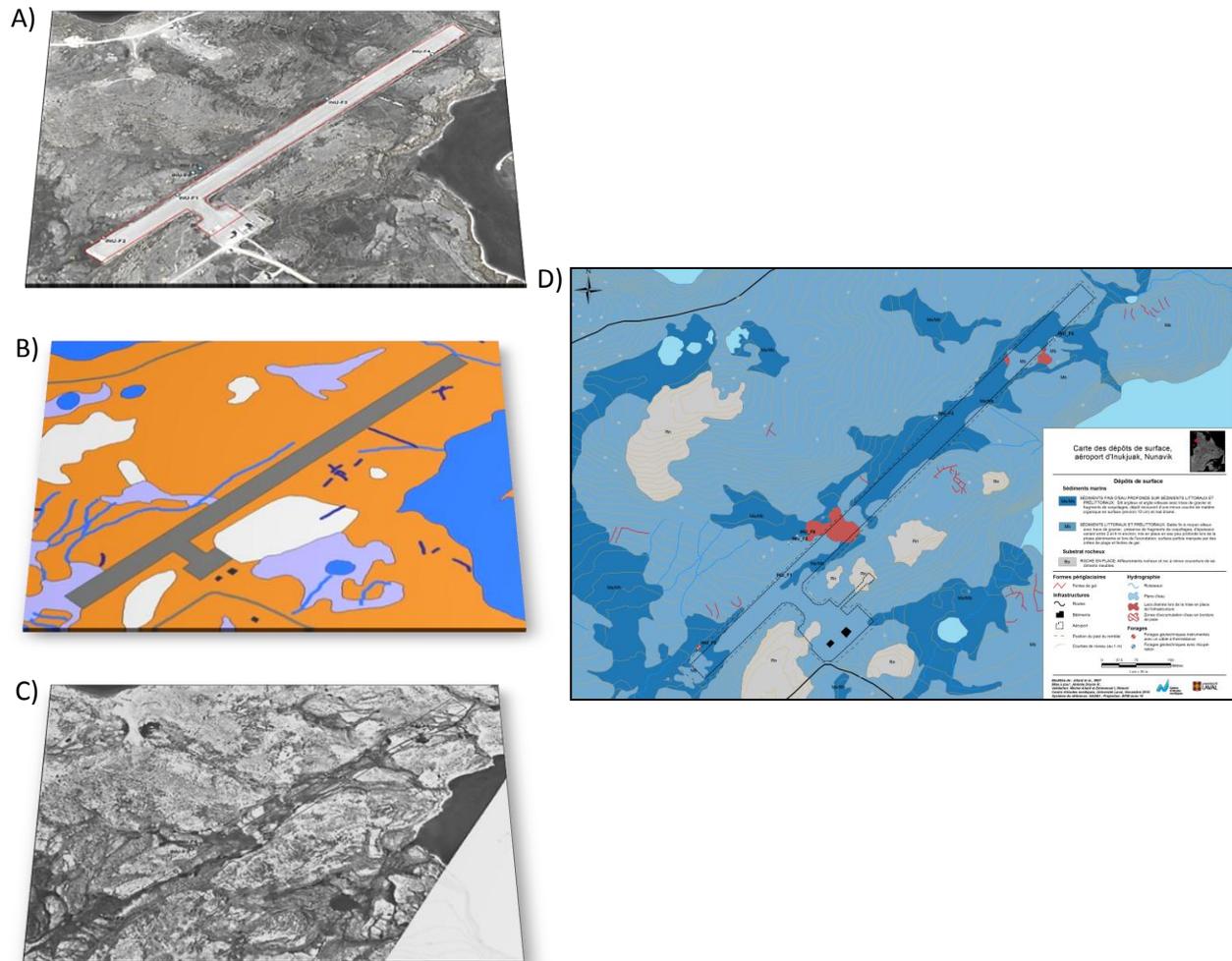


Figure 12 : A) Orthophoto de 2002-03 de la piste d'atterrissage d'Inukjuak utilisée initialement pour cartographier les unités géologiques de surface et conditions de pergélisol. B) Cartes des unités géologiques de surface produites dans une étude antérieure (Tirée de Allard *et al.*, 2007). C) Photographies aériennes de 1974 utilisées pour cartographier les dépôts meubles sous la piste d'Inukjuak. Carte des dépôts de surface améliorée du secteur de l'aéroport à Inukjuak produite dans le cadre de la présente étude.

3.3.4 COUPE GÉOLOGIQUE SYNTHÈSE

Les levés de géophysique réalisés en 2004 aux pistes de Tasiujaq, Kangirsuk et Quaqtac dans le cadre d'un projet antérieur de caractérisation du pergélisol (Allard *et al.*, 2007) et qui ont fait l'objet d'une analyse approfondie par Savard (2006), ont été réinterprétés en considérant les nouvelles informations stratigraphiques apportées par les forages profonds réalisés en 2008 et 2009 (Allard *et al.*, 2009; L'Hérault *et al.*, 2009). Le même exercice a été réalisé pour les pistes de Salluit, Akulivik, Puvirnituk et Inukjuak à partir de relevés de géoradar réalisés en 2005 par un consultant privé pour le compte du MTQ (Radar-Inspection, 2005). La réinterprétation des profils de géoradar a permis d'interpoler la profondeur des contacts stratigraphiques observés aux différents forages et ainsi d'évaluer l'épaisseur de chacune des couches de dépôts meubles sous l'ensemble de l'infrastructure (Figure 13). Les épaisseurs ainsi que les patrons de disposition des différentes unités stratigraphiques ont été intégrés à la géométrie du modèle soumis à des essais de simulation numérique du régime des températures du sol. Pour chacune des unités discrétisées, les propriétés thermiques propres aux différentes unités ont été déterminées selon les caractéristiques géotechniques mesurées en laboratoire (teneur en eau, teneur en glace, granulométrie, etc.) (voir section 3.2) ainsi que par un processus de calibration et de validation pratiqué à partir des mesures de températures du sol enregistrées par les câbles à thermistances existants (voir section 3.4.2).

Il est important de noter que les coupes géologiques synthèses sont des schématisations de l'organisation des unités géologiques sous les pistes. 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 et les informations stratigraphiques disponibles. L'utilisation des levés 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 pseudo-épaisseurs des différentes unités qui apparaissent dans les coupes géologiques synthèses, car leur précision dépend du nombre d'observations stratigraphiques distribuées le long du levé et leurs validités. Par exemple, les forages réalisés dans le cadre de ce projet sont tous localisés en pied de remblai ou à une certaine distance dans le milieu naturel, tandis que les levés de géoradar ont été, dans la majorité, réalisés au centre des pistes ou dans l'accotement. 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-piste et du pied de remblai n'est que d'une vingtaine de mètres, peut affecter sensiblement la position des différents contacts stratigraphiques et nécessairement les épaisseurs des unités géologiques.

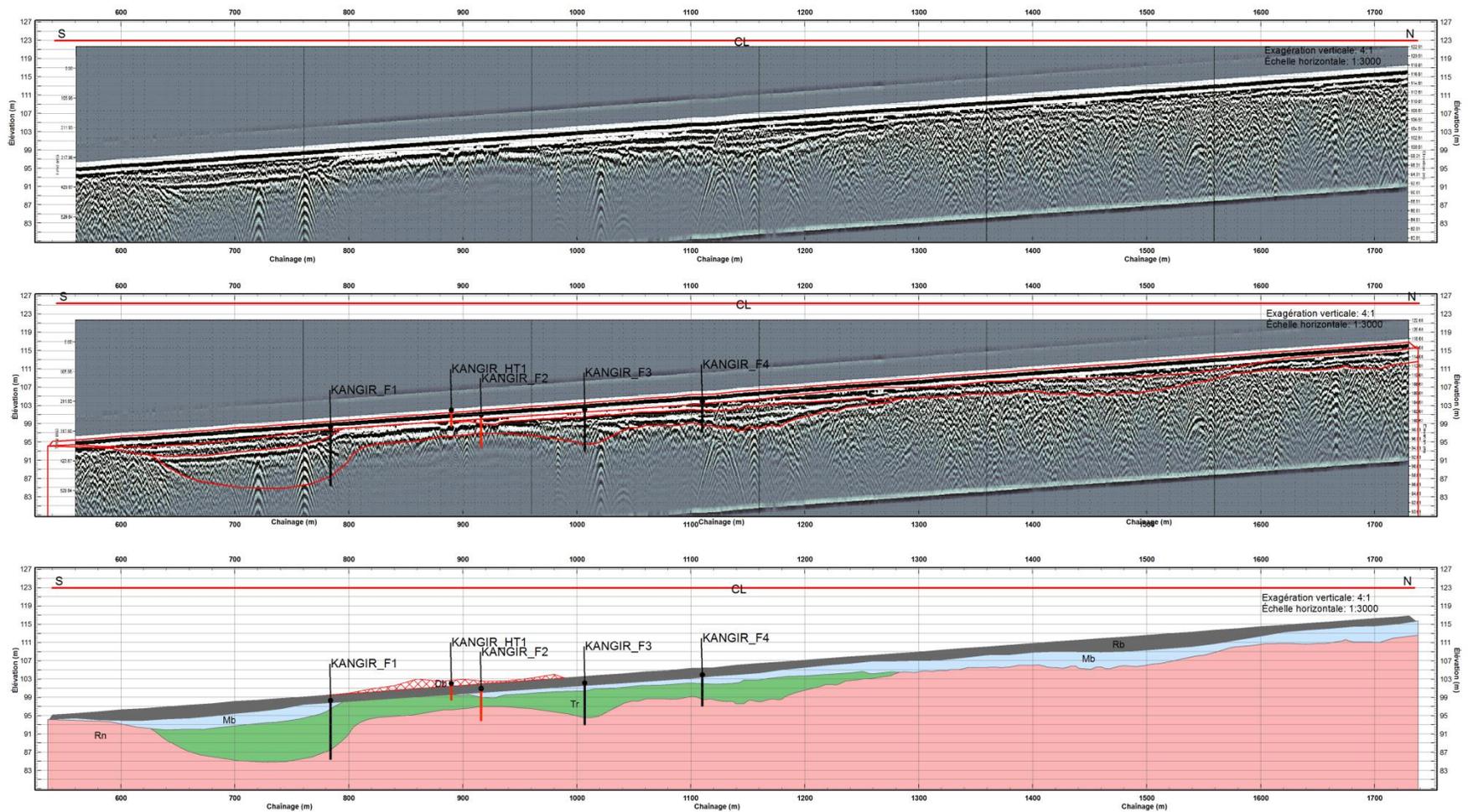


Figure 13 : A) Levé de géoradar à 50 MHz effectué sur la piste de Kangirsuk (Allard, Fortier et al. 2007). B) Réinterprétation du levé géoradar d'après les informations issues des nouveaux forages (les contacts stratigraphiques sont représentés par les lignes rouges). C) Coupe géologique synthèse avec les différentes unités géologiques et leurs contacts stratigraphiques approximatifs.

3.4 SIMULATIONS ET PROJECTIONS GÉOTHERMIQUES

De nombreuses études sur les changements climatiques en régions nordiques font état d'un réchauffement des températures de l'air et dans le sol survenues depuis une trentaine d'années dans l'ouest de l'arctique et plus récemment au Nunavik (Osterkamp et Romanovsky, 1999; Chouinard *et al.*, 2007; Akerman et Johansson, 2008; Smith *et al.*, 2010). Au cours des dernières années, un nombre considérable d'études ont aussi fait appel à différents types de modèles afin d'évaluer les changements climatiques et leurs impacts potentiels dans un futur à moyen et long terme (Riseborough *et al.*, 2008).

Les changements climatiques sont généralement projetés dans le futur à l'aide de modèles climatiques qui intègrent de nombreux processus physiques. Ces modèles numériques qui appliquent des lois physiques fournissent des projections du climat futur. Les sorties de modèles sont des représentations plausibles de climats futurs qui sont conséquents avec les hypothèses d'émission de gaz à effet de serre et les connaissances actuelles de leurs effets sur le climat (ACIA). De plus, ces projections climatiques sont, depuis quelques années, utilisées comme intrant dans des modèles de simulations géothermiques avec pour objectif de simuler l'évolution du régime thermique du pergélisol et plus spécifiquement de l'évolution de la couche active (Sazonova et Romanovsky, 2003; Zhang *et al.*, 2008; Alfaro *et al.*, 2009).

Dans ce rapport, les simulations ainsi que les projections de l'évolution potentielle du régime thermique des pistes du MTQ ont été réalisées à l'aide de modèles quasi unidimensionnels et bidimensionnels programmés dans le logiciel commercial TEMP/W de Geo-Slope International. Afin de projeter les changements du régime thermique du pergélisol jusqu'en 2050, six sorties de températures de l'air provenant du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) ont été utilisées afin de représenter l'incertitude liée à la variabilité naturelle du climat. Les différentes sorties utilisent toutes le scénario de gaz à effet de serre A2 (Nakicenovic *et al.*, 2000) qui est considéré pessimiste. Parmi les sorties MRCC disponibles, quatre sont pilotées aux limites latérales du modèle par le modèle de circulation général (MCG) CGCM3 (*Canadien global climat model*) et deux sont pilotées par le MCG ECHAM5 développé par l'institut Max Plank. Pour ce qui est des conditions aux limites du modèle géothermique en profondeur, elles sont représentées par un flux géothermique équivalent à 34 mW/m^2 . Cette valeur est tirée de la carte des flux géothermiques de l'Amérique du Nord (Blackwell et Richards, 2004) et elle est la même pour l'ensemble du territoire à l'étude.

Les travaux de modélisation numérique entrepris dans cette étude ont pour objectif général de simuler le régime thermique sous et en périphérie de certaines pistes d'atterrissage et routes 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 $0 \text{ }^\circ\text{C}$, qu'une estimation de l'amplitude des tassements à anticiper suite au dégel du pergélisol sera réalisée. Des exercices de simulation ont également permis, par l'utilisation de modèles numériques bidimensionnels le long de profils transversaux stratégiquement localisés, de reproduire les impacts thermiques sur le pergélisol causés par les accumulations de neige et la formation de nappes d'eau contre les remblais. Ces simulations permettent également une évaluation de la capacité à restaurer le pergélisol par l'application de certaines techniques de mitigation.

Pour chacune des pistes étudiées, deux exercices de projections ont été réalisés, soit : un exercice pour le centre-piste et un exercice en pied de remblai. Le choix de ces deux emplacements réside dans leurs différences notables tant au niveau des propriétés thermiques des matériaux que de l'influence des conditions environnementales locales (végétation, neige et drainage) sur le transfert thermique en surface des températures atmosphériques. Par exemple, la position en pied de remblai est généralement

recouverte d'une couverture de neige qui isole la surface du sol des conditions atmosphériques hivernales. Dans ces cas, les températures de surface mesurées sont généralement plus élevées que celles de l'air, ce qui influence grandement le régime thermique du sol. On y observe habituellement des températures dans le sol plus chaudes et une épaisseur de la couche active plus importante. À l'inverse, le centre-piste, généralement dégagé de toute couverture de neige durant l'hiver, se caractérise par un régime thermique essentiellement influencé par les températures de l'air. Par conséquent, les températures de surface et dans le sol en hiver sont généralement plus froides et l'épaisseur de la couche active en été y est moins importante.

Il est important de mentionner que la réaction du pergélisol en réponse aux changements climatiques se produit à des vitesses qui diffèrent d'un site à l'autre en raison de la variabilité dans le temps et l'espace des propriétés thermiques et des conditions environnementales locales. Il est donc nécessaire de considérer avec prudence les résultats des exercices de modélisation numérique présentés dans ce rapport malgré leur grande cohérence avec les températures du pergélisol mesurées *in situ* par les câbles à thermistances. Néanmoins, ces exercices permettent de comprendre et d'évaluer les réactions thermiques potentielles des sols dans des contextes climatiques changeants, mais somme toute imprévisibles.

3.4.1 PARAMÈTRES DES MODÈLES NUMÉRIQUES

3.4.1.1 TEMPÉRATURE DE L'AIR

3.4.1.1.1 PÉRIODE 2000 À 2010

Pour la période qui s'étend de la date de la construction de l'infrastructure à aujourd'hui, les températures atmosphériques reconstituées du NARR peuvent être utilisées au besoin. Elles ont été utilisées pour les villages où il y a absence de mesures météorologiques en continu ou sur une période suffisamment longue pour valider le modèle géothermique. Depuis la construction des aéroports, certaines pistes ont été munies de capteurs de températures de l'air entretenus par le CEN. Ces capteurs permettent de mesurer en continu la température de l'air. Il s'avère qu'une période minimale de 5 ans d'enregistrement de données de températures de l'air quotidiennes est suffisante pour calibrer le modèle géothermique pour les niveaux de profondeur qui sont requis pour les analyses. La majorité des stations du CEN sont automatisées depuis 2004 dans les secteurs d'intérêts pour chaque aéroport étudiés.

3.4.1.1.2 PÉRIODE 2011-2050

Sur un ensemble de six sorties de projections MRCC version 4.2.3 disponibles par pistes, deux sorties ont été sélectionnées afin de forcer le modèle géothermique à ces conditions de surfaces. Les sorties AEV et AHA du MRCC ont été sélectionnées, car elles représentent approximativement les deux extrêmes climatiques pour l'ensemble des données disponibles (Figure 14). 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).

L'ensemble des séries MRCC utilisées pour forcer les modèles géothermiques projette une augmentation moyenne des températures de l'air d'environ 3°C pour l'horizon 2050 (Tableau 6). Les changements de températures sont calculés en faisant la différence entre la normale climatique de la période future et celle d'une période de référence. Le changement de température présenté ici est établi pour la période de référence 1971 à 2000 et pour la période future 2041 à 2070.

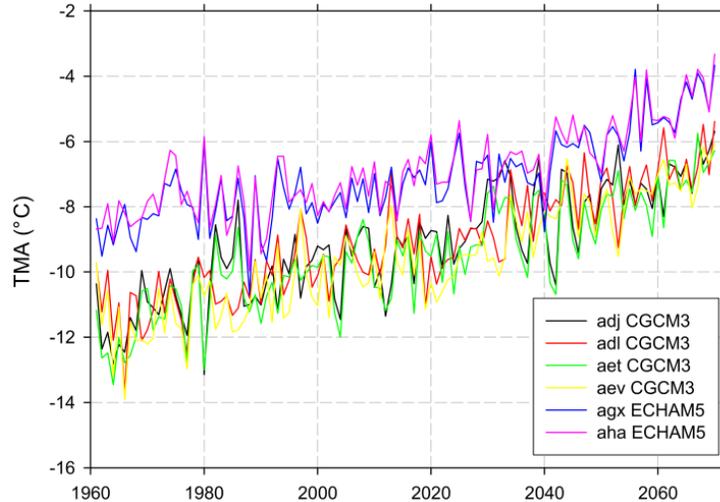


Figure 14: Les six sorties du MRCC des températures de l'air entre 1961 et 2070 pour la région de Tasiujaq.

Tableau 6 : Changements de température de l'air projetés aux aéroports du MTQ pour l'horizon 2050.

Aéroports	MRCC (sortie AEV)	MRCC (sortie AHA)	Moyenne des sorties
Tasiujaq	+2,4 °C	+2,9 °C	+2,7 °C
Quaqtaq	+2,5 °C	+3,4 °C	+3,0 °C
Akulivik	+2,8 °C	+3,6 °C	+3,2 °C
Salluit	+2,7 °C	+3,7 °C	+3,2 °C
Puvirnituaq	+2,7 °C	+3,5 °C	+3,1 °C
Kangirsuk	+2,5 °C	+3,4 °C	+2,9 °C
Inukjuak	+2,7 °C	+3,2 °C	+2,9 °C
Moyennes	+2,6 °C	+3,4 °C	+3,0 °C

Comme le montrent les températures moyennes annuelles de l'air reconstituées (NARR) et simulées (sorties MRCC AEV et AHA) pour la période 1979 à 2007 à Salluit (Figure 15A), la hausse des températures qu'a connue le Nord du Québec depuis 1993 n'est pas reproduite par les sorties MRCC, mais bien représentée par les données NARR. De plus, la comparaison des températures annuelles moyennes de l'air des sorties MRC à celles enregistrées à la station SILA de Salluit a permis de faire ressortir la présence d'un biais froid de l'ordre de 4 à 5 °C dans les projections climatiques du MRCC pour le Nord du Québec. Comme il est très difficile d'évaluer le nombre de processus climatiques ayant cours dans l'arctique en raison de la faible couverture de stations météorologiques et de leur fiabilité, il est difficile d'évaluer les raisons précises pouvant expliquer ce biais. Le manque de connaissance sur la climatologie des régions nordiques ainsi qu'une prise en charge déficiente de certains processus physiques intrinsèques au modèle pourraient être à l'origine du biais.

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. Les températures plus froides enregistrées au Nunavik entre 1980 et 1990 (Allard et *al.*, 1995) sont peu représentatives des conditions climatiques

récentes marquées par un réchauffement important depuis le début des années 1990. Par conséquent, le calcul d'un biais à partir des moyennes climatiques des 30 dernières années ne permet pas une correction adéquate des températures de l'air. Afin de mieux épouser la dynamique climatique actuelle, les données de températures de l'air récentes mesurées aux différentes stations météorologiques réparties sur l'ensemble du territoire ont été utilisées pour effectuer cette correction. La méthode utilisée pour la correction des températures de l'air du MRCC est celle dérivée de Salzman et al. (2007a et b). Cette méthode consiste à déterminer la valeur du biais à corriger en calculant la différence entre la moyenne des températures observées ($xobs_{tma}$) et celles des deux séries MRCC (série AEV et AHA) ($xsim_{tma}$). Ainsi, 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 (Figure 15C). 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. Ainsi, le biais est calculé selon l'équation suivante :

$$Biais = xobs_{tma} - xsim_{tma} \quad (7)$$

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 :

$$MRCC_{corr} = Sim_{quoti} + Biais \quad (8)$$

où Sim_{quoti} représente les températures quotidiennes d'une série MRCC auxquelles est additionnée la valeur du biais.

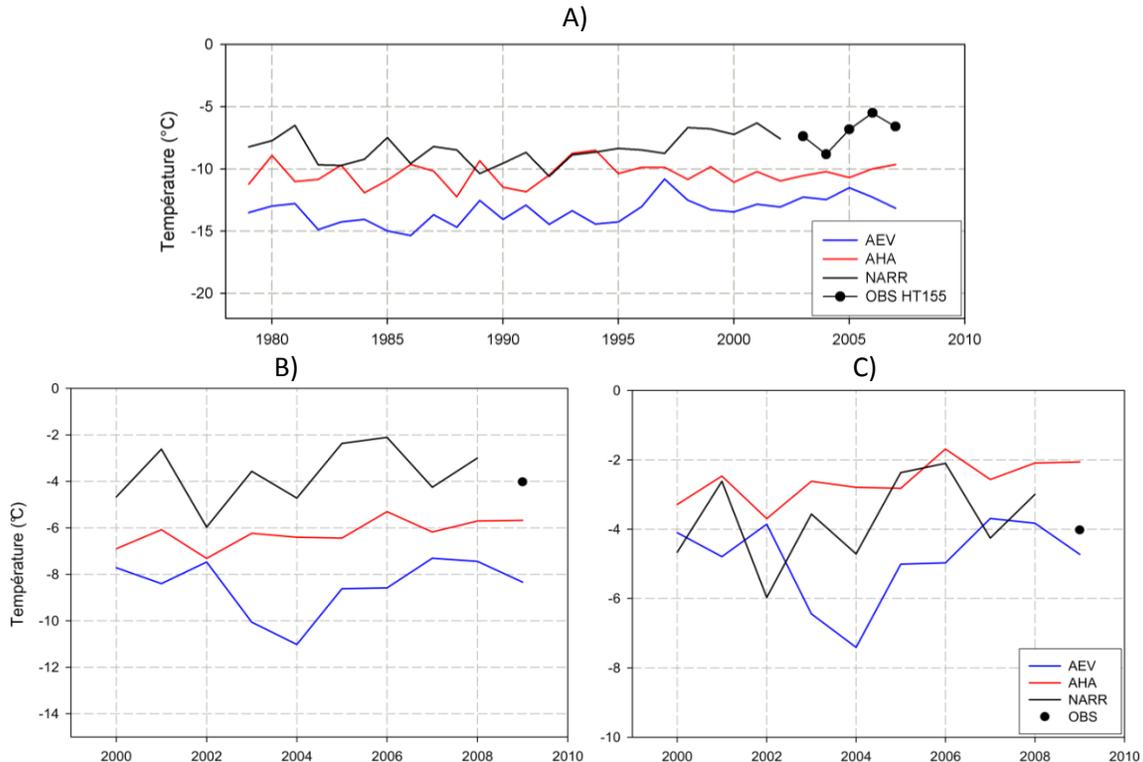


Figure 15: A) Comparaison entre les données NARR et les sorties MRCC AEV et AHA pour la période 1979 à 2007, Salluit, Nunavik. Comparaison entre les températures moyennes annuelles à Inukjuak observées et provenant du NARR versus celles des séries MRCC AHA et AEV non corrigées (B) et corrigées (C).

3.4.1.2 TEMPÉRATURE DE SURFACE

3.4.1.2.1 LES CONDITIONS DE SURFACE ET LES FACTEURS-N

Pour l'analyse du régime thermique du mollisol et du pergélisol, il est préférable d'utiliser la température en surface du sol à celle de l'air, car elle intègre l'influence de la végétation et du couvert nival sur la transmission de la chaleur entre l'atmosphère et le sol (Harris, 1981). Selon les conditions de surface, la différence entre la température de l'air et celle à la surface du sol est parfois très importante. Cette différence justifie la détermination et l'intégration de ces conditions dites « limite » dans les exercices de modélisation du régime thermique du pergélisol. La schématisation et l'intégration de ces conditions représentent un défi considérable en raison de leur variabilité spatiale et temporelle ainsi que du peu de mesures *in-situ* disponibles (type de végétation et épaisseur de l'enneigement). Néanmoins, à des fins de conception ou de simulations numériques, les températures de surface sont couramment estimées par un coefficient empirique nommé « facteur-n » (Johnston, 1981) défini comme le ratio des températures de surface sur les températures de l'air. L'utilisation d'un tel coefficient intègre les transferts complexes de chaleur entre l'air et la surface du sol en fonction des conditions de surface. Par exemple, plus ce coefficient se rapproche de 0, plus l'influence des températures de l'air est atténuée par les conditions de surface (ex. couvert de neige, végétation). À l'inverse, s'il est supérieur à l'unité, les conditions de surface amplifient la température de l'air (ex. revêtement d'asphalte noir, surface non-végétalisée).

Lors des exercices de modélisation réalisés 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 appliqué aux températures de l'air. Les facteurs-n pour la saison de gel (n_f) et de dégel (n_t) ont été calculés respectivement par les équations suivantes :

$$n_f = \frac{\sum DJG_s}{\sum DJG_a} \quad (9)$$

$$n_t = \frac{\sum DJD_s}{\sum DJD_a} \quad (10)$$

où DJG_s , DJD_s , DJG_a et DJD_a correspondent respectivement à la somme des degrés-jour de gel et de dégel calculée à partir des températures de la surface du sol et celles de l'air. Afin de déterminer la valeur du facteur-n pour un site spécifique, il est nécessaire de mesurer simultanément la température de l'air et la température à la surface du sol au cours de plusieurs cycles hivernaux et estivaux. Pour les sites où de telles mesures ne sont pas disponibles, des facteurs-n tirés de la littérature (Andersland et Ladanyi, 2004) ont été utilisés (Tableau 7).

Tableau 7: Valeurs de facteur-n en saison de gel et de dégel selon les conditions de surface (Tiré de Andersland et Ladanyi, 2004)

Conditions de surface	Facteur-n (n_f)	Facteur-n (n_t)
Neige (en surface) :	1,0	n.a
Revêtement sans neige et glace :	0,9	n.a
Sable et gravier :	0,9	2,0
Tourbe :	0,5	1,0
Surface de sol minéral :	0,33	1,22
Gravier :	0,6-1,0	1,3 - 2
(valeurs probables en conditions Nordiques) :	0,9 - 0,95	
Revêtement en asphalte :	0,29 - 1,0 ou plus	1,4 - 2,3
(valeurs probables en conditions Nordiques) :	0,9 - 0,95	
Revêtement en béton :	0,25 - 0,95	1,3 - 2,1
(valeurs probables en conditions Nordiques) :	0,7 - 0,9	

3.4.1.2.2 CONSIDÉRATIONS SUR L'INFLUENCE DE LA NEIGE

C'est par l'application d'un facteur-n saisonnier (n_f) calculé sur les températures moyennes journalière de l'air (TMJA) au cours de l'hiver que l'influence de la neige a été intégrée dans les exercices de simulations numériques. L'influence de ce facteur sur le régime thermique dépend essentiellement de l'épaisseur de neige au sol qui est variable dans l'espace et dans le temps selon la dynamique de distribution de la neige en périphérie de l'infrastructure et la vitesse d'édification de la couverture nivale au cours de l'hiver.

De nombreuses études réalisées sur l'interaction du pergélisol avec les infrastructures au Nunavik (Allard *et al.*, 2004; Allard *et al.*, 2007; Allard *et al.*, 2010; Fortier *et al.*, 2011) ainsi que les nombreuses mesures sur l'enneigement réalisées par le MTQ au bord des pistes, ont démontré que l'accumulation de la neige s'effectue préférentiellement en pied de remblai. En effet, dans le milieu bâti, l'aérodynamisme et la hauteur des infrastructures s'ajoutent à la topographie naturelle à titre de facteurs de contrôle de l'enneigement. Ainsi, les importantes accumulations de neige correspondent aux zones de dépressions et aux secteurs en périphérie des édifices ou des crans rocheux qui se retrouvent à l'abri (Fortier *et al.*, 2003; Bouchard, 2005). Par conséquent, peu importe l'orientation de l'infrastructure, des accumulations de neige sont à anticiper du côté de l'infrastructure non-exposé aux vents dominants, car l'énergie de transport y est atténuée, ce qui favorise la sédimentation. Sur une base mensuelle et interannuelle, les caractéristiques des congères (largeur et hauteur) sont très variables et dépendent du régime de précipitation nivale et de régime éolien (orientation et vitesse) au courant de l'hiver.

Les conditions d'enneigement en périphérie des pistes d'atterrissage ont un impact important sur le régime thermique du pergélisol. Afin d'étudier cette relation, Allard *et al.*, (2007) ont réalisé une série d'observations et de mesures d'épaisseur de neige sur le terrain à la fin de l'hiver le long de la piste de Tasiujaq. Dans cette étude, des relevés des épaisseurs de neige ont été réalisés le long de dix transects sur une distance comprise entre 15 et 25 m, en partant du pied du remblai et en s'éloignant graduellement de celui-ci. Par la suite, pour quatre de ces transects, trois enregistreurs autonomes de température ont été placés directement sous la surface de la couche organique et répartis du pied du remblai jusqu'à 10 à 20 m dans le terrain naturel. Leurs résultats ont clairement démontrés que là où les accumulations de neige sont les plus importantes, on observe également les températures les plus élevées en surface du sol. Par exemple, sur une base annuelle, une épaisseur de neige supérieure à 77 cm aux abords de la piste de Tasiujaq suffit pour rendre un bilan thermique annuel du sol positif, donc inapte à la préservation du pergélisol (Figure 16A).

À partir de leurs résultats, une relation logarithmique entre l'épaisseur du couvert de neige et la valeur du facteur-n de gel a été déterminée (Figure 16B). Cette relation se traduit par une diminution du facteur-n plus marquée pour les premiers centimètres d'accumulation de neige (début de l'hiver) pour ensuite décroître graduellement au fur et à mesure que le couvert nivale s'épaissit puis se densifie (fin de l'hiver). Par conséquent, sous un couvert de neige important, la surface du sol se trouve isolée des températures froides de l'air en hiver, ce qui vient modifier le régime thermique. La variation temporelle des conditions de surface en hiver, quoique certainement variable mais peu documentée, a été considérée dans les exercices de simulations numériques comme étant nulle. Par conséquent, un facteur-n constant en hiver (n_f), calculé par l'équation 6, est appliqué aux températures de l'air afin d'estimer celles à la surface du sol:

$$n_f = -0,424 \log z_{n \max} + 2,5254 \quad (11)$$

où $z_{n \max}$ correspond à l'épaisseur de neige maximale en centimètres mesurée ou estimée à la fin de l'hiver. Par exemple, pour une épaisseur maximale de 172 cm, le facteur-n calculé est de 0,34. Pour les

mesures de neige réalisées en février, celles-ci ont été augmentées d'environ 20 cm sans jamais dépasser le haut de talus du remblai de manière à correspondre le plus fidèlement possible à l'épaisseur de neige maximale atteinte à la fin de l'hiver. La période de fonte de la neige est estimée à quinze jours à partir du début de mai. Durant cette période, la valeur de n_f augmente graduellement jusqu'à atteindre sa valeur maximale qui est équivalente à celle de n_t .

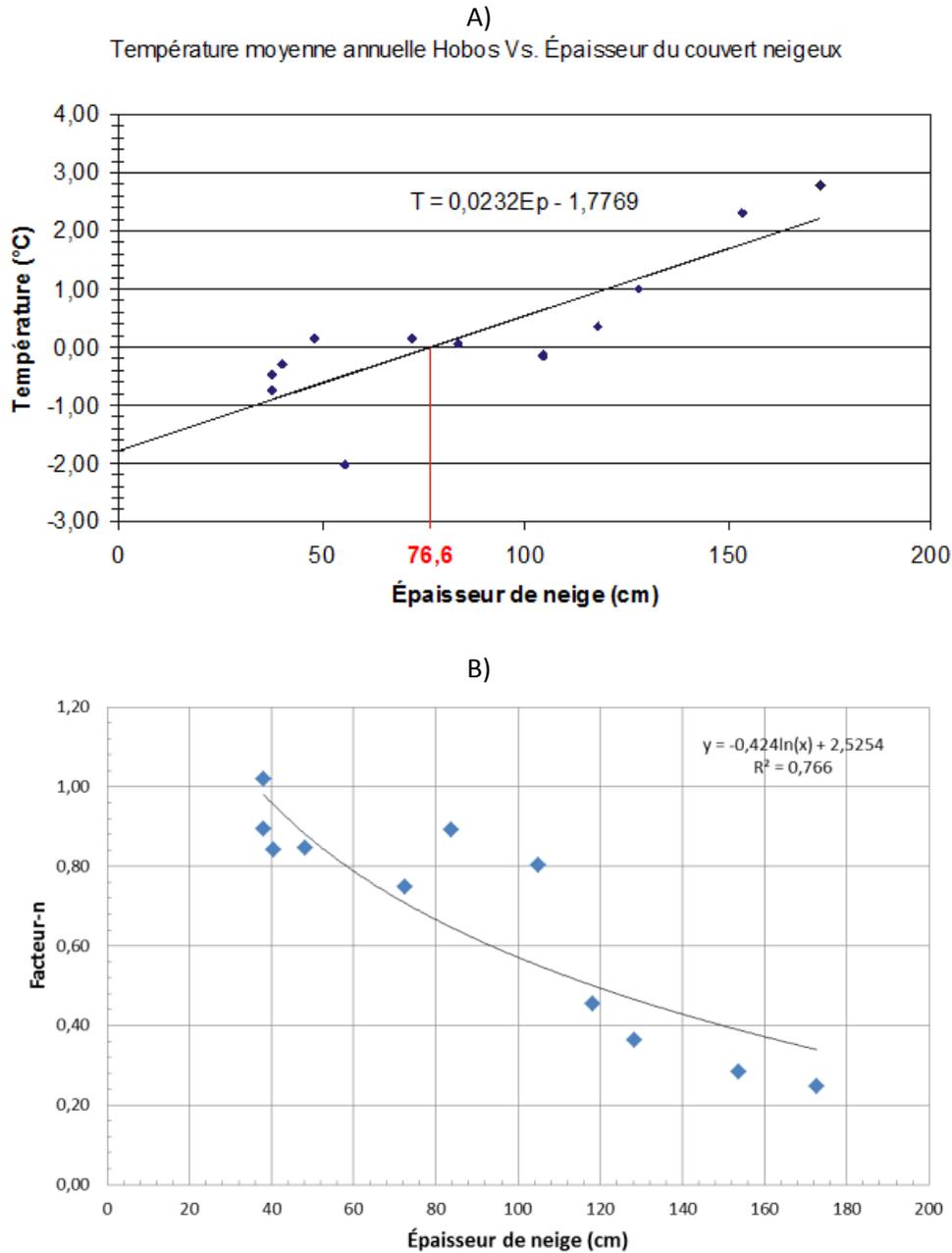


Figure 16: A) Température moyenne annuelle de surface versus l'épaisseur de neige en marge de la piste d'atterrissage de Tasiujaq (Tirée de Allard et *al.*, 2007). B) Relation logarithmique entre la valeur du facteur-n et l'épaisseur de neige d'après les mesures de Allard et *al.*, (2007).

3.4.1.3 ATTRIBUTION DES CONDITIONS LIMITES

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 17A). Ainsi, 3 zones principales ont été délimitées selon les matériaux de surface, la piste (zone 1), le pied de remblai (zone 2) et le terrain naturel (zone 3), puis subdivisées selon les conditions d'enneigement tirées de mesures sur le terrain lorsque disponibles ou estimées (1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 2c et 3). C'est à partir de ces conditions de surface spécifiques rencontrées en été et en hiver pour chaque zone et sous-zone, que les valeurs du facteur-n pour la saison de gel (n_f) et de dégel (n_t) ont été déterminées, soit par des valeurs tirées de la littérature (Tableau 7) ou des mesures de terrain.

C'est selon les conditions de surface propres à chaque zone que les températures de l'air provenant des projections climatiques ont été ajustées afin d'estimer les températures de surface qui alimenteront les simulations numériques du système pergélisol. Cette conversion s'applique en utilisant l'équation suivante sur les séries de températures de l'air :

$$TMJS_f(t) = TMJA_f(t) \cdot n_f \quad (12)$$

$$TMJS_t(t) = TMJA_t(t) \cdot n_t \quad (13)$$

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 $TMJA_t$ sont la température moyenne journalière de surface et de l'air en été. La figure 17B montre un exemple de conversion de la température de l'air en températures de surface par l'utilisation de facteurs-n saisonniers (n_f et n_t) caractéristiques des conditions de surface rencontrées selon la zone. Sur cette figure, les épaisseurs de neige plus importantes en pied de remblai et dans le terrain naturel isolent considérablement la surface du sol des froides températures de l'air ce qui modère son refroidissement. À l'opposé, une surface sans couverture nivale, comme le centre-piste, a une température de surface sensiblement équivalente à celle de l'air, ce qui favorise un refroidissement du pergélisol plus en profondeur. À l'été, les surfaces minéralisées ou revêtements d'asphalte présentent un facteur-n plus élevé comparativement aux surfaces végétalisées (Tableau 7) ce qui accroît leur température et favorise une progression rapide et de plus forte amplitude du front de dégel dans le sol. La figure 17C illustre l'influence la neige sur la température de surface en hiver. Plus la couverture nivale est importante, plus l'effet isolant de la neige se fait sentir sur les températures de surface.

Les conditions de surface pour les pistes sont considérées identiques aux températures de l'air en raison du déneigement constant des surfaces. Pour ce qui est des conditions aux limites des modèles en profondeur, elles représentent un flux géothermique équivalent 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 ($q = 0 \text{ W/m}^2$).

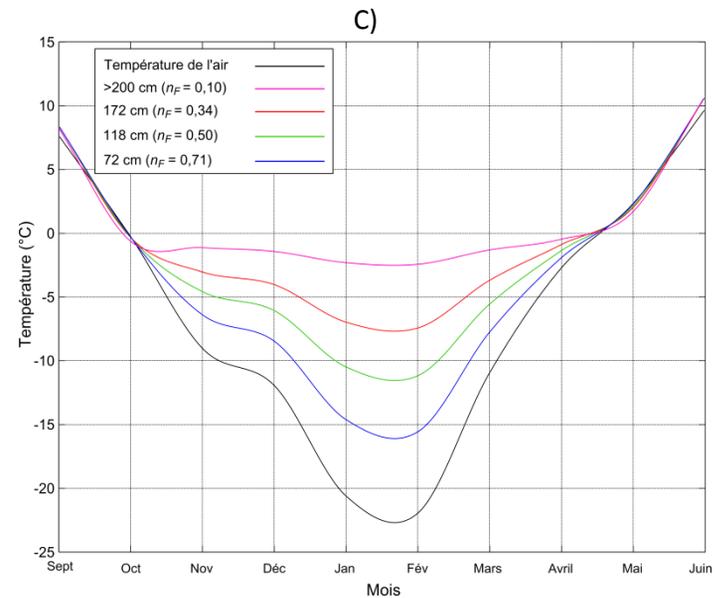
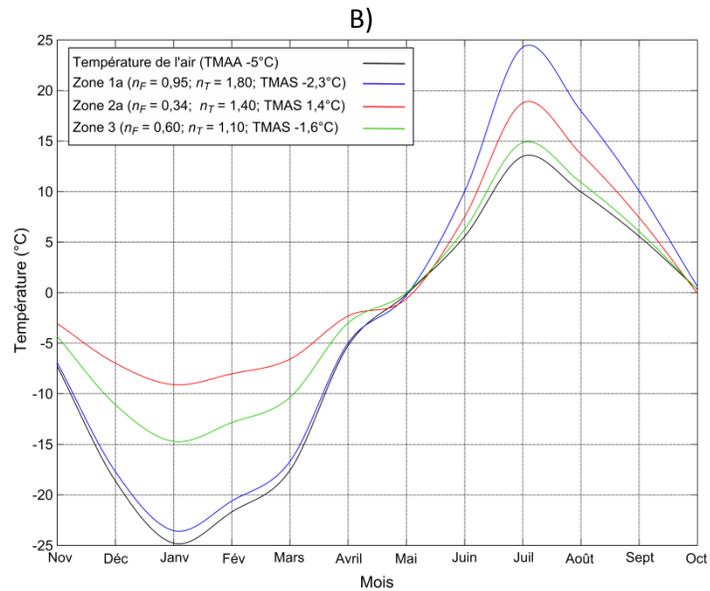
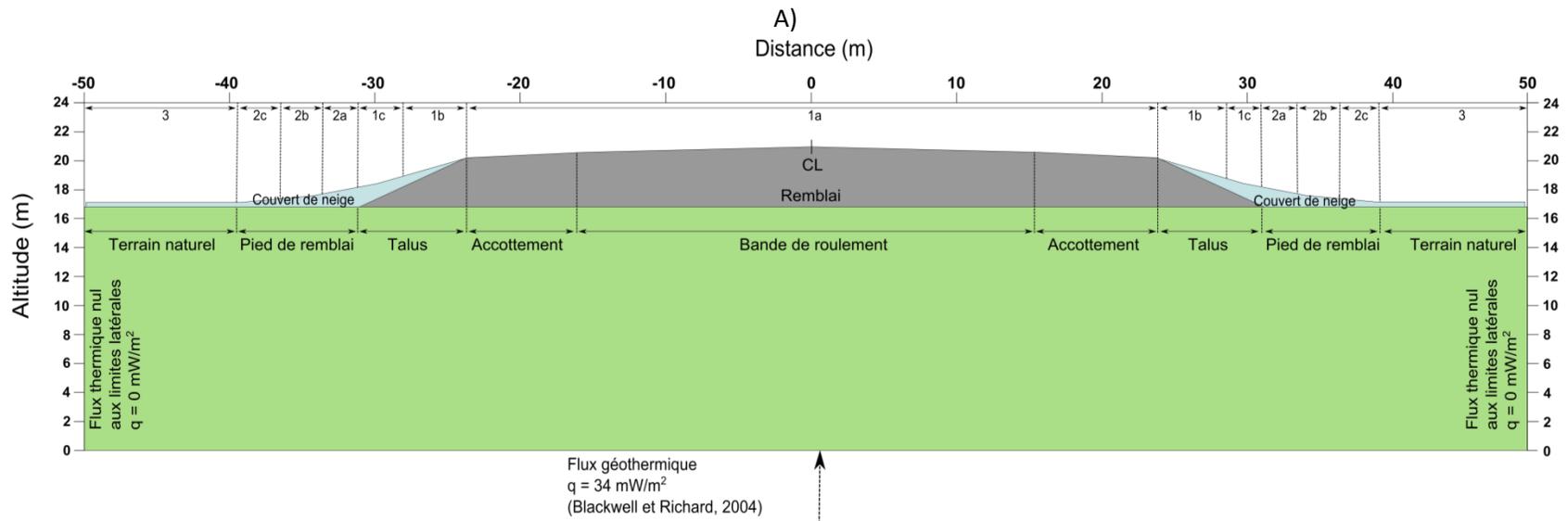


Figure 17 : A) Section type d'une piste d'atterrissage avec les différentes conditions de surface qui sont considérées dans les exercices de simulations numériques. B) L'influence des conditions de surface sur les températures superficielle du sol. C) L'influence de l'épaisseur de neige sur les températures de surface.

3.4.2 CALIBRATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES

Les simulations et les projections thermiques ont été effectuées à partir de colonnes quasi unidimensionnelles dans le but de réduire le temps de calcul par ordinateur. Les colonnes sont de largeurs réduites au minimum requis afin d'accommoder la quantité maximale de nœuds en surface (généralement 50 cm de largeur pour des nœuds aux 25 cm). Les dimensions en profondeurs des différentes simulations varient selon la nature du problème à traiter et des données de forages disponibles. La distance entre les nœuds qui divisent le modèle est de 0,25 m près de la surface et augmente graduellement en fonction de la profondeur sans excéder 1 m. Cette géométrie verticale du maillage utilisée lors de simulation quasi unidimensionnelles a également été utilisée lors des simulations bidimensionnelles.

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). Les contenus en eau volumétriques et la granulométrie ont été établis pour les couches de sol respectives en se basant sur les données répertoriées dans les rapports de forage (Allard *et al.*, 2009; L'Hérault *et al.*, 2009). Les contenus en eau liquide sous le point de congélation ont été considérés en fonction des classes granulométriques préprogrammées dans le logiciel TEMP/W.

Pour ce qui est des conditions limites de surface lors de la calibration, les modèles sont forcés par des températures de l'air enregistrées localement. Pour chacun des cas étudiés, le modèle est calibré à partir des données enregistrées à l'emplacement exact ou à proximité du site. Ces données disponibles permettent, dès le départ de la calibration, de contraindre les modèles à adopter un profil thermique qui s'apparente à ceux observés. Selon le comportement thermique du modèle par rapport aux variations climatiques de surface ou de l'air, les propriétés thermiques (conductivité thermique) estimées sont réajustées en prenant soin de demeurer à l'intérieur d'une gamme de valeurs plausibles pour un type de dépôts donnée. Des exercices de simulation à plus long terme, sur une période vingt ans, utilisant les données du *North American Regional Reanalysis* (NARR) (Mesinger *et al.*, 2006) et des données observées comme intrants, montrent une très bonne réplique des profondeurs de dégel maximales annuelles, sans dérive thermique du modèle. Ce type d'analyse a permis de valider la calibration et la constance du modèle dans le temps.

Les exercices de modélisation répliquent généralement, avec une marge d'erreur acceptable, l'épaisseur de la couche active observée aux différents sites. Malgré leur capacité à simuler adéquatement la réponse thermique d'un sol à un stimulus d'ordre climatique, les modèles restent une schématisation de la réalité où la stratigraphie et les propriétés thermiques des sols qui les définissent n'en demeurent pas moins simplifiées. Cette simplification de la réalité, où l'attribution des propriétés thermiques des sols est basée sur des mesures en laboratoire et des calculs théoriques et où l'intégration de la variabilité spatiale et temporelle des variables climatiques et environnementales locales (précipitations, écoulement d'eau, couverture nivale) est déficiente, demeure une source d'incertitude, particulièrement dans les modèles en deux dimensions où l'influence latérale des transferts de chaleur peut avoir des impacts sur les résultats.

4 RÉSULTATS :

Dans le présent rapport, chaque aéroport est présenté individuellement suivant la séquence chronologique des visites effectuées par l'équipe technique du Centre d'études nordiques (CEN) et du Groupe de recherche en ingénierie des chaussées (GRINCH). Pour chaque aéroport, un portrait des déficiences qui affectent l'infrastructure est dressé et s'accompagne d'une description exhaustive des composantes physiques du milieu telles que la répartition des unités géologiques de surface et leurs propriétés géotechniques, les conditions de pergélisol, l'enneigement et le drainage. Toutes ces informations sont intégrées à l'intérieur de planches synthèses qui définissent les paramètres de l'environnement physique dans lequel évoluent les infrastructures. Ce mode d'intégration de l'information géoscientifique a permis de poser un diagnostic sur les causes de la dégradation actuelles du pergélisol et d'évaluer sa sensibilité en réponse aux changements climatiques anticipés. C'est à partir de cette évaluation que des stratégies d'adaptation à court, moyen et long terme en vue de limiter la dégradation du pergélisol sous et en périphérie des infrastructures existantes ont été développées.

4.1 UMIUJAQ

4.1.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

Dans cette communauté, les travaux d'investigations géotechniques visaient essentiellement la route d'accès à l'aéroport. La surface profilée de la route d'accès mesure 2012 m de longueur, du chaînage 1+000 m (extrémité nord) à 3+012 m (extrémité sud, au terminal de l'aéroport) et 8 m de largeur. En 2008, des affaissements importants étaient observables le long de cette route d'accès (Figure 18A et B). Ces tassements du sol, en plus de rendre la circulation hasardeuse, altéraient considérablement l'efficacité des ponceaux sous la route en modifiant les profils d'écoulement (Figure 18C). Le remblai épais de la route, en agissant comme une barrière, favorise l'accumulation de neige sur les talus et au pied du remblai en hiver (Figure 18D) contribuant ainsi au réchauffement du profil thermique du sol et la dégradation du pergélisol.



Figure 18: A) et B) Tassements différentiels le long de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq liés à la dégradation du pergélisol, été 2008. C) Ponceau déformé suite aux tassements. D) Accumulation de neige de chaque côté du remblai en date du 30 avril 2007 (Tirée de Fortier et Bolduc, 2008).

La route présente une série de longues dépressions dans les sections qui reposent sur les dépôts meubles. Des relevés de nivellement effectués par le personnel du MTQ montrent que la route s'est affaissée de 6,3 cm entre 2005 et 2006 à l'emplacement de la plaque de tassement. Entre 2007 et 2008,

l'infrastructure n'a pas été visitée par le personnel du MTQ et suite au pavage de la route d'accès en 2009, la plaque n'est plus utilisable, ce qui explique l'absence de données de tassement entre 2007 et 2009. En 2006, un nivellement de la route entre les chaînages 2+300 et 2+600 a été réalisé par Fortier et Bolduc (2008). Le nivellement de cette section de la route a ensuite été comparé avec les valeurs d'altitudes initiales de l'infrastructure extraites des plans « tels que construit » du Ministère des Transports du Québec (1991). Les tassements ainsi calculés entre la date de construction (1991) et la date du relevé (2006) peuvent atteindre des valeurs aussi élevées que -0,63 m avec un volume total de tassement près de 527 m³ pour le remblai de route de 7,4 m de largeur (Fortier et Bolduc, 2008). Des mesures de nivellement récentes effectuées par Fortier et *al.* (2011) sur la même section de route suggèrent des valeurs de tassements aussi élevées que -0,85 m pour la période 1991 à 2009. Cette même étude estime que le volume de tassement est passé de 527 m³ en 2006 à 766 m³ en 2008, soit une augmentation de près de 240 m³ sur une période de 2 ans.

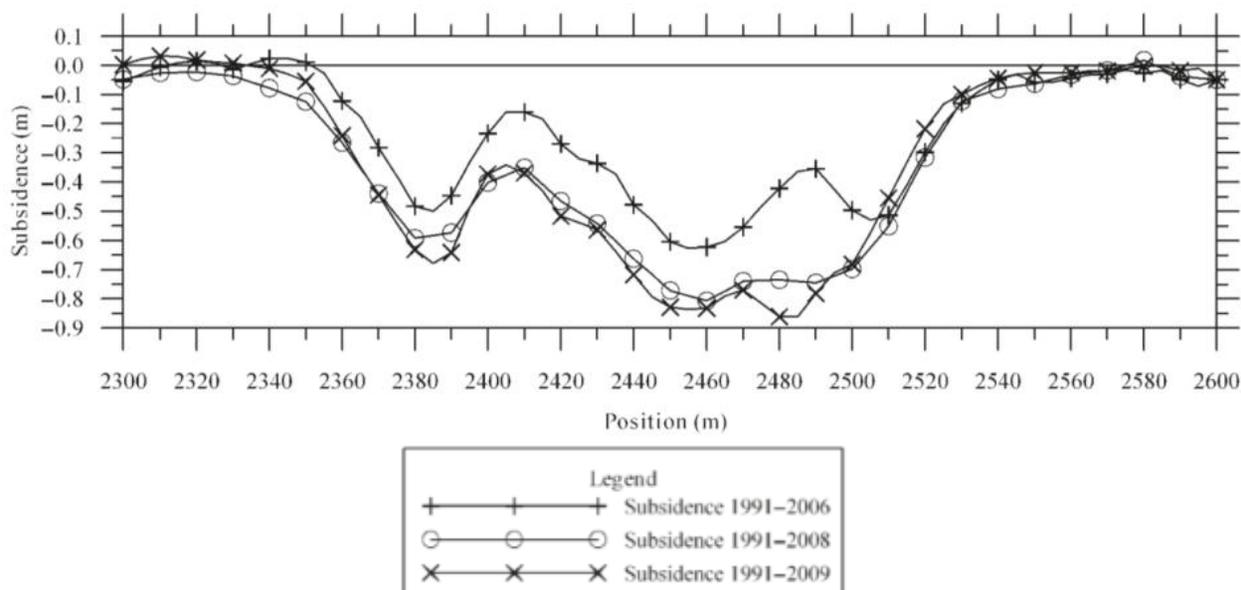


Figure 19: Tassement au dégel de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq pour la période de 1991 à 2006, 2008 et 2009 (tirée de Fortier et *al.*, 2011).

Outre le tassement, le personnel du MTQ a relevé et documenté (longueur, largeur, profondeur) sept dépressions le long de la route d'accès entre 2005 et 2006. En 2005, les dépressions avaient une longueur comprise entre 7 et 30 m et une largeur de 9 m, soit la largeur totale de l'infrastructure. En 2006, ces dépressions se sont agrandies considérablement pour atteindre une longueur, pour la majorité, près de deux fois supérieure à celles mesurées en 2005. À l'été 2009, un profilage de la route a été effectué afin de combler en partie les dépressions en vue de recevoir un revêtement d'asphalte. Toutefois, compte tenue de l'ampleur de certaines dépressions, la surface de la route est restée ondulée. Le pavage récent de la route risque d'accélérer la fonte du pergélisol riche en glace sous l'infrastructure. L'implantation en 2009 de dix clous de références sur le pavage de la route permettra d'assurer un suivi des tassements dans les années à venir.

4.1.2 RÉPARTITION SPATIALE, ÉPAISSEUR ET PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DES UNITÉS GÉOLOGIQUES DE SURFACE

D'après la carte des unités géologiques de surface (Figure 20), la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq repose sur trois types d'unités géologiques de surface soit sur : des sédiments éoliens sur sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Ed/Gs), des sédiments pré littoraux minces sur sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Mb/Gs) ou sur des affleurements rocheux (R). L'une des sections de la route qui est grandement affectée par des tassements différentiels traverse une dépression topographique comblée par des dépôts meubles. Cette dépression est délimitée au nord et au sud par des affleurements rocheux. Cette dépression débute aux environs du chaînage 2+330 m à son extrémité nord et se termine au chaînage 2+550 m à son extrémité sud. Un seul forage a été réalisé le long de la route, précisément à l'intérieur de cette dépression. Ce forage a été nommé UMI_F1 et est situé au chaînage 2+472, sur le côté est de la route à moins de 3 mètres du pied du remblai. Ce forage a atteint une profondeur totale de 8,56 m et révèle que l'épaisseur des dépôts meubles sur le roc peut atteindre par endroits plus de 8 mètres.

À l'été 2006, cette section de la route affectée par des dépressions majeures a fait l'objet d'une investigation géophysique approfondie effectuée par Fortier et Bolduc (2008). Des levés de géoradar ont été réalisés entre les chaînages 2+300 et 2+600 au centre de la route ainsi que sur le terrain naturel à 10 m du pied du remblai sur le côté ouest. Un profilage de résistivité électrique a également été réalisé sur le terrain naturel à l'emplacement du levé de géoradar. Les résultats et interprétations de cette investigation géophysique sont présentés à la figure 21.

Suite à la campagne de forage de 2008 au cours de laquelle un forage fut réalisé au centre de cette zone problématique, soit au chaînage 2+472, une réévaluation des interprétations des relevés géophysiques fut réalisée à la lumière des informations stratigraphiques et géotechniques acquises lors du forage. Cette nouvelle interprétation diffère considérablement de celle initialement produite par Fortier et Bolduc (2008) qui, en l'absence de forage, avaient mal associés les principaux réflecteurs aux différents contacts stratigraphiques et par conséquent, présentait une évaluation erronée des épaisseurs des unités géologiques de surface. Toutefois, une réinterprétation du même levé géoradar a récemment été réalisée par Fortier et *al.* (2011) après qu'ils eurent procédé à une vérification supplémentaire par essai de pénétration au cône (Figure 21); cette interprétation concorde désormais avec celle de la présente étude présentée à la figure 22.

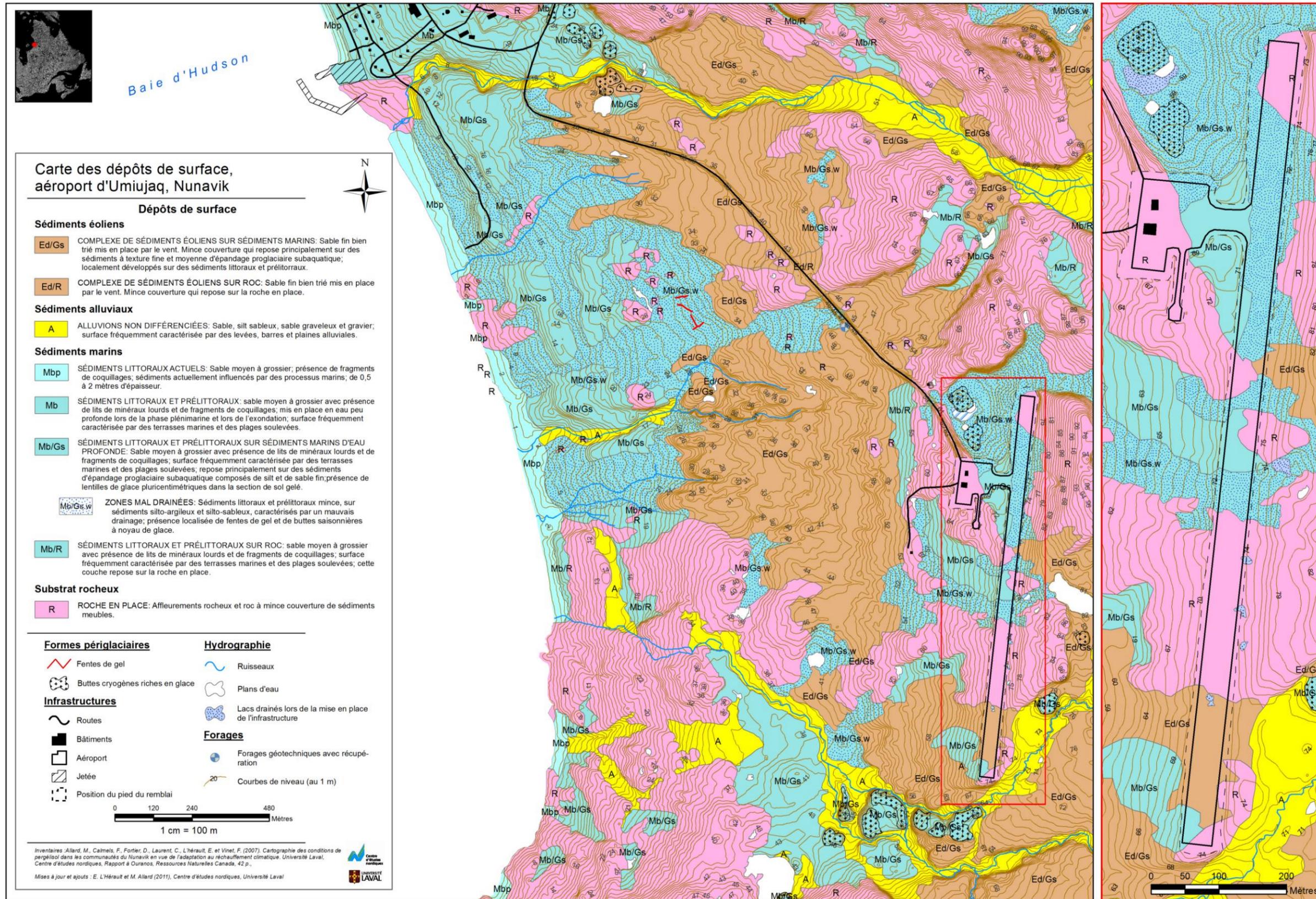


Figure 20 : Carte des dépôts de surface d'Umiujaq.

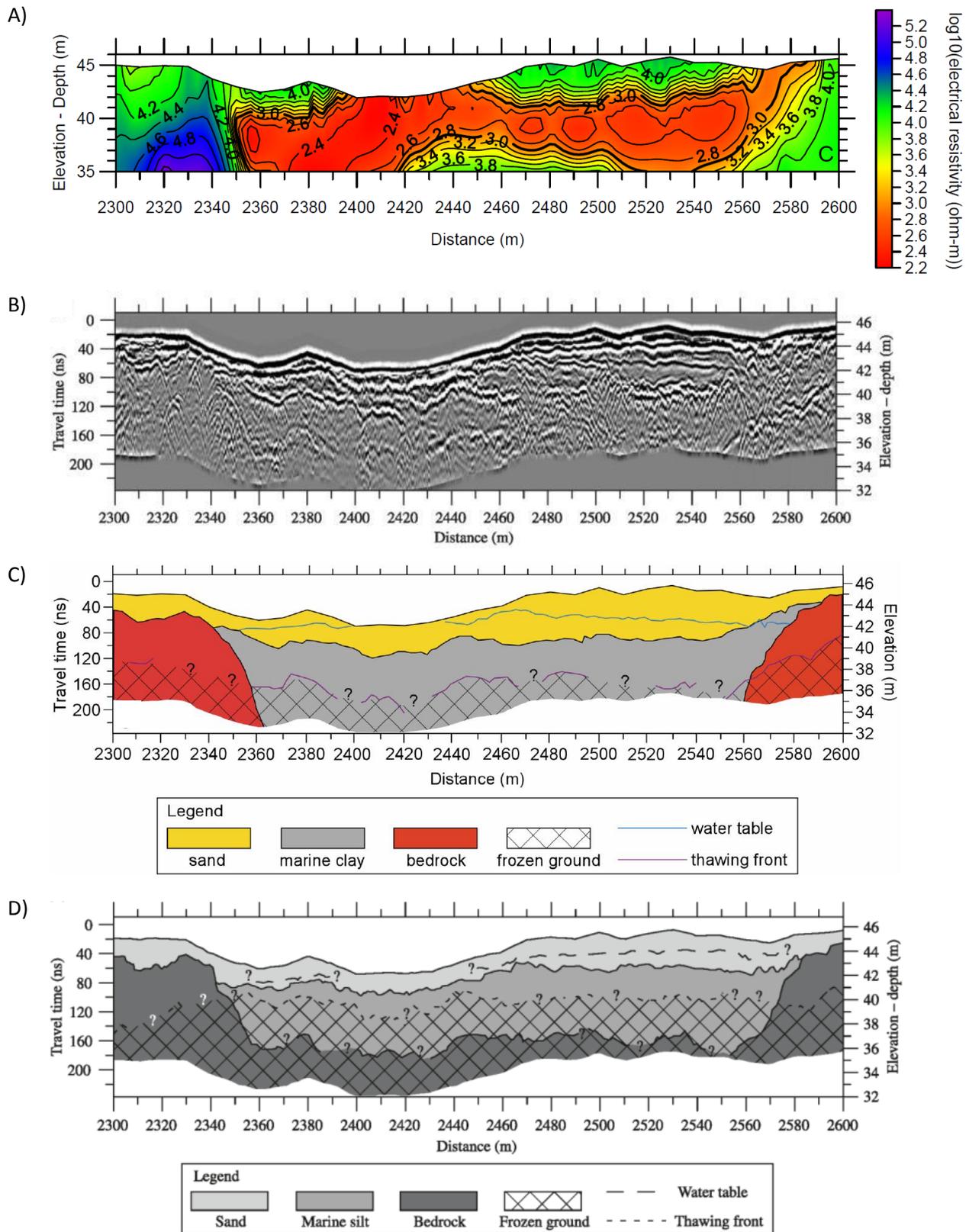
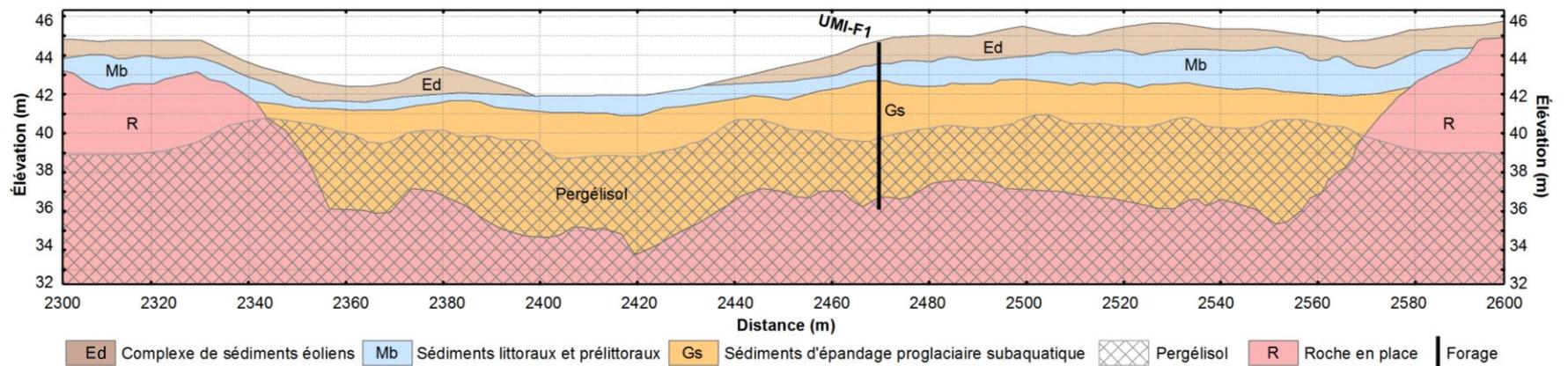


Figure 21 : Modèle de résistivité électrique (A), levé de géoradar de 100 MHz (B) et unités géologiques de surfaces interprétées (C) pour le terrain naturel entre les chaînages 2+300 et 2+600 de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq (Tirée de Fortier et Bolduc, 2008). Réinterprétation du même levé géoradar par Fortier et al. (2011).



Unité géologique	Classe USCS	Description	Photos	Teneur en eau
Ed	SP	Sable fin très bien trié de couleur beige avec traces d'oxydation. Peu ou pas de particules fines. Profondeur : -0,04 à -1,10 m		<p>UMI_F1 Teneur en eau vs profondeur</p>
Mb	SP	Sable moyen à grossier de couleur beige avec traces d'oxydation et présence de lits de minéraux lourds et quelques fragments de coquillages à la base de l'unité. Peu ou pas de particules fines. Profondeur : -1,10 à -2,40 m		
Gs	SC-CL	Dépôt à grains fins composé principalement d'argile silteuse et de sable fin avec traces de sable plus grossier. La fraction fine argileuse est de plasticité faible à moyenne. Profondeur : -2,40 à -7,98 m. Présence de lentilles de glace pluri-centimétriques sub-horizontales en alternance qui peuvent atteindre 2 à 4 cm d'épaisseur entre -4,89 et -7,40 m. Couche massive de glace entre -5,20 et -5,35 m qui pourrait correspondre au plafond actuel du pergélisol. On observe à la base de cette unité une alternance de lits de silt avec des lits de sable moyen à grossier.	 	
R	n.a	Socle rocheux : Basalte Profondeur : -7,98 m		

Figure 22 : Coupe géologique en bordure de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq produite suite à l'intégration des informations stratigraphiques du forage UMI-F1 et la réinterprétation des levés géophysiques provenant de Fortier et Bolduc (2008).

4.1.2.1 COMPLEXE DE SÉDIMENTS ÉOLIENS SUR SÉDIMENTS D'ÉPANDAGE PROGLACIAIRE SUBAQUATIQUE (ED/Gs)

À l'exception des deux extrémités construites respectivement sur : des sédiments pré littoraux minces sur sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Mb/Gs) (extrémité nord) et sur le socle rocheux (R) (extrémité sud), la majorité de la route d'accès repose sur des sédiments éoliens d'une épaisseur moyenne d'environ un mètre. Ce type de dépôt recouvre généralement les sédiments littoraux et pré littoraux sous lesquelles on retrouve les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique composés essentiellement de sable fin et silt. À l'occasion, généralement en périphérie des affleurements rocheux, ces sédiments éoliens reposent directement sur le roc.

Comme le témoigne l'analyse granulométrique, le dépôt éolien est composé de sable moyen à fin très bien trié dont 90 % des particules ont un diamètre compris entre 0,2 et 1 mm. D'après la classification USCS, ce type de dépôt consiste en un sable uniforme avec peu ou pas de particules fines (SP). Plusieurs mesures de teneurs en eau montrent que le matériel sableux en surface est bien drainé avec une teneur en eau de 12,9 % mesurée entre 1 et 1,1 m. Malgré l'excellente stabilité au dégel et son faible potentiel de ségrégation de la glace, ce type de dépôt, par sa position stratigraphique superficielle et son épaisseur souvent trop limitée (habituellement inférieure à celle de la couche active) ne contribue pas à la stabilité de l'infrastructure.

4.1.2.2 COMPLEXE DE SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR SÉDIMENTS D'ÉPANDAGE PROGLACIAIRE SUBAQUATIQUE (MB/Gs)

Les sédiments littoraux et pré littoraux consistent en un sable moyen à grossier à l'intérieur duquel on distingue la présence de lits de minéraux lourds et des fragments de coquillages. En surface, ce type de dépôt est fréquemment caractérisé par des terrasses marines et des plages soulevées. Remanié par l'action du vent, ce type de dépôt constitue la source de sable primaire pour l'édification des complexes éoliens qui le recouvrent par endroits. Dans la région d'Umiujaq, ce dépôt consiste en une couverture relativement mince comprise entre 1 et 2 mètres d'épaisseur sous lequel se retrouvent les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique. Les secteurs à mince couverture de sédiments littoraux sur les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique sont souvent mal drainés et il est fréquent d'y retrouver des buttes saisonnières à noyau de glace (*frost blister*), là où des suintements se poursuivent en hiver, comme c'est le cas dans le territoire compris entre le littoral et la route d'accès à l'aéroport.

Ce dépôt est également assez bien trié et majoritairement composé de sable moyen à grossier. Les teneurs en eau sont relativement faibles et sont légèrement supérieures à celles mesurées dans les sédiments éoliens. Au même titre que les sédiments éoliens, ce type de dépôt se caractérise selon la classification USCS comme étant un sable uniforme avec peu ou pas de particules fines (SP) qui est stable au dégel et peu propice au développement de lentilles de glace de ségrégation. En raison de sa position stratigraphique superficielle ainsi que sa faible épaisseur sur les sédiments marins d'eau profonde, ce dépôt ne contribue pas à la stabilité de l'infrastructure car la profondeur du dégel actuel surpasse son épaisseur.

4.1.2.3 SÉDIMENTS D'ÉPANDAGE PROGLACIAIRE SUBAQUATIQUE (Gs)

D'après la disposition stratigraphique des différentes unités géologiques de surface (Figure 22), les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique repose sous les sédiments éoliens et littoraux à des profondeurs généralement inférieures à 2,5 m. L'épaisseur de ce dépôt est variable, mais peut facilement atteindre des valeurs comprises entre 6 et 8 m.

À partir d'échantillons extraits du forage UMI-F1, plusieurs analyses granulométriques ont été effectuées à diverses profondeurs à l'intérieur de ce dépôt à grains fins; elles révèlent qu'il est principalement composé de silt et de sable moyen à fin. La proportion des particules fines (<0,075 mm ou 75 microns) occupe entre 45 et 72 % de la composition, tandis que la proportion de sable moyen à fin varie entre 55 et 28 %. Quelques lits de sédiments plus grossiers se retrouvent ici et là et se distinguent par une composition granulométrie bien différente marquée par une proportion de sable et de gravier plus importantes aux dépens de la fraction plus fine. D'après les résultats des essais de consistance (Annexe, Tableau 38), ce type de sédiment est considéré comme un mélange de sable et d'argile inorganique de plasticité faible à moyenne (SC-CL).

À la date de réalisation du forage, soit le 19 juillet, le front de dégel a été rencontré à une profondeur de 4,89 m. Dans la partie du sol gelée, d'importantes quantités de glace sous forme de lentilles pluricentimétriques ont été observées et celles-ci peuvent atteindre jusqu'à 6 cm d'épaisseur. Le plafond actuel du pergélisol, selon nos estimations, se situerait autour de 5,20 m de profondeur et se caractérise par une importante couche de glace massive de plus de 15 cm d'épaisseur. La section du dépôt à grains fins qui est dégélée présente des teneurs en eau qui oscillent entre 22 et 30 %, tandis que la section gelée affiche des teneurs en eau très élevées qui oscillent entre 40 et 70 % et qui peuvent même atteindre des valeurs aussi élevées que 136 %. Ces teneurs en eau très élevées mesurées dans le pergélisol s'expliquent par la présence de nombreuses lentilles de glace de ségrégation réparties en alternance à travers ce dépôt.

D'après la carte des dépôts de surface produite (Figure 20), la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq repose directement ou indirectement presque en totalité sur ces dépôts meubles riches en glace à l'exception des quelques endroits où celle-ci trouve assise soit sur des affleurements rocheux ou des dépôts éoliens mince sur roc.

4.1.3 CONDITIONS THERMIQUES DU PERGÉLISOL

4.1.3.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : PÉRIODE 1990-2010

Dans la région d'Umiujaq, seulement un câble à thermistance installé dans un affleurement rocheux près de l'extrémité ouest de la piste permet d'informer sur les caractéristiques thermiques du pergélisol de la région. D'une longueur de 20,5 m, le câble indique que la couche active dans les basaltes atteint actuellement une épaisseur de près de 18 m (Allard *et al.*, 2007). En raison de la faible teneur en glace du substrat rocheux, essentiellement limitée aux fractures, l'approfondissement de la couche active dans le roc ne devrait pas causer de tassement. Toutefois, ce sont les dépôts à granulométrie plus fine, tels que les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique, qui présentent les teneurs en glace les plus élevées. Ayant une conductivité thermique plus faible et une chaleur spécifique plus élevée que le roc, l'épaisseur de la couche active à l'intérieur des dépôts fins est moins importante.

Au cours de l'investigation géotechnique réalisée au mois d'août 1990, soit un an avant la construction de la route d'accès, les forages à la cuillère fendue aux chaînages 2+416 et 2+496 (MTQ, 1991) ont atteint le front de dégel dans l'unité de sable moyen à grossier (Mb, USCS :SP) à une profondeur respective de 0,6 et 1,6 m. Les positions du front de dégel rencontrées suggèrent une épaisseur de la couche active avant la construction de quelques décimètres supplémentaires, soit comprise entre 0,8 et 1,8 m.

Lors de la réalisation du forage UMI-F1 au mois de juillet 2008, le front de dégel se situait à 4,89 m. La présence d'une couche massive de glace entre 5,2 et 5,35 m de profondeur laisse présumer que le plafond du pergélisol se trouve actuellement autour de 5,2 m. Un essai de pénétration au cône, réalisé par Fortier et al. (2011) au mois de juillet 2008 au chaînage 5+506 à 10 m à l'ouest du pied de remblai,

suggère une position du front de dégel autour de 5,7 m sous lequel les sédiments encore gelés sont surconsolidés et contiennent des lentilles de glace. À partir de ces observations, l'épaisseur maximale de la couche active à l'endroit de cet essai est estimée à près de 6 m d'épaisseur.

D'après ces observations ponctuelles, une augmentation de la couche active en pied de remblai de près de 4 m s'est produite depuis la construction de la route entraînant le dégel de plus de 3 m d'argile silteuse potentiellement riche en glace. Cette augmentation considérable de la couche active explique l'ampleur des tassements qui affectent présentement la route et qui, par endroits, atteignent près de 0,85 m (Fortier et Bolduc, 2008; Fortier *et al.*, 2011). Les simulations numériques effectuées par Fortier *et al.* (2011) indiquent aussi que la cause première de la dégradation du pergélisol est l'enneigement important des deux côtés de la route qui se produit année après années.

4.1.3.2 ÉVOLUTION FUTURE : PÉRIODE 2010-2050

4.1.3.2.1 CALIBRATION

Un modèle de simulation numérique bidimensionnel a été construit afin de simuler le régime thermique dans le remblai et dans le sol sous une portion transversale de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq (Figure 23). Située au chaînage 2+470 m, cette section transversale mesure 40 m de longueur, soit 20 m de part et d'autre du centre-ligne de la route, et s'étend jusqu'à une profondeur de 50 m. Les informations stratigraphiques récupérées au forage UMI_F1 ont été utilisées pour configurer les paramètres du modèle, dont les propriétés physiques attribuables à chacune des unités stratigraphiques sont similaires à celles utilisées par Fortier *et al.*, (2011) et sont présentées au tableau 8. Les facteur-n de gel et dégel appliqués à chacune des zones du modèle (Figure 23) apparaissent également au tableau 8. Une fois paramétré, le modèle a été mis en équilibre avec une température moyenne annuelle de l'air (TMAA) de -4,8 °C, dont le cycle annuel suit une courbe sinusoïdale parfaite. Cette valeur tirée de Fortier *et al.*, (2011) correspond à la TMAA à Umiujaq pour la période de référence 1960-1990. Dans cet exercice de simulation, la zone occupée par le remblai a été exclue et la couche de neige gardée uniforme sur l'ensemble de la surface du modèle afin de représenter le régime thermique du sol à ses « conditions initiales », c'est-à-dire sans remblai. Les conditions géothermiques initiales obtenues, présentées à la figure 24A, sont utilisées comme point de départ dans les exercices de simulation subséquents auxquelles les différentes composantes telles que l'infrastructure, l'enneigement et le réchauffement des températures de l'air ont été graduellement intégrées. L'absence de données géothermiques en continu dans les dépôts meubles à proximité de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq limite toutefois la calibration du modèle ainsi que l'évaluation de sa capacité à reproduire les conditions géothermiques actuelles. Par conséquent, les résultats des exercices de modélisations qui sont présentés doivent être considérés avec prudence.

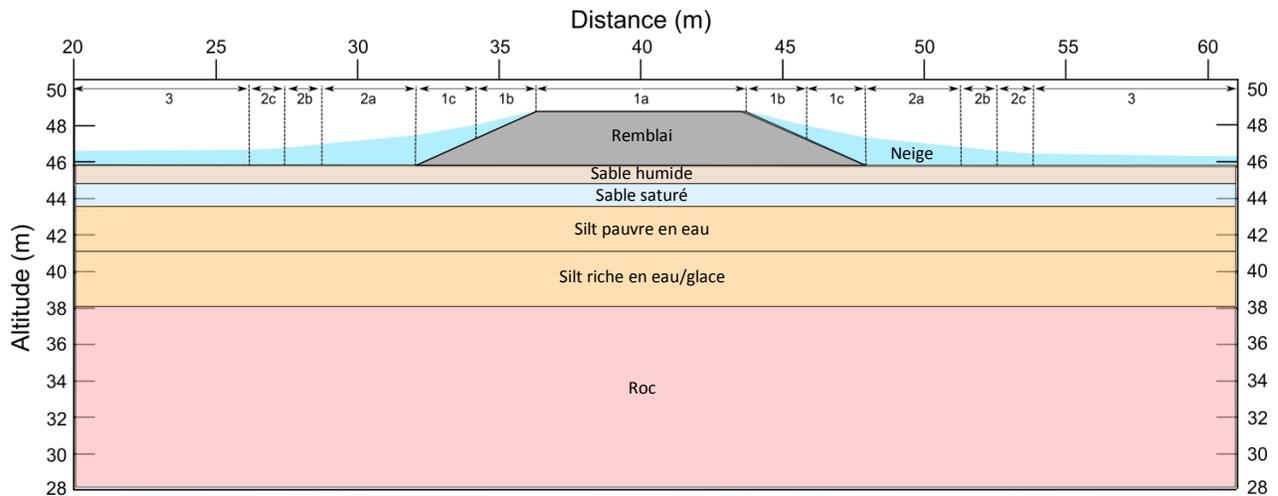


Figure 23: Modèle numérique bidimensionnel pour une section transversale de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq montrant la stratigraphie et les différentes conditions de surface utilisées dans les exercices de simulations numériques. Le chiffre entre les flèches réfère aux zones dont les conditions de surface sont présentées au tableau 8.

Tableau 8: Propriétés physiques programmées dans le modèle bidimensionnel de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq. Les paramètres climatiques et conditions de surface pour chaque exercice de simulation numérique y sont également présentés.

chaînages 2+470 (forage UMI_F1)								
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)		
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé			
3 à 0	Remblai	1870	2000	186,62	185,76	0,075		
0 à -1,15	Sable humide	1720	2070	129,96	129,96	0,19		
-1,15 à -2,40	Sable saturé	2030	2770	233,28	155,52	0,25		
-2,40 à -5,20	Silt pauvre en eau	2030	2790	210	120	0,25		
-5,20 à -7,98	Silt riche en eau/glace	1900	3000	230	130	0,68		
-7,98 à -47,00	Roc	1340	1340	192,67	192,67	0		
Facteurs-n de gel et dégel associés aux différentes conditions de surface								
	Zones	1a	1b	1c	2a	2b	2c	3
Conditions initiales : Sans remblai, TMAA de -4,8°C et couverture de neige mince et uniforme								
	Facteur n gel	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	Facteur n dégel	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
1 ^{er} exercice : Avec remblai, TMAA de -4,8°C et couverture de neige mince et uniforme								
	Facteur n gel	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	Facteur n dégel	1,85	1,4	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1
2 ^e exercice : Avec remblai, TMAA de -4,8°C et couverture importante de neige des deux côtés du remblai								
	Facteur n gel	0,95	0,71	0,2	0,2	0,51	0,61	0,71
	Facteur n dégel	1,85	1,4	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1
3 ^e exercice : Avec remblai, TMAA de -2,5°C et couverture importante de neige des deux côtés du remblai								
	Facteur n gel	0,95	0,71	0,2	0,2	0,51	0,61	0,71
	Facteur n dégel	1,85	1,4	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1
4 ^e exercice : Avec remblai, TMAA projetées par la sortie climatique AHA et couverture importante de neige des deux côtés du remblai								
	Facteur n gel	0,95	0,71	0,2	0,2	0,51	0,61	0,71
	Facteur n dégel	1,85	1,4	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1

4.1.3.2.1 PROJECTIONS ET TASSEMENTS À VENIR

Au total, quatre exercices de simulation numériques ont été réalisés. Le premier exercice vise à évaluer l'impact de la présence d'un remblai sur le régime thermique du pergélisol. Pour ce faire, un remblai a été ajouté au modèle qui a servi à reproduire les conditions initiales (Figure 24A). Par la suite, le modèle a roulé pendant 6500 jours (\approx 18 ans) avec une TMAA de $-4,8$ °C et une couverture de neige mince et uniforme sur toute la surface en hiver (Tableau 8). Les résultats de cet exercice sont présentés à la figure 24B. Sur cette figure, le régime thermique dans et sous le remblai à la fin de l'été (1^{er} octobre), soumis à des conditions climatiques et d'enneigement stables pour une période de 18 ans, s'est ajusté avec la nouvelle géométrie du terrain et les nouvelles conditions de surface. Ainsi, le plafond du pergélisol est remonté légèrement sous la route, comportement anticipé lors du dimensionnement de remblai en zone de pergélisol et qui permet d'assurer stabilité à l'ouvrage. Cette remontée du plafond du pergélisol est proportionnelle à l'épaisseur de matériel ajouté sur le sol naturel. Malheureusement, malgré un dimensionnement du remblai jugé adéquat pour prévenir un dégel du pergélisol, la simple présence de celui-ci vient modifier d'une part le drainage des eaux de surface et d'autre part la dynamique d'enneigement. Par exemple, dans le cas de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq, le remblai épais agit à titre de clôture à neige ce qui favorise l'accumulation de neige de chaque côté (Figure 18D). Ces conditions particulières d'enneigement en périphérie de l'infrastructure réchauffent le profil thermique du pergélisol et favorisent la pénétration du front de dégel à des profondeurs plus importantes au cours de l'été suivant (Zhang *et al.*, 1996; Zhang *et al.*, 1997; Zhang et Stamnes, 1998). Fréquemment, l'ignorance ou la sous-estimation de l'influence de l'enneigement sur le régime thermique du pergélisol lors du design empêche l'infrastructure d'atteindre les conditions de stabilité thermique initialement souhaitées.

À cet effet, le deuxième exercice vise à quantifier l'effet de l'enneigement sur le régime thermique du pergélisol. Au cours de cet exercice, l'enneigement préférentiel de part et d'autre de la route s'ajoute à la liste des variables considérées dans l'exercice de simulation numérique précédent. Conséquemment, un remblai a été ajouté au modèle des conditions initiales (Figure 24A) qui a, par la suite, roulé pendant 6500 jours (\approx 18 ans) avec une TMAA de $-4,8$ °C et une couverture importante de neige des deux côtés du remblai. Les facteurs-n utilisés sont ceux correspondants aux conditions d'enneigement documentées par Fortier *et al.*, (2011) et apparaissent au tableau 8. Comme en témoigne la figure 24C, l'impact de cette accumulation de neige sur le régime thermique du pergélisol est significatif. En effet, pour une même température annuelle de l'air de $-4,8$ °C, la position du front de dégel est plus profonde tant sous l'infrastructure qu'en pied de remblai comparativement à celle obtenue dans l'exercice précédent (Figure 24B). Les températures du sol sous la route sont également plus chaudes en profondeur, fait confirmé par la concavité de l'isotherme -2 °C et la disparition de celui de -4 °C. Comme les conditions de surface de la route sont identiques entre les deux exercices et que seules les conditions d'enneigement sur le talus, le pied de remblai et le terrain naturel diffèrent, les différences dans le régime thermique entre les deux exercices découlent de l'effet isolant de la neige. En raison de la faible largeur de la route, il est indéniable qu'un apport de chaleur latéral du pied de remblai vers le centre ligne se produit et modifie non seulement le régime thermique en pied de remblai, mais également celui sous l'infrastructure. Cette influence latérale contribue à dégrader le pergélisol sur la largeur de l'infrastructure, et ce, d'une manière pratiquement synchrone et d'amplitude équivalente. Cette dégradation uniforme du pergélisol tant en pied de remblai que sous le centre ligne expliquent l'ondulation complète de la route et non seulement la présence de dépressions sporadiques localisées sur l'accotement, comme c'est souvent le cas pour une infrastructure plus large telle une piste d'atterrissage.

D'après les travaux de Fortier et *al.*, (2011), l'effet simultané de la neige et d'une hausse de la température de l'air serait à l'origine du dégel profond du pergélisol sous la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq et dont le tassement au dégel aurait donné naissance aux dépressions qu'on y observe. À partir de ces présomptions, le troisième exercice de simulation tente de reproduire les conditions thermiques actuelles à l'intérieur et sous le remblai de la route d'Umiujaq. Pour ce faire, la présence d'un remblai avec d'importantes accumulations de neige de chaque côté a été intégrée au modèle des conditions initiales auquel une TMAA de $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a été appliquée. En raison de l'absence de mesure de température dans le sol, la position du front de dégel identifiée lors du forage UMI_F1 en 2008 a été utilisée pour évaluer l'état d'équilibre du modèle. Cet état d'équilibre correspond au moment où la position du front de dégel simulée atteint la profondeur observée à l'été 2008, soit une profondeur autour de 4,9 m. Les résultats de cette simulation (Figure 24D) dévoilent une isotherme $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la fin de l'été dont la forme concave présente une légère remontée sous la route. Comparativement au second exercice (Figure 24C), l'épaisseur de la couche active est plus importante tant dans le terrain naturel qu'au pied et sous le remblai et la température en profondeur plus chaude. Ces différences thermiques entre les deux exercices découlent principalement de l'utilisation d'une TMAA plus chaude, soit de $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ au lieu de $-4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le quatrième exercice de simulation numérique vise à évaluer, à partir du portrait des conditions géothermiques actuelles simulées au troisième exercice, la progression du front de dégel en réponse aux TMAA projetées par la sortie climatique AHA du MRCC pour la période 2008 à 2050. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 24E. Dans la mesure où les conditions actuelles simulées concordent avec la réalité et que les changements de températures de l'air pour la région d'Umiujaq s'accorderont avec la tendance et les températures proposées par le scénario AHA, un dégel complet de la couche de dépôt meuble riche en glace sous la route pourrait survenir d'ici l'horizon 2025. Ce dégel complet, d'après les teneurs en glace observées au forage UMI_F1, engendrera des tassements significatifs supplémentaires d'une ampleur équivalente à ceux déjà observés depuis la construction de la route. Selon ce même scénario climatique, une disparition complète du pergélisol sous la route surviendrait d'ici l'horizon 2035.

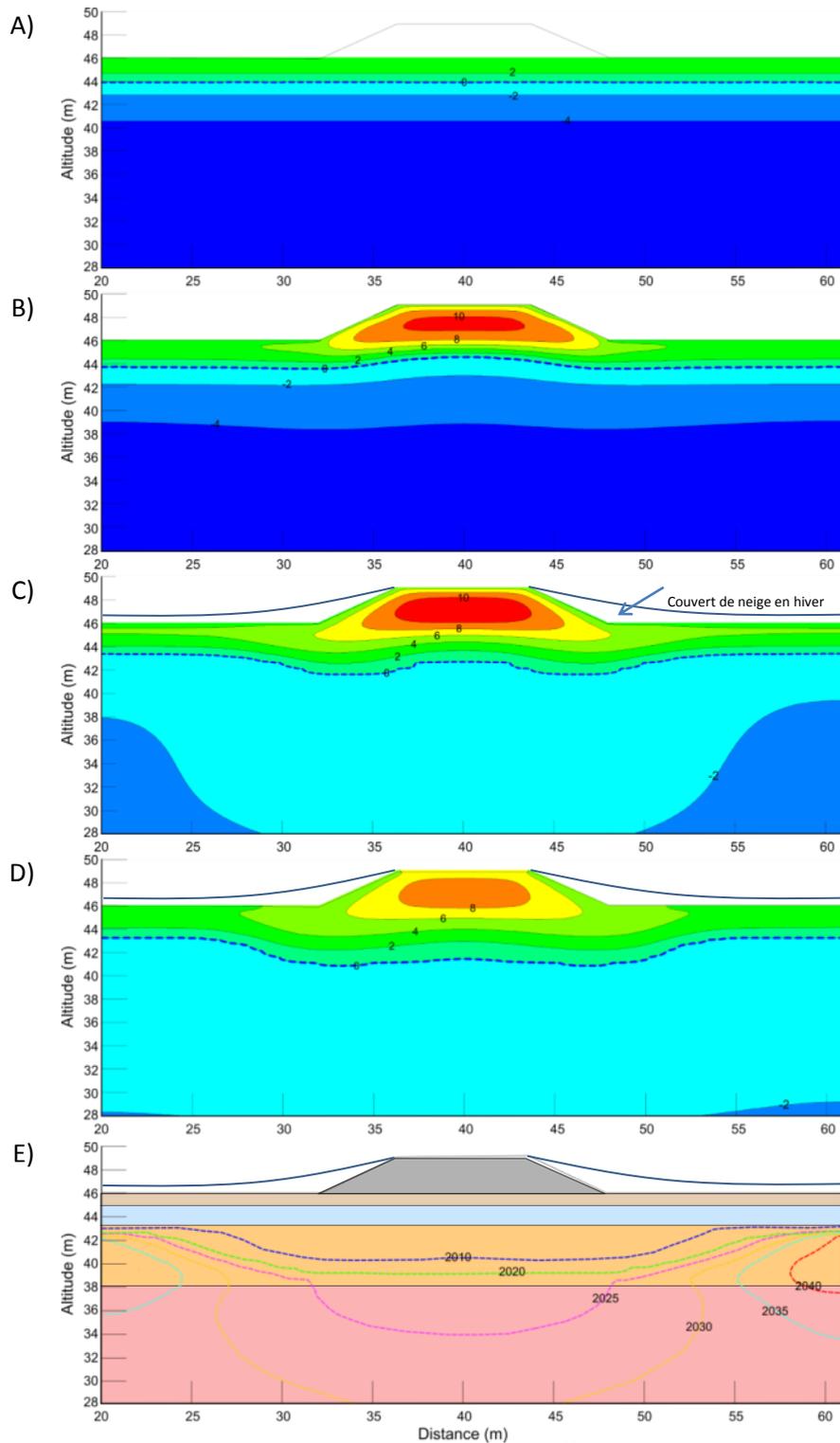


Figure 24: Conditions géothermiques simulées à la fin de la saison de dégel (1^{er} octobre) : A) pour une TMAA de -4,8 °C et une couverture de neige mince et uniforme ; B) pour les mêmes conditions climatiques et d'enneigement qu'en (A), mais avec la présence d'un remblai ; C) pour une TMAA de -4,8 °C et une accumulation importante de neige des deux côtés du remblai ; D) pour les mêmes conditions d'enneigement qu'en (C), mais en équilibre avec les conditions climatiques de 2008 (TMAA de -2,5°C). E) Migration du front de dégel (isotherme 0 °C) pour la période 2010 à 2050 selon les TMAA projetées par la sortie climatique AHA du MRCC. Les conditions d'enneigement sont les mêmes qu'en (C) et les températures du sol de départ sont celles simulées en (D).

4.1.4 STRATÉGIES D'ADAPTATION ENVISAGÉES :

Les précisions stratigraphiques et cryostratigraphiques apportées par le forage UMI_F1 et la réinterprétation des levés géophysiques effectués par Fortier et Bolduc (2008) et Fortier et *al.*, (2011) indiquent que le front de dégel au pied du remblai atteint une profondeur d'environ 5,2 m et se retrouve dans les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Gs) riche en glace. Selon les endroits, plus de 3 m de sédiments fins gelés riches en glace restent à dégeler avant d'atteindre le socle rocheux. Ces trois derniers mètres de pergélisol riche en glace demeurent sensibles à une éventuelle dégradation thermique. À la lueur des exercices de simulations réalisés, l'effet isolant de la neige conjointe à un réchauffement de la température de l'air contribue au dégel profond du pergélisol sous la route. Cette dégradation thermique se présente sous une forme concave et suggère une dégradation du pergélisol uniforme sur la largeur de l'infrastructure. Sous les TMAA projetées par la sortie climatique AHA du MRCC, les résultats des projections réalisées suggèrent un dégel complet de la couche de sol riche en glace d'ici 2025 et une disparition du pergélisol sous la route d'ici 2035. Des tassements importants sont à anticiper et devraient progresser à un rythme accéléré, particulièrement suite au récent pavage de la route d'accès et la tendance au réchauffement des températures moyennes annuelles de l'air observé partout au Nunavik.

À court terme, il est nécessaire de suivre l'évolution de la situation. Pour ce faire, munir la route d'un câble à thermistance permettrait d'assurer un suivi thermique et évaluer l'épaisseur réelle des sédiments qui reste à dégeler sous l'infrastructure. Ce même câble permettrait une meilleure calibration du modèle numérique afin d'améliorer sa précision.

À moyen terme, comme il s'agit principalement de dépressions de grande longueur d'onde, celles-ci ne devraient pas être problématiques pour la conduite. Il est donc recommandé de laisser l'infrastructure se dégrader et faire un entretien au besoin, c'est-à-dire de procéder au comblement avec du gravier des dépressions jugées problématiques.

À long terme, advenant la nécessiter de repaver la route, il est suggéré d'attendre le dégel complet des sédiments riches en glace et de procéder au comblement des dépressions avec du gravier afin d'atténuer les déformations. Une planification des ressources granulaires sera nécessaire.

4.2 INUKJUAK

4.2.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

L'aéroport d'Inukjuak et sa route d'accès ont été achevés avant 1987. La largeur et la longueur totale de la piste sont respectivement de 40 m et de 1190 m, du chaînage 4+940 m à 6+130 m, tandis que la surface profilée mesure 1070 m, du chaînage 5+000 m au chaînage 6+070 m. Le personnel du MTQ a recensé de nombreuses dépressions le long de la piste dont les plus importantes se situent sur le côté nord-ouest où d'importantes accumulations d'eau ont également été observées dans les fossés de drainage entre les chaînages 5+200 m et 6+070 m (Figure 25A et B). Au cours d'une étude antérieure (Allard *et al.*, 2007), des fissures de tensions longitudinales avaient été observées sur le côté sud de la piste (Figure 25C). Ce type de fissures indique un basculement de l'épaulement en réponse à une dégradation thermique puis tassement du sol en marge de piste. Cette dégradation accélérée du pergélisol en marge de piste est le résultat de l'influence conjointe de l'accumulation de neige et d'eau en pied de remblai.

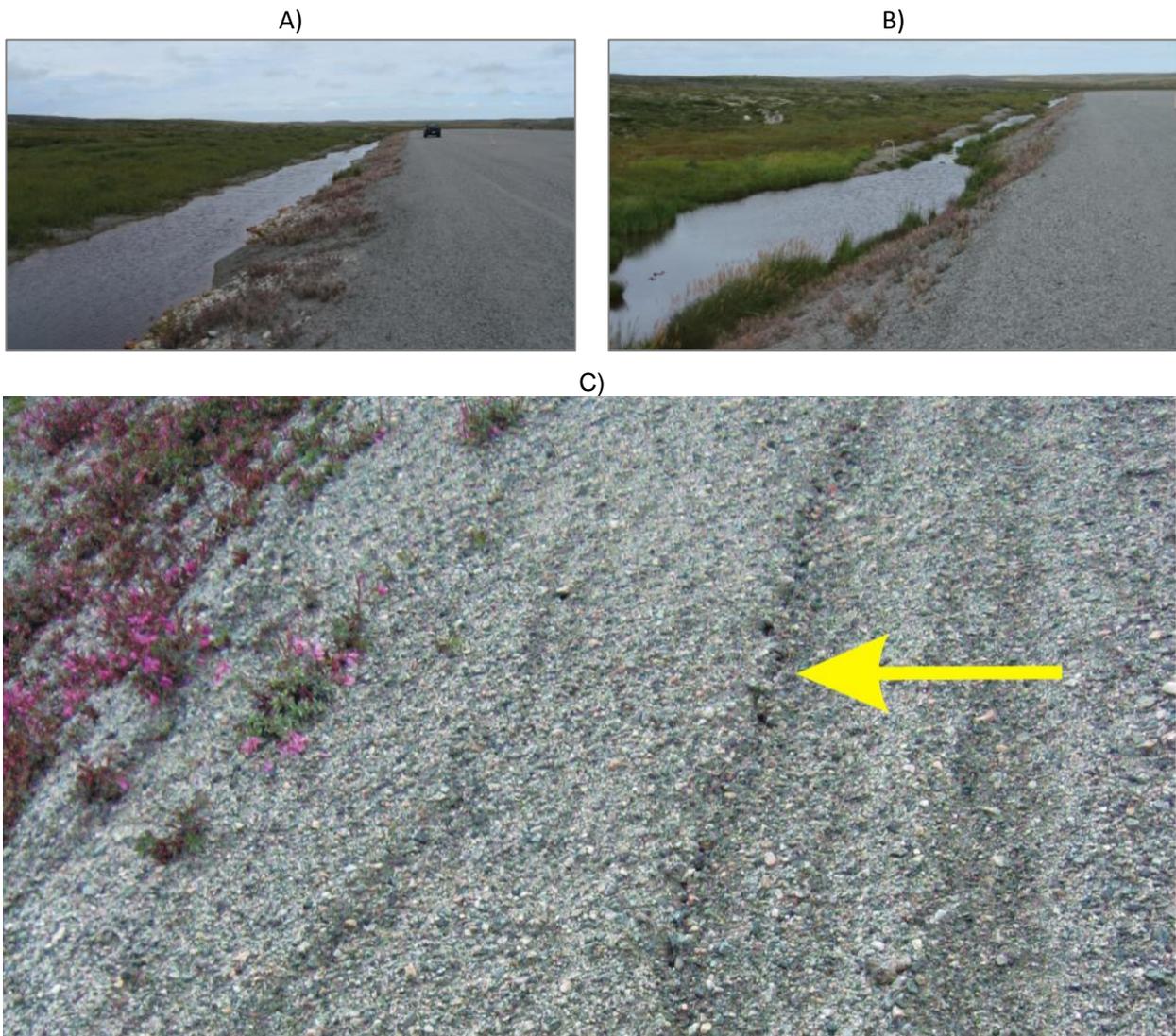


Figure 25: A) et B) Accumulations d'eau à l'intérieur du fossé de drainage sur le côté nord-ouest de la piste d'Inukjuak. C) Fissures de tension longitudinales sur la bordure sud de la piste d'Inukjuak juin 2005 (Tirée de Allard *et al.*, 2007).

4.2.1.1 DÉPRESSIONS ET TASSEMENTS MESURÉS

La piste d'atterrissage d'Inukjuak est affectée par de nombreuses dépressions réparties sur la longueur totale de l'infrastructure et qui sont essentiellement localisées dans l'accotement. À partir des relevés de défauts réalisés par le personnel du MTQ, il est possible de différencier deux types de dépression : 1) les dépressions de grande amplitude avec une longueur et une largeur supérieures respectivement à 10 m et 5 m et 2) les dépressions de faible amplitude dont la longueur et la largeur n'excèdent pas 5 m. Malgré les différences de géométrie entre ces deux types de dépressions, celles-ci présentent des profondeurs similaires qui varient entre 15 cm et 35 cm. De manière générale, les dépressions de grandes amplitudes sont localisées dans l'accotement sur le côté nord-ouest de la piste tandis que celles plus limitées se retrouvent du côté sud-est (côté aérogare). En 2006, la piste a été surfacée; par conséquent, plusieurs dépressions ont été comblées et n'ont pu être mesurées en 2007. Toutefois, en 2008, certaines dépressions sont réapparues, confirmant une dégradation continue du pergélisol en marge de la piste.

Afin de faire le suivi des tassements le long de la piste d'atterrissage, le MTQ a installé quatre plaques de tassement, soit trois dans l'accotement (AC) et une au centre-piste (CL) (Figure 27A). Les informations relatives au positionnement des plaques par rapport au chaînage ainsi que les mesures de nivellements relevés annuellement sont présentées au tableau placé en annexe. D'après les relevés, la plaque P-2, située dans l'accotement au chaînage 5+232, est celle qui présente les valeurs de tassement les plus importantes, soit un tassement total de 11 cm entre 2005 et 2010. Les autres plaques témoignent de légers affaissements de la piste compris entre 1,4 et 3,5 cm.

4.2.1.2 RÉSEAU DE DRAINAGE, ZONES D'ACCUMULATION D'EAU ET ÉPAISSEURS DE NEIGE

La piste d'Inukjuak est circonscrite à l'intérieure d'une dépression topographique délimitée au nord et au sud par des affleurements rocheux surélevés. La photographie aérienne prise avant construction témoigne de la présence d'un réseau d'écoulement qui suit sensiblement l'orientation sud-ouest nord-est de la piste actuelle. De plus, une bonne partie du terrain sur lequel repose la piste est mal drainée et caractérisée par un drainage diffus (Figure 27A). L'écoulement des eaux de surface s'effectue essentiellement du nord-ouest vers le sud-est, mais une partie importante s'écoulait également vers l'ouest. Le positionnement de la piste actuelle force l'écoulement à longer la piste puis à s'écouler vers le nord-est. C'est dans la section de la piste comprise entre les chaînages 5+340 et 5+820 que l'écoulement d'eau est le plus problématique et où plusieurs accumulations ont été recensées (Figure 27A).

L'accumulation de neige en périphérie de l'infrastructure est problématique sur les deux côtés. En effet, d'après les relevés effectués par le personnel du MTQ au cours de la période 2006-2010 (Tableau 9), l'épaisseur de neige en pied de remblai peut atteindre plus de 1,6 m par endroits avec une valeur moyenne d'environ 1,2 m. Aux endroits où le couvert de neige est le plus épais, la végétation arbustive a commencé à coloniser le talus du remblai ce qui favorise la rétention de la neige. Cela n'améliore en rien le bilan thermique du pergélisol qui se retrouve d'autant plus isolé pendant l'hiver.

Tableau 9 : Épaisseurs de neige mesurées annuellement en marge de la piste d’Inukjuak par le personnel du MTQ.

Id.	Chaînage	Côté	Distance du pied de remblai (m)	Épaisseurs de neige (m)					Moyenne (m)
				2006	2007	2008	2009	2010	
n.a	4+980	nord	1	1,60	n.d	n.d	n.d	n.d	1,60
n.a	5+230	nord	1	1,45	n.d	n.d	n.d	n.d	1,45
n.a	4+420	nord	1	1,20	n.d	n.d	n.d	n.d	1,20
n.a	4+440	sud	1	1,55	n.d	n.d	n.d	n.d	1,55
n.a	5+900	nord	1	1,50	n.d	n.d	n.d	n.d	1,50
n.a	5+900	sud	1	1,62	n.d	n.d	n.d	n.d	1,62
N1	4+970	nord	10	1,60	1,60	1,50	0,80	1,00	1,30
N1a	4+980	nord	1	0,90	1,30	0,90	1,65	1,30	1,21
N3	5+890	nord	1	1,62	1,30	0,95	1,25	0,95	1,21
N9	5+890	sud	1	1,50	1,50	1,10	1,20	1,25	1,31
N13	5+450	sud	1	1,55	1,60	0,95	1,25	0,95	1,26
N14	5+210	nord	1	1,50	0,80	0,85	1,25	0,75	1,03
N15	5+420	nord	1	1,20	1,00	0,95	0,90	0,65	0,94

Épaisseurs de neige mesurées le 6 mars 2006 le long de la piste d’Inukjuak (Allard *et al.*, 2007).

Épaisseurs de neige effectuées au mois de février sur une base annuelle par le personnel du MTQ. À noter qu’en 2006, les mesures ont été réalisées au début du mois de mars.

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

D’après la carte des unités géologiques de surfaces réalisée (Figure 27B), le terrain sur lequel est bâti l’aéroport se subdivise en trois types d’unités géologiques de surface soit : 1) des sédiments littoraux et pré-littoraux sous forme de plates-formes ou terrasses (Mb), 2) des sédiments intertidaux mal drainés recouverts d’une mince couche de sédiments littoraux et pré-littoraux (Mm/Mi) et 3) des affleurements rocheux recouverts par endroits d’une mince couche de sédiments littoraux et pré-littoraux (Mm/R ou R)(Figure 26A). En raison de la topographie du site, la piste a été alignée à l’intérieur d’une légère dépression mal drainée circonscrite entre plusieurs affleurements rocheux de superficie imposante et dont certains affleurent en marge de piste, comme c’est le cas au chaînage 5+810 côté nord (Figure 26B). Cette dépression topographique dans le roc constitue un excellent bassin de captation des sédiments ce qui explique que l’épaisseur de ceux-ci peut atteindre plus de 10 m par endroits (forage INU_F2).

Au total, 6 forages ont été réalisés le long de la piste d’atterrissage, dont 5 sur le côté nord-ouest et un seul sur le côté sud-est. L’emplacement exact de ces forages est illustré à la figure 27B. Leurs positions selon le chaînage ainsi que leurs profondeurs maximales atteintes sont résumées tableau 10.

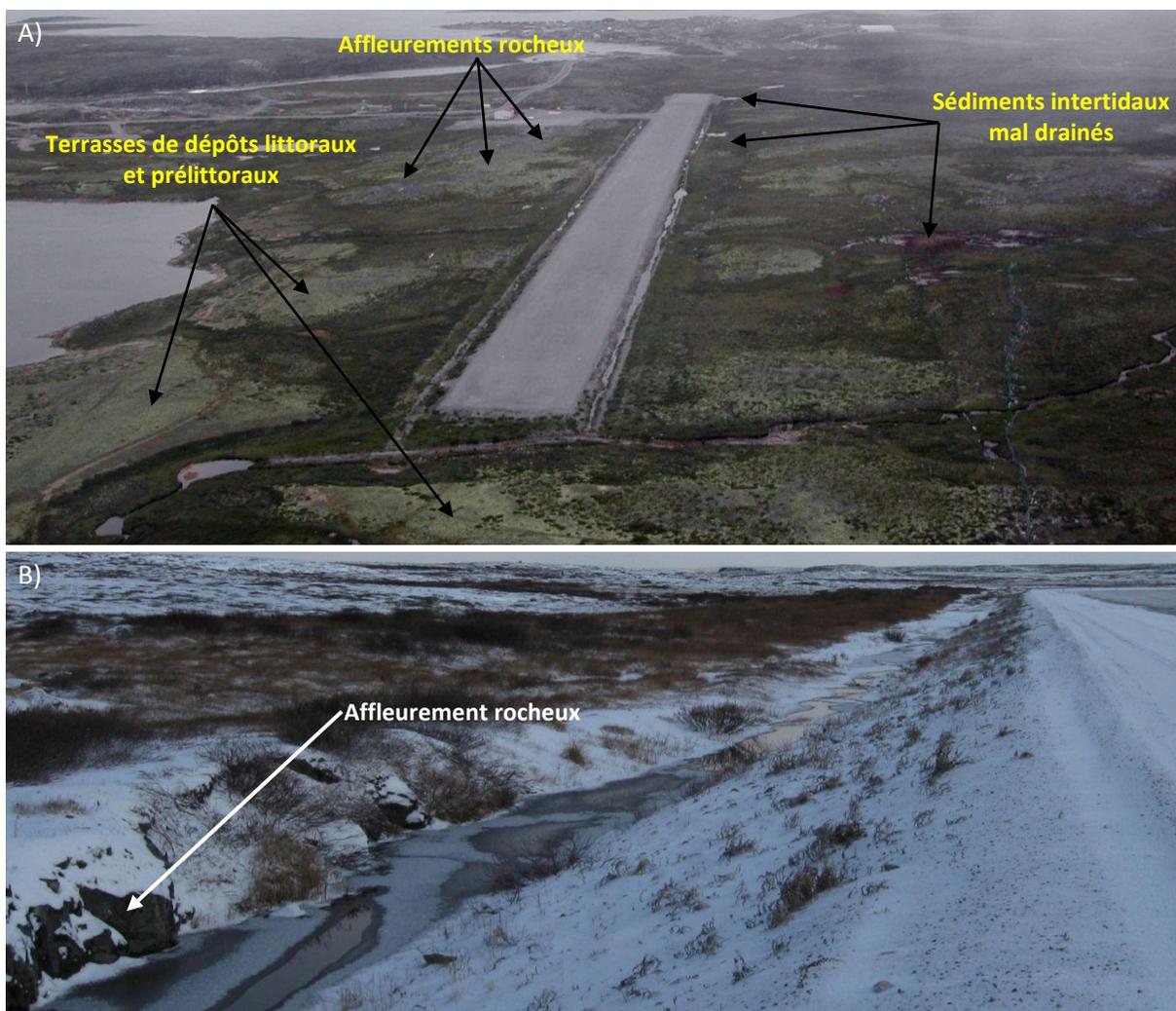


Figure 26 : A) Photographie aérienne de la piste d’Inukjuak prise à la troisième semaine de juillet 2006 (Tirée de Allard *et al.*, 2007). B) Affleurement rocheux exposé en marge de piste au chaînage 5+810 côté nord.

Tableau 10 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d’atterrissage d’Inukjuak à l’été 2008.

Nom du forage	Localisation par rapport au chaînage existant	Profondeur atteinte
INU_F1	Côté Nord-ouest, chaînage 5+210 m, 2 m du pied du remblai	6,26 m
INU_F2	Côté Nord-ouest, chaînage 4+989 m, 1,7 m du pied du remblai	12,87 m
INU_F3	Côté Nord-ouest, chaînage 5+704 m, 4 m du pied du remblai	8,93 m
INU_F4	Côté Sud-est, chaînage 6+006 m, 1 m du pied du remblai	10,75 m
INU_F5	Côté Nord-ouest, chaînage 5+280 m, 35 m du pied du remblai	2,56 m
INU_F6	Côté Nord-ouest, chaînage 5+302 m, 35 m du pied du remblai	3,20 m

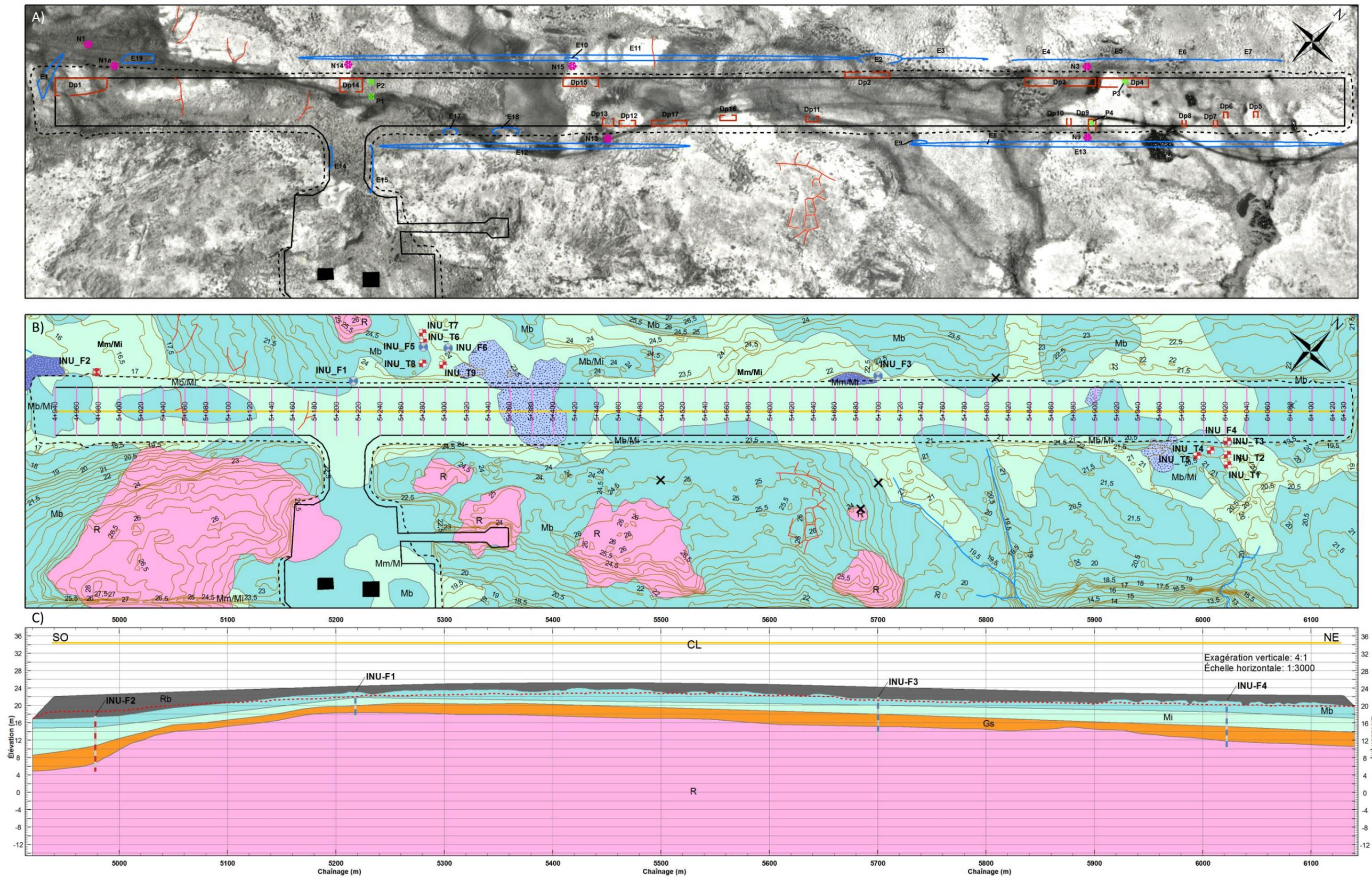


Figure 27 : Planche synthèse de la piste d'Inukjuak.

Dépôts de surface

Sédiments marins

- Mb** SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX: Sable fin à moyen silteux avec traces de graviers (USCS: SM); présence de fragments de coquillages; d'épaisseur variant entre 2 et 4 mètres environ; mis en place en eau peu profonde lors de la phase plénimarine et lors de l'exondation; surface parfois marquée par des fentes de gel.
- Mb/Mi** SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR SÉDIMENTS INTERTIDaux: Sable fin à moyen silteux avec traces de graviers; présence de fragments de coquillages; d'épaisseur inférieure à 2 mètres environ; surface parfois marquée par des fentes de gel; cette couche repose sur des sédiments intertidaux.
- Mm/Mi** SÉDIMENTS MARINS MINCES SUR SÉDIMENTS INTERTIDaux: Mince couche de sédiments marins principalement composés de sables et graviers avec traces de silt; repose sur des sédiments intertidaux.
- Mi** SÉDIMENTS INTERTIDaux: Silt sableux avec traces de graviers et fragments de coquillages (USCS: ML); d'épaisseur variant de 2 à 7 mètres environ mis en place en zone intertidale ou infratidale dans des baies ou bras de mer abrités.

Sédiments fluvioglaciers

- Gs** SÉDIMENTS D'ÉPANDAGE PROGLACIAIRE SUBAQUATIQUE: Sable et sable silteux avec un peu de graviers; de 2 à 4 mètres d'épaisseur; formant des amas mis en place en eau plus ou moins profonde au bout des tunnels sous-ou intra- glaciaires débouchant dans la Mer de Tyrell; rencontrés sous les sédiments intertidaux; reposent habituellement directement sur le roc.

Substrat rocheux

- R** ROCHE EN PLACE: Affleurements rocheux et roc à mince couverture de sédiments meubles.

Anthropique

- Rb** ANTHROPIQUE: Remblai.

Hydrographie

-  Ruisseaux
-  Lacs drainés lors de la mise en place de l'infrastructure
-  Accumulation d'eau en bordure de piste

Formes de terrain

-  Affleurements rocheux isolés
-  Fentes de gel
-  Front de dégel

Forages

-  Sondage
-  Forages géotechniques instrumentés avec un câble à thermistances
-  Forages géotechniques avec récupération
-  Courbe de niveau (50cm)

Infrastructures

-  Centre de la piste d'atterrissage
-  Chaînage
-  Limite de la surface profilée
-  Limite du pied de remblai
-  Bâtiments

Identification des défauts

-  Accumulation d'eau en bordure de piste
-  Dépressions
-  Mesure d'enneigement
-  Plaque de tassement

4.2.2.1 SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX (MB)

De manière générale, les dépôts de sédiments littoraux et pré littoraux reposent soit sur les sédiments intertidaux ou directement sur le socle rocheux. D'une épaisseur pouvant atteindre plus de 4 m (forage INU_F1), il est fréquent d'y retrouver en surface des plages soulevées avec fragments de coquilles ainsi que des fentes de gel organisées en réseaux polygonaux (Figure 28). Actuellement, très peu d'informations documentent ces fentes de gel à savoir si elles abritent des coins de glace et dans l'affirmative, quelles sont leurs dimensions. Toutefois, l'exercice de cartographie des unités géologiques de surface à partir des photographies aériennes prises avant la construction a permis de révéler que la probabilité que des fentes de gel traversent la piste est très faible. En effet, aucune fente de gel majeure n'a été observée et cartographiée sous la piste, ce qui n'exclut pas la possibilité d'en retrouver de plus petites difficilement identifiables à partir des photographies aériennes. Par exemple, en raison de la composition des dépôts de surface sous la piste, il est probable de retrouver des fentes de gel entre les chaînages 5+000 et 5+180, 5+410 et 5+480 et 5+880 et 6+130, mais la présence de coins de glace reste à vérifier (planche synthèse). Le forage INU_F1 a été réalisé en plein centre de cette unité géologique de surface. Les analyses granulométriques démontrent que ce dépôt est composé majoritairement de sable fin à moyen brunâtre avec un peu de silt (entre 4 et 30 %) (Tableau en annexe). D'après les essais de consistance, cette unité consiste en un sable silteux (USCS : SM) dont la matrice fine est non plastique ou de faible plasticité et composée essentiellement de silts et sables très fins. Les teneurs en eau mesurées sur des échantillons non gelés prélevés au forage INU_F1 sont toutes inférieures à 20 % (Figure 32).



Figure 28 : Fente de gel dans une terrasse sableuse au sud de la piste (Tirée de Allard *et al.*, 2007).

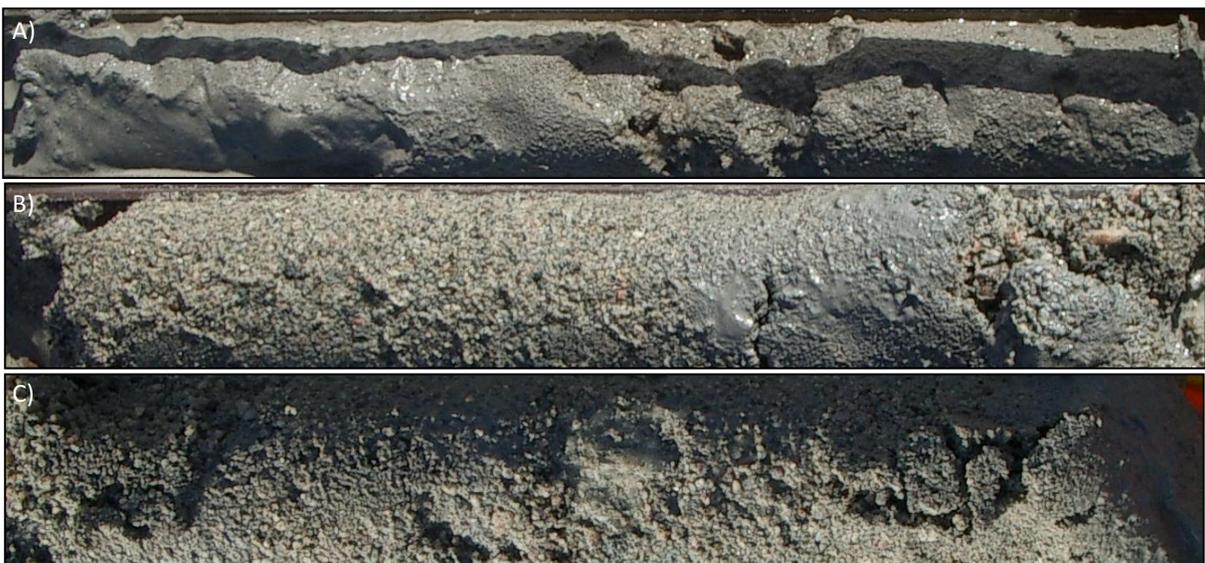


Figure 29: Sédiments littoraux et pré littoraux composés de sable avec un peu de silt (SM) échantillonnée au forage INU_F1 entre 1,80 et 2,1 m (A), 3 et 3,3 m (B) et 3,6 et 3,8 m (C) de profondeur.

4.2.2.2 SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX MINCES SUR SÉDIMENTS INTERTIDaux (Mm/Mi)

Le terrain sous la piste se caractérise par une alternance de petites barres alluviales relativement bien drainées avec des chenaux déprimés humides. La formation de ces barres alluviales résulte d'une incision et d'un remaniement subséquent des plates-formes et des terrasses de dépôts littoraux et pré-littoraux par le ruissellement. Sur la carte des dépôts de surface, ce type de dépôt a été cartographié en tant que sédiments littoraux et pré-littoraux sur sédiments intertidaux (Mm/Mi) malgré l'évidence d'un remaniement alluvial en surface. Aux endroits où la couverture de sédiments littoraux est très mince, à la faveur d'un terrain plus organique et moins bien drainé, des thufurs et des buttes de pergélisol ont été identifiés à proximité de la piste d'atterrissage. Par exemple, de telles formes périglaciaires se retrouvent dans le secteur mal drainé qui borde l'extrémité sud-ouest de la piste (Figure 30); elles se retrouvent aussi forcément sous la piste, dans des secteurs mal drainés très localisés où la couverture organique est importante. Quoique très peu documentées dans la région, la présence de telles formes est généralement associée à un substrat de granulométrie fine susceptible de contenir d'importantes quantités de glace dont la fonte résulterait nécessairement en des tassements significatifs. Même si ces formes apparaissent très peu déstabilisées dans le terrain naturel (Allard *et al.*, 2007) (Figure 30), il est fort probable que certaines dépressions sur la piste, comme celle observée à l'extrémité sud-ouest de la piste, résultent de la dégradation thermique et du tassement subséquent du sol d'une de ces buttes (Figure 27A).

La réalisation de plusieurs sondages dans ces barres alluviales montre une stratigraphie similaire qui se caractérise par une couche de matière organique en surface variant entre 10 et 25 cm d'épaisseur, une section d'une cinquantaine de centimètres en moyenne composée de sable moyen à fin beige avec des lits oxydés et qui repose sur un sable fin grisâtre dont la proportion de particules fines augmente en profondeur jusqu'au contact avec l'unité sous-jacente identifiée comme un dépôt de sédiments intertidaux avec coquilles (Figure 31A, B et C). Ces sédiments fins se retrouvent en moyenne à une profondeur comprise entre à 0,6 et 1,2 m. Toutefois, la limite entre la couverture de sédiments littoraux et les sédiments fins d'eau profonde est approximative, car le contact stratigraphique entre ces deux unités est graduel.

Cette disposition stratigraphique particulière au terrain sur lequel la piste d'atterrissage d'Inukjuak a été construite est mise en évidence par les analyses granulométriques réalisées à différentes profondeurs sur les échantillons prélevés aux forages INU_F1, INU_F2, INU_F3 et INU_F4. En effet, d'un forage à l'autre, les courbes granulométriques présentent sensiblement la même signature en fonction de la profondeur (Voir annexe). Par exemple, dans les premiers deux mètres sous la surface, le dépôt consiste en un sable fin silteux (Mm) avec des proportions de particules fines généralement inférieures à 50 %. Graduellement, à mesure que l'on pénètre dans l'unité Mi, la proportion de particules fines augmente avec la profondeur et atteint à l'occasion plus de 85 %. Les résultats granulométriques obtenus ici concordent avec ceux présentés dans une étude antérieure (Allard *et al.*, 2007) au cours de laquelle une quantité significative de silt (entre 55 et 73 %) avait été mesurée dans le premier mètre du profil, là où il apparaissait y avoir une résurgence de matériel plus fin. D'après les essais de consistance réalisés sur plusieurs échantillons prélevés aux forages INU_F2, INU_F3 et INU_F4, les sédiments intertidaux sont composés essentiellement de silts inorganiques et sables très fins non plastiques (USCS : ML) (Figure 31E et F). Les teneurs en eau mesurées dans ces sédiments intertidaux (Mi) sont sensiblement supérieures à celles mesurées dans les sédiments plus sableux qui composent l'unité de sédiments littoraux et pré-littoraux (Mb). De manière générale, celles-ci sont comprises entre 20 et 30 % (Figure 32) et tendent à diminuer en profondeur à mesure que la granulométrie devient plus grossière. À l'intérieur de cette unité, plusieurs fragments de coquilles ont été observés, ce qui confirme l'origine marine de ce dépôt (Figure 31D).

Les sédiments intertidaux ont en moyenne une épaisseur estimée entre 2 et 4 m, mais peuvent atteindre à certains endroits plus de 8 m (INU_F2). Ces sédiments reposent habituellement sur une unité sableuse grisâtre contenant un peu de silt (Figure 33). Cette dernière unité, rencontrée sous les sédiments intertidaux aux forages INU_F2, INU_F3 et INU_F4, repose directement sur le roc et se distingue par une proportion de particules fines (silt et argile) nettement inférieure à celle contenue dans les sédiments intertidaux. Cette unité a été identifiée comme étant des sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Gs) composée de sables silteux non plastiques et où les teneurs en eau mesurées sont toutes inférieures à 15 %.

Il est important de noter que les forages ont été réalisés en pied de remblai, c'est-à-dire dans des secteurs déjà perturbés thermiquement et où la profondeur de dégel atteint plus de 6 m par endroits. Dans ces circonstances, les échantillons prélevés lors de ces forages étaient tous non gelés, ce qui n'est pas représentatif des conditions géotechniques réelles du pergélisol présent sous la piste. Par conséquent, il est plausible que les teneurs en eau soient beaucoup plus élevées dans les sédiments encore gelés sous la piste et que leur fonte engendrerait des dépressions similaires à celles observées actuellement en bordure de piste (Figure 27A).



Figure 30 : A) Secteur mal drainé à l'extrémité sud-ouest de la piste d'Inukjuak où des buttes de pergélisol ont été identifiées. B) Même secteur photographié 3 ans plus tôt (Allard *et al.*, 2007).



Figure 31 : Sondages INU_T4 (A), INU_T6 (B) et INU_T7 (C) effectués à proximité de la piste d'Inukjuak (Figure 27A). B). D) Coquilles marines trouvée à l'intérieur des sédiments intertidaux (Mi) excavés au sondage INU_T7. E) Sédiments intertidaux composés de silts inorganiques et sables très fins non plastiques (USCS : ML) prélevés au forage INU_F4 entre 2,6 et 3 m (E) et 4 et 4,4 m (F) de profondeur.

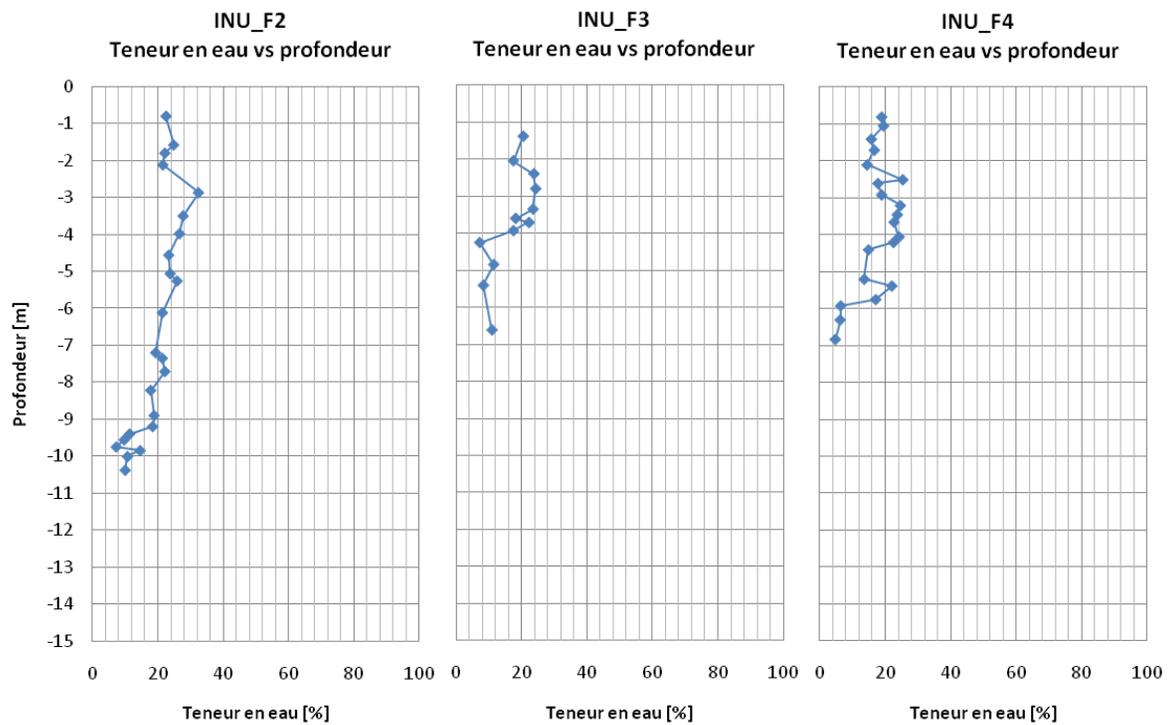


Figure 32 : Variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur aux forages INU_F2, INU_F3 et INU_F4.

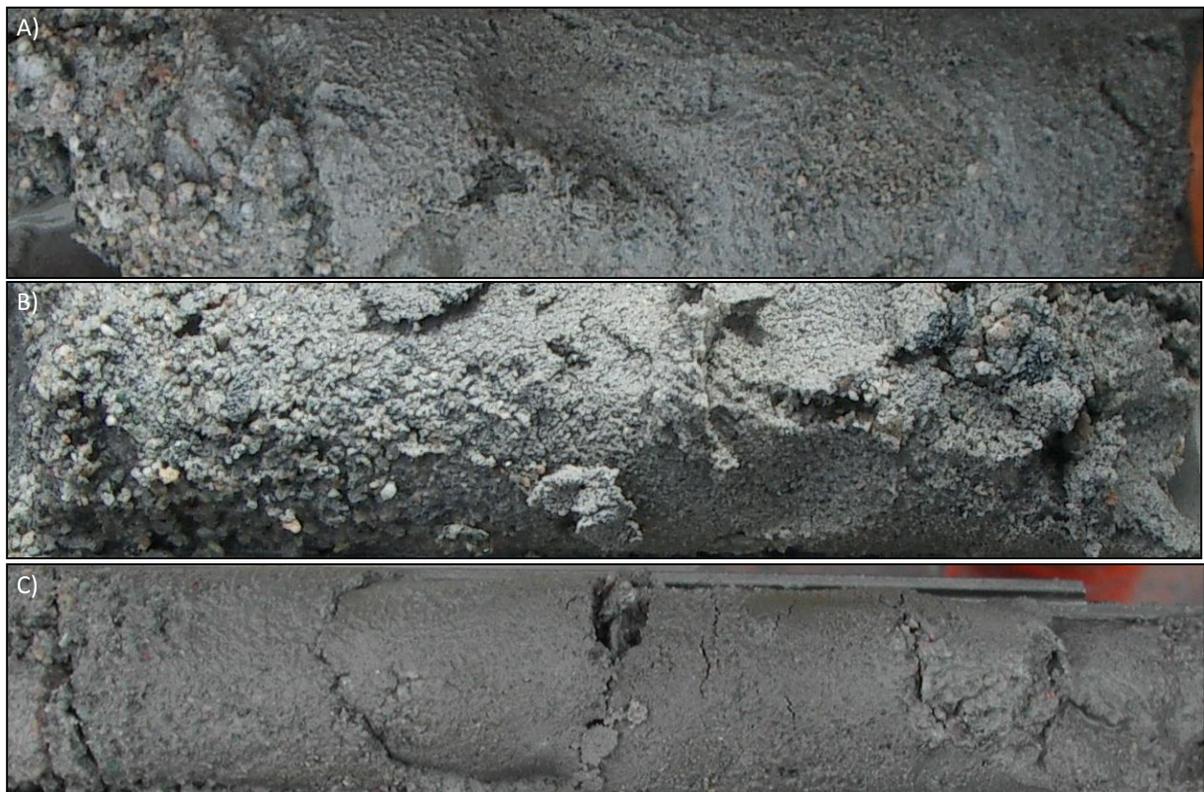


Figure 33 : Unité sableuse avec un peu de silt (USCS : SM) identifiée en tant que sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique. Échantillons prélevés au forage INU_F2 entre 9,15 et 9,75 m (A), INU_F3 entre 4,8 et 5 m (B) et INU_F4 entre 6,8 et 7 m (C).

4.2.3 CONDITIONS THERMIQUES DU PERGÉLISOL

4.2.3.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : PÉRIODE 1990-2010

À l'extrémité nord-ouest de la piste, à l'emplacement du forage INU_F2, les données thermiques sont enregistrées par une station complètement automatisée munie d'un chapelet de 14 thermistances réparties sur 12 m de profondeur (0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12 m). Les données présentement compilées s'étalent du mois d'octobre 2008 jusqu'à octobre 2009 (Figure 34). Ces données thermiques ont permis de constater que le front de dégel pénètre environ jusqu'à 5,8 m de profondeur. Entre 5,8 et 9,8 m, la température se situe entre 0 et -1 °C durant toute l'année. En hiver, les premiers mètres à la surface du sol n'enregistrent aucune diminution de température et restent non gelés sur une longue période avant de finalement passer sous 0°C. Cette signature thermique spécifique indique que le comportement thermique du pergélisol n'est plus influencé par les températures de l'air hivernales en raison d'une importante accumulation de neige en pied de remblai à cet endroit qui est de l'ordre de 0,9 à 1,6 m d'épaisseur (Tableau 9) et, aussi, en raison de la chaleur latente contenue dans l'épaisseur couche dégelée.

Des profils de températures du sol réalisés manuellement en octobre 2008 dans les puits de forage INU_F3 et INU_F4, tous deux situés en pied de remblai, montrent également des épaisseurs de la couche de sol dégelé assez grandes. D'après ces mesures ponctuelles, cette couche de sol dégelé atteint respectivement une épaisseur de 7,14 m et 6,35 m aux forages INU_F3 et INU_F4. Malheureusement, il n'existe pas de câble à thermistance sous la piste qui pourrait informer sur le régime thermique sous le remblai dans un secteur non soumis à l'effet isolant de la neige. Toutefois, un levé de géoradar produit par Inspection Radar Inc. en 2005 et interprété par Allard *et al.*, (2007) suggère que le front de dégel saisonnier au centre-piste se propage dans le terrain naturel légèrement au-delà de la base du remblai, mais la profondeur exacte de pénétration n'est pas connue. Néanmoins, tout laisse à croire que malgré la forte dégradation thermique du pied de remblai et d'une section des accotements, les conditions thermiques au centre de l'infrastructure sont demeurées relativement stable depuis sa construction et que le front de dégel actuel ne dépasse pas l'épaisseur de l'ancienne couche active sous la piste.

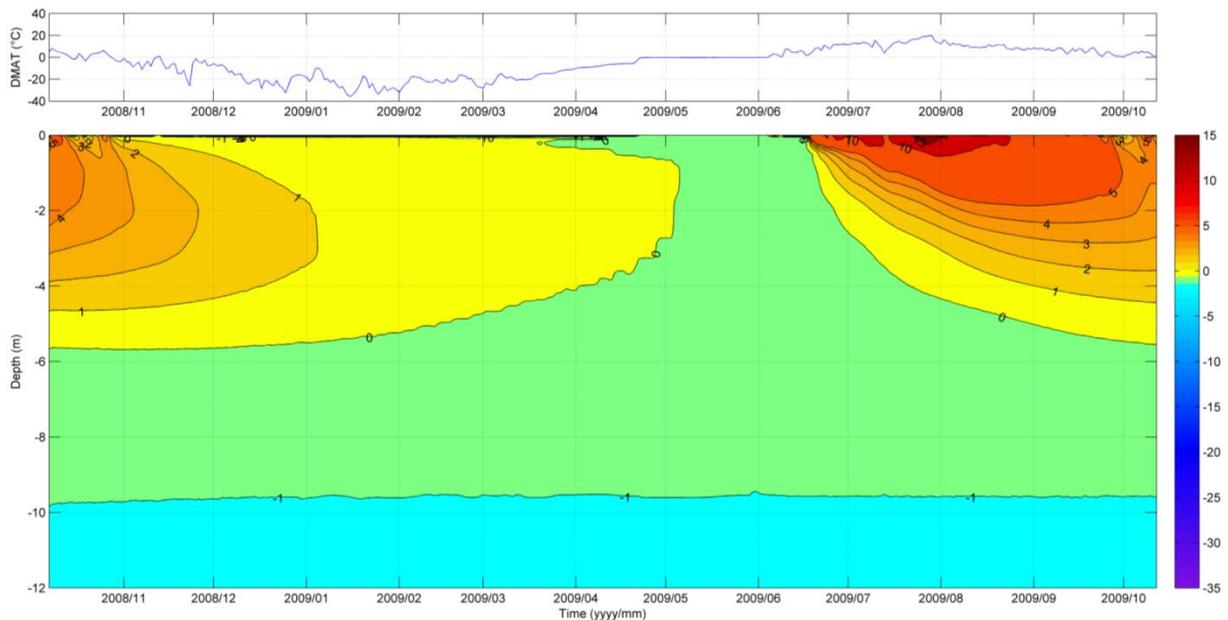


Figure 34 : Variation journalière de la température dans le sol à l'emplacement du forage INU-F2 en fonction de la profondeur et du temps pour la période du 7 octobre 2008 au 12 octobre 2009, aéroport d'Inukjuak.

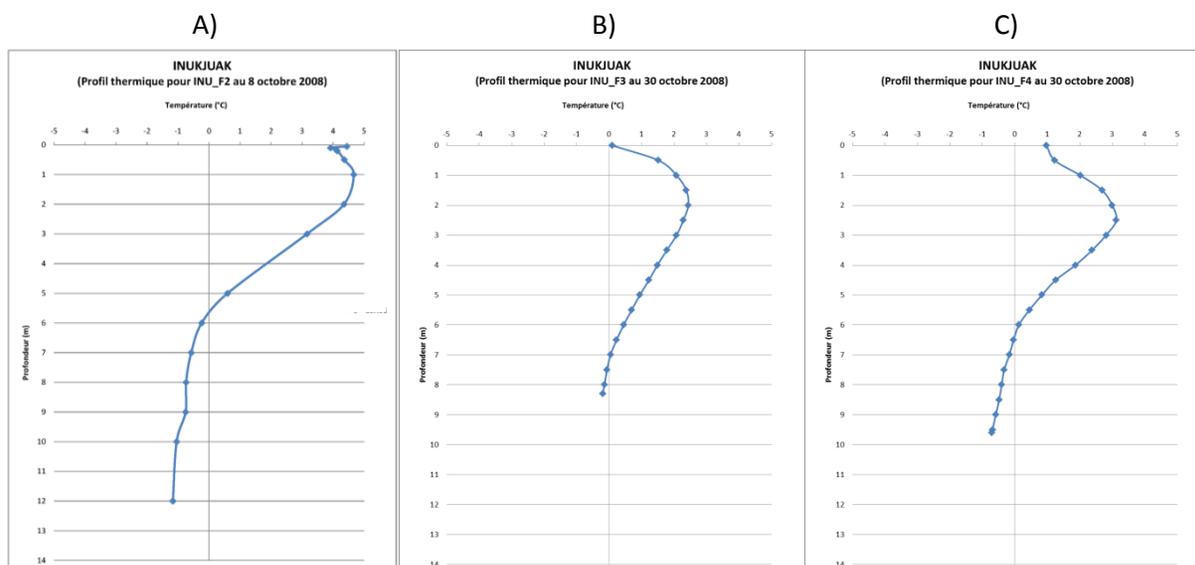


Figure 35: Températures du sol mesurées automatiquement par le chapelet de thermistances mis en place dans le puits de forage INU_F2 (A). Températures du sol mesurées manuellement à différentes profondeurs à l'emplacement des puits de forages INU_F3 (B) et INU_F5 (C) au mois d'octobre 2008.

4.2.3.2 ÉVOLUTION FUTURE : PÉRIODE 2010-2050

4.2.3.2.1 CALIBRATION

Pour la piste d'Inukjuak, deux modèles numériques ont été construits pour simuler le régime thermique aux chaînages 4+989 et 5+704. C'est deux modèles utilisent les informations stratigraphiques issues des forages réalisés à proximité soit les forages INU_F2 et INU_F3 (Tableau 11). La calibration des modèles a été réalisée sur une période de 9 ans, soit de 2000 à 2010. Pour les périodes 2000-2007 et 2008-2010, la température de l'air provient respectivement de la série climatique reconstituée (NARR) et des mesures prises à l'emplacement du câble INU_F2. Un suivi thermique du pergélisol en pied de remblai est réalisé depuis 2008 par le câble à thermistance INU_F2 à partir duquel il est possible de comparer les valeurs simulées. Cette comparaison, quoique possible pour seulement 3 années, montre qu'il existe une excellente correspondance ($\pm 1\%$) entre les données simulées et celles enregistrées par le câble à thermistance INU_F2. Les résultats de la calibration du modèle pour les simulations au chaînage 5+704 sont plus incertains en raison de l'absence de données thermiques pour la calibration. Comme il n'y a pas de câbles à thermistances à ce site, la profondeur de dégel au centre-piste est estimée à partir d'un profil géoradar réalisé à l'été 2005, tandis que celle en pied de remblai provient de mesures ponctuelles réalisées dans le puits de forage INU_F3 à la fin de l'été 2008 (Figure 35B).

Tableau 11: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol en marge et sous la piste d'Inukjuak.

chaînages 4+989 (forage INU_F2)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	
5,10 à 0,00	Remblai	2000	2500	250	380	0,05
0,00 à -1,10	Sable fin	2301	3306	250	122	0,22
-1,10 à -2,60	Silt et sable	2414	3289	250	131	0,22
-2,60 à -4,70	Silt argileux	2513	3568	271	136	0,29
-4,70 à -9,20	Sable et silt	1948	2438	275	122	0,22
-9,20 à -11,00	Sable graveleux	2136	2732	115	105	0,1
-11,00 à -50,00	Roc	2490	2490	146,9	146,9	0
chaînages 5+704 (forage INU_F3)						
2,8 à 0,00	Remblai	2000	2500	150	160	0,05
0,00 à -1,80	Sable fin	2301	3306	250	122	0,22
-1,80 à -3,70	Silt et sable	2414	3289	250	131	0,22
-3,70 à -6,80	Sable graveleux	2136	2732	115	105	0,1
-6,80 à -57,00	Roc	2490	2490	146,9	146,9	0

4.2.3.2.2 PROJECTIONS ET TASSEMENTS À VENIR

Les projections réalisées à l'emplacement du câble INU-F2 en pied de remblai, où les épaisseurs de neige considérables influencent de façon importante les transferts thermiques, démontrent que malgré un scénario optimiste (série AEV), une augmentation de couche de sol dégelé est à anticiper (Figure 36A). En effet, selon les simulations, le front de dégel atteindra le socle rocheux respectivement autour de 2022 selon les simulations effectuées avec les températures de l'air de la série AHA et autour de 2030 avec celles de la série AEV. Dans le cas particulier du pied de remblai au chaînage 4+989 m, qui est déjà très fortement dégradé thermiquement par la présence d'accumulations de neige, le dégel projeté par les deux séries de projection MRCC dépasse l'épaisseur des dépôts meubles (11 m au forage INU_F2). Évidemment, la série AEV montre un dégel plus tardif que la série AHA qui est plus chaude, mais la différence entre les deux séries est faible (environ huit années de différence) ce qui démontre l'importance du problème nonobstant le scénario de température choisi. Pour le centre-piste, au chaînage 4+989, la position du front de dégel demeure relativement stable selon la projection AEV comparativement à la projection AHA qui montre un approfondissement important (Figure 36B). En effet, au cours de la période 2010-2050, le front de dégel au centre-piste atteindra une profondeur maximale de 5,20 m sous la projection AEV et de 9,27 m avec la projection AHA.

Afin de quantifier les changements de températures du sol en profondeur selon les projections AEV et AHA, une comparaison des profils des températures minimums, maximums et moyennes du sol pour les années 2010 et 2050 a été effectuée (Figure 37). Entre 2010 et 2050, pour le pied de remblai au chaînage 4+989 m (INU-F2), les températures moyennes dans le sol à 5, 10 et 15 m de profondeur passent respectivement de -0,46 à 1,99°C, -1,08 à 1,45°C et -1,01 à 1,09°C sous la projection AEV et de 0,16 à 2,78°C, -1,0 à 2,36°C et de -0,98 à 1,99°C sous la projection AHA. D'après ces simulations, le profil du sol en pied de remblai au chaînage 4+989 m sera complètement dégelé d'ici 2050 sous les deux projections avec une augmentation anticipée des températures moyennes comprise entre 2,45 et 2,62°C à 5 m, 2,53 et 3,41°C à 10 m et 2,10 et 2,97°C à 15 m de profondeur. Pour la même période et aux mêmes profondeurs, la température moyenne du sol au centre-piste passera respectivement de -3,07 à -2,01°C, -3,55 à -2,45°C et -3,66 à -2,37°C sous la projection AEV et de -1,47 à 0,21°C, -2,56 à -0,41°C et -2,56 à -0,90°C sous la projection AHA. Contrairement au pied de remblai, les résultats des simulations numériques pour le centre-piste indiquent que malgré un approfondissement considérable du front de

dégel, le sol à plus de 9 m de profondeur restera gelé d'ici 2050 avec néanmoins des températures plus chaudes toutes supérieures à -1°C .

Les projections pour le site INU-F3 (chaînage 5+704 m) montrent que le front de dégel en pied de remblai va atteindre une profondeur comprise entre -12,42 et -12,97 m d'ici 2050, ce qui correspond à une augmentation de la couche de sol dégelé de l'ordre de 5,6 à 6,2 m (Figure 38A). Actuellement, d'après le relevé de température effectué ponctuellement en octobre 2008 dans le puits de forage INU_F3, la couche de sol dégelé en pied de remblai atteint le socle rocheux qui se situe à une profondeur d'environ 6,8 m. Par conséquent, la simulation des profondeurs du front de dégel réalisée à partir de la sortie AHA concorde mieux avec les observations de terrain que celle qui découle de la sortie AEV. Néanmoins, nonobstant la sortie de projection MRCC utilisée, la couche de sol dégelé en pied de remblai atteint déjà (sortie AHA) ou atteindra rapidement dans les prochaines années (sortie AEV) le socle rocheux. Pour le centre-piste, la profondeur du front de dégel devrait atteindre d'ici 2050 des valeurs comprises entre -2,88 et 3,20 m, soit une légère augmentation d'environ 0,08 et 0,4 m (Figure 38B).

Au chaînage 5+704 m, la variation d'ici 2050 des profils de température du sol en profondeur selon les projections AEV et AHA est présentée à la figure 39. D'après les simulations, les températures moyennes à 5, 10 et 15 m de profondeur en pied de remblai passent respectivement de $-0,29$ à $1,88^{\circ}\text{C}$, $-1,32$ à $1,45^{\circ}\text{C}$ et $-1,80$ à $1,15^{\circ}\text{C}$ sous la projection AEV et de $0,64$ à $2,27^{\circ}\text{C}$, $-0,66$ à $1,99^{\circ}\text{C}$ et de $-1,47$ à $1,70^{\circ}\text{C}$ sous la projection AHA. D'après ces simulations, le profil du sol en pied de remblai au chaînage 5+704 m sera complètement dégelé d'ici 2050 sous les deux projections avec une augmentation anticipée des températures moyennes comprise entre $1,63$ et $2,17^{\circ}\text{C}$ à 5 m, $2,65$ et $2,78^{\circ}\text{C}$ à 10 m et $2,95$ et $3,17^{\circ}\text{C}$ à 15 m de profondeur. Au centre-piste, la température moyenne du sol à 5, 10 et 15 m de profondeur passera respectivement de $-3,76$ à $-3,27^{\circ}\text{C}$, $-3,26$ à $-2,89^{\circ}\text{C}$ et $-2,39$ à $-2,30^{\circ}\text{C}$ sous la projection AEV et de $-2,25$ à $-1,28^{\circ}\text{C}$, $-1,74$ à $-0,92^{\circ}\text{C}$ et $-1,13$ à $-0,51^{\circ}\text{C}$ sous la projection AHA. Contrairement au pied de remblai, les résultats des simulations numériques pour le centre-piste indiquent que le sol restera gelé à plus de 3,2 m de profondeur d'ici 2050 avec des températures d'environ $0,5$ à 1°C plus chaudes en profondeur.

À la lumière des observations sur le terrain et des simulations numériques réalisées aux chaînages 4+989 m (INU_F2) et 5+704 m (INU_F3), il apparaît hors de tout doute que l'accumulation de neige est le facteur déterminant qui explique les différences thermiques notables qui existent entre les pieds de remblai et le centre-piste. D'une part, les pieds de remblai affichent des profils des températures minimums beaucoup plus chauds, attribuable à l'effet isolant de la neige au cours de l'hiver qui empêche l'extraction de chaleur accumulée en pied de remblai au cours de l'été. Sur une base annuelle, l'effet de la neige contribue à réchauffer le régime thermique, phénomène qui se présente graphiquement par le déplacement des profils de températures vers des valeurs plus chaudes. Le réchauffement du régime thermique s'accompagne d'une augmentation de l'épaisseur de la couche active susceptible de former une zone non-gelée à l'année « talik » si son épaisseur devient trop importante ou les conditions climatiques en hiver trop chaudes pour permettre un regel complet en hiver. Sous de telles conditions, le front de dégel atteindra des profondeurs plus importantes, et ce plus rapidement en pied de remblai comparativement au centre-piste, tel qu'illustré à la figure 40 qui présente l'évolution bidimensionnelle de la couche de sol dégelé entre 2010 et 2050 en fonction de la sortie AEV des températures MRCC. Graduellement, les conditions plus chaudes en périphérie de l'infrastructure vont, par transfert latéral de la chaleur, se propager vers le centre-piste et ultimement en affecter la stabilité.

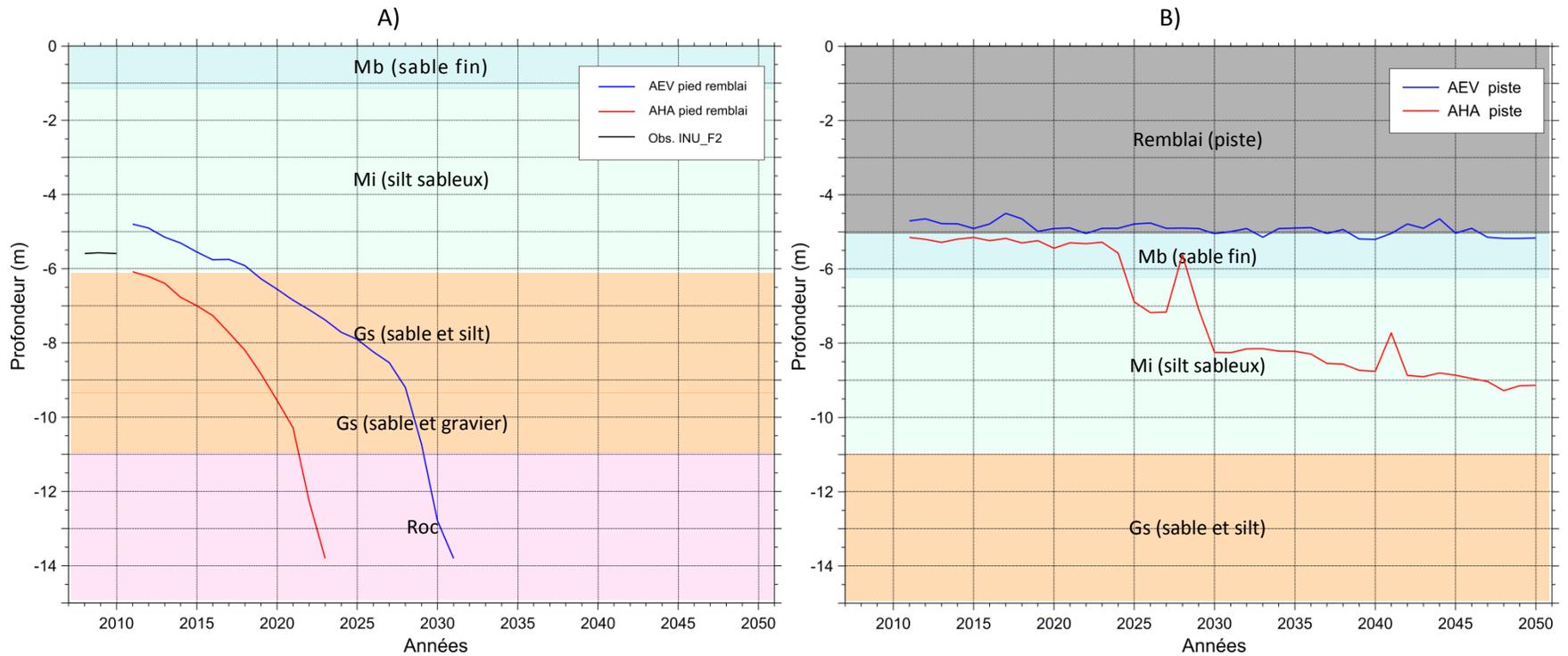


Figure 36: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport d’Inukjuak, chaînage 4+989 m, vis-à-vis le forage INU-F2.

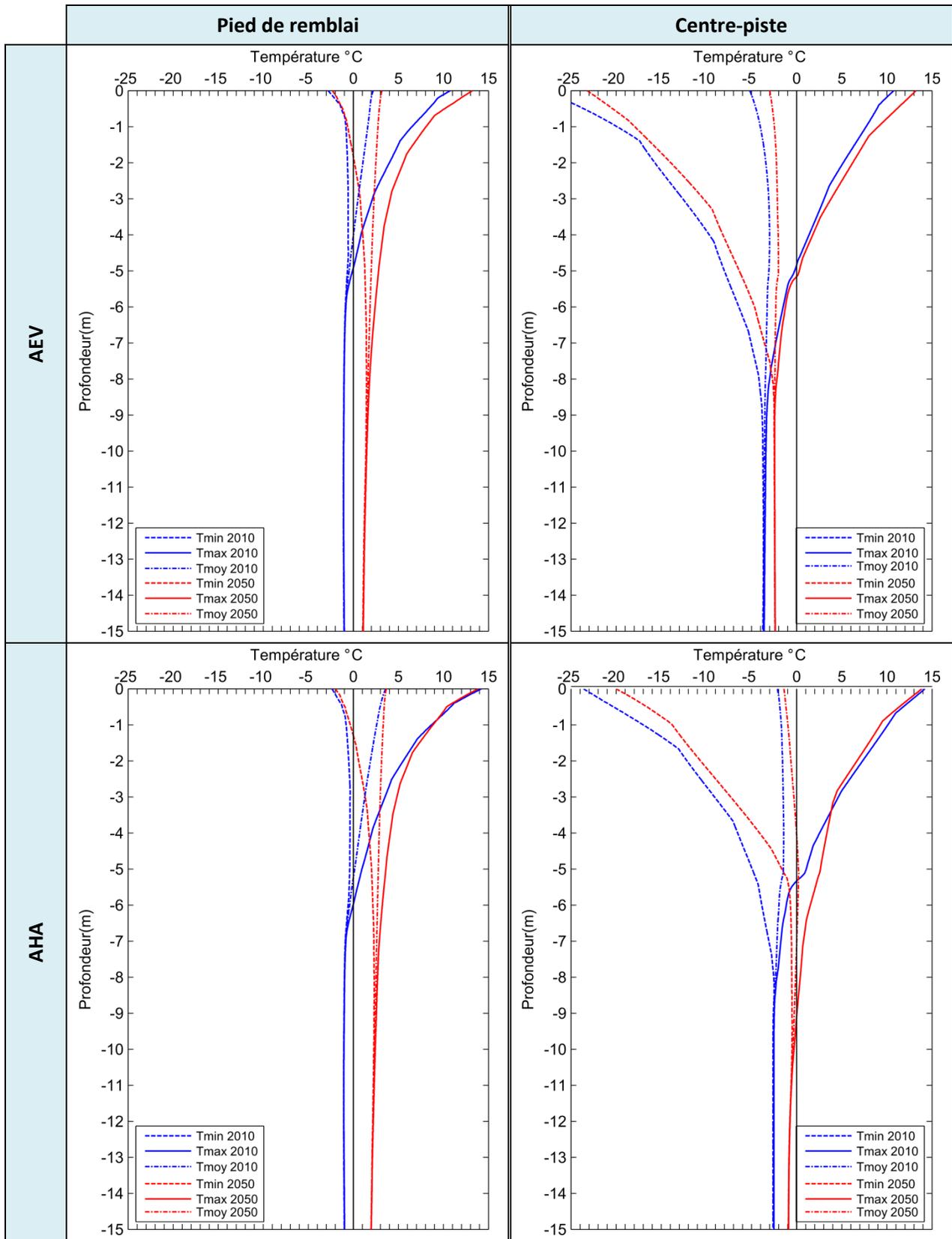
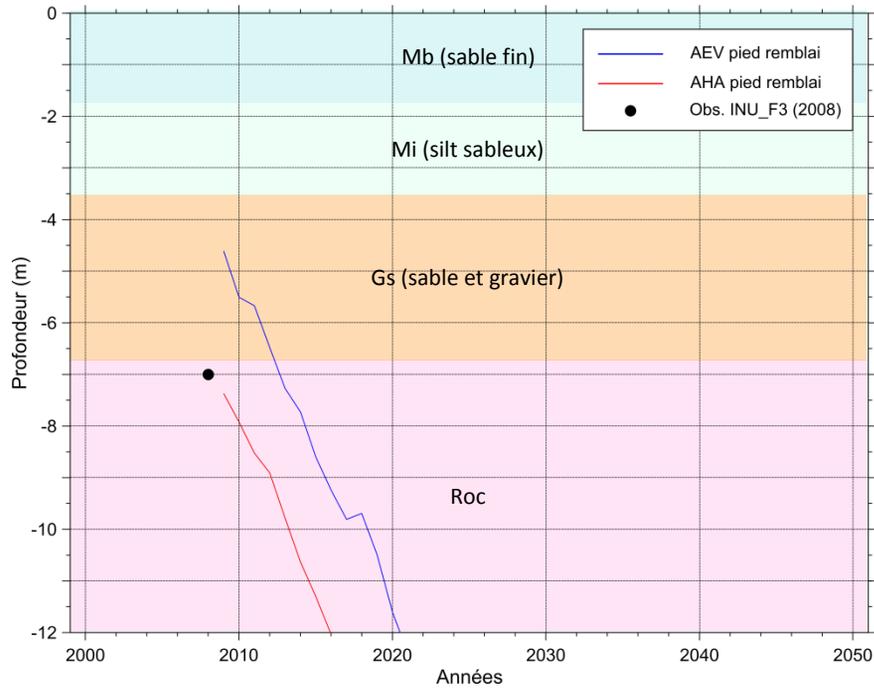


Figure 37: Profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport d'Inukjuak, chaînage 4+989 m (INU-F2).



A)



B)

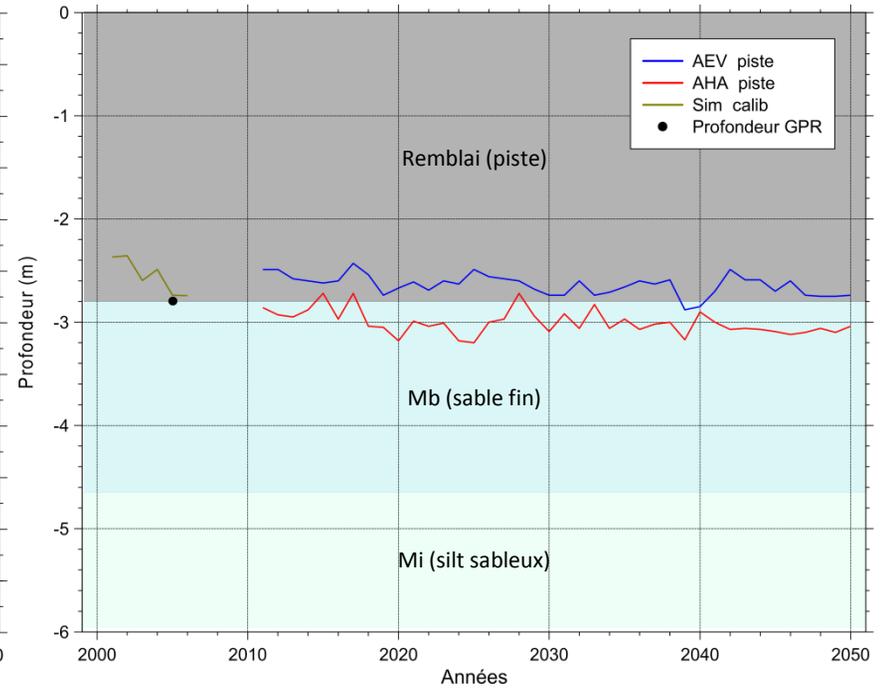


Figure 38: Projections de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport d'Inukjuak, chaînage 5+704 m, vis-à-vis le forage INU-F3.

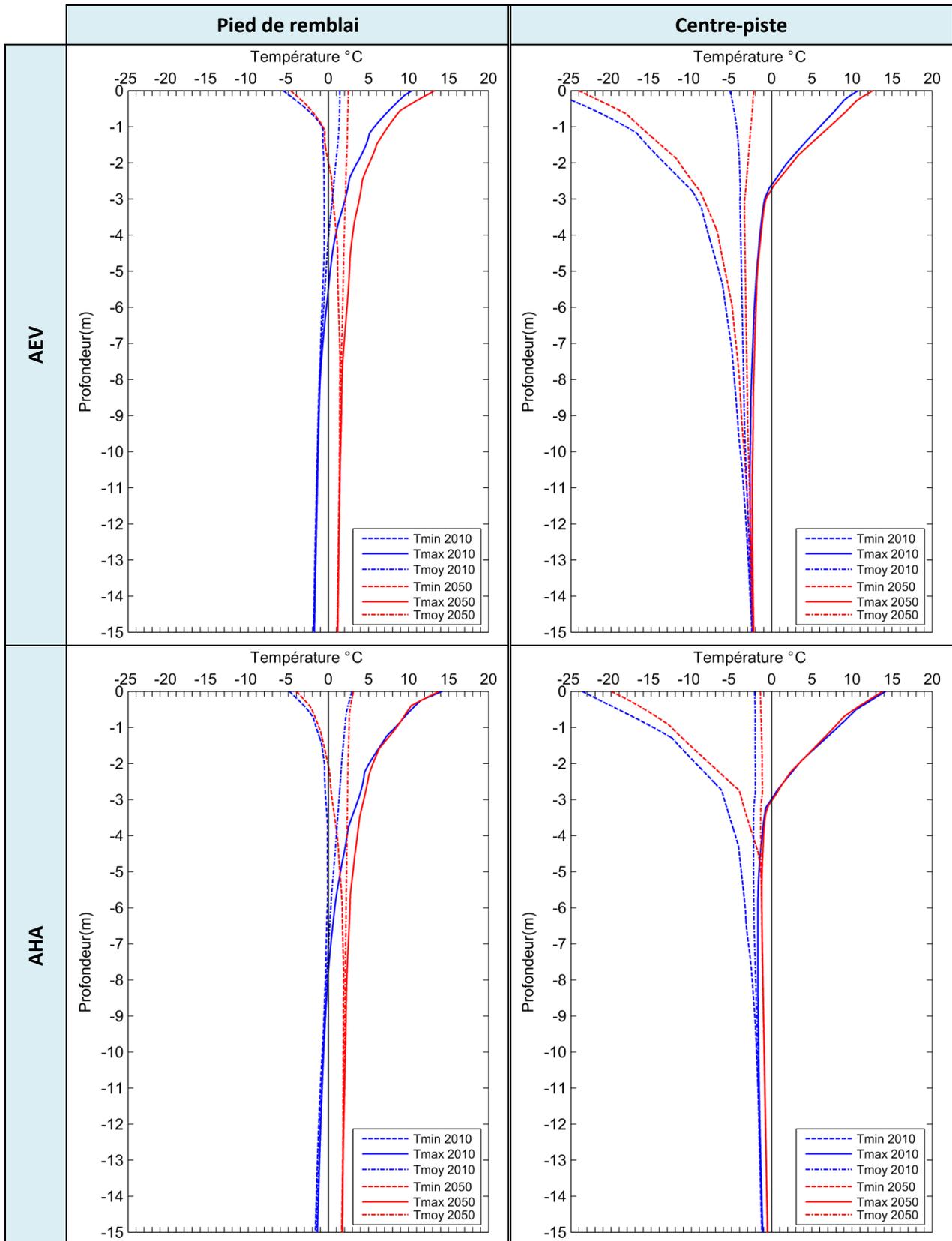


Figure 39: Profils de température projetés pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport d'Inukjuak, chaînage 5+704 m (INU-F3).

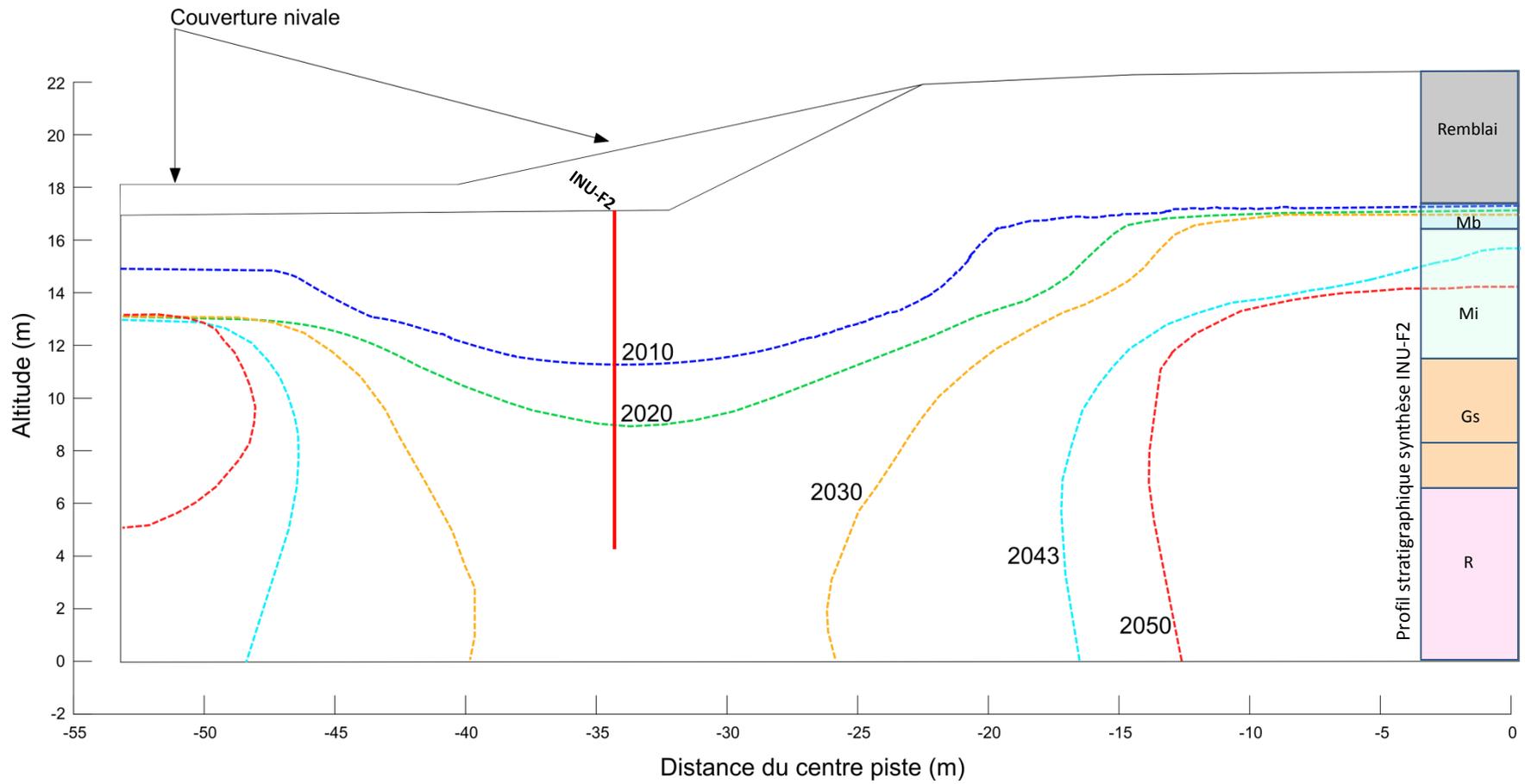


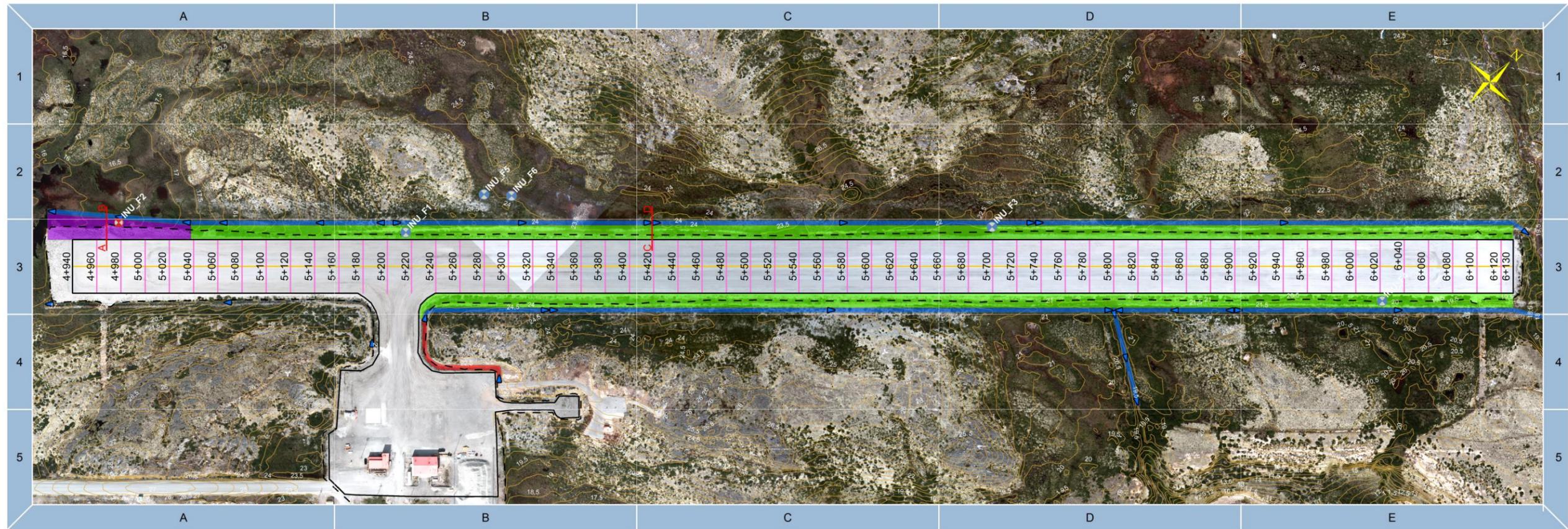
Figure 40: Évolution potentielle de la couche de sol dégelé en pied de remblai et sous la piste d’Inukjuak entre 2010 et 2050 en fonction de la sortie AEV des températures MRCC.

4.2.4 STRATÉGIES D'ADAPTATION ENVISAGÉES :

D'après les lectures de températures du sol (câble INU-F2) et les relevés de neige, il est possible de conclure que les signes de dégradation sont essentiellement le résultat d'une perturbation du régime thermique du pergélisol en pied de remblai liée à la modification de facteurs environnementaux locaux tels que le drainage et l'accumulation de neige. Indépendamment de la composante climatique, le pergélisol en bordure de piste est sévèrement affecté et sa dégradation est avancée comme en témoigne le suivi thermique au câble INU-F2. D'après les projections forcées par les températures de l'air provenant du MRCC (série AEV et AHA), une légère augmentation de l'épaisseur de la couche active est à prévoir au centre-piste, ce qui devrait entraîner des tassements très localisés et d'ampleur limitée. Toutefois, le pergélisol en pied de remblai, soumis à l'influence conjointe de l'augmentation des températures de l'air projetée par les sorties climatiques du MRCC et la présence d'une couverture nivale importante, continuera à se dégrader. Dans certains secteurs, tel qu'au forage INU_F3, le front de dégel a atteint le socle rocheux en pied de remblai ce qui indique que les tassements observés depuis la construction de la piste découlent du dégel complet des dépôts meubles en pied de remblai. Ce dégel très localisé lié à l'enneigement et le drainage explique pourquoi les signes de dégradation recensés le long de la piste d'atterrissage d'Inukjuak sont exclusivement situés dans l'accotement et se prolongent rarement plus loin que les feux de bord de piste. Toutefois, afin de freiner la dégradation des accotements et éviter tout transfert de chaleur latéral éventuel qui pourrait graduellement affecter la stabilité du pergélisol sous la piste, il importe de venir modifier les composantes de l'infrastructure telles que la pente des remblais et les fossés de drainage afin de minimiser leur impact sur l'enneigement et le drainage. Pour ce faire, la stratégie d'adaptation proposée à la figure 41 tend, par l'utilisation d'un remblai à pente adoucie (6 :1) avec fossés de drainage peu profonds sur presque la totalité de l'infrastructure, à minimiser l'accumulation de neige en pied de remblai et à éloigner le drainage de la zone vitale de l'infrastructure, c'est-à-dire du centre-piste. Dans les secteurs où l'épaisseur du remblai actuelle est supérieure à 3 mètres, un remblai à pente adoucie tronquée est à privilégier. Pour ces sections, la partie adoucie 6 :1 devra atteindre une distance minimale de 10 m par rapport au haut de talus actuel pour ensuite rejoindre le terrain naturel avec une pente 2 :1 (Figure 41).

Parallèlement à la stratégie d'adaptation proposée, les actions supplémentaires suivantes sont recommandées afin : 1- d'assurer une évaluation approfondie de l'étendue du problème, 2- de combler le manque de connaissances sur les conditions du pergélisol en zones non perturbées (centre-piste) et 3- d'évaluer à long terme l'efficacité des méthodes de mitigation proposées.

- Instrumenter avec des câbles à thermistances les puits de forage INU-F3 et INU-F4. En cas de travaux de réfection, il s'avère essentiel de préserver l'instrumentation, car celle-ci permettra d'évaluer ultérieurement l'efficacité de la méthode de mitigation utilisée.
- Réaliser des relevés au MASW afin d'avoir le profil des sols dégelés le long de transects partant du centre-piste vers le pied de remblai et le terrain naturel.
- Réaliser des forages peu profonds (<5 m) avec récupération au centre-piste afin de déterminer les propriétés du pergélisol non dégradé présent sous la piste. Données que la campagne de forage de 2008 et 2009 n'a pu permettre d'acquérir en raison des emplacements en zones fortement perturbées (pied de remblai) des forages et de problèmes techniques lors de l'utilisation du système d'échantillonnage.
- Munir l'infrastructure d'un câble au centre-piste afin de faire le suivi du régime thermique à long terme à l'intérieur et sous le remblai.



Stratégie d'adaptation, aéroport d'Inukjuak.

Infrastructures et instrumentation

- Forages géotechniques avec câble à thermistances
 - Forages géotechniques
 - Centre piste
 - Chaînage transversal
 - Courbe de niveau (50 cm)
 - Limite de la surface profilée
 - Position du pied de remblai
- 1 cm = 30 m
- 0 20 40 80 120 m

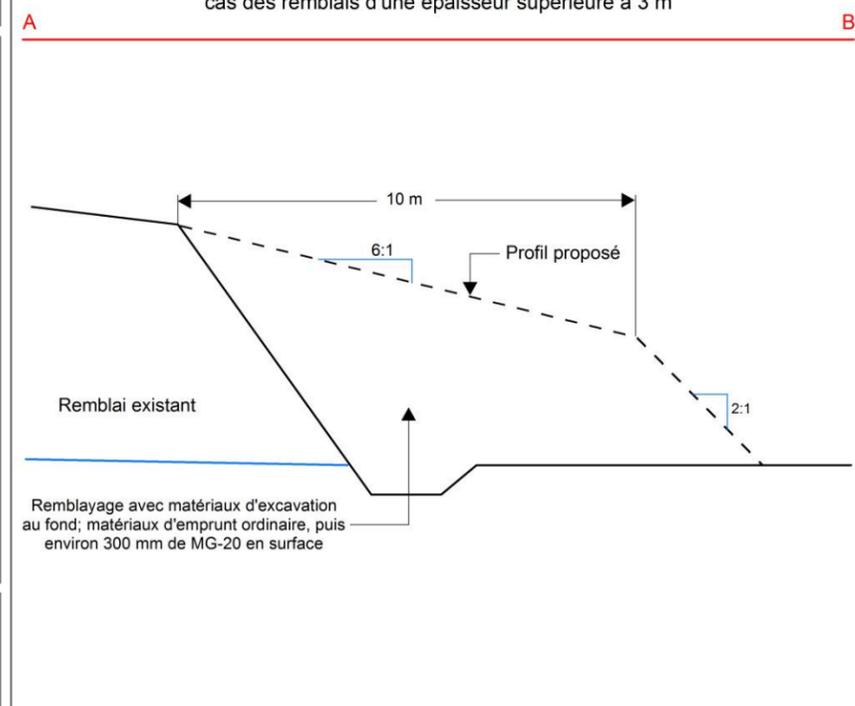
Modifications proposées

- Sens de l'écoulement des fossés de drainage
- Nouveau fossé de drainage peu profond (< 500 mm)
- Reprofilage des fossés de drainage existants
- Remblai à pente adoucie (6:1) avec fossé de drainage peu profond
- Remblai à pente adoucie tronquée (6:1)

Réalisation: E. L'Hérault, M. Allard et G. Doré, septembre 2011, Centre d'études nordiques, Université Laval.
Système de référence: NAD83 ; Projection: MTM zone 10



Pente adoucie tronquée:
cas des remblais d'une épaisseur supérieure à 3 m



Pente adoucie avec fossé de drainage peu profond:
cas des remblais d'une épaisseur inférieure à 3 m

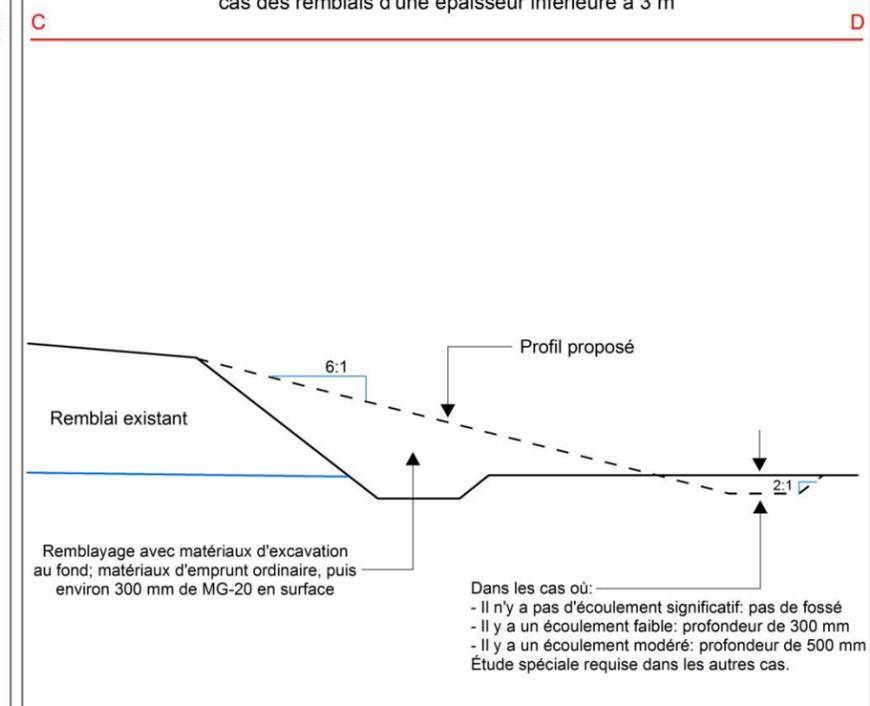


Figure 41 : Plan d'adaptation pour la piste d'Inukjuak.

4.3 PUVIRNITUQ

4.3.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

L'aéroport de Puvirnituk a été achevé en 1990. Comparativement aux autres pistes construites par le Ministère des Transports du Québec dans les communautés inuites du Nunavik, celle de Puvirnituk est significativement plus longue et plus large. Orientée selon un axe nord-nord-ouest sud-sud-est, la longueur totale de la piste était jusqu'en 2009 de 1644 m, du chaînage 4+940 m au chaînage 6+584 m, et sa largeur était de 90 m (60 m pour la bande de roulement). Ses extrémités sud et nord reposaient respectivement à des altitudes d'environ 16 et 23 m. Depuis l'été 2009, à la suite d'importants travaux, la piste a été rallongée de 388 m vers le nord et 12 m vers le sud pour débiter désormais au chaînage 4+928 m et se terminer au chaînage 6+972 m à une altitude de 26 m.

La piste a été presque entièrement construite sur des affleurements rocheux (Allard *et al.*, 2007). Toutefois, la piste traverse une vallée orientée nord-ouest sud-est entre les chaînages 6+125 m et 6+290 m sur le côté est et entre les chaînages 6+270 m et 6+390 m sur le côté ouest. C'est essentiellement dans cette section de la piste traversée par la vallée comblée de dépôts meubles qu'on observe les signes de dégradation. Une dépression majeure a été relevée en bordure de piste du côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m. Cette dépression est circonscrite à l'intérieur de l'accotement côté est et ne dépasse pas les feux de piste. La profondeur de cette dépression n'a pas été mesurée lors des travaux de forage, toutefois, elle avait été estimée à environ 20 cm en 2004 par Beulac et Doré (2005). Des mesures effectuées par le MTQ à l'été 2008 indiquent que cette dépression mesurait alors environ 66 m de longueur, 20 m de largeur et 0,40 m de profondeur. Deux plaques de tassements sont installées au chaînage 6+180 m sur le côté est de la piste dans l'accotement où des tassements inférieurs à 2 cm y ont été mesurés entre 2005 et 2008. Ces faibles valeurs de tassements s'expliquent par une mauvaise localisation initiale des plaques de tassements P-1 et P-2 situées à l'extérieur de la dépression à son extrémité sud. Pour rectifier la situation, deux nouvelles plaques de tassement ont été installées au centre de la dépression en 2008, plus précisément au chaînage 6+197 m à une distance de 1 m et 5 m du bord de piste.

Vis-à-vis le centre de la dépression, au pied du remblai, on observe un écoulement important d'eau tout au long de l'été et qui perdure jusque tard dans l'automne (Figure 43). L'écoulement s'effectue dans le sens de la pente, c'est-à-dire du nord-ouest au sud-est, et son débit est assez rapide. Cet écoulement d'eau sous la piste semble contribuer à la dégradation du pergélisol sous l'ouvrage et une attention particulière devra y être portée dans le futur afin de quantifier son impact thermique sur le pergélisol sous-jacent.

Au cours de l'hiver, la présence de l'imposant remblai qui traverse la vallée constitue un obstacle de taille qui entrave le transport nival par le vent ce qui contribue à l'accumulation de neige en marge de l'infrastructure (Figure 44). D'après les relevés des épaisseurs de neige réalisés par le MTQ, l'épaisseur de neige en pied de remblai sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m peut atteindre plus de 3 m d'épaisseur. L'épaisseur de la couverture nivale diminue graduellement à mesure que l'on s'éloigne du pied du remblai pour rejoindre des valeurs comprises entre 0,6 et 1 m d'épaisseur.



Figure 42 : Dépression majeure relevée en bordure de piste sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m.



Figure 43 : Écoulement d'eau sous la piste vis-à-vis le centre de la dépression majeure côté est.



Figure 44 : Accumulation de neige importante en bordure de piste sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m.

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

D'après la cartographie des unités géologiques de surface et les observations stratigraphiques (Figure 45B, C et D), la piste repose sur trois types d'unités géologiques de surface qui se résument ainsi : des affleurements rocheux (R), des dépôts d'origine marine (Mb/Ma ou Mm/Ma) et du till remanié (Tr). La répartition spatiale de ces trois unités géologiques de surface suit un patron bien spécifique qui est intimement lié à la topographie régionale caractérisée par un relief ondulé où alternent sommets et dépressions de faible amplitude (dénivellation inférieure à 30 m). Les parties surélevées correspondent essentiellement à des affleurements rocheux dont la surface lisse est marquée par des polis glaciaires, tandis que les dépressions sont, quant à elles, comblées de dépôts meubles d'origine marine et ou glaciaire. Le roc qui délimite ces dépressions peut plonger rapidement ce qui forme des cuvettes profondes à l'intérieur desquelles l'épaisseur des dépôts peut atteindre plus de 16 m.

Au total, 5 forages ont été réalisés le long de la piste de Puvirnituk ainsi que dans une petite vallée qui a par la suite été comblée par le prolongement de la piste. L'auscultation géotechnique visait essentiellement à caractériser les dépôts meubles de deux vallées transversales à la piste, soit celle initialement traversée où un tassement était observé et celle nouvellement traversée depuis le prolongement de la piste en 2009-2010. Les positions exactes des puits de forages réalisés à l'été 2008 dans le cadre de la présente étude sont présentées à la Figure 45B et leurs caractéristiques sont résumées au tableau 12. Une stratigraphie synthèse des dépôts meubles dans les dépressions accompagnées de leurs épaisseurs caractéristiques est présentée au

tableau 13. Cette synthèse est une compilation des observations qui proviennent des forages PUV_F1, PUV_F2 et PUV_F5 réalisés dans la vallée transversale de part et d'autre de la piste d'atterrissage entre chaînages 6+125 m et 6+290 m). Les caractéristiques géotechniques de chacune des unités géologiques de surface identifiées sont présentées individuellement dans les sous-sections suivantes.

Tableau 12 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Puvirnituk.

Nom du forage	Localisation par rapport au chaînage existant	Profondeur atteinte
PUV_F1	Côté Est, chaînage 6+237 m, <1 m du pied du remblai	-15,00 m
PUV_F2	Côté Est, chaînage 6+197 m, <1 m du pied du remblai	-15,60 m
PUV_F3	Extrémité Nord, chaînage 6+617 m, 38 m à l'est du centre de piste.	-6,13 m
PUV_F4	Extrémité Nord, chaînage 6+654 m, 9 m à l'est du centre de piste.	-4,40 m
PUV_F5	Côté ouest, chaînage 6+315 m, <1 m du pied du remblai	-7,42 m

Tableau 13: Stratigraphie synthèse des dépôts meubles présents dans la vallée transversale (chaînages 6+125 m et 6+290 m). Réalisée à partir des observations aux forages PUV_F1, PUV_F2 et PUV_F5.

Épaisseurs	Stratigraphie
0 à 0,30 m	Couverture de matière organique mélangée avec du gravier MG-20 en surface
0,20 à 1 m	Couche de cailloux pluri-centimétriques avec matrice de sable moyen à grossier et trace de silt. Unité géologique de surface : MB. Classification unifiée des sols (USCS) : SM
1 à 1,6 m	Sable moyen silteux grisâtre avec quelques fragments de coquillages. À la base de cette unité, le matériel a une consistance très molle et est majoritairement composé de sable fin silteux avec quelques cailloux centimétriques. Unité géologique de surface : MB. Classification unifiée des sols (USCS) : SM-ML
4 à 8 m	Silt et argile grisâtre avec quelques fragments de coquillages. Consistance molle dans les premiers mètres du dépôt où le matériel se liquéfie après manipulation. Dans la section encore gelée, présence de quelques cristaux et lentilles de glace millimétriques épars. Peut présenter une structure en polyèdres avec des espaces subhorizontaux plurimillimétriques à pluricentimétriques à l'emplacement de lentilles de glace qui ont fondu. Présence de quelques graviers à la base de cette unité. Unité géologique de surface : Ma. Classification unifiée des sols (USCS) : ML-CL ou CL
0 à 4,5 m	Diamicton grisâtre composé de sable moyen à grossier grisâtre et silt avec trace de gravier. Présence de poches de sable fin silteux avec quelques fragments de coquillages. Présence de blocs pluridécimétriques. Pas de glace apparente. (till probable). Unité géologique de surface : Tr. Classification unifiée des sols (USCS) : SM ou SM-ML

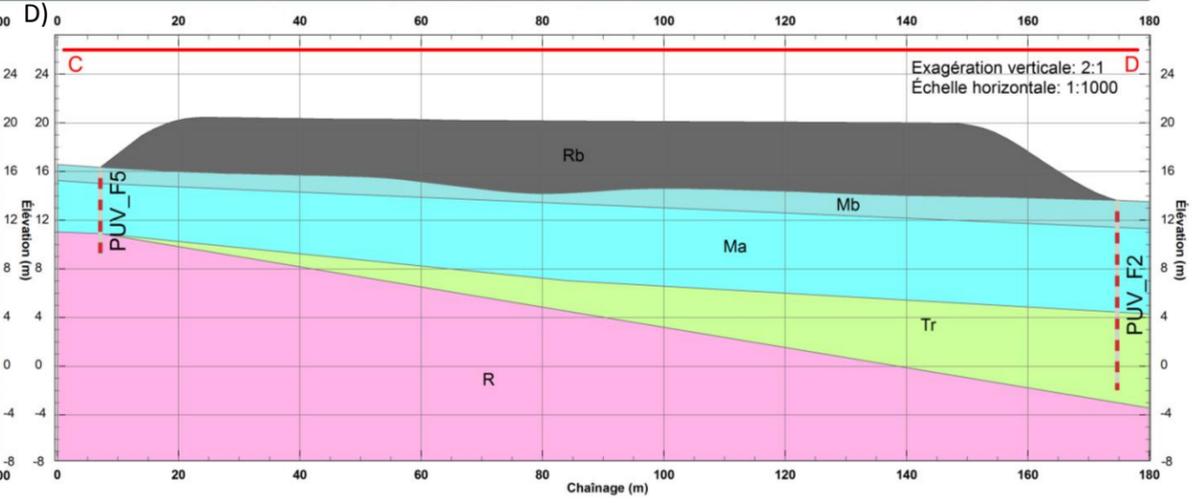
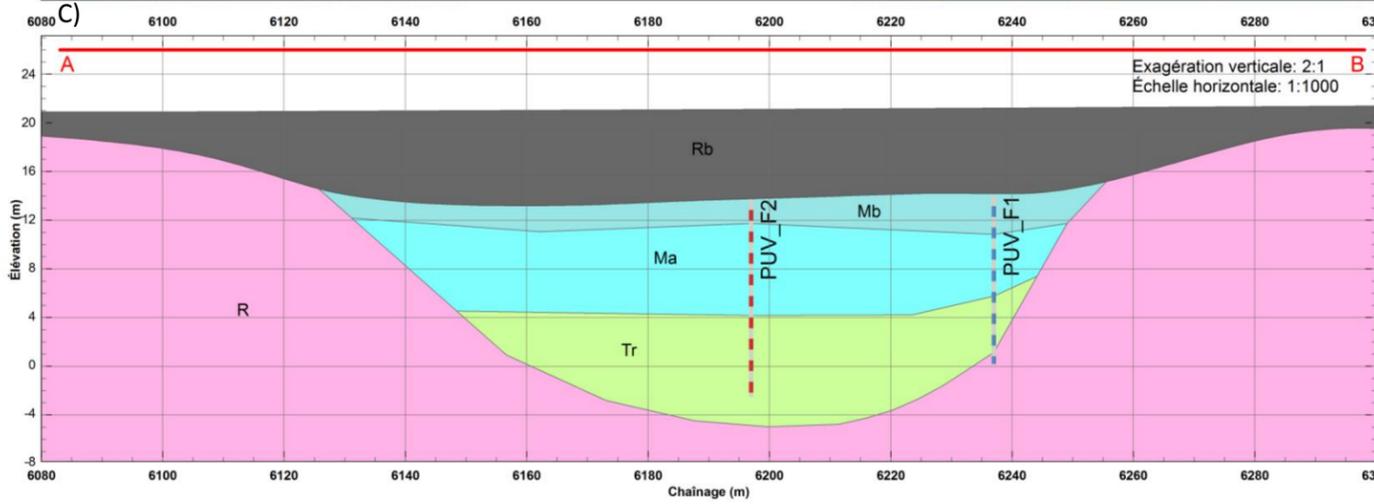
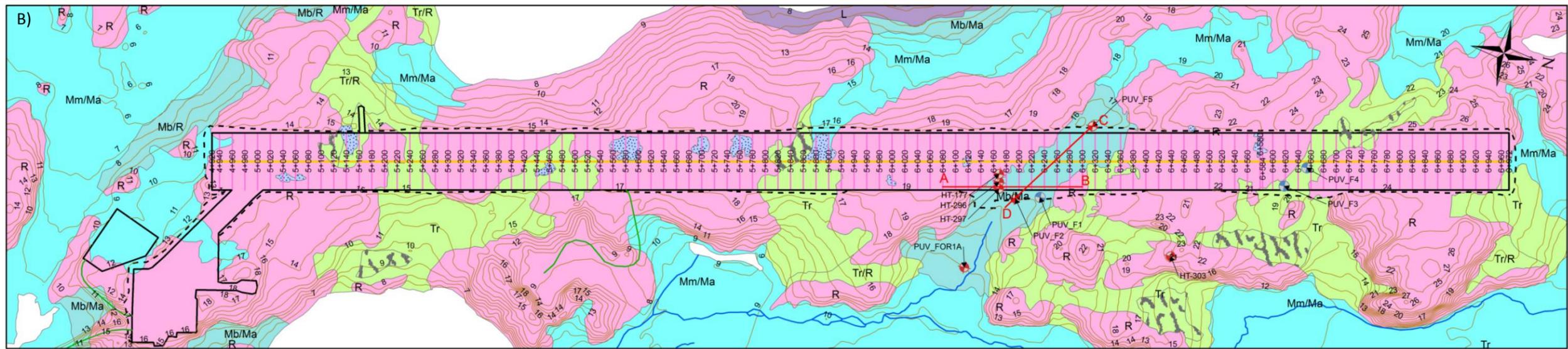
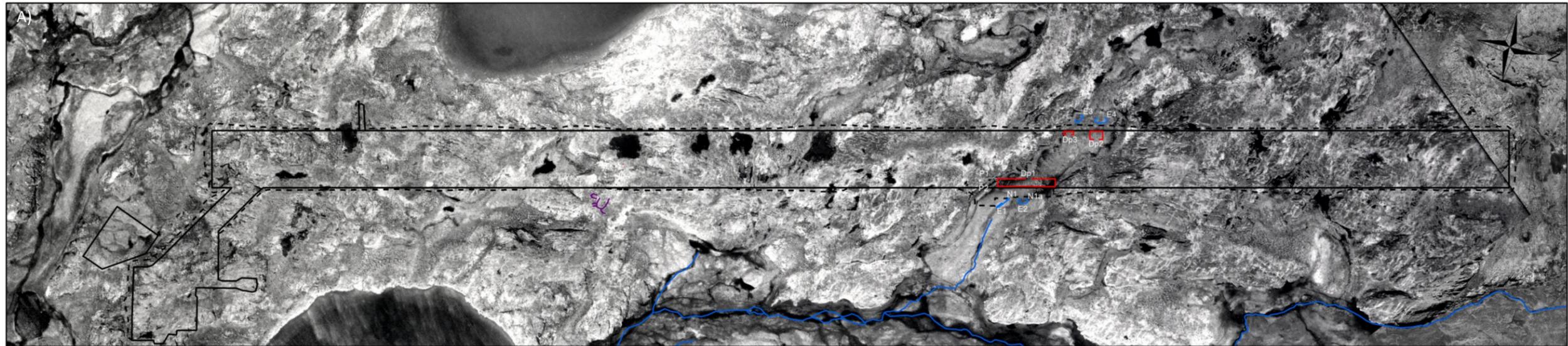


Figure 45: Planche synthèse de la piste de Puvirnituk.

Dépôts de surface

Sédiments lacustres

L

SÉDIMENTS LACUSTRES: Sédiments mis en place dans un lac comprenant principalement des sables et graviers littoraux, pré-littoraux et deltaïques; pouvant aussi inclure des sédiments remaniés à partir d'unités sous-jacentes.

Sédiments marins

Mb

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers; mis en place en eau peu profonde lors de la phase plénaire et lors de l'exondation, présence occasionnelle de fentes de gel à la surface.

Mb/Ma

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR SÉDIMENTS FINS D'EAU PROFONDE: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers, d'une épaisseur supérieure à 2 m; reposent sur des sédiments fins d'origine marine.

Mb/R

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR ROC: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers, d'une épaisseur supérieure à 2 m; reposent directement sur le roc.

Mm/Ma

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX MINCES SUR SÉDIMENTS FINS D'EAU PROFONDE: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers de moins de 2 m d'épaisseur; caractérisés par un mauvais drainage et la présence d'une mince couche de matière organique en surface. reposent sur des sédiments fins d'origine marine.

Ma

SÉDIMENTS FINS D'EAU PROFONDE: Sable silteux, silt et argile; mis en place principalement par décantation durant la phase d'inondation marine; présence éparse de graviers, de cailloux et de fragments de coquillages.

Sédiments glaciaires

Tr

TILL REMANIÉ: Dépôt hétérométrique non-trié composé principalement de sable et de silt avec un peu de graviers anguleux; diamicton dont la partie superficielle a été remaniée par les vagues et les courants lors de la phase plénaire; repose directement sur la roche en place; présence d'ostioles en surface par endroit.

Substrat rocheux

R

ROCHE EN PLACE: Affleurements rocheux et roc à mince couverture de sédiments meubles.

Anthropique

Rb

ANTHROPIQUE: Remblai.

Hydrographie



Ruisseaux



Plans d'eau



Lacs drainés lors de la mise en place de l'infrastructure

Formes de terrain



Sols structurés (ostioles, ostioles à bourrelets, sols striés sur les pentes, cercles de pierres, etc.)

Forages



Sondage



Forages géotechniques instrumentés avec un câble à thermistances



Forages géotechniques avec récupération



Courbe de niveau (1m)

Infrastructures



Centre-piste



Chaînage



Limite de la surface profilée



Limite du pied de remblais

Identification des défauts



Accumulation d'eau en bordure de piste



Dépressions



Mesure d'enneigement



Plaque de tassement

4.3.2.1 COMPLEXE DE SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR SÉDIMENTS MARINS D'EAU PROFONDE (MB/MA)

Quoiqu'en majorité construite sur une surface dominée par des affleurements rocheux, la piste traverse une petite vallée oblique d'une largeur de 60 m et délimitée au sud et au nord par des affleurements rocheux aux versants abrupts d'une hauteur supérieure à 6 m par rapport au fond de la vallée. Cette discontinuité dans le paysage justifie la présence d'un remblai important à cet endroit dont l'épaisseur atteint près de 9 m (Figure 46A). Avant la construction du remblai, des levés géophysiques effectués ont permis de démontrer la présence de dépôts marins silto-argileux grisâtre (Ma) recouverts soit de plus d'un mètre de sable silteux (Mb) ou de seulement quelques décimètres avec couverture de matières organiques en surface (Mm). En 2005, un forage superficiel (PUV_FOR1A) d'une profondeur de 3,75 m fut réalisé par Allard et *al.*, (2007) dans cette petite vallée, à une centaine de mètres du pied du remblai côté est (Figure 46B). Lors de ce forage, le front de dégel avait été rencontré à 0,43 m de profondeur au-delà duquel, le dépôt de sables silteux beigeâtre, d'une épaisseur de 0,88 m, contenait de fines lentilles de glace occupant un volume estimé à environ 30% (Figure 46C et D). Sous cette couverture mince, un matériel gélif grisâtre avec une importante fraction de silt et d'argile avait été rencontré puis échantillonné (Figure 46E). Ce même dépôt grisâtre à granulométrie fine avait également été ausculté entre les chaînages 6+330 et 6+350 lors d'une étude géotechnique réalisée avant la construction de la piste (rapport géotechnique, laboratoire ville-marie, 1989). Rencontré à 1 m de profondeur, ce dépôt silto-argileux peu plastique (USCS : ML), constitué à 75% de silt, avait des teneurs en eau inférieures à 15% dans la couche active et était très sensible et facilement liquéfiable.

Dans le cadre de la présente étude, trois forages avec récupération ont été réalisés à l'été 2008 dans cette vallée. Pour ces trois forages, intitulés PUV_F1, PUV_F2 et PUV_F5, l'échantillonnage a été réalisé en partie à la cuillère fendue en raison de la consistance très molle du dépôt. En effet, sur l'ensemble de son épaisseur évaluée à plus de 5 m, l'unité silto-argileuse grisâtre (Ma) présente sous la fine couverture de dépôt de sables silteux beigeâtre (Mb ou Mm) présente une consistance molle avec des indices n tous inférieurs à 10 coups/300 mm et pouvant atteindre des valeurs aussi basses que 2 coups/300 mm (Figure 47A et B). Les échantillons prélevés étaient très sensibles et sujets à la liquéfaction à la moindre manipulation avec des teneurs en eau mesurées toutes inférieures à 34 %. Les essais de consistance réalisés (Tableau 41) démontrent que ce dépôt est un mélange de silts inorganiques, sables très fins et argile de faible plasticité (USCS : ML-CL). La proportion de particules fines (< 0,075 mm) peut atteindre plus de 90 % et tend à augmenter en profondeur pour favoriser un comportement géotechnique qui s'apparente à celui d'une argile inorganique de faible plasticité (USCS : CL). Les teneurs en eau mesurées, généralement supérieures aux limites de liquidité mesurées (W_L d'environ 25 %), expliquent la sensibilité du dépôt lors de son prélèvement à sa susceptibilité à se transformer en un liquide visqueux à la moindre vibration (Figure 47A et B).

Dans ce dépôt, aucune évidence de glace en excès n'a été notée à l'exception de quelques petites lentilles de glace millimétriques observées sur environ 1,8 m d'épaisseur à des profondeurs supérieures à 6 mètres. Ces petites lentilles de glace se trouvent dans un sol au comportement similaire à celui d'un sol dégelé, en raison de la température du sol près du point de fusion, comprise entre -1 et 2°C. Fait intéressant, au forage PUV_F5, les échantillons présentaient une structure en polyèdres entre 2,4 et 4,2 m de profondeurs (Figure 47E et F). Cette structure découle possiblement d'une surconsolidation du sédiment par le développement de glace de ségrégation, malheureusement, aucune lentille de glace n'a été observée. La forte dégradation thermique du pergélisol en pied du remblai, ses températures près du point de fusion en profondeur ou une possible altération thermique induite par les opérations de forage peuvent expliquer l'absence de glace de ségrégation dans ce dépôt malgré sa gélivité.

Au point de vue stratigraphique, cette couche de silt argileux d'origine marine repose sur un diamicton grisâtre assez dense identifié comme étant un till (Tr) et dont la surface a été remaniée lors de l'immersion des terres par la mer de Tyrell.



Figure 46: A) Vallée oblique comblée de sédiments littoraux et pré littoraux sur sédiments marins d'eau profonde. B) Vue de la section aval de la vallée avec l'emplacement du forage PUV_FOR1A réalisé dans une étude antérieure. C) Lentilles de glace millimétriques observées au front de dégel lors d'une excavation réalisée à l'été 2008 à proximité du forage PUV_FOR1A. D) Dépôt de sables silteux beige (USCS : SM) avec lentilles de glace et E) matériel silto-argileux grisâtre (USCS : ML) prélevés respectivement entre 0,69 et 0,88 m et 1,22 et 1,45 m de profondeur au forage PUV_FOR1A (Tirée de Allard *et al.*, 2007).

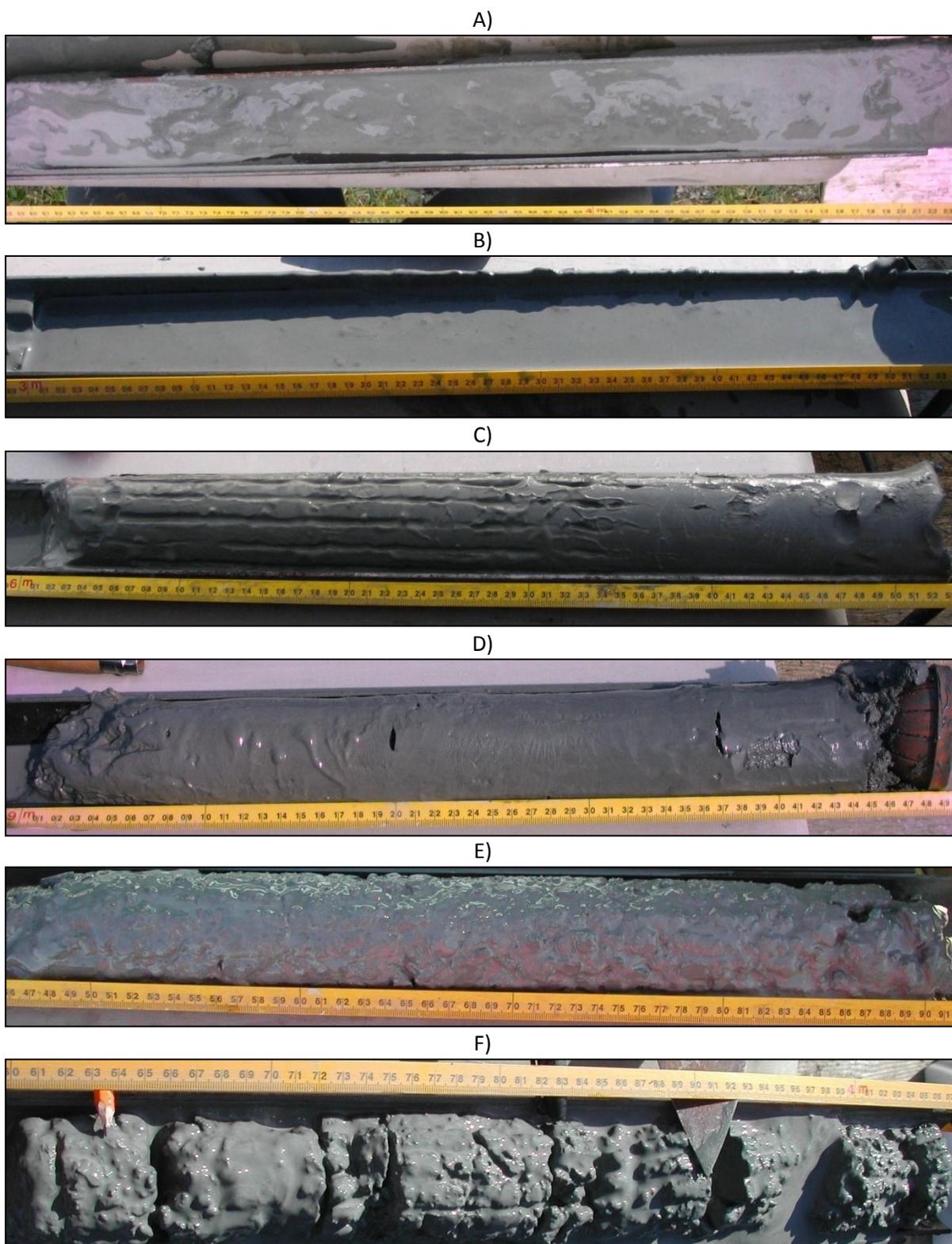


Figure 47: Échantillons de silt et d'argile grisâtre très sensible prélevés entre 3,6 et 4,2 m au forage PUV_F1 (A) et entre 3 et 3,6 m au forage PUV_F2 (B). Échantillons de silt et argile à consistance molle avec quelques cristaux de glace et lentilles millimétriques très espacées prélevés entre 6 et 6,6 m (C) et 9 et 9,5 m (D) de profondeur au forage PUV_F2. Échantillons de silt et d'argile avec une structure en polyèdre prélevés entre 2,4 et 3 m (E) et espaces possiblement occupés par des lentilles de glace fondues entre 3,6 et 4,2 m (F) au forage PUV_F5.

4.3.2.2 TILL REMANIÉ (TR)

Les dépôts de till observés à la surface se présentent essentiellement sous forme de buttes de till remanié, c'est-à-dire des accumulations d'un dépôt mal trié avec une fraction silteuse et sableuse contenant de nombreux cailloux et blocs (Allard *et al.*, 2007). Sa surface est généralement marquée par des ostioles et gros blocs (Figure 48A) et il est fréquent d'y retrouver des fragments de coquillages en surface, évidence d'un remaniement par l'eau lors de la submersion des terres par la mer de Tyrell (Figure 48B). Dans les vallées et dépressions topographiques, celui-ci se retrouve sous les dépôts marins pré littoraux et fins d'eau profonde. D'après les observations stratigraphiques compilées lors des forages réalisés le long de la piste en 2008, le till peut atteindre une épaisseur de près de 4,5 m (PUV_F2) et repose directement sur la roche en place (Figure 45C). Sa granulométrie est hétérométrie composée principalement de sable et de silt avec un peu de gravier anguleux. D'après les résultats des essais de consistance, il s'agit d'un mélange de sable et de silt non plastique avec un peu de gravier (USCS : SM). La proportion de particules fines à l'intérieur de ce dépôt peut atteindre près de 50 % (USCS : SM-ML), mais est généralement comprises entre 15 et 35 %. Lors des forages, les échantillons prélevés dans le till n'étaient pas gelés en raison de perturbations thermiques induites par les opérations de forage (Figure 48C et D). Par conséquent, l'absence d'échantillon gelé représentatif rend impossible l'évaluation des conditions du pergélisol dans ce type de dépôts (teneur en glace, type de glace, etc.). Des teneurs en eau ont tout de même été mesurées et affichent des valeurs assez faibles qui oscillent entre 7 et 18 %.

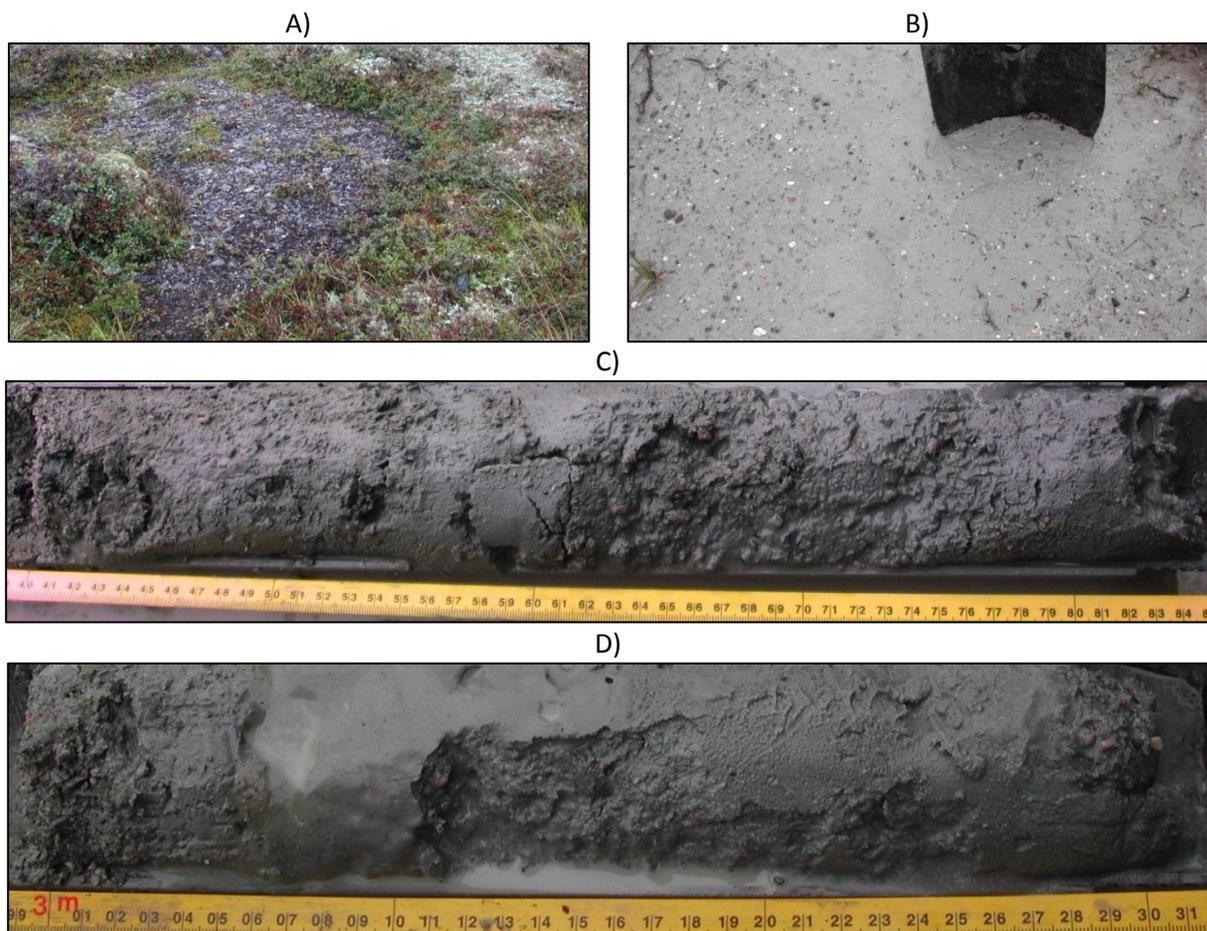


Figure 48: A) ostioles à bourrelets dans le till. B) Ostioles silto-sableuse avec fragments de coquillages en surface. Diamicton grisâtre prélevé entre 11,50 et 11,80 m de profondeur à PUV_F2 (C) et entre 3 et 3,31 m de profondeur à PUV_F3 (D).

4.3.3 CONDITIONS THERMIQUES DU PERGÉLISOL

4.3.3.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : PÉRIODE 1990-2010

Lors de la campagne de forage réalisée à l'été 2008, trois tubages de PVC ont été remplis d'huile de silicone dans les puits de forage PUV_F1, PUV_F2 et PUV_F5. Parmi ces trois forages, ce sont ceux nommés PUV_F2 et PUV_F5, indiqués en rouge sur la carte des dépôts de surface (Figure 45B), qui ont été instrumentés par des câbles à thermistances puis reliés à des stations automatisées d'enregistrement placées le long du talus du remblai (Figure 49). Les câbles à thermistances logés dans les puits de forages PUV_F2 et PUV_F5 atteignent respectivement des profondeurs de 15 et 6,5 m dans le sol naturel (Figure 45D). Les puits de forage PUV_F1 et PUV_F5 ont également fait l'état de mesures thermiques ponctuelles au mois d'octobre 2008, effectuées manuellement à l'aide d'un multimètre et d'une thermistance, tandis que les données thermiques enregistrées par la station complète dans le puits de forages PUV_F2 ont été téléchargées 12 heures après son installation. Les données de températures du sol à l'emplacement de ces trois forages sont présentées à la figure 50.

Au pied du remblai de la piste d'atterrissage de Puvirnituaq, à l'intérieur de la vallée comblée de sédiments littoraux et pré-littoraux sur sédiments marins d'eau profonde, la profondeur du dégel a atteint environ 5,60 m (forage PUV_F1) et 6,75 m (forage PUV_F5) en date du 29 octobre 2008. À l'emplacement du forage PUV_F2, les premières données enregistrées après une première journée d'automatisation permettent de constater que le dégel a atteint une profondeur de 5,75 m le 10 octobre 2008. Le profil thermique à PUV_F2 présente un plateau thermique entre 3 et 5 m de profondeur. Ces températures légèrement plus chaudes mesurées à ces profondeurs sont possiblement conditionnées par un apport de chaleur latente issue d'un écoulement d'eau à l'intérieur du sol. Malgré les différentes méthodes de mesures des températures du sol employées entre les puits de forage PUV_F1 et PUV_F2 (manuelle versus automatisée), les données de températures du sol indiquent une profondeur de dégel sensiblement similaire entre ces deux sites. Des relevés MASW (Modal Analysis of Surface Waves) réalisés les 28 et 29 septembre 2009 ont permis, à partir de profils de vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s) directement reliée à la rigidité du matériau, de déterminer l'épaisseur et le profil de la couche dégelée au-dessus du pergélisol. Le levé réalisé sur la ligne MASW-01, d'une longueur de 48 m et orienté perpendiculaire à l'axe de la piste d'atterrissage du côté est, indique que le front de dégel se situe dans le remblai sous la piste, mais qu'il se propage profondément dans le terrain naturel en pied de remblai (> 6 m). À mesure que l'on s'éloigne de l'infrastructure, le front de dégel remonte graduellement pour atteindre une profondeur d'environ 2 m à une distance de 20 mètres du pied du remblai (Figure 50D). Il existe une excellente concordance entre la position du front de dégel déterminée thermiquement par les lectures des câbles à thermistance installés dans le remblai (HT-177, HT-296, HT-297) et en pied de remblai (PUV_F2) et celle déterminée à l'aide des levés MASW. La position actuelle du front de dégel en pied de remblai diffère considérablement de celle initialement évaluée lors d'une étude géotechnique réalisée à l'été 1989 avant la construction de la piste d'atterrissage (Les Laboratoires Ville Maries Inc., 1989). En effet, au cours de cette étude, le pergélisol avait été rencontré dans la vallée transversale à des profondeurs comprises entre 0,91 et 1,22 m. Ces observations concordent avec les lectures thermiques d'un câble à thermistances installé au début des années 1990 à une centaine de mètres de la piste dans les sédiments marins silteux (HT-164) à partir desquelles la profondeur du front de dégel avait été estimée à 0,9 m à l'été 1991 (Allard *et al.*, 1994). Les lectures thermiques d'un nouveau câble de référence (PUV_FOR1A) installé en 2005 à proximité (Figure 45B) suggèrent une profondeur du front de dégel en 2005 d'environ 1 m. Cette profondeur a par la suite considérablement augmenté depuis les dernières années pour atteindre près de 1,7 m de profondeur en 2010.

D'après ces observations, en l'espace de 20 ans, la profondeur du front de dégel en pied de remblai a augmenté de plus de 4,5 m pour atteindre actuellement une profondeur supérieure à 6 m, ce qui correspond à une augmentation de près de 500 % de la couche de sol dégelé. Par opposition, la profondeur maximale du front de dégel dans le terrain naturel (HT-164 et PUV_FOR1A) a connu au cours de la même période une augmentation nettement inférieure, soit d'environ 89 %. À la lueur de ces observations, l'effet isolant de la neige qui s'accumule en pied de remblai constitue le facteur principal de la dégradation du pergélisol observée actuellement en marge de l'infrastructure et auquel s'additionne l'influence de l'augmentation de la température de l'air observée depuis le début des années 1990. Quoique difficilement quantifiable, il n'est pas à exclure la contribution potentielle de l'écoulement d'eau présent sous le remblai dans le processus de dégradation du pergélisol, aspect auquel une attention particulière a été portée lors de l'élaboration de la stratégie d'adaptation amorcée dès 2009.



Figure 49 : Station automatisée en bordure de la piste sur le versant est du remblai.

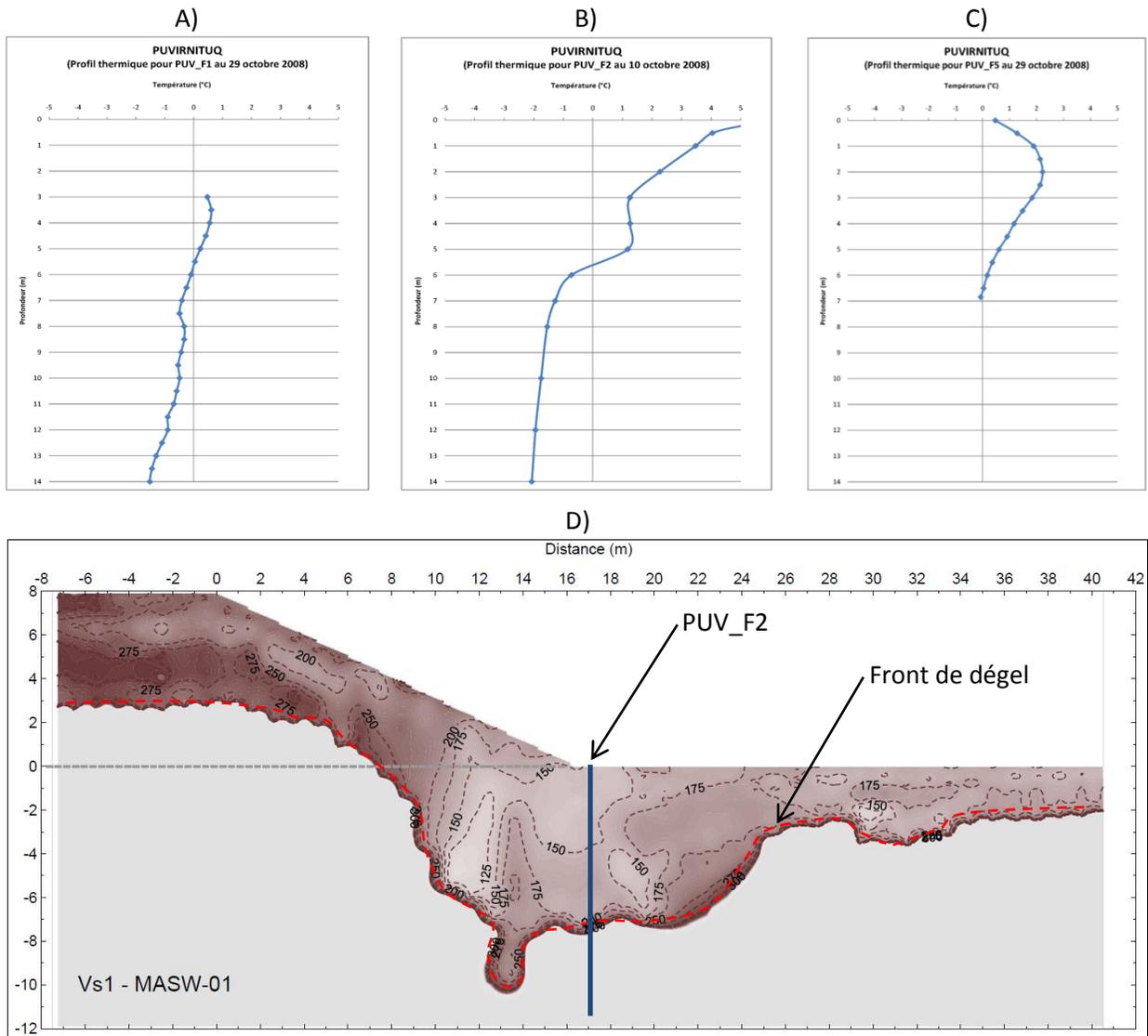


Figure 50 : Températures du sol mesurées manuellement à différentes profondeurs dans les puits de forages PUV_F1 (A) et PUV_F5 (B). C) Températures du sol mesurées automatiquement par le chapelet de thermistances mis en place dans le puits de forage PUV_F2. D) Contours de la vitesse des ondes de cisailments normalisées pour 100 kPa qui déterminent la position du front de dégel (ligne pointillée rouge) le long de la ligne MASW-01 (modifiée de Karray et al., 2009).

4.3.4 STRATÉGIES D'ADAPTATION ENVISAGÉES :

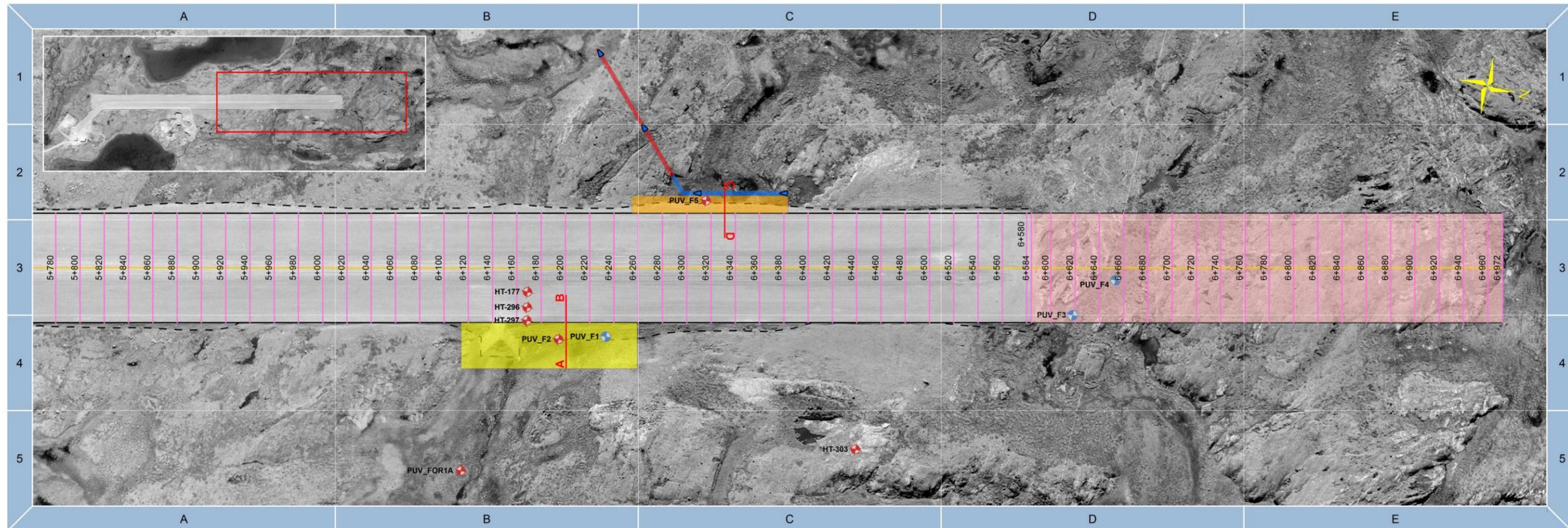
Pour la piste de Puvirnituk, les dépressions importantes sont concentrées dans la section de la piste qui traverse une petite vallée transversale comblée de silts et d'argile. À cet endroit, le remblai atteint 9 mètres d'épaisseur et repose sur un sol argileux partiellement dégelé en bordure de piste. Dans ce secteur, la hauteur de la structure favorise l'accumulation de neige à sa base. De plus, le drainage naturel de la vallée qui s'effectue naturellement de l'ouest vers l'est est entravé par la piste qui agit comme un barrage. L'absence de ponceau transversal ne permet pas de drainer rapidement l'eau qui s'accumule sur le côté ouest de la piste et force celle-ci à s'infiltrer sous le remblai ce qui induit un apport de chaleur latente et contribue à dégrader thermiquement le pergélisol. Depuis sa construction, ces facteurs ont contribué à dégrader la piste à cet endroit. Lors des forages, les essais de pénétration standard effectués par la firme « Techmat » ont indiqué une résistance des silts et argiles assez faible en pied de remblai qui pourrait possiblement conduire, si la dégradation du pergélisol se poursuit, à une rupture du remblai.

La stratégie de protection développée pour la piste de Puvirnituk (Figure 51) a pour objectif de diminuer le risque de fluage du pergélisol tiède sous le poids de la structure ainsi que la dégradation thermique du pergélisol causée par l'accumulation de neige sur le talus et par l'écoulement d'eau sous le remblai. Afin d'assurer la stabilité de l'infrastructure, les actions suivantes sont recommandées :

- Diminuer l'impact sur le régime thermique de l'écoulement d'eau sous la piste.
- Diminuer l'impact sur le régime thermique de l'accumulation de neige en pied de remblai.
- Assurer la stabilité mécanique du remblai à l'aide d'une berme (contrepois) placée au pied du talus.
- Maintenir un suivi du comportement thermique et mécanique de la technique d'ingénierie de protection proposée.

Compte tenu du risque potentiel de rupture du remblai, la stratégie d'adaptation proposée a été mise de l'avant dès l'automne 2009 pour assurer la sécurité des opérations. Ainsi, le drainage de la section amont de la vallée a été inversé de manière à drainer l'eau vers l'ouest en vue de diminuer l'impact de l'écoulement d'eau sous la piste (Figure 51). Désormais, une bonne partie des eaux de surface s'écoule par ce canal de drainage et non plus sous le remblai. Il sera important d'assurer la fonctionnalité de ce canal, particulièrement lors de la fonte printanière, car la formation d'un barrage de glace est très probable.

Afin de stabiliser ou restaurer le régime thermique du pergélisol dans la section amont et aval du remblai, la technique d'ingénierie de protection mise en place consiste en un remblai à convection d'air. Le système de protection installé pour le remblai de la piste de Puvirnituk est une variante développée par les chercheurs de l'Université Laval en collaboration avec le Ministère des Transports du Québec dans le cadre de projets expérimentaux et de simulations numériques. L'objectif de cette technique est d'extraire la chaleur des remblais par la formation en hiver de cellules de convection dans les pores d'un matériau granulaire grossier. Pour la section aval du remblai, la configuration et le dimensionnement du remblai à convection d'air ont été pensés de manière à assurer également une stabilité mécanique à l'aide d'une berme. La technique d'ingénierie de protection appliquée fait actuellement l'objet d'un suivi thermique et mécanique afin d'évaluer son efficacité sur le long terme.



Stratégie d'adaptation, aéroport de Puvirnituk.

Infrastructures et instrumentation

- Forages géotechniques avec câble à thermistances
 - Forages géotechniques
 - Centre-piste
 - Chainage
 - Courbe de niveau (50 cm)
 - Limite de la surface profilée
 - Position du pied de remblai
- 1 cm = 30 m
- 0 25 50 100 150 m

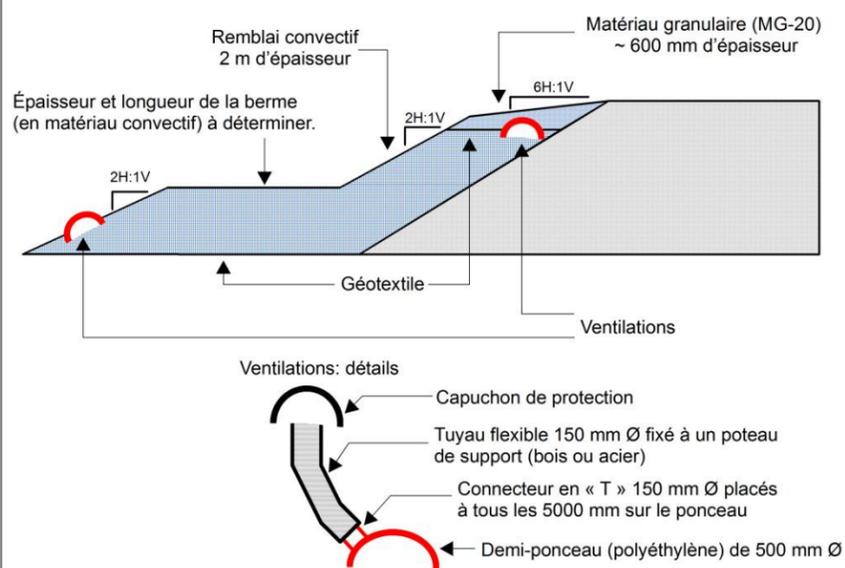
Modifications proposées

- Sens de l'écoulement des fossés de drainage
- Nouveau fossé de drainage peu profond (< 500 mm)
- Nouveau fossé de drainage excavé dans le roc
- Remblai avec système à convection et berme
- Remblai avec système à convection
- Nouvelle extension de la piste

Réalisation: E. L'Héroult, M. Allard et G. Doré, septembre 2011, Centre d'études nordiques, Université Laval.
Système de référence: NAD83 ; Projection: MTM zone 10



Système à convection et berme: Côté aval



Système à convection: Côté amont

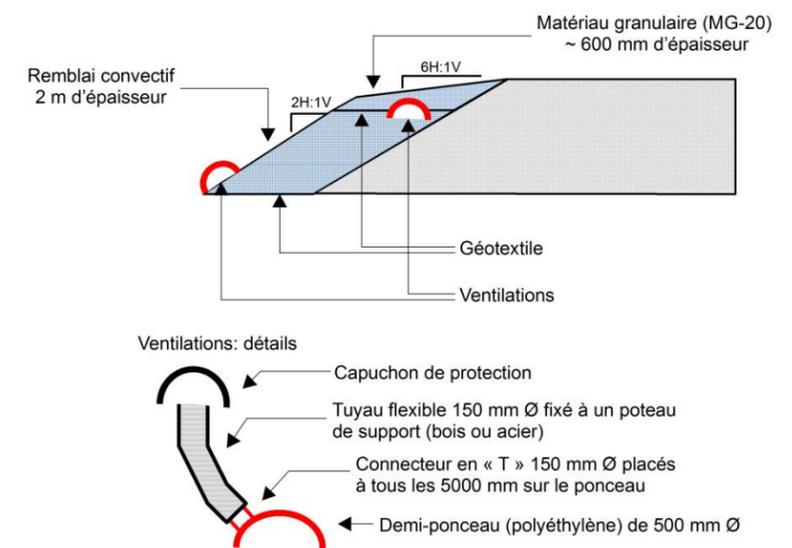


Figure 51: Plan d'adaptation proposé pour la piste de Puvirnituk.

4.4 AKULIVIK

4.4.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

La piste d'atterrissage d'Akulivik, située dans la zone de pergélisol continu, a été achevée en 1991. La piste d'atterrissage est d'une longueur totale de 1190 m, du chaînage 4+940 m au chaînage 6+130 m, et d'une largeur de 44 m. Son axe est orienté ouest-sud-ouest est-nord-est. La piste repose à une altitude d'environ 12 m à son extrémité ouest-sud-ouest et 23 m à son extrémité est-nord-est.

Les tassements observés le long de la piste sont essentiellement localisés sur le côté nord entre les chaînages 5+760 m et 6+070 m. Les relevés topographiques des plaques de tassements réalisés par le MTQ montrent qu'au chaînage 5+810 m, un affaissement de 3,4 cm (P-1) s'est produit entre 2005 et 2010. Pour la même période, un affaissement de 11,7 cm a été mesuré au chaînage 6+000 m (P-2). C'est aussi sur le côté nord de la piste que des accumulations d'eau importantes ont été répertoriées au pied du remblai. Ces accumulations d'eau sont localisées : de part et d'autre de la voie d'accès (entre le chaînage 4+940 m et 5+320 m) (Figure 52A), entre le chaînage 5+700 m et 5+760 m (Figure 52C) et entre les chaînages 5+980 m et 6+060 m (Figure 52B). Les emplacements de ces accumulations d'eau en pied de remblai coïncident avec celles des dépressions répertoriées sur le côté nord de la piste. D'après Allard *et al.*, (2007), ces accumulations d'eau sont des indicateurs des processus thermokarstiques en pied de remblai qui affectent cette section de la piste.

Outre les accumulations d'eau en pied de remblai, la piste repose sur un réseau de polygones à coin de glace. Présentement, sur le côté nord de la piste, plusieurs des sillons correspondant aux coins de glace sont remplis d'eau (Figure 52C), accroissant ainsi le risque de dégradation du pergélisol. Pour l'instant, l'infrastructure ne semble pas être affectée par la présence d'un tel réseau, mais des mesures préventives contre la fonte des coins de glace devront être intégrées dans le plan d'adaptation au changement climatique.

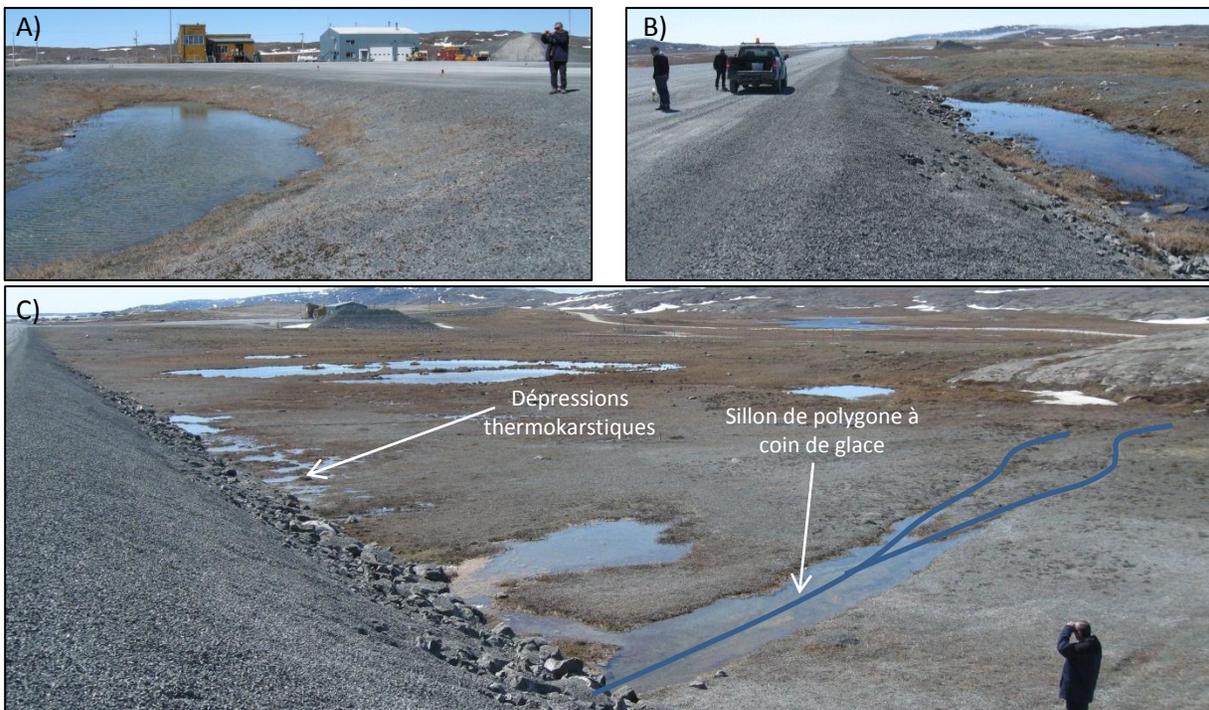


Figure 52 : Accumulations d'eau dans les dépressions thermokarstiques localisées entre les chaînages : 5+060 et 5+100 m (A), 5+980 m et 6+060 m (B) et 5+700 m et 5+760 m (C). La dépression linéaire (C) correspond à la fonte partielle d'un coin de glace.

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

Lors de la caractérisation du pergélisol aux aéroports nordiques, Allard et *al.*, (1994) avaient identifié deux unités géologiques de surface distinctes sur lesquelles repose la piste d'Akulivik. Ces unités se résument à : une plaine de sable marin très riche en coquillages sillonnée par des fentes de gel (ou sillons de coins de glace) et une butte de till recouverte par endroit d'une mince couche de sable marin minée d'ostioles à bourrelets silto-graveleux (Figure 53).

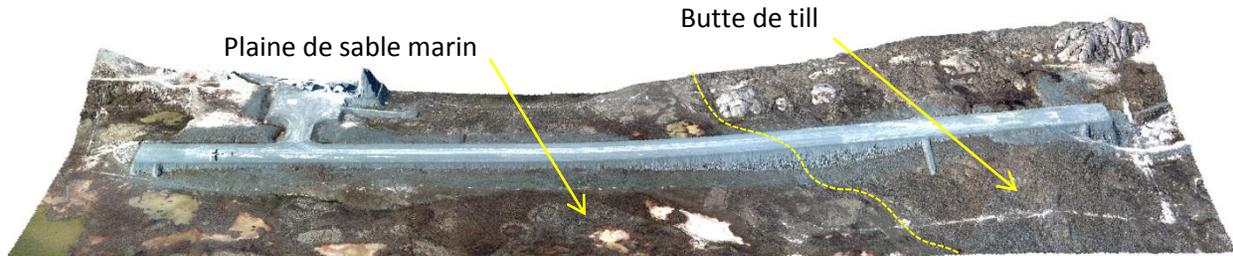


Figure 53: Vue oblique de la piste d'Akulivik et des deux unités géologiques de surface principales. La ligne pointillée jaune indique la limite approximative où le till plonge sous la plaine de sable marin.

Antérieurement à la construction de la piste d'Akulivik, plusieurs sondages géotechniques réalisés dans l'axe projeté de la piste par la firme Gendron Lefebvre Inc. (1984) précisent les caractéristiques géotechniques de ces deux unités géologiques de surface. D'après les relevés réalisés sur la plaine de sable marin, la stratigraphie du premier mètre sous la piste se résume à : un sable de granulométrie uniforme (SP) à étalée (USCS : SW) avec des pourcentages de particules fines (< 0,075 mm) inférieurs à 6,5 % et un contenu en coquilles pouvant atteindre près de 30 % du poids de l'échantillon. Sur la butte de till, du chaînage 5+825 à 6+090, le dépôt est composée de sable silteux (USCS : SM) compact avec des traces de gravier et recouvert d'une fine couche de matériau granulaire (USCS : SW-SM). Néanmoins, en raison de leur superficialité, ces sondages réalisés ne permettent pas de décrire les caractéristiques du pergélisol sous la piste. Afin de pallier au manque de connaissances sur les propriétés géotechniques des dépôts pergélisolés de la région, quatre forages profonds ont été réalisés en pied de remblai le long de la piste à proximité des signes de dégradation (dépressions et mares thermokarstiques) recensés par le MTQ. Les emplacements exacts des puits de forages sont présentés à la figure 54B et leurs caractéristiques techniques sont résumées au tableau 14.

Tableau 14 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage d'Akulivik à l'été 2008.

Nom du forage	Localisation par rapport au chaînage existant	Profondeur atteinte
AKU_F1	Côté Sud, chaînage 6+010 m, 25 m du pied du remblai vers le sud-est	15,00 m
AKU_F2	Côté Nord, chaînage 5+825 m, 1,8 m du pied du remblai	15,00 m
AKU_F3	Côté Nord, chaînage 6+000 m, 12 m du pied du remblai	9,60 m
AKU_F4	Côté Nord, chaînage 5+155 m, 10 m du pied du remblai de la voie d'accès vers l'est-nord-est	10,41 m

Par la réalisation d'une carte à haute résolution des unités géologiques de surface, la réinterprétation des levés de géoradar disponibles et la compilation des observations stratigraphiques et des résultats des essais géotechniques sur des échantillons, les limites et épaisseurs des unités géologiques de surface préalablement identifiées par Allard et *al.*, (1994) ont été précisées et leurs propriétés géotechniques (Gendron Lefebvre, 1984) mieux définies. Les caractéristiques stratigraphiques et géotechniques des unités géologiques de surface cartographiées à la figure 54B sont présentées plus en détails dans la section suivante.

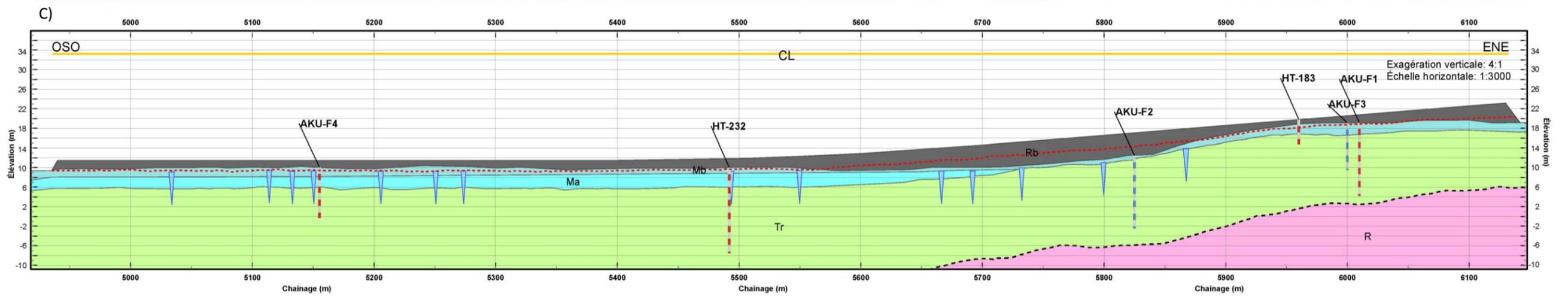
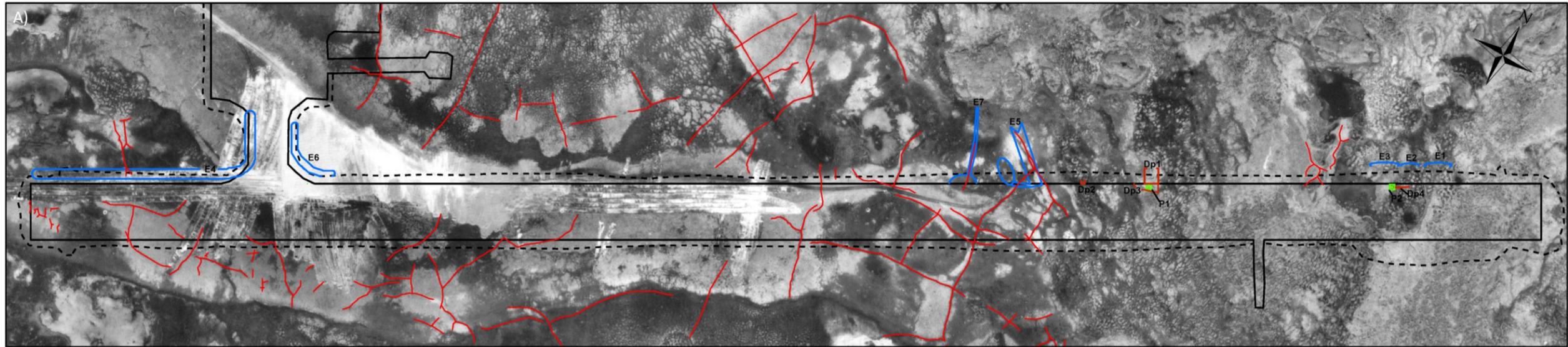


Figure 54: Planche synthèse de la piste d'Akulivik.

Dépôts de surface

Sédiments marins

Mb/Ma

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR SÉDIMENTS MARINS D'EAU PROFONDE: Sable avec traces de silt, quelques graviers et fragments de coquillages; plus d'un mètre d'épaisseur; reposent sur des sédiments marins d'eau profonde composés de silt et sable fin; surface marquée par des fentes de gel.

Mb/Tr

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR TILL REMANIÉ: Sable avec traces de silt, quelques graviers et fragments de coquillages; plus d'un mètre d'épaisseur; reposent sur un till remanié composé de sable silteux avec un peu de graviers anguleux; présence de cailloux et/ou blocs.

Mb/R

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR ROC: Sable avec traces de silt, quelques graviers et fragments de coquillages; plus d'un mètre d'épaisseur; reposent directement sur la roche en place; fréquemment marqués par des crêtes de plage et des fentes de gel.

Mm/Ma

SÉDIMENTS LITTORAUX MINCES SUR SÉDIMENTS MARINS D'EAU PROFONDE: Sable avec traces de silt, quelques graviers et fragments de coquillages; moins d'un mètre d'épaisseur; mis en place en eau peu profonde lors de la phase plénumarine et lors de l'exondation; reposent sur des sédiments marins d'eau profonde composés de silt et sable fin; surface marquée par des fentes de gel.

Ma

SÉDIMENTS MARINS D'EAU PROFONDE: Silt et sable fin; matériel dont la proportion de particules fines est supérieure à 50 %; présence de quelques lentilles de glace de ségrégation.

Sédiments glaciaires

Mm/Tr

SÉDIMENTS LITTORAUX MINCES SUR TILL REMANIÉ: Sable, quelques graviers et fragments de coquillages; moins d'un mètre d'épaisseur; reposent sur un till remanié; présence d'ostioles à bourrelets en surface.

Tr

TILL REMANIÉ: Matériel hétérométrique non trié composé de sable silteux avec un peu de graviers anguleux; présence de cailloux et/ou de blocs; matériel dont la partie superficielle a été remaniée par les vagues et les courants sous la limite maximum de la mer; parfois recouvert par une mince couche de sédiments littoraux et pré littoraux.

Substrat rocheux

R

ROCHE EN PLACE: Affleurements rocheux et roc à mince couverture de sédiments meubles.

Anthropique

Rb

ANTHROPIQUE: Remblai.

Hydrographie



Plans d'eau



Lacs drainés lors de la mise en place de l'infrastructure



Zones d'accumulation d'eau en bordure de piste

Formes de terrain



Fentes de gel



Front de dégel



Contact géologique approximatif



Coin de glace



Sols structurés (ostioles, ostioles à bourrelets, sols striés sur les pentes, cercles de pierres, etc.)

Forages



Forages géotechniques instrumentés avec un câble à thermistances



Forages géotechniques avec récupération



Courbe de niveau (50 cm)

Infrastructures



Centre-piste



Chainage



Limite de la surface profilée



Limite du pied de remblai



Bâtiments

Identification des défauts



Accumulation d'eau en bordure de piste



Dépressions



Plaque de tassement

4.4.2.1 COMPLEXE DE SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR SÉDIMENTS MARINS D'EAU PROFONDE (Mb/MA OU Mm/MA)

Entre les chaînages 4+940 et 5+720 m, la piste d'Akulivik repose sur un complexe de sédiments littoraux et pré-littoraux sur sédiments marins d'eau profonde (Mb/Ma ou Mm/Ma). Sur la carte des unités géologiques de surface présentée à la figure 54B, cette unité est discrétisée en deux sous-unités selon l'épaisseur des dépôts de sédiments littoraux et pré-littoraux qui recouvre les sédiments marins d'eau profonde. Ainsi, une distinction entre les sédiments littoraux et pré-littoraux d'une épaisseur supérieure à 1 m (Mb) et inférieure à 1 m (Mm) a été réalisée. D'après la cartographie des unités géologiques de surface corrélée avec les observations stratigraphiques des forages et les levés de géoradar, la piste entre les chaînages 4+940 et 5+720 m repose en partie sur ces sédiments littoraux et pré-littoraux dont l'épaisseur est supérieure à 1 m. À l'emplacement des forages AKU_F2 et AKU_F4, cette unité atteint une épaisseur d'environ 2 m.

Les essais géotechniques définissent cette unité comme un sable uniforme, bien trié, avec trace de silt dont la proportion est généralement inférieure à 20 % (USCS : SP-SM). Les teneurs en eau mesurées dans cette unité n'excèdent pas les 22 %. On note la présence abondante de fragments de coquilles dont la proportion peut atteindre plus de 70 % par endroits, telle qu'observée dans les deux premiers mètres de la surface au forage AKU_F4. Ces concentrations de fragments de coquillages se présentent à des profondeurs spécifiques sous forme de lits très denses (Figure 55A).

Sous cette couche de sédiments littoraux sableux, on retrouve un matériel dont la proportion de particules fines est supérieure à 50 %. Le contact entre les deux unités est assez franc (Figure 55B), toutefois, la proportion de particules fines dans l'unité de sédiments marins d'eau profonde (Ma) augmente graduellement en profondeur pour atteindre à l'occasion plus de 70 %. D'après les essais de consistance réalisés dans cette couche de sédiments (Tableau 47), celle-ci se classifie comme un mélange de silt et de sable très fin peu plastique (USCS : ML-CL). Les teneurs en eau mesurées sont comprises entre 20 et 30 %. Au forage AKU_F4, juste sous le front de dégel (3,1 m), la structure du sol suggère la présence de lentilles de glaces qui ont fondu (Figure 55C). Malgré l'altération thermique probable lors de l'échantillonnage, quelques lentilles de glace de ségrégation étaient néanmoins toujours visibles et ont été identifiées sur l'image tomodynamométrique (Figure 55D). En raison de la piètre qualité des échantillons récupérés dans cette unité, aucun essai de consolidation au dégel n'a pu être réalisé et la quantité réelle de glace n'a pu être mesurée. Toutefois, en 2010, dans le cadre d'un autre projet de recherche, un forage superficiel a été réalisé dans les sédiments marins d'eau profonde à environ 300 m au nord du forage AKU_F4. Comme le témoigne la figure 55E, les sédiments marins d'eau profonde pergélisolés de la région d'Akulivik sont susceptibles de contenir beaucoup de glace de ségrégation sous forme réticulée dont la fonte peut entraîner des tassements supérieurs à 40 % de l'épaisseur totale de la couche dégelée.

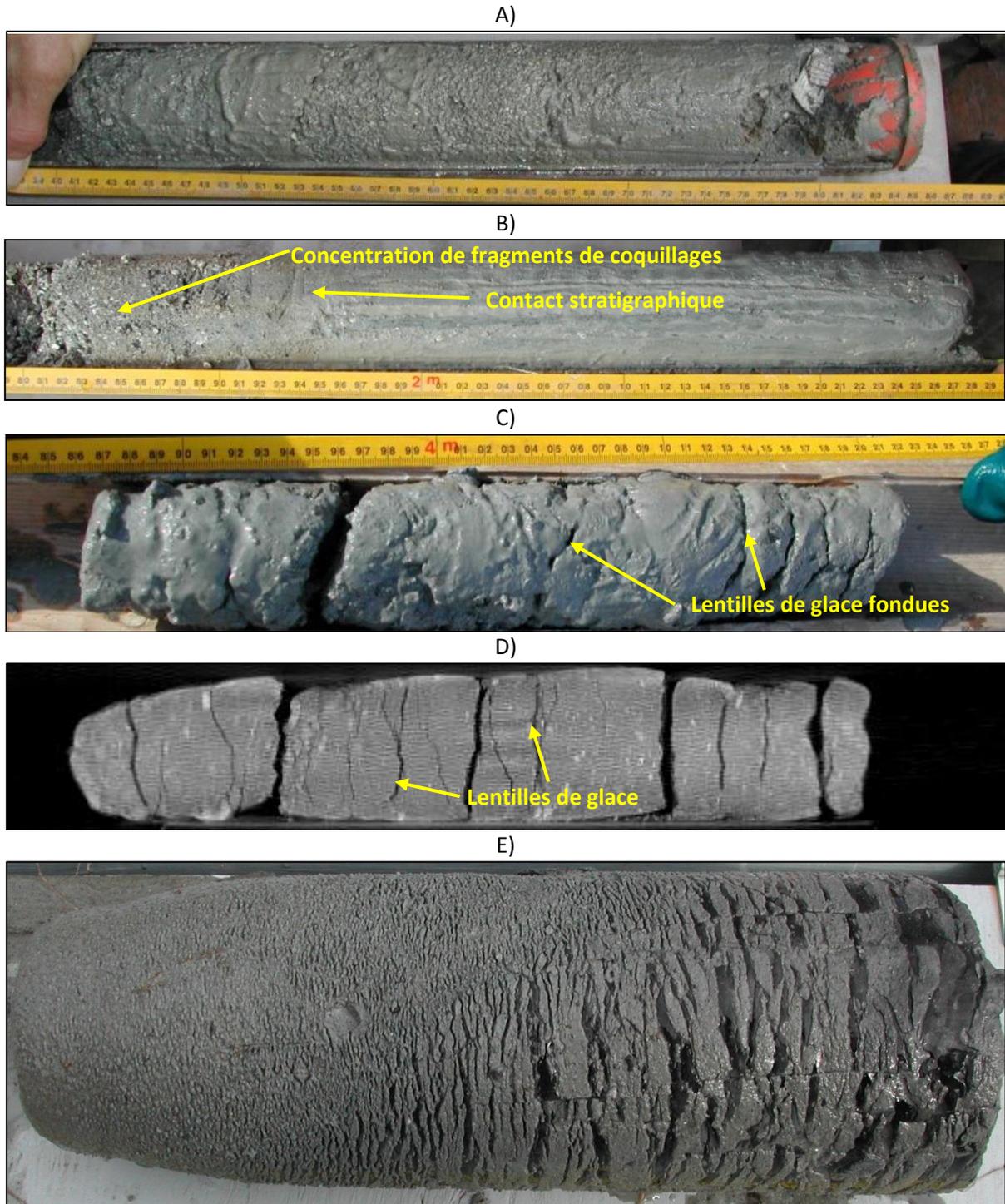


Figure 55 : A) Sédiments littoraux et pré littoraux (Mb) prélevé au forage AKU_F2 entre 2,4 et 3 m de profondeur ; sable uniforme, bien trié, avec trace de silt (USCS : SP-SM). B) Contact stratigraphique observé à 1,95 m de profondeur (AKU_F4) entre les sédiments littoraux et pré littoraux et les sédiments marins d'eau profonde. C) Sédiments marins d'eau profonde (Ma) prélevés au forage AKU_F4 entre 3,87 et 4,2 m ; mélange de silt et de sable très fin peu plastique (USCS : ML-CL) dont la structure suggère la présence de glace de ségrégation. D) Fines lentilles de glace de ségrégation identifiées dans les sédiments marins d'eau profonde pergélisolés à partir d'une image tomodynamométrique. E) Sédiments marins d'eau profonde riches en glace prélevés en 2010 à environ 300 m au nord du forage AKU_F4.

D'après Allard *et al.*, (1994), l'épaisseur de la couche active dans les sédiments littoraux et pré-littoraux sableux (Mb) était d'environ 1,10 à 1,25 m, profondeur correspondant à la position du sommet des coins de glace présents sous les sillons visibles à la surface du dépôt. Une excavation réalisée au sommet de l'un de ces sillons à l'été 1991 avait permis de confirmer la présence du coin de glace et d'en mesurer la largeur, soit environ 20 cm (Figure 56). Sans autres observations, il n'est pas possible de donner des valeurs plus précises quant aux dimensions et à la distribution détaillée des coins de glace. Même si l'emplacement de certains a pu être identifié sous la piste à l'aide des levés de géoradar et par photo-interprétation (Figure 54B et C), une étude approfondie est requise afin d'en préciser la distribution et les dimensions.

Autres phénomènes périglaciaires rencontrés, des buttes cryogènes peuvent être observées de l'autre côté de la clôture dans une mare d'eau, au sud de la piste (Allard *et al.*, 2007). La nature du terrain avant la construction suggère la présence de telles buttes dans le secteur mal drainé au chaînage 5+820 et où une ancienne mare d'eau existait au chaînage 6+020 m (Figure 54A). C'est également dans ces secteurs que des tassements importants ont été mesurés (plaques P-1 et P-2). En raison de la faible teneur en glace du till et la mince couverture de dépôts pré-littoraux et littoraux sur le till dans le secteur, ces tassements pourraient être le résultat de la fonte de l'une de ces buttes riches en glace.

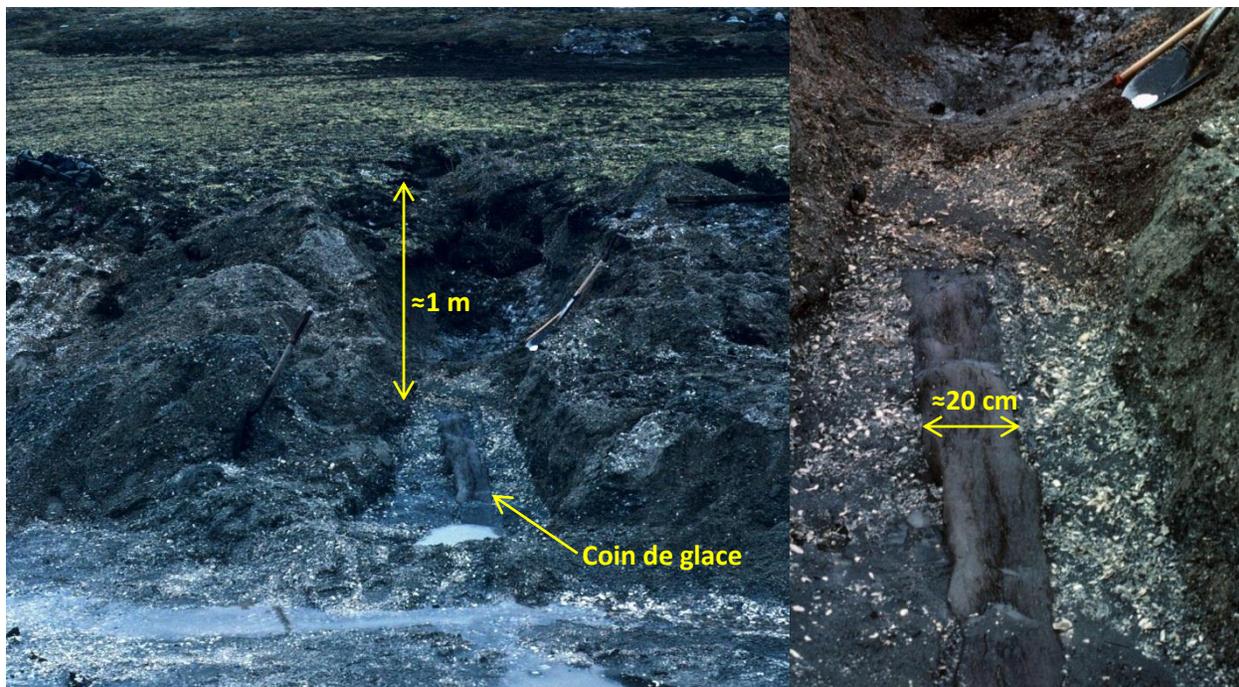


Figure 56: Excavation d'un coin de glace en bordure de la piste d'atterrissage d'Akulivik à l'été 1991.

4.4.2.2 TILL REMANIÉ (MB/TR, MM/TR OU TR)

Le till est présent sous l'ensemble de la piste d'atterrissage d'Akulivik. Sur les 800 premiers mètres, du chaînage 4+940 au chaînage 5+720 m, le till est recouvert d'environ 4 m de dépôts meubles d'origine marine qui consistent en : deux mètres de sédiments marins d'eau profonde (silt et sable) et deux mètres de sédiments littoraux et pré-littoraux (sable coquillier) (Figure 54C). À partir du chaînage 5+720 m, la topographie s'élève et forme une butte. Cette butte est composée principalement de till (Tr) recouvert par endroit d'une mince couche de dépôts marins d'une épaisseur généralement inférieure à 2 m (Mb/Tr ou Mm/Tr) ponctuée par la présence de nombreux ostioles (Figure 57A). Lors des forages réalisés dans le cadre de la présente étude, le till a été rencontré dans tous les forages à des profondeurs comprises entre 0 (AKU_F3) et 4,5 m (AKU_F4). La couche de ce dépôt glaciaire n'a pas été traversée, ce qui indique qu'elle peut atteindre plus de 15 m d'épaisseur (AKU_F3).

Le till foré consiste exclusivement en un dépôt hétérométrique non trié grisâtre assez compact dont la matrice est un mélange de sable et de silt avec trace de gravier. La proportion de cailloux et blocs à l'intérieur de ce dépôt peut être assez importante. Allard et *al.*, (1994) avaient initialement décrit le till de la région comme un dépôt susceptible de fluer au dégel en raison de sa fraction silteuse importante et n'ayant pas de volumes de glace excédentaire malgré la présence isolée de fines lentilles de glace (Figure 57B). D'après les résultats des analyses granulométriques et essais de consistance, le till consiste en un mélange de sable et de silt dont la proportion de particules fines (<0,075 mm) est généralement comprise entre 40 et 50 % (USCS : SM-ML). Il s'avère non plastique avec une limite de liquidité assez faible généralement inférieure à 15. Les teneurs en eau mesurées sont dans l'ensemble inférieures à 15 %. Les échantillons de till prélevés dans la section du sol gelé contiennent essentiellement de la glace interstitielle avec quelques fines lentilles millimétriques éparses.

Un essai de consolidation au dégel a été réalisé sur une section de de till gelé récupérée entre 4,16 m et 4,60 m de profondeur au forage AKU_F1 (Figure 57C). Visuellement, l'échantillon de till analysé ne contenait pas de glace en excès et avait une apparence similaire à ceux prélevés aux différents forages. D'après les résultats de l'essai, le till suite au dégel affiche des valeurs de tassement total de 5,3 % et 7,9 % lorsqu'il est respectivement soumis à des contraintes de 100 et 200 kPa. Il est à noter que les principaux tassements présentement observés le long de la piste d'Akulivik sont exclusivement localisés dans les secteurs couverts d'une mince couche de dépôts pré-littoraux mal drainés sujet à la formation de buttes cryogènes riches en glace (chaînage 5+820 et 6+020 m).



Figure 57: A) Ostioles à bourrelets dans le till qui traversent la mince couche de sédiments littoraux et pré-littoraux. B) Diamicton grisâtre (till) avec lentilles de glace millimétriques. Échantillons de till gelé prélevés entre : C) 4,16 m et 4,60 m (forage AKU_F1), D) 5,80 et 6 m (forage AKU_F2), E) 8,70 et 8,93 m (forage AKU_F3) et 4,86 et 5,10 m (forage AKU_F4). L'encadré rouge en (C) indique la section de la carotte qui a été soumise à un essai de consolidation au dégel.

4.4.3 CONDITIONS THERMIQUES DU PERGÉLISOL

4.4.3.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : PÉRIODE 1990-2010

Lors de la construction de la piste (1990), quatre câbles à thermistances ont été installés dans le milieu naturel ainsi que dans le remblai et sous la piste, soit un de 18 m dans les sables coquillés (Mb) (HT-232), un de 20 m dans le roc (HT-230), un de 5 m dans le till (Tr) (HT-162) et un de 5 m à travers la piste et dans le till (HT-183). De ces quatre câbles, trois sont toujours opérationnels, dont deux sont automatisés et permettent un enregistrement des données thermiques sur une base quotidienne (HT-162 et HT-183). La température de l'air est mesurée à l'aide d'un capteur thermique adjoint au câble de référence HT-162. Lors de la campagne de forage en 2008, les quatre puits de forage réalisés (Figure 54B) ont été dotés d'un tubage en PVC et remplis d'huile de silicone. Sur ces quatre puits, les forages AKU_F1 et AKU_F4 ont été instrumentés à l'aide de câbles à thermistances automatisés branchés soit à une nouvelle station (Figure 58A) ou une station déjà existante à l'aide d'un multiplexeur (Figure 58B). Les deux autres puits ont fait l'objet de mesures thermiques ponctuelles à la fin du mois d'octobre 2008 à l'aide d'un multimètre et d'une thermistance.



Figure 58 : A) Station automatisée à l'emplacement du puits de forage AKU_F4. B) Station dans le milieu naturel à l'extrémité est-sud-est de la piste d'Akulivik.

Initialement, lors de la construction, l'épaisseur de la couche active dans les sédiments littoraux et pré-littoraux sableux (Mb) était d'environ 1,25 m (HT-232), profondeur à laquelle le sommet des coins de glace avait été observé sous les sillons par Allard et *al.* (1994). Dans le till, en milieu naturel, l'épaisseur de la couche active atteignait une valeur d'environ 1,24 m (HT-162) tandis que sous la piste, celle-ci était d'environ 1,55 m (HT-183). Dans le roc (HT-230), la couche active atteignait une profondeur légèrement supérieure à 3 m avec une température annuelle moyenne de -5°C à 20 m, soit comparable à celle sous la plaine de sable (HT-232) (Allard *et al.*, 1994). Malgré la sporadicité des enregistrements thermiques pour le câble HT-232, ceux-ci indiquent que le pergélisol s'est réchauffé d'environ $0,9^{\circ}\text{C}$ à 17,5 m de profondeur entre 1990 et 2010, passant d'une température de $-4,6$ à $-3,76^{\circ}\text{C}$.

Le câble HT-162, situé dans le till en terrain naturel non loin de la piste d'atterrissage sert de référence. Malgré la présence de manques dans la série de données avant 2004, une augmentation de la couche active est observable. En effet, l'épaisseur de la couche active dans le till en milieu naturel est passée d'environ 1,24 m à 2,86 m, ce qui représente une augmentation de près de 131% (Tableau 15). En profondeur, la température s'est également réchauffée. Par exemple, la moyenne mensuelle des températures à 5 m de profondeur pour le mois de juillet 1990 et 2010 est passée respectivement de $-6,8$ à $-2,3^{\circ}\text{C}$. En comparaison, les enregistrements thermiques acquis durant la même période par le câble de 5 m HT-183 situé sous la piste montrent que peu de temps après la construction de la piste, le profil thermique dans le remblai s'est réajusté, c'est-à-dire que le plafond du pergélisol est remonté passant de 1,84 m en 1990 à 1,54 m en 1992. Toutefois, depuis 1992, l'épaisseur de la couche active a augmenté pour atteindre désormais 1,91 m, ce qui représente une augmentation de plus de 23 %

(Tableau 15). Avec une épaisseur de remblai estimé à environ 0,75 m dans sa section la plus mince, le front de dégel se situe toujours dans l'ancienne couche active consolidée pauvre en glace.

La figure 59A présente les cycles de températures journalières du sol au câble HT-162 en fonction de la profondeur et du temps pour la période de juin 2004 à octobre 2010. En comparaison, la figure 59B présente les enregistrements thermiques acquis durant la même période (2004-2010) par le câble HT-183 de 5 m situé sous la piste. À première vue, les lectures aux deux câbles affichent des cycles de gel et dégel synchrones sans déphasage apparent avec les variations de température atmosphérique. Toutefois, une lecture plus approfondie permet de noter une pénétration du gel moins rapide en terrain naturel en raison d'un effet de chaleur latente (l'effet zero curtain) lié à la présence d'eau dans le sol. À l'inverse, dans le remblai, le front de gel se propage en profondeur de manière plus régulière et continue, en raison de la faible teneur en eau contenue dans le matériel de remblai ainsi que de sa forte conductivité thermique. Autre fait intéressant, la profondeur de l'isotherme 0°C montre une variabilité interannuelle plus importante en milieu naturel que sous la piste. Bien que d'amplitude moindre, la variabilité de la profondeur de dégel dans le remblai suit la même tendance que celle observée en milieu naturel. Plus en profondeur, les températures du pergélisol sous la piste sont plus froides et similaires d'une année à l'autre contrairement à celles enregistrées en milieu naturel qui sont plus chaudes et dont la variabilité dépend principalement, outre de la température atmosphérique, des conditions d'enneigement. Ces températures dans le sol plus chaudes peuvent en partie expliquer l'amplitude plus élevée des changements dans l'augmentation de la couche active d'une année à l'autre. Par exemple, une accumulation importante de neige pourrait avoir contribué à freiner le refroidissement du sol à l'hiver 2010, favorisant ainsi une pénétration du front de dégel plus en profondeur l'été suivant. Entre l'été 2009 et l'été 2010, la profondeur maximale de dégel a augmenté entre 22 (HT-162) et 32 % (AKU_F1) dans le milieu naturel comparativement à 2,4 % (HT-183) dans le remblai de piste (Tableau 15). Ces données inusitées démontrent qu'en l'absence de couverture nivale, les conditions thermiques sous le centre-piste en hiver semblent plus favorables au maintien du pergélisol, et ce, malgré un réchauffement des températures de l'air depuis les deux dernières décennies.

L'effet de réchauffement du profil thermique induit par l'enneigement semble également avoir contribué fortement à la dégradation du pergélisol en pied de remblai. Par exemple, au câble AKU_F4, le cycle de températures journalières du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période d'octobre 2008 à octobre 2010 (Figure 60A) montre que la température atmosphérique froide en hiver ne pénètre que superficiellement le sol. Ainsi, la température du sol entre 1 et 6 m de profondeur demeure comprise entre -1 et 0°C tout l'hiver. En milieu naturel, à l'écart de l'influence de l'infrastructure, la température dans le sol peut descendre sous les -10 °C à un mètre de profondeur et jusqu'à -4 °C à 5 m (Figure 60B). Les lectures manuelles des températures du sol prises au mois d'octobre 2008 aux forages AKU_F2 et AKU_F3 suggèrent des profondeurs de dégel de 6,25 m et 5,87 m respectivement (Figure 60D et E), soit considérablement plus élevées que celles établies à partir des lectures enregistrées en milieu naturel par le câble AKU_F1. Pour des dépôts similaires, la comparaison entre les profondeurs de dégel mesurées en 2008 avec celles mesurées en 1992 (Tableau 15) suggère une augmentation de l'épaisseur de la couche dégelée comprise entre 40 et 130 % en milieu naturel (HT-162, HT-232 et AKU_F1) et qui, en pied de remblai, peut atteindre plus de 400 % (AKU_F2).

Tableau 15: Profondeurs maximales atteintes par le front de dégel au cours de la période 1992-2010 à l'emplacement des différents câbles à thermistances ou puits de forages, aéroport d'Akulivik.

Années	HT-162 Till (milieu naturel)			HT-183 Centre-piste			HT-230 Roc (milieu naturel)			HT-232 Sable marin (milieu naturel)		
	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)
1992	123,6	n.a	n.a	154,4	n.a	n.a	320,0	n.a	n.a	125,1	n.a	n.a
2004	193,6	70,0	56,7	168,1	13,7	8,9	n.d	n.a	n.a	136,6	11,5	9,2
2005	206,0	12,4	6,4	167,8	-0,3	-0,2	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
2006	227,0	21,0	10,2	175,4	7,7	4,6	n.d	n.a	n.a	143,2	6,6	4,8
2007	220,0	-7,0	-3,1	170,9	-4,5	-2,5	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
2008	241,0	21,0	9,5	183,1	12,1	7,1	n.d	n.a	n.a	138,3	-4,9	-3,4
2009	234,0	-7,0	-2,9	186,2	3,1	1,7	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
2010	286,0	52,0	22,2	190,7	4,5	2,4	n.d	n.a	n.a	181	42,7	30,9
Total		+162,4	+131,4		+36,3	+23,5		n.a	n.a		+55,9	+44,7
Années	AKU-F1 Till (milieu naturel)			AKU-F2 Mb/Tr (pied de remblai)			AKU-F3 Till (pied de remblai)			AKU-F4 Mb/Mi/Tr (pied de remblai)		
	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)
1992	123,6*	n.a	n.a	123,6*	n.a	n.a	123,6*	n.a	n.a	125,1* *	n.a	n.a
2004	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
2005	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
2006	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
2007	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
2008	196,6	73,0	59,0	621,9	498,3	403,2	589,7	466,1	377,1	347,2	222,1	177,5
2009	204,6	8,0	4,1	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	315,7	-31,5	-9,1
2010	271,1	66,5	32,5	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	347,0	31,3	9,9
Total		+147,5	+119,3		+498,3	+403,2		+466,1	+377,1		+222,1	+177,5

*Épaisseur observée au câble HT-162. **Épaisseur observée au câble HT-232.

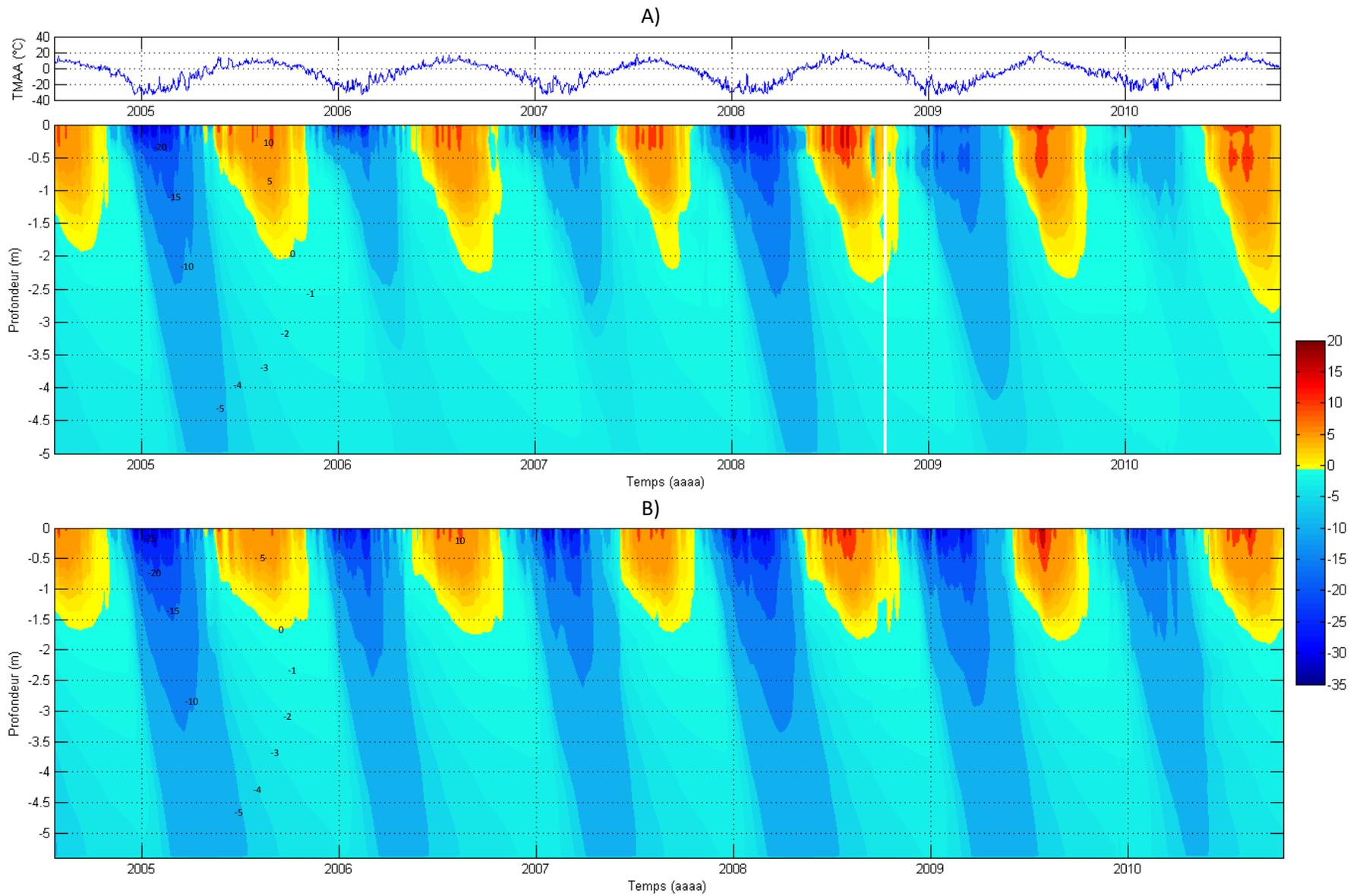


Figure 59: Température du sol journalière dans le till (HT-162) (A) et dans la piste (HT-183) (B) en fonction de la profondeur et du temps pour la période de juin 2004 à octobre 2010.

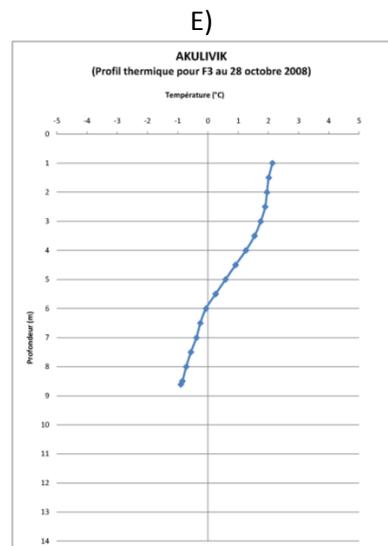
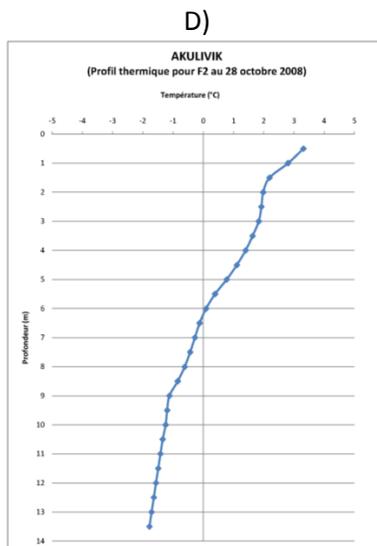
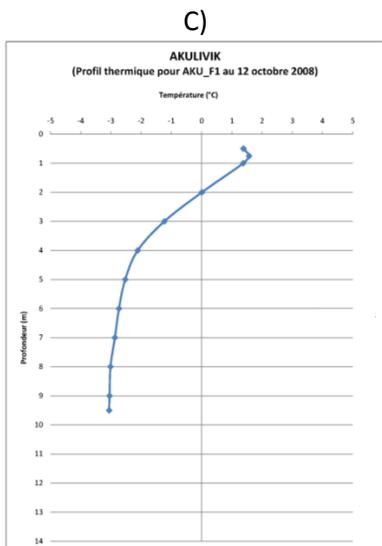
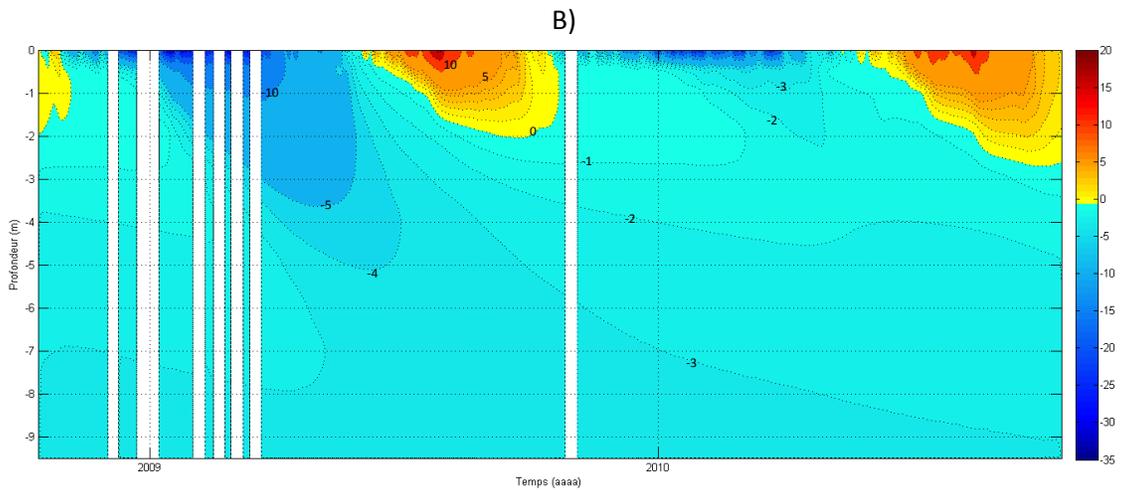
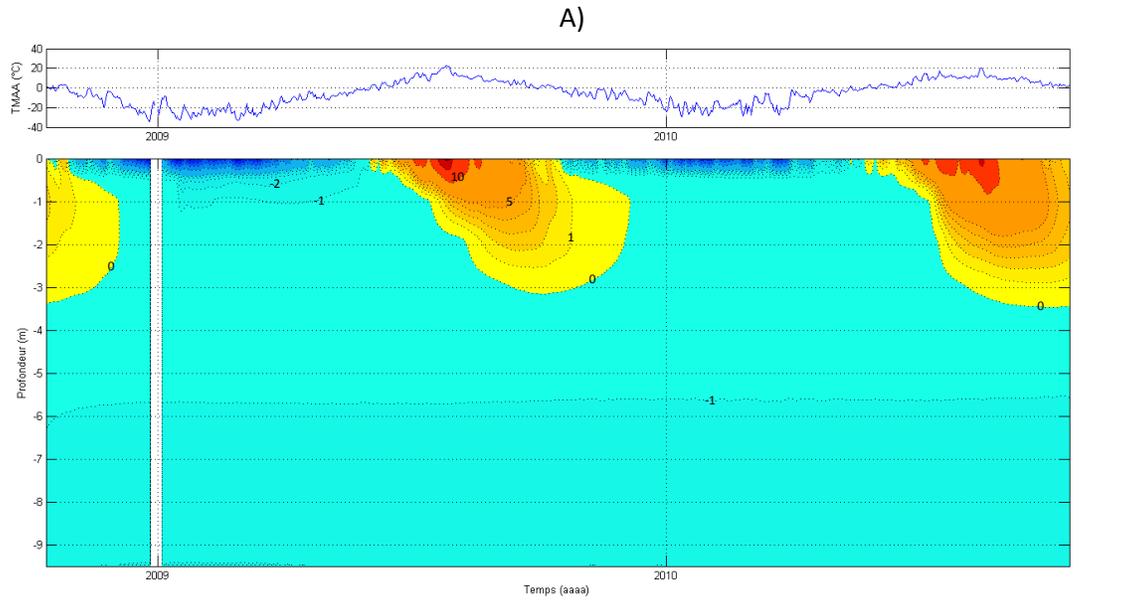


Figure 60 : Température du sol journalière au câble AKU_F4 (A) et AKU_F1 (B) en fonction de la profondeur et du temps pour la période de d'octobre 2008 à octobre 2010. C) Températures du sol mesurées au câble AKU_F1. Températures du sol mesurées manuellement à différentes profondeurs à l'emplacement des puits de forages AKU_F2 (D) et AKU_F3 (E).

4.4.3.2 ÉVOLUTION FUTURE : PÉRIODE 2010-2050

4.4.3.2.1 CALIBRATION

Plusieurs simulations numériques ont été produites afin de reproduire le régime thermique en pied de remblai et au centre-piste pour les chaînages 5+155 et 5+960 m. Ces modèles utilisent les informations stratigraphiques issues des forages réalisés à proximité (Tableau 16) ainsi que des plans originaux pour déterminer, aux chaînages respectifs, la géométrie et l'épaisseur du remblai et pour estimer les propriétés thermiques des matériaux à utiliser comme intrants dans les simulations. Une fois construits, les modèles ont été calés à partir des lectures des câbles à thermistances présents à proximité. Par exemple, le modèle numérique en pied de remblai au chaînage 5+155 m a été calibré à partir des données enregistrées au câble AKU_F4 tandis qu'au chaînage 5+960 m, celui pour le centre-piste a été calibré à partir des lectures du câble HT-183. Dans l'ensemble, les résultats de la calibration des modèles montrent une excellente correspondance entre les épaisseurs de dégel observées et simulées dont l'écart n'excède pas $\pm 7\%$ (Tableau 17). En raison de l'absence de câbles à thermistances disponibles à proximité immédiate, les modèles numériques construits et utilisés pour les simulations au centre-piste au chaînage 5+155 m et en pied de remblai au chaînage 5+960 m n'ont pu être calibrés et validés. Pour ces raisons, les résultats issus de ces simulations doivent être considérés avec prudence.

Tableau 16: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol en pied de remblai et au centre-piste de la piste d'Akulivik.

chaînage 5+155 (forage AKU_F4)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	
1,4 à 0,00	Remblai ¹	2000	2500	90	90	0,05
0,00 à -0,20	Sable avec matière organique et gravier MG20 ²	2301	3306	40	100	0,2
-0,20 à -1,90	Sable moyen à grossier avec traces de silt	2350	3320	140	100	0,2
-1,90 à -4,50	Silt avec sable fin	2870	1920	200	110	0,3
-4,50 à -11,40	Till	2400	1860	140	139	0,1
chaînage 5+960 (centre-piste : forage HT-183)						
0,75 à 0,00	Remblai ¹	2000	2500	90	90	0,05
0,00 à -0,75	Till pauvre en glace	2301	3306	162,24	80,92	0,10
-0,75 à -20,00	Till	2236	3212	140,64	139,92	0,15
chaînage 5+960 (pied de remblai : forage AKU_F3)						
0,00 à -0,75	Till pauvre en glace	2301	3306	102,24	98,92	0,07
-0,75 à -20,00	Till	3000	3100	140,64	139,92	0,15

¹ La couche de remblai est présente dans les modèles lors des simulations au centre-piste seulement.

Tableau 17: Épaisseurs de la couche active observées et simulées, piste d'Akulivik.

chaînage 5+155, pied de remblai (câble de référence AKU_F4)				
Années	Observation (m)	Simulation (m)	Différence (m)	Différence (%)
2009	-3,16	-3,10	-0,06	1,81
2010	-3,47	-3,69	0,22	-6,41
chaînage 5+960, centre-piste (câble de référence HT-183)				
2007	-1,71	-1,71	0,00	-0,01
2008	-1,83	-1,93	-0,10	-5,34
2009	-1,86	-1,82	0,04	2,29
2010	-1,91	-1,98	-0,07	-3,69

4.4.3.2.2 PROJECTIONS ET TASSEMENTS ANTICIPÉS

D'après les résultats des simulations réalisées au chaînage 5+155 m pour la période 2010-2050 (Figure 61A et B), la profondeur de dégel en pied de remblai atteindra une profondeur maximale de 6,63 m sous la projection AEV et de 12,37 m sous la projection AHA. En 2010, la profondeur maximale de dégel en pied de remblai était de 3,47 m (AKU_F4), soit comprise dans la fourchette des valeurs simulées sous les deux scénarios (AEV et AHA). La comparaison entre les profondeurs de dégel observées (AKU_F4) et simulées (AEV et AHA) suppose une augmentation de la couche dégelée d'ici 2050 de l'ordre de 3,16 à 8,9 m par rapport à l'actuel (Tableau 18). Ainsi, un dégel complet de la couche de sédiments marins d'eau profonde composés de silt et sable fin est à prévoir d'ici 2015 sous le scénario pessimiste (scénario AHA) et autour de 2038 sous le scénario optimiste (scénario AEV). À l'opposé, l'augmentation de la profondeur de dégel au centre-piste sera de moindre importance avec une augmentation anticipée pour la même période de 0,22 m sous AEV et de 2,30 m sous AHA par rapport à l'actuel. Le front de dégel au centre-piste, d'après les projections proposées par les scénarios de réchauffement climatique, devrait rester dans les dépôts pré littoraux sableux (Mb) pauvres en glace jusqu'au alentour de 2046 pour, par la suite, pénétrer rapidement dans les sédiments marins d'eau profonde potentiellement riches en glace (Ma). Dans la mesure où l'évolution du climat sera conforme aux projections proposées, ce n'est qu'une fois le dégel graduel de cette couche de sédiments marins d'eau profonde que des tassements surviendront au centre-piste. L'absence d'échantillon représentatif non perturbé de l'unité de silt et sable fin (Ma) rend difficile l'estimation du tassement en cas de fonte. Toutefois, des essais de consolidation réalisés sur des échantillons analogues suggèrent des valeurs de potentiel de tassement de l'ordre de 30 à 40 %. À l'heure actuelle, d'après les informations stratigraphiques et un suivi thermique au forage AKU_F4, il resterait environ 1 m de ce silt et sable fin potentiellement riche en glace à dégelier avant d'atteindre le till sous-jacent. D'après les projections climatiques et les caractéristiques géotechniques des couches de pergélisol impliquées, le dégel anticipé d'ici 2050 pourrait provoquer un tassement en pied de remblai de l'ordre de 0,4 à 1,04 m. Le centre-piste, quant à lui, devrait rester stable d'ici 2046 en raison d'une progression modérée du front de dégel à l'intérieur d'une couche sableuse stable au dégel. Il est toutefois à noter que les simulations suggèrent que le front de dégel sous la piste se situe actuellement à juste un peu plus d'un mètre sous la base du remblai, soit dans l'ancienne couche active préconstruction. Cette profondeur est voisine de la profondeur du sommet des coins de glace observée lors de la construction. Par conséquent, tout approfondissement supplémentaire du front de dégel est donc fortement susceptible de provoquer des tassements linéaires dans la piste, au droit des coins de glace.

La comparaison du profil de température du sol observé en pied de remblai pour l'année 2010 (AKU_F4) avec ceux projetés pour l'année de 2050 (AEV et AHA) permet de quantifier les changements de température en profondeur anticipés (Figure 62). D'ici 2050, le profil du sol en pied de remblai sera complètement dégelé sous la projection AHA avec une augmentation moyenne des températures dans le sol d'environ 1,9 °C pour l'ensemble des profondeurs. Sous la projection AEV, le sol restera gelé à 6 m de profondeur jusqu'en 2050 quoique significativement plus chaud qu'à l'actuel (0,6 °C en moyenne). Pour la même période, le profil des températures dans le sol au centre-piste, initialement plus froid que celui observé en pied de remblai (câble AKU_F4), se réchauffera également. À 5 et 10 m de profondeur, les températures du sol passeront respectivement de -4,91 à -3,80 °C et de -4,98 à -3,85 °C sous la projection AEV, ce qui représente une augmentation de plus de 1,1 °C. Aux mêmes profondeurs, mais sous la projection AHA, l'augmentation des températures du sol sera plus marquée, passant respectivement de -4,91 à -1,09 °C et de -4,98 à -1,69 °C, ce qui correspond à un réchauffement de plus de 3,3 °C. Contrairement au pied de remblai, les résultats des simulations numériques pour le centre-piste indiquent que malgré un réchauffement considérable des températures dans le sol d'ici 2050, qui

se traduit par une migration du profil thermique vers les valeurs plus chaudes (Figure 62), le sol demeurera gelé sous les projections AEV et AHA à 3 et 4 m de profondeur respectivement.

Au chaînage 5+960 m, c'est-à-dire dans la section de la piste qui repose sur du till, le front de dégel en pied de remblai va atteindre une profondeur comprise entre -15,48 et -20,00 m d'ici 2050. D'après le relevé de température manuel réalisé en octobre 2008 dans le puits de forage AKU_F3, la couche de sol dégelé y atteint une profondeur d'environ 5,9 m, soit incluse dans la fourchette des valeurs simulées sous les deux scénarios (AEV et AHA). Peu importe le scénario climatique utilisé, la progression du front de dégel en pied de remblai sera soutenue (Figure 63A) avec une augmentation de l'épaisseur de la couche de sol dégelé par rapport à l'actuel de l'ordre de 9,58 à 14,10 m (Tableau 18). D'ici 2050, les températures moyennes à 5 et 10 m de profondeur en pied de remblai passeront respectivement de 0,05 à 1,96 °C et -0,72 à 1,01 °C sous le scénario AEV et seront près de 4 °C plus chaudes qu'à l'actuel sous le scénario AHA (Figure 64). L'augmentation de la couche dégelée entraînera la fonte du till qui, d'après les résultats des forages et analyses en laboratoire, contient peu de glace en excès et dont le potentiel de tassement sous contraintes est compris entre 5 et 8 %. Malgré ces valeurs assez faibles, l'importance de la couche de sol qui sera dégelée en pied de remblai entraînera des tassements considérables d'environ 0,5 à 1,13 m.

Pour le centre-piste, la profondeur du front de dégel devrait atteindre d'ici 2050 des valeurs comprises entre -2,21 et -3,81 m, soit une augmentation de la couche active par rapport à l'actuel (HT-183) de l'ordre de 0,31 à 1,91 m (Tableau 18). À 5 m de profondeur, la température du sol restera stable sous AEV, mais augmentera d'environ 2,8 °C sous AHA. La progression du dégel ne sera pas constante et soutenue, mais plutôt erratique avec des variations interannuelles marquées par d'importantes remontées ou approfondissement du front de dégel (Figure 63B). L'augmentation modérée de l'épaisseur de la couche active pronostiquée par les simulations numériques suggère ainsi des tassements de l'ordre de 1,5 à 15 cm d'ici 2050. Malgré le réchauffement anticipé, le pergélisol sous le centre-piste sera toujours présent à 4 m de profondeur, ce qui n'est pas le cas en pied de remblai où celui-ci, peu importe le scénario utilisé, se retrouvera au-delà de 15 m de profondeur et isolé de la surface par une zone qui restera non gelée toute l'année (talik).

Tableau 18: Profondeurs maximales du dégel projetées d'ici 2050 pour le centre-piste et le pied du remblai selon les exercices de modélisations numériques alimentés par les sorties climatiques AEV et AHA.

chaînages 5+155 (forage AKU_F4)					
Position	obs	AEV	AHA	Δ obs/AEV	Δ obs/AHA
Pied de remblai	-3,47 m ¹	-6,63 m	-12,37 m	3,16 m	8,90 m
Centre-piste	-2,25 m ²	-2,47 m	-4,55 m	0,22 m	2,30 m
chaînages 5+960 (forage AKU_F3 et HT-183)					
Position	obs	AEV	AHA	Δ obs/AEV	Δ obs/AHA
Pied de remblai	-5,9 m ³	-15,48 m	-20,00 m	9,58 m	14,10 m
Centre-piste	-1,9 m ⁴	-2,21 m	-3,81 m	0,31 m	1,91 m

1 : Profondeur maximale de dégel en 2010 au câble AKU_F4.

2 : Profondeur maximale de dégel simulée en 2009.

3 : Profondeur maximale de dégel en 2008 au puits de forage AKU_F3.

4 : Profondeur maximale de dégel en 2010 au câble HT-183.



A)



B)

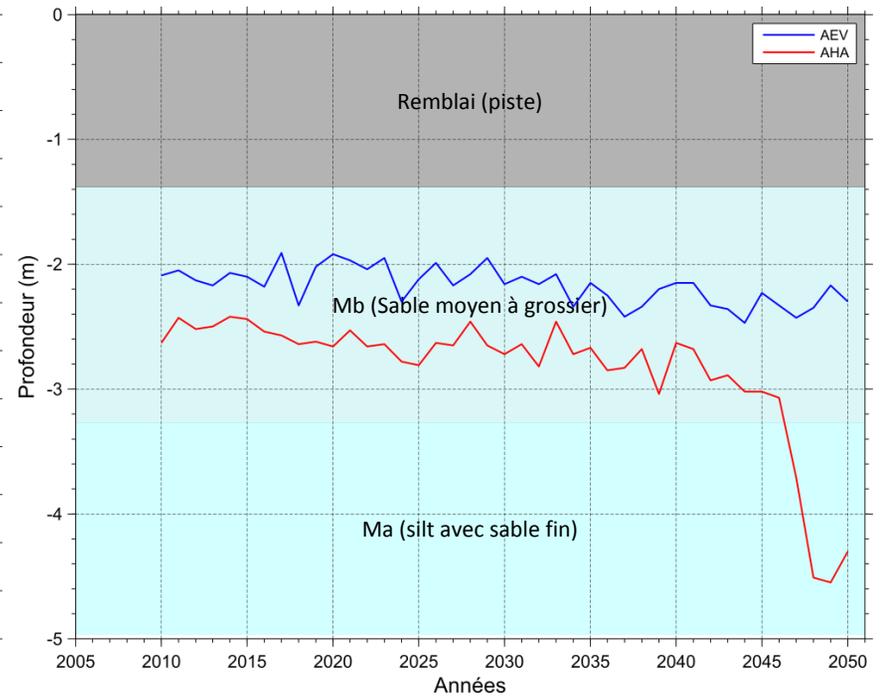


Figure 61: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport d'Akulivik, chaînage 5+115 m, vis-à-vis le forage AKU_F4.

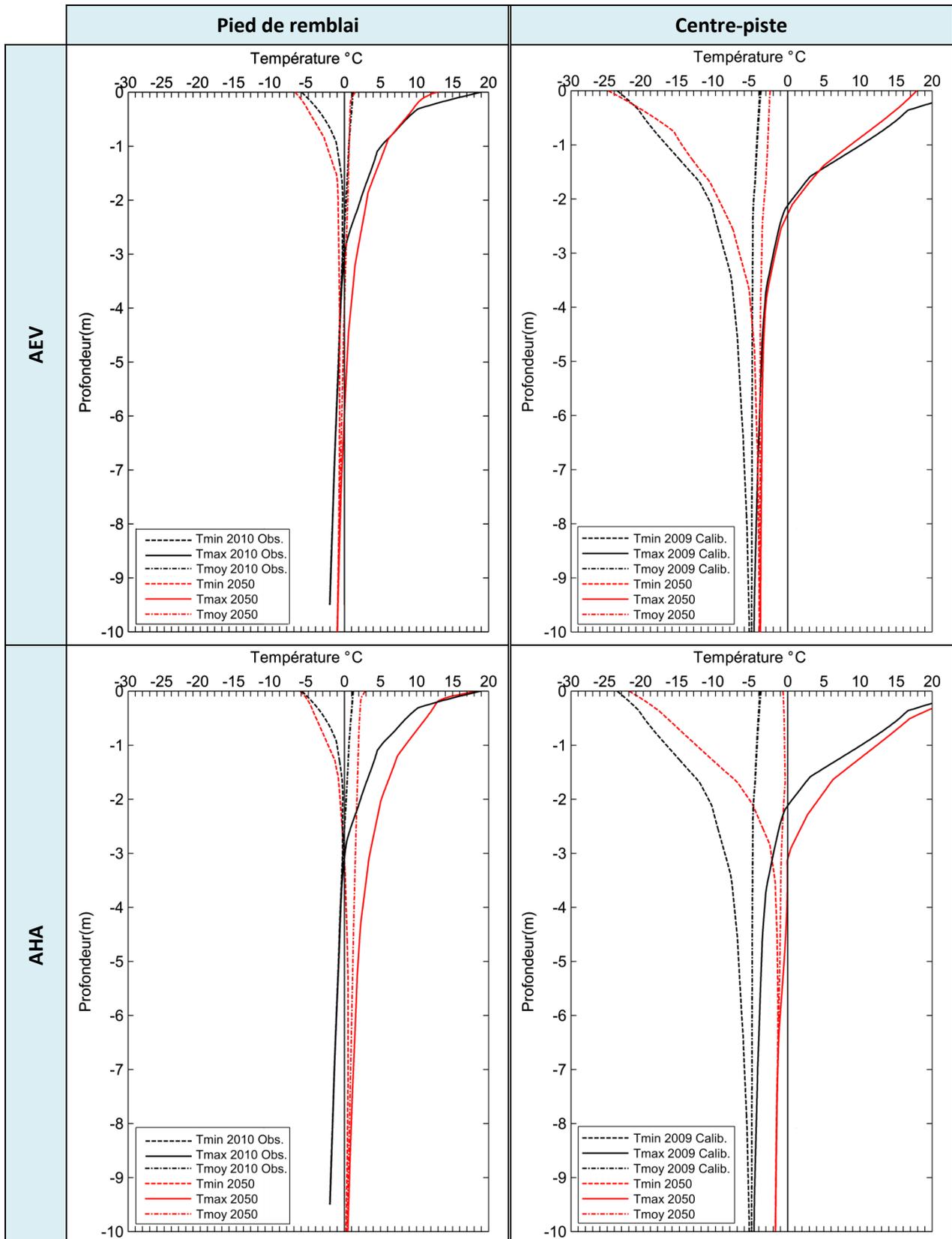


Figure 62: Profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport d'Akulivik, chaînage 5+115 m (AKU_F4).



Figure 63: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport d'Akulivik, chaînage 5+960 m, vis-à-vis le câble HT-183.

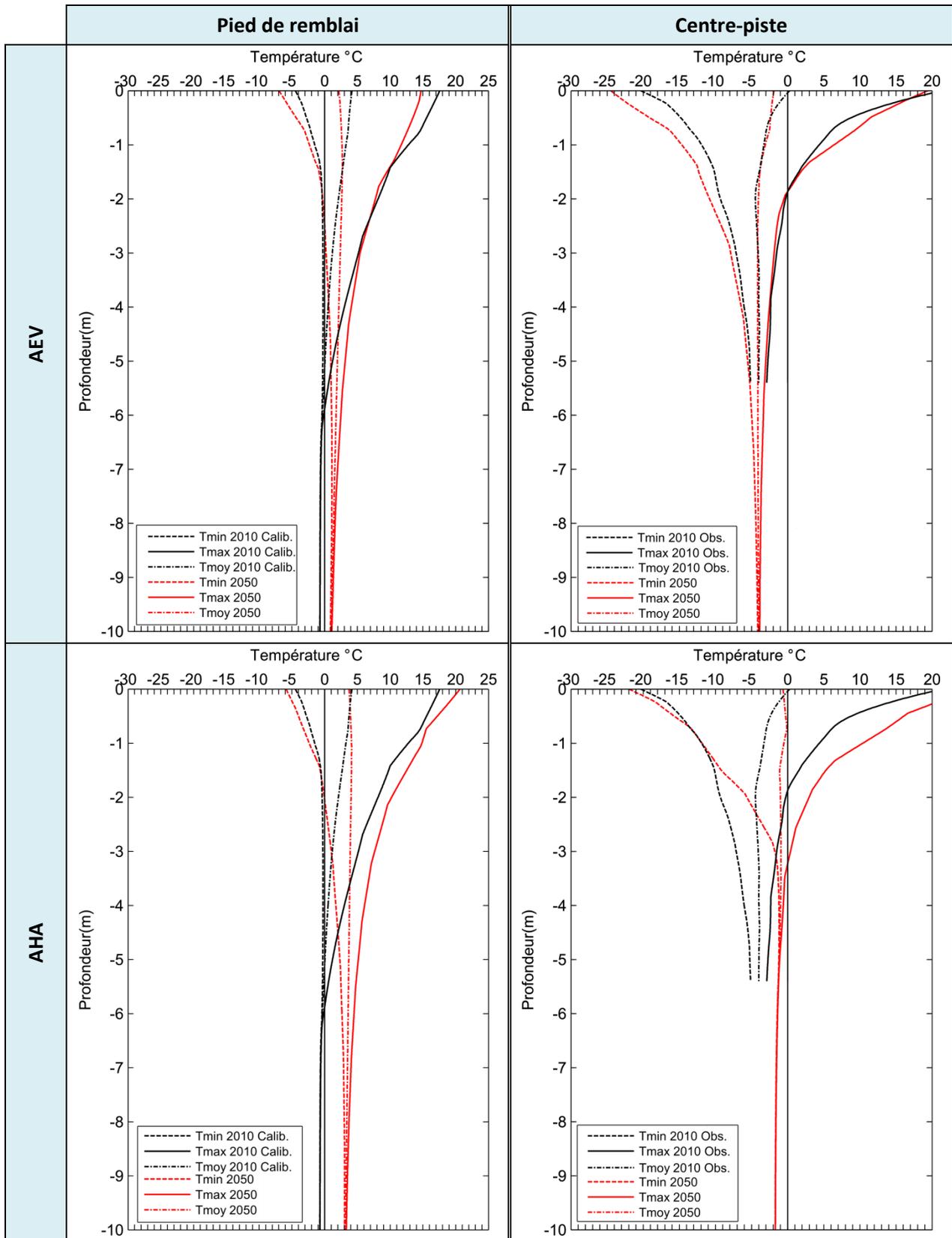


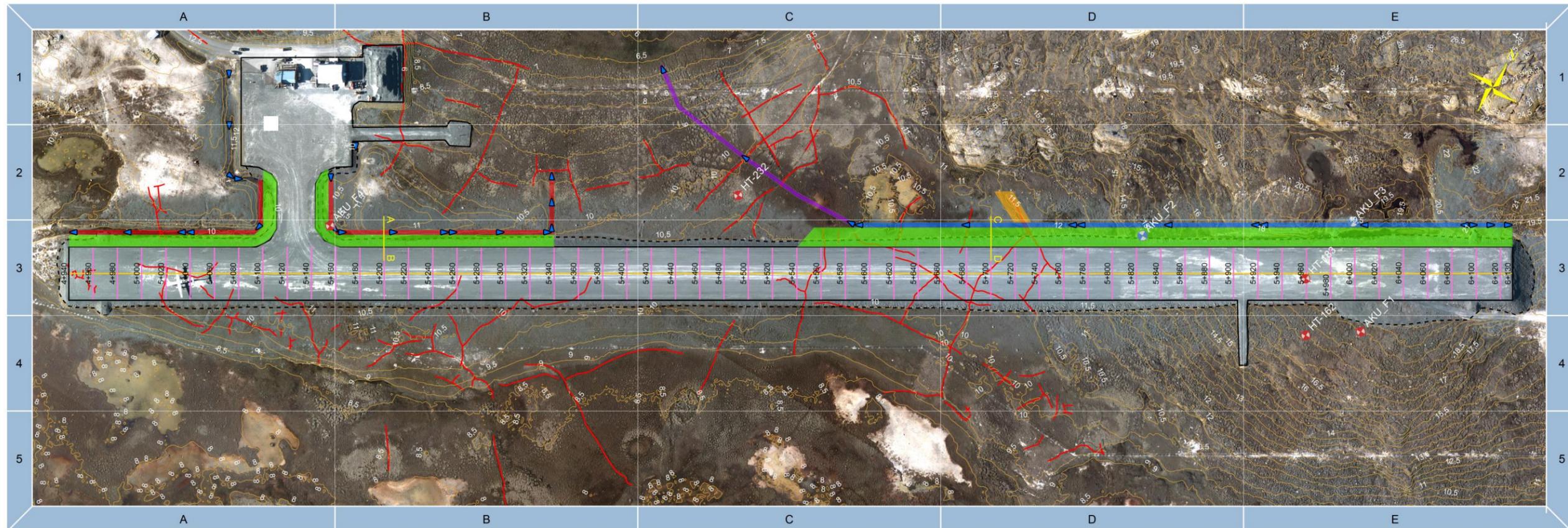
Figure 64: Profils des températures minimums, maximums et moyennes projetés pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport d'Akulivik, chaînage 5+960 m.

4.4.4 STRATÉGIES D'ADAPTATION ENVISAGÉES :

Actuellement, le pergélisol présent en pied de remblai du côté nord est fortement dégradé comme en témoignent les mesures thermiques de 2010 au câble AKU_F4 ainsi que celles réalisées ponctuellement en 2008 dans les puits de forage AKU_F2 et AKU_F3. Le rôle prédominant de l'accumulation de neige et d'eau en pied de remblai dans le processus de dégradation est indéniable. Cette dégradation du pergélisol apparaît plus sévère à l'extrémité est de la piste, là où elle repose sur une butte de till et dont une section avait été excavée lors de la construction. D'après les relevés effectués par le personnel du MTQ, l'accotement construit sur cette section en déblai s'est affaissé d'environ 12 cm entre 2005 et 2010. De manière générale, les résultats des simulations numériques forcées par les températures de l'air des scénarios climatiques du MRCC (série AEV et AHA) proposent une légère augmentation de l'épaisseur de la couche active au centre-piste, mais un dégel soutenu et considérable pour les pieds de remblai. Ainsi, en fonction des caractéristiques géotechniques des couches de sols à dégeler, des tassements potentiellement importants sont à envisager en pied de remblai. En revanche, ceux-ci devraient être très localisés et d'ampleurs limitées au centre-piste. Afin de freiner la dégradation des accotements et éviter tout transfert de chaleur latéral éventuel qui pourrait graduellement affecter la stabilité du pergélisol sous la piste d'Akulivik, il est proposé d'utiliser un remblai à pente adoucie (6 :1) avec fossés de drainage peu profonds sur presque la totalité du côté nord (Figure 65). Les quelques sillons de coin de glace qui traversent la piste et qui sont sujets à la thermoérosion par l'eau devront être drainés puis comblés avec de la tourbe afin d'éviter toute accumulation d'eau éventuelle. Pour l'instant, le pergélisol sous le centre-piste ainsi qu'en pied de remblai du côté sud semble épargné, donc ne nécessite pas de mesures de mitigation particulières.

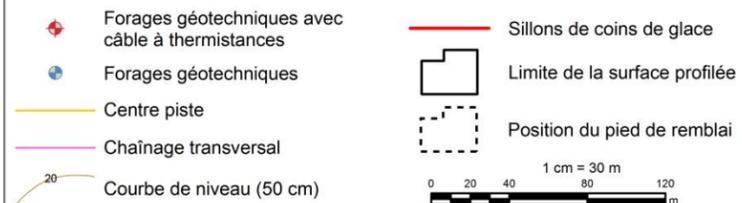
Parallèlement à la stratégie d'adaptation proposée, les actions supplémentaires suivantes sont recommandées afin d'assurer une évaluation approfondie de l'étendue du problème, de combler le manque de connaissances sur les conditions du pergélisol en zones non perturbées (centre-piste) et d'évaluer, au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

- Instrumenter avec des câbles à thermistances les puits de forage AKU_F2 ou AKU_F3. L'installation permanente de câbles à thermistance en pied de remblai est recommandée afin de valider si les épaisseurs de la couche dégelée sont réellement celles mises en lumière par les lectures manuelles. En cas de travaux de réfection, il s'avère essentiel de préserver l'instrumentation, car celle-ci permettra d'évaluer ultérieurement l'efficacité de la méthode de mitigation mise en place.
- Réaliser des relevés au MASW afin d'avoir le profil des sols dégelés le long de transects partant du centre-piste vers le pied de remblai et le terrain naturel. Refaire les relevés aux mêmes endroits quelques années après la mise en place de la méthode de mitigation afin d'évaluer l'état de restauration thermique des pieds de remblai.
- Réaliser un forage peu profond (<5 m) avec récupération au centre-piste (vis-à-vis AKU_F4) à l'aide d'une foreuse portative afin de déterminer les propriétés du pergélisol non dégradé présent sous la piste. Données que la campagne de forage de 2008 et 2009 n'a pu permettre d'acquérir en raison des emplacements en zones perturbées (pied de remblai) des forages et de problèmes techniques lors de l'utilisation du système d'échantillonnage.
- Instrumenter le forage au centre-piste à l'aide d'un câble à thermistances afin d'assurer le suivi du régime thermique à long terme à l'intérieur du remblai et dans le pergélisol.
- Procéder à une cartographie détaillée des coins de glace ainsi qu'une étude approfondie afin de déterminer leurs caractéristiques (profondeur, largeur et longueur).



Stratégie d'adaptation, aéroport d'Akulivik.

Infrastructures et instrumentation



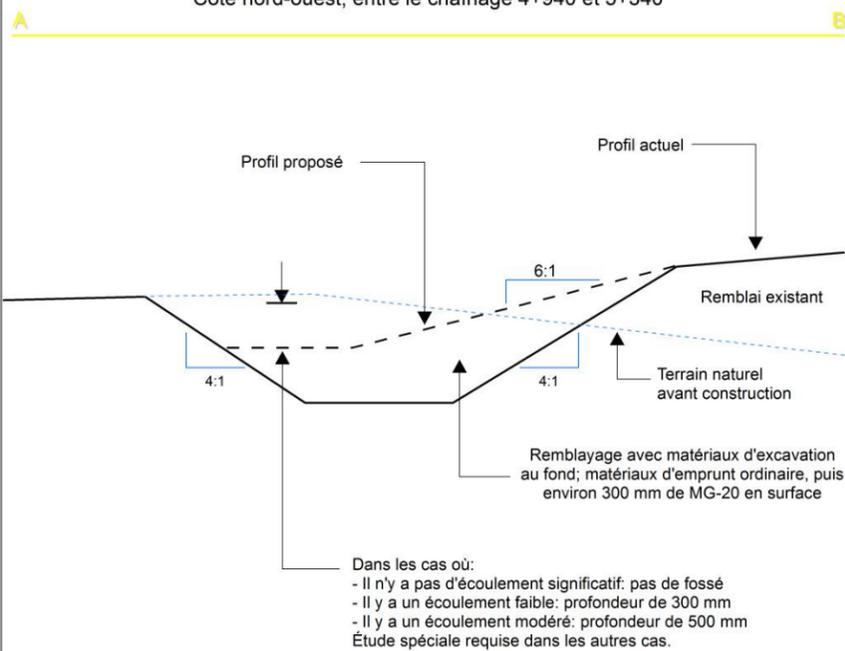
Modifications proposées

- Sens de l'écoulement des fossés de drainage
- Nouveau fossé de drainage peu profond (< 500 mm)
- Reprofilage des fossés de drainage existants par comblement
- Fossé de décharge peu profond (< 500 mm)
- Remblai à pente adoucie (6:1) avec fossé de drainage peu profond

Réalisation: E. L'Hérault, M. Allard et G. Doré, septembre 2011, Centre d'études nordiques, Université Laval.
Système de référence: NAD83 ; Projection: MTM zone 10



Remblai à pente adoucie (6:1) avec fossé de drainage peu profond
Côté nord-ouest, entre le chaînage 4+940 et 5+340



Remblai à pente adoucie (6:1) avec fossé de drainage peu profond
Côté nord-ouest, entre le chaînage 5+540 et 6+130

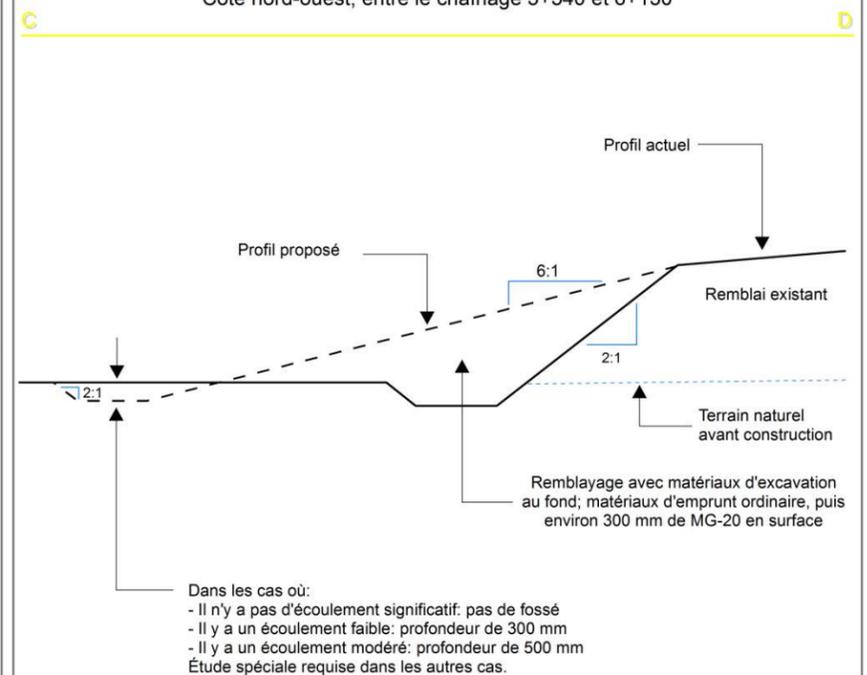


Figure 65: Plan d'adaptation proposé pour la piste d'Akulivik.

4.5 SALLUIT

4.5.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

4.5.1.1 PISTE D'ATERRISSAGE

La piste d'atterrissage de Salluit ainsi que ses infrastructures ont été achevées en 1988. La piste a une longueur totale de 1190 m, du chaînage 1+810 m au chaînage 3+000 m, et une largeur de 44 m. Son axe est orienté sud-sud-ouest nord-nord-est. La piste repose à une altitude d'environ 220 m à son extrémité sud-sud-ouest et 226,1 m à son extrémité nord-nord-est.

La première section affectée par des tassements est située à l'extrémité nord-ouest, près de la voie de circulation et le long de l'accotement (du chaînage 2+760 au chaînage 2+920). À cet endroit, la piste repose sur du till qui, d'après les plans, a été décapé d'une tranche d'environ un mètre d'épaisseur lors de la construction. Plusieurs dépressions ont aussi été observées tout au long de la bordure est de la piste et s'accompagnent quasi automatiquement de la présence de mares en pied de remblai (Figure 69A). Cette fonte préférentiellement localisée sur le côté est découle, d'après Allard et al. (2007), de l'accumulation de grandes épaisseurs de neige qui s'accumulent dans les dépressions topographiques ainsi qu'un mauvais système de drainage qui retient l'eau contre le pied du remblai et, même, qui favorise son infiltration sous la piste par endroits.

Les dépressions sur le flanc est de la piste et qui découlent de ces mêmes facteurs sont localisées au chaînage 2+030 m, 2+180 m et 2+500 m. L'affaissement le plus notable est situé au niveau des deux ponceaux superposés situés au chaînage 2+030 m (Figure 66A). Ces derniers témoignent de l'ampleur du tassement dans le secteur par le basculement de leurs extrémités est vers l'intérieur de la piste. Dans cette zone affectée, de nombreuses fissures de tensions et un trou d'une trentaine de centimètres de largeur et de profondeur ont été observés en bordure de piste (Figure 66B et C). Sur le côté ouest, vis-à-vis cette dépression, un important écoulement d'eau s'infiltrant au pied du remblai a été observé tout au long de la campagne de forage (Figure 66D). Vers la fin octobre 2008, les froides températures d'automne prévalant alors ont fait geler l'eau à l'intérieur des ponceaux, mais l'écoulement d'eau sous le remblai persistait toujours.

4.5.1.1 ROUTE D'ACCÈS

La route d'accès à l'aéroport mesure 3,057 km du chaînage 0+629 m au chaînage 3+686. Le long de cette route, des déformations importantes se sont produites et sont attribuables à des tassements différentiels dus au dégel du pergélisol. Certaines de ces déformations sont survenues dans des secteurs sur till entre les chaînages 2+200 m et 3+200 m (Figure 67A), mais c'est principalement la section bâtie sur argile marine riche en glace qui est affectée (entre les chaînages 1+300 m et 2+200 m). Lors d'une visite au mois d'août 2008, des fissures longitudinales en bordure de l'accotement ainsi que dans la partie pavée plus au centre de la route (Figure 67B) ont été observées entre les chaînages 1+550 m et 1+580 m. Ces fissures confirment qu'un tassement localisé sous l'épaulement s'est produit à cet endroit et qu'il risque de progresser au cours des prochaines années. Vis-à-vis cette dépression, en pied de remblai côté est, la déformation graduelle d'un tuyau de PVC initialement installé à la verticale dans un puits de forage ainsi que la présence d'un bourrelet suggèrent un mouvement latéral lent du talus de remblai vers le bas de pente (Figure 67C). Sur le côté ouest de la route, les dépressions sont presque systématiquement accompagnées de mares en pied de remblai (Figure 67D). L'accumulation d'eau sur le côté ouest est favorisée par l'entrave au drainage naturel de la pente que représente le remblai de la route. Lors de la fonte printanière et lors d'épisodes pluvieux importants, l'eau s'écoule en nappe mince à la surface de la toundra. Sur les versants, l'écoulement se concentre légèrement dans des chenaux

parallèles, mais diffus, dans lesquels l'humidité du sol est plus élevée et où l'eau migre lentement en partie en surface, en partie à travers les horizons supérieurs de la couche active. L'eau de ces chenaux humides véhicule de la chaleur par convection et c'est à leur passage que l'on retrouve préférentiellement des affaissements (Figure 68). Au chaînage 0+960 m, une rupture de la couche active est survenue à l'été 2005 à environ 15 m du pied du remblai côté ouest (Figure 67E). La tête de la rupture régresse graduellement vers le pied de la route, ce qui risque éventuellement d'en affecter la structure. À la fin de l'été 2010, une seconde rupture de la couche active s'est produite à proximité confirmant la sensibilité du pergélisol au dégel dans le secteur et en l'occurrence la précarité de l'infrastructure.

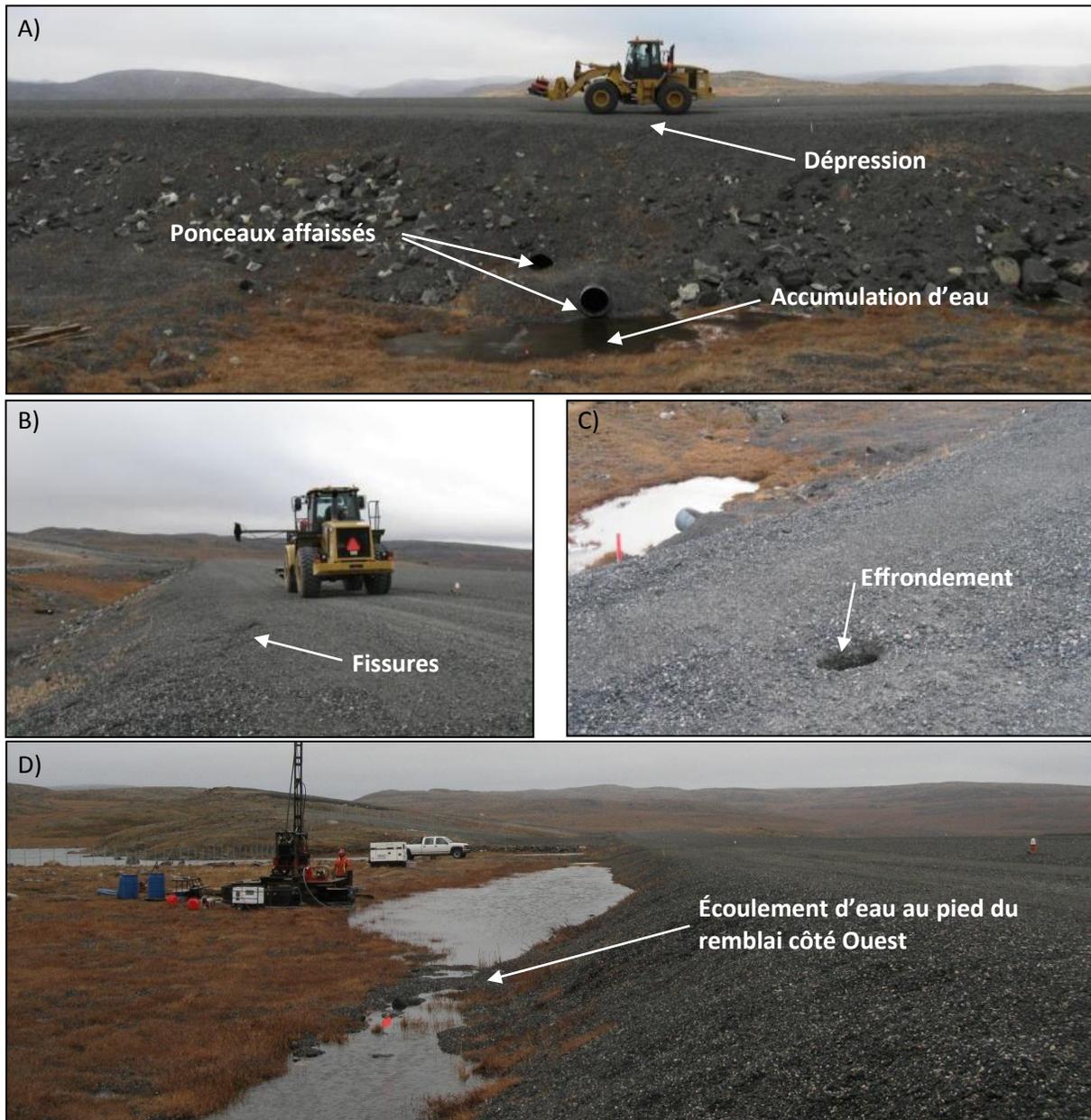


Figure 66 : A) Dépression importante sur le côté est de la piste au niveau des deux ponceaux superposés situés au chaînage 2+030 m. Fissures (B) et effondrement (C) dans la zone affectée par la dépression. D) Accumulations d'eau côté est, chaînage 2+510 m.

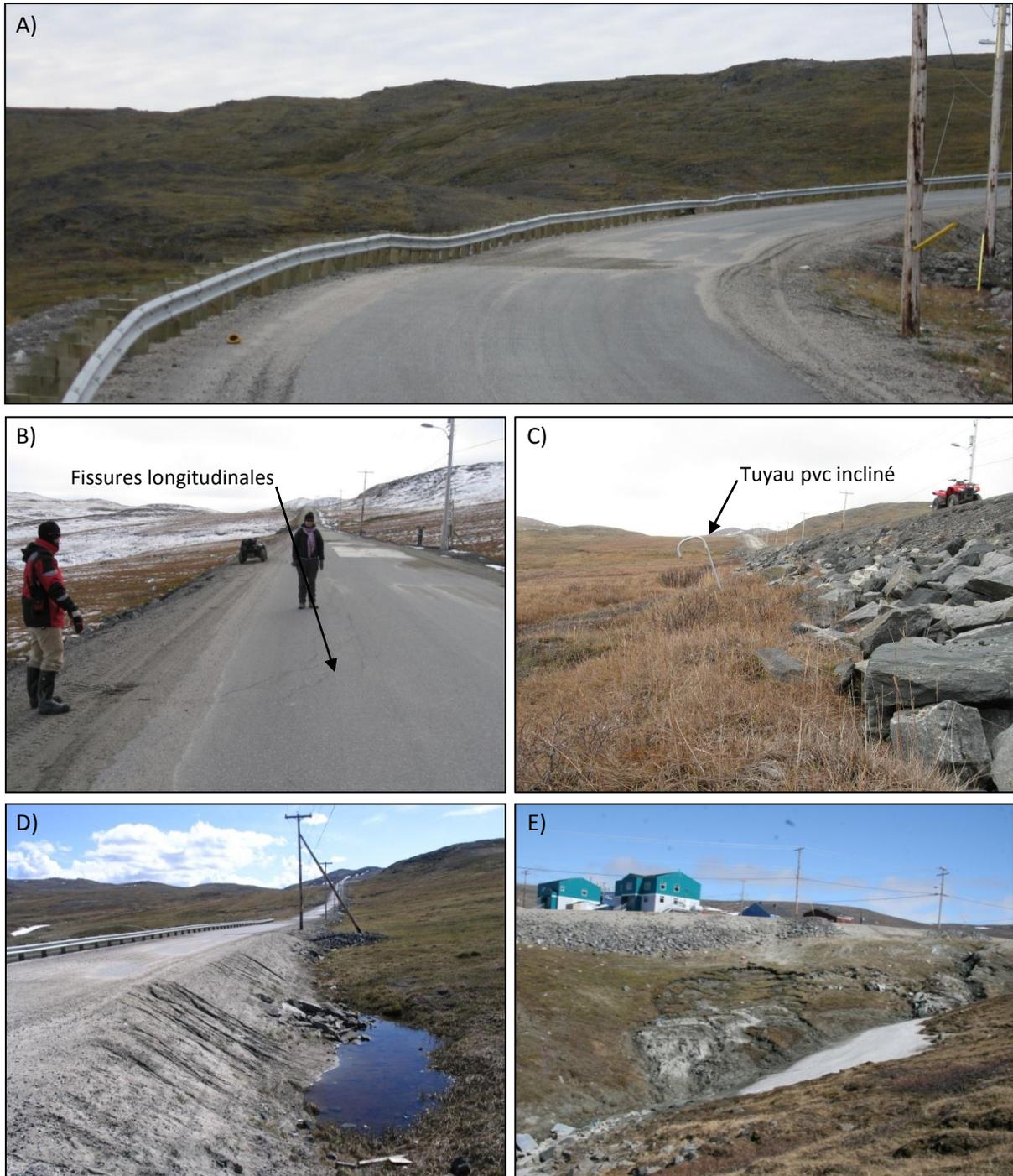


Figure 67 : A) Déformation de la chaussée survenue dans un secteur sur till entre les chaînages 2+200 m et 3+200 m. B) Fissures longitudinales dans le revêtement entre les chaînages 1+550 m et 1+580 m. C) Tuyau de pvc incliné et bourrelet en pied de remblai côté est qui suggèrent un mouvement lateral lent du talus de remblai. D) Mares en pied de remblai côté ouest. E) Rupture du mollisol en bordure de la route d'accès au chaînage 0+960 m côté ouest.

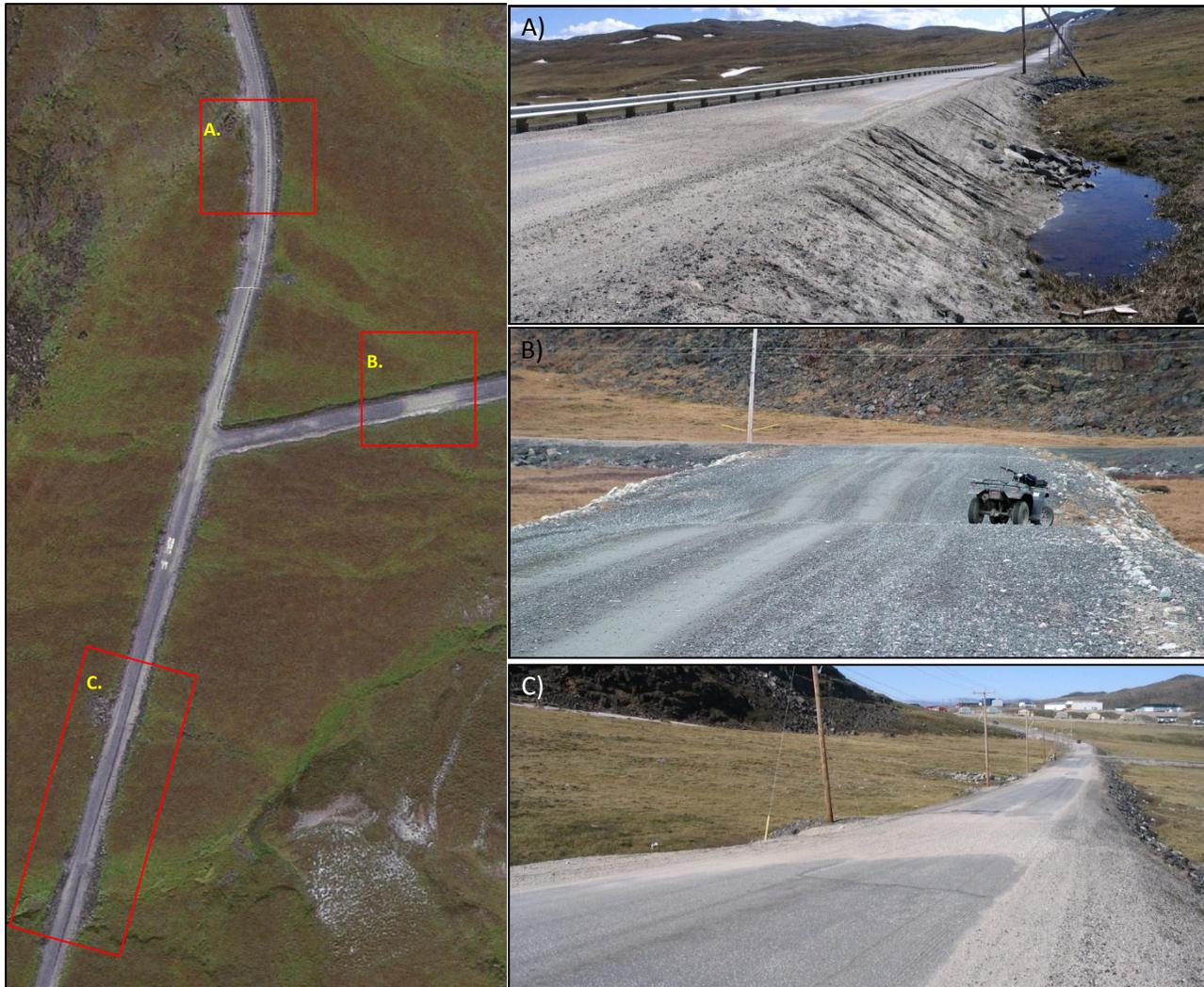


Figure 68 : Tassements localisés le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. Ces tassements se retrouvent préférentiellement au passage des chenaux humides sous l'infrastructure. Les chenaux sont facilement identifiables sur l'image satellite par leurs teintes verdâtres (image de gauche).

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

À l'automne 2008, 5 forages ont été réalisés le long de la piste d'atterrissage et un en bordure de la route d'accès à l'aéroport. C'est à proximité des anomalies recensées le long de la piste et de la route d'accès que les forages ont été réalisés. Le positionnement des forages est illustré à la figure 69B et leurs caractéristiques générales résumées au tableau 19.

Tableau 19 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Salluit et sa route d'accès.

Nom du forage	Localisation par rapport au chaînage existant	Profondeur atteinte
SAL_F1	Côté ouest, chaînage 2+802 m, dans le fossé de drainage à 1 m du pied du remblai	5,75 m
SAL_F2	Côté est, chaînage 2+510 m, 10 m du pied du remblai	9,32 m
SAL_F3	Côté est, chaînage 2+030 m, à 1 m du pied du remblai	6,20 m
SAL_F4	Côté est, chaînage 2+185 m, dans le fossé de drainage à 1 m du pied du remblai	5,04 m
SAL_F5	Côté ouest, chaînage 2+645 m, dans le milieu naturel à 75 m du remblai	7,50 m
SAL_F6	Côté est de la route d'accès, chaînage 1+560 m à 1 m du pied du remblai	13,63 m

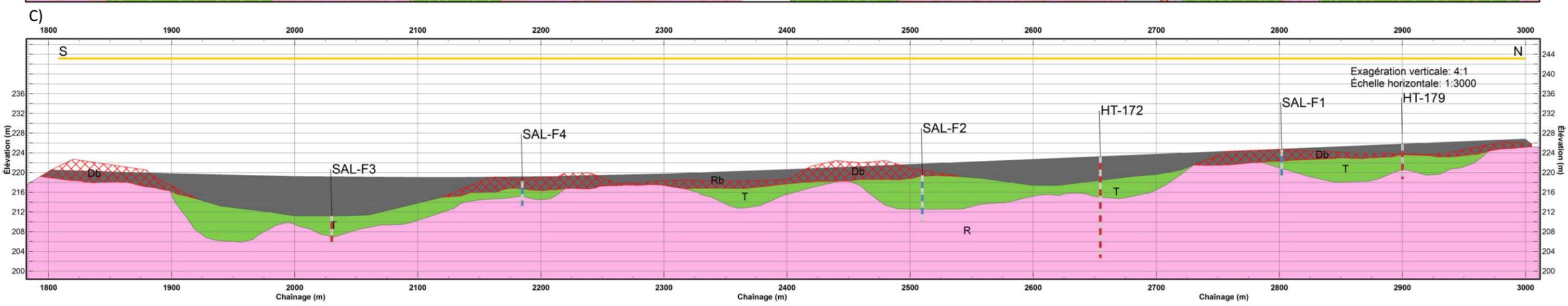
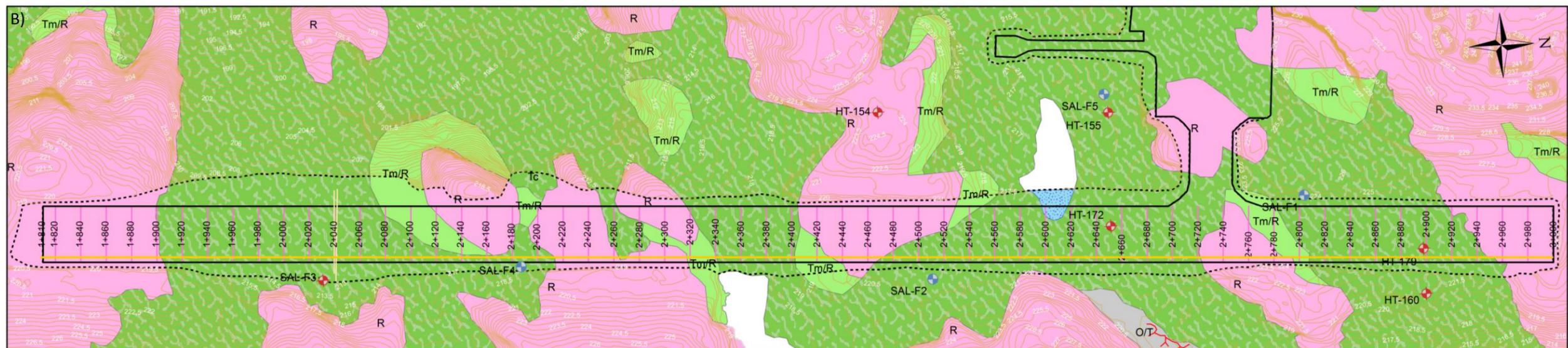
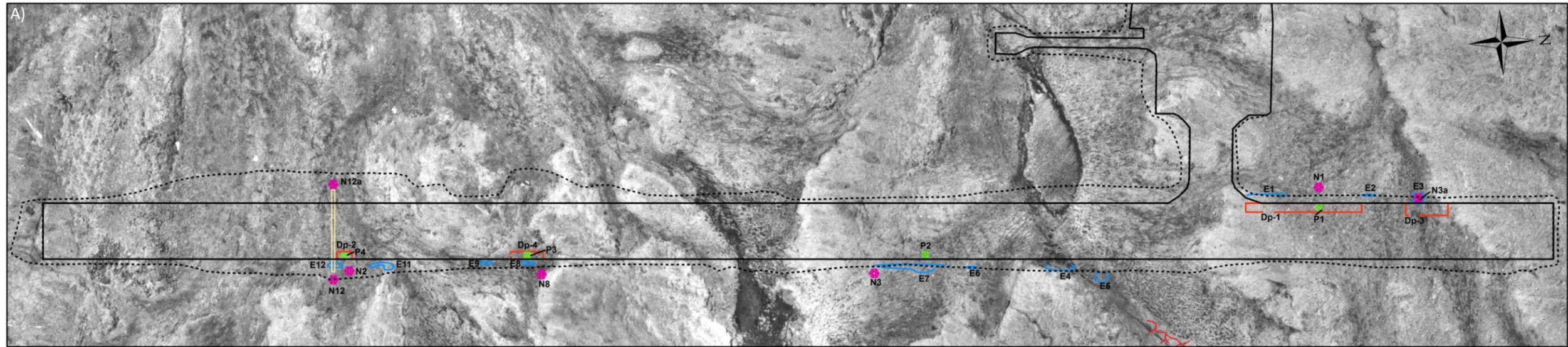


Figure 69 : Planche synthèse de la piste de Salluit.

Dépôts de surface

Sédiments organiques

O/T SÉDIMENTS ORGANIQUES SUR TILL: Dépôts sableux avec présence de matière organique; caractérisé par un mauvais drainage et par la présence de réseaux de polygones à coins de glace.

Sédiments glaciaires

T TILL ÉPAIS: Matériel hétérométrique non trié dont l'épaisseur est supérieure à 1 m ; composé de sable silteux avec un peu de graviers anguleux et présence de cailloux et/ou blocs pluricentimétriques; dans la section de sol gelé, le dépôt contient des lentilles de glace plurimillimétriques à centimétriques et de la glace interstitielle; caractérisé en surface par des sols striés et des lobes de gélifluxion.

Tm/R TILL MINCE SUR ROC: Matériel hétérométrique non trié dont l'épaisseur est inférieure à 1 m; composé de sable silteux avec un peu de graviers anguleux et présence de cailloux et/ou blocs pluri-centimétriques; ponctué d'affleurements rocheux; la structure du roc sous-jacent transparaît en surface.

Substrat rocheux

R ROCHE EN PLACE: Affleurements rocheux et roc à mince couverture de sédiments meubles.

Anthropique

Rb ANTHROPIQUE: Remblai.

Hydrographie



Plans d'eau



Lacs drainés lors de la mise en place de l'infrastructure



Zone d'accumulation d'eau en bordure de piste

Formes de terrain



Fentes de gel



Sols structurés (ostioles, ostioles à bourrelets, sols striés sur les pentes, cercles de pierres, etc.)



Déblai

Forages



Forages géotechniques instrumentés avec un câble à thermistances



Forages géotechniques avec récupération



Courbe de niveau (50 cm)

Infrastructures

 Emplacement du levé de géoradar

 Chainage transversal

 Ponceau



Limite de la surface profilée



Limite du pied de remblai

Identification des défauts



Accumulation d'eau en bordure de piste



Dépressions



Mesures d'enneigement effectuées sur une base annuelle



Plaque de tassement

4.5.2.1 SECTEUR DE L'AÉROPORT

L'aéroport de Salluit, situé sur des hauts plateaux, repose sur trois types d'unités géologiques de surface qui se résument à : des dépôts de till épais (T), des couvertures de till mince et discontinue sur le roc (Tm/R) et des affleurements rocheux (R). La topographie du secteur se caractérise par un relief modelé où alternent sommets et creux. Sur les sommets, le roc affleure ici et là, tandis que dans les creux topographiques, le till peut atteindre des épaisseurs de plus de 7 m (SAL_F2). C'est également à l'intérieur de ces creux topographiques, souvent mal-drainés, que s'accumulent tourbe et colluvions dans lesquelles se développent fréquemment des réseaux de coins de glace (Figure 70A et B). Sur les pentes, souvent à partir de 8° d'inclinaison, mais parfois moins, il se forme des lobes de gélifluxion et des ostioles en surface du till, processus lents et limités à la couche active dont l'épaisseur est comprise entre 1,80 (SAL_F5) et 2,2 m (SAL_F1).

Sur un plan géotechnique, le till consiste en un dépôt hétérométrique mal trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (USCS : SM). La proportion moyenne de gravier, sable et silt est respectivement de 27, 46 et 27 % ; très variable, la fraction en silt peut atteindre près de 50 %. Dans l'ensemble, les échantillons de till prélevés dans le pergélisol à l'aéroport ont révélé la présence d'importante quantité de glace. La glace à l'intérieur du dépôt se présente essentiellement sous forme de lentilles de glace de ségrégation avec à l'occasion une structure réticulée (Figure 71A et B). La teneur en eau gravimétrique est en moyenne supérieure à 30 % et peut atteindre, dans les zones riches en glace au sein du pergélisol, des valeurs pondérales aussi élevées que 180 % (SAL_F5) (Figure 71C, D, E et F). En raison de sa teneur en eau assez importante et souvent bien supérieure à sa limite de liquidité, le till est susceptible de se tasser et de fluer lors de son dégel. Afin d'évaluer son potentiel au tassement, des essais de consolidation au dégel ont été réalisés. Ces essais ont permis d'établir que le potentiel de tassement d'un till riche en glace dont la teneur en eau est de 28 et 40 % est respectivement de 30 et 40 % sous des contraintes de 100 kPa (Voir annexe tableau 58 et tableau 59). Ce potentiel de tassement est certainement plus élevé dans les zones extrêmement riches en glace comme c'est le cas près du plafond du pergélisol aux forages SAL_F3 et SAL_F5 (Figure 71C et E).

Des essais de déformation au fluage ont également été réalisés sur cinq échantillons de till gelé. Le fluage est un phénomène physique qui provoque une déformation irréversible lente d'un matériau soumis à de très fortes pressions. Dans le cas de la piste d'atterrissage de Salluit, le tassement en fluage survient principalement dans les sols gelés là où la contrainte appliquée est élevée comme c'est le cas aux endroits où l'épaisseur du remblai atteint des valeurs considérables (p. ex. > 5 m). Lorsqu'une contrainte est appliquée sur une longue période, on atteint une phase où le taux de déformation est constant pour une contrainte et une température définies (Ladanyi, 1972) (phase II voir encadré figure 72A). Le but de ces essais est d'arriver à déterminer avec précision les paramètres de fluage du till de Salluit et de mettre en relation directe le taux de déformation annuel au fluage en fonction de la contrainte appliquée et de la température. La figure 72A présente l'allure d'une courbe de fluage lors d'un essai réussi. C'est à partir des essais réussis que les paramètres de fluage du till ont pu être évalués. En particulier, un de ces essais, a été réalisé par paliers de température, c'est-à-dire que pour un même échantillon, la température a été changée afin d'obtenir plusieurs courbes de fluage (Figure 72B). Dans l'ensemble, la majorité des essais ont été réussis, quoique certains, en raison de la variabilité non souhaitée de certains paramètres (températures, confinement, contrainte verticale) ont été partiellement réussis ou échoués. Le tableau 20 présente un sommaire des conditions et résultats des essais de fluage réalisés en laboratoire.

Tableau 20 : Sommaire des résultats des essais au fluage pour le till glaciaire.

Échantillon	Unité	Paramètres de fluage				Durée de l'essai (hrs)	Température de l'essai (°C)	Contrainte verticale σ_1 (kPa)	Taux de fluage (année ⁻¹)	RMSE	Résultat de l'essai
		b	n	σ_{co} (MPa)	w						
SAL_F2_244-257	TG	0,32	1,01	0,140	0,44	166,6	-1,0	200	4,56%	0,044	Succès
SAL_F2_365-379	TG	0,56	2,53	0,035	0,43	52,3	-2,0	200	36,79%	0,153	Partiel
SAL_F2_461-475	TG	0,40	1,35	0,193	0,45	115,8	-4,0	200	1,36%	0,057	Succès
		0,61	1,07	0,074	0,31	142,7	-3,0	200	7,63%	0,079	Partiel
		0,34	1,52	0,093	0,45	98,3	-2,0	200	4,61%	-	Succès
		0,50	1,08	0,081	0,45	72,1	-1,0	200	7,85%	-	Succès
SAL_F2_673-687	TG	0,44	1,09	0,076	0,39	139,1	-4,0	100	2,79%	0,028	Succès
SAL_F5_488-501	TG	0,29	1,10	0,133	0,46	258,1	-2,0	200	3,67%	0,204	Succès
Moyenne		0,38	1,19	0,119	0,44						
Écart-type		0,08	0,20	0,04	0,03						

Initialement, les essais consistaient à déterminer directement le taux de fluage constant, c'est-à-dire lorsqu'on atteint la phase secondaire (phase II) de l'essai. Par contre, il s'est avéré que cet état est atteint, dans le cas des deux sols à l'étude, après une trop longue période de temps, ce qui rend impossible la réalisation de plusieurs essais dans les temps requis. Pour remédier au fait que des essais d'environ 100 heures caractérisent seulement le fluage dit primaire, on a caractérisé les 4 paramètres en fluage des sols (b, n, σ_{co} et w) à l'aide de l'équation générale de fluage primaire en condition triaxiale (Andersland et Ladanyi, 1994).

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{c\theta}} \right)^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}_c t}{b} \right)^b \quad (14)$$

où $\dot{\varepsilon}_c = 1 \times 10^{-5} \text{h}^{-1}$, σ_d est la contrainte déviatorique (MPa) et $\sigma_{c\theta} = \sigma_{co} (1 + |T|)^w$

Cette méthode indirecte utilise la méthode des moindres carrés et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour obtenir une régression linéaire de la courbe de fluage théorique par rapport à celle expérimentale. En procédant de manière itérative, on minimise cette erreur, qui caractérise la différence entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs mesurées, en modifiant la valeur des quatre paramètres à la fois. Il faut cependant noter que des paramètres qui fournissent une RMSE légèrement plus élevée sont parfois souhaitables pour mieux caler les valeurs expérimentales. Une fois l'optimisation effectuée, on peut prendre les paramètres déterminés et obtenir le taux de fluage secondaire ($\dot{\varepsilon}_{min}$) à l'aide de l'équation suivante (Andersland et Ladanyi, 1994) :

$$\dot{\varepsilon}_{min} = \dot{\varepsilon}_c \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{c\theta}} \right)^n \quad (15)$$

L'analyse des résultats permet, en appliquant la méthode présentée précédemment, de déterminer avec succès les paramètres au fluage de chaque échantillon testé. En faisant la moyenne de ces paramètres et en les insérant dans l'équation (15), un abaque pratique qui permet de connaître rapidement le taux de déformation annuel au fluage associé à une température et à une contrainte données a été développé à partir de l'équation générale (16) et est présenté à la figure 72C.

$$\dot{\varepsilon}_{min} = \dot{\varepsilon}_c \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{c\theta}} \right)^n = \dot{\varepsilon}_c \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{co}(1 + |T|)^w} \right)^n = \dot{\varepsilon}_c \left(\frac{\sigma_d}{0,119(1 + |T|)^{0,44}} \right)^{1,19} \quad (16)$$

où T est la température (°C).

De manière générale, lorsque la température du pergélisol se rapproche de son point de fusion, la vitesse de fluage s'accroît en raison de la diminution de la résistance au cisaillement suite à l'accroissement de la fraction d'eau non gelée dans les pores (Nixon et Lem, 1984).

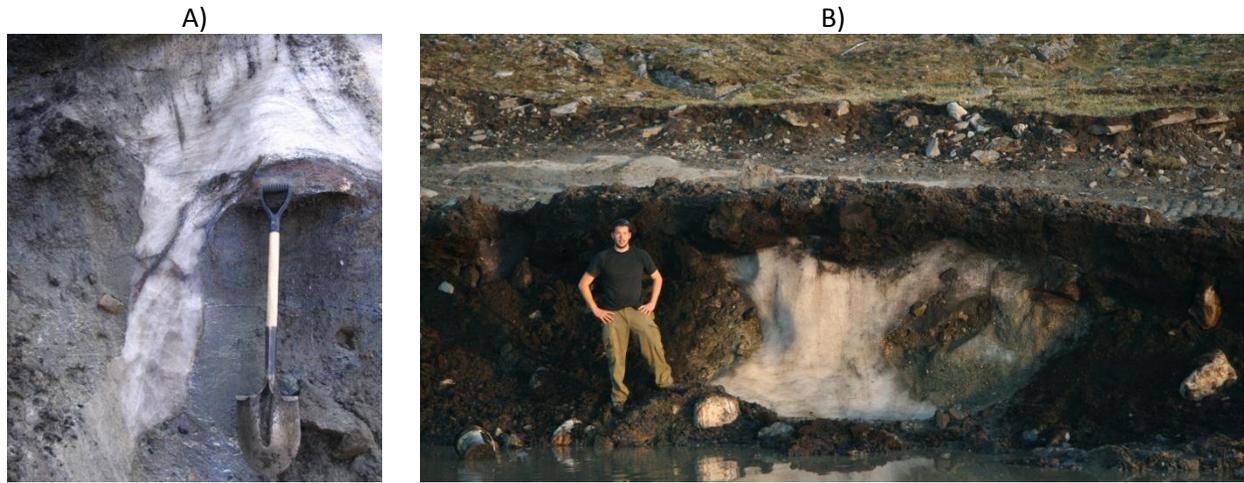


Figure 70: Coins de glace à l'intérieur du till exposés lors d'une excavation.

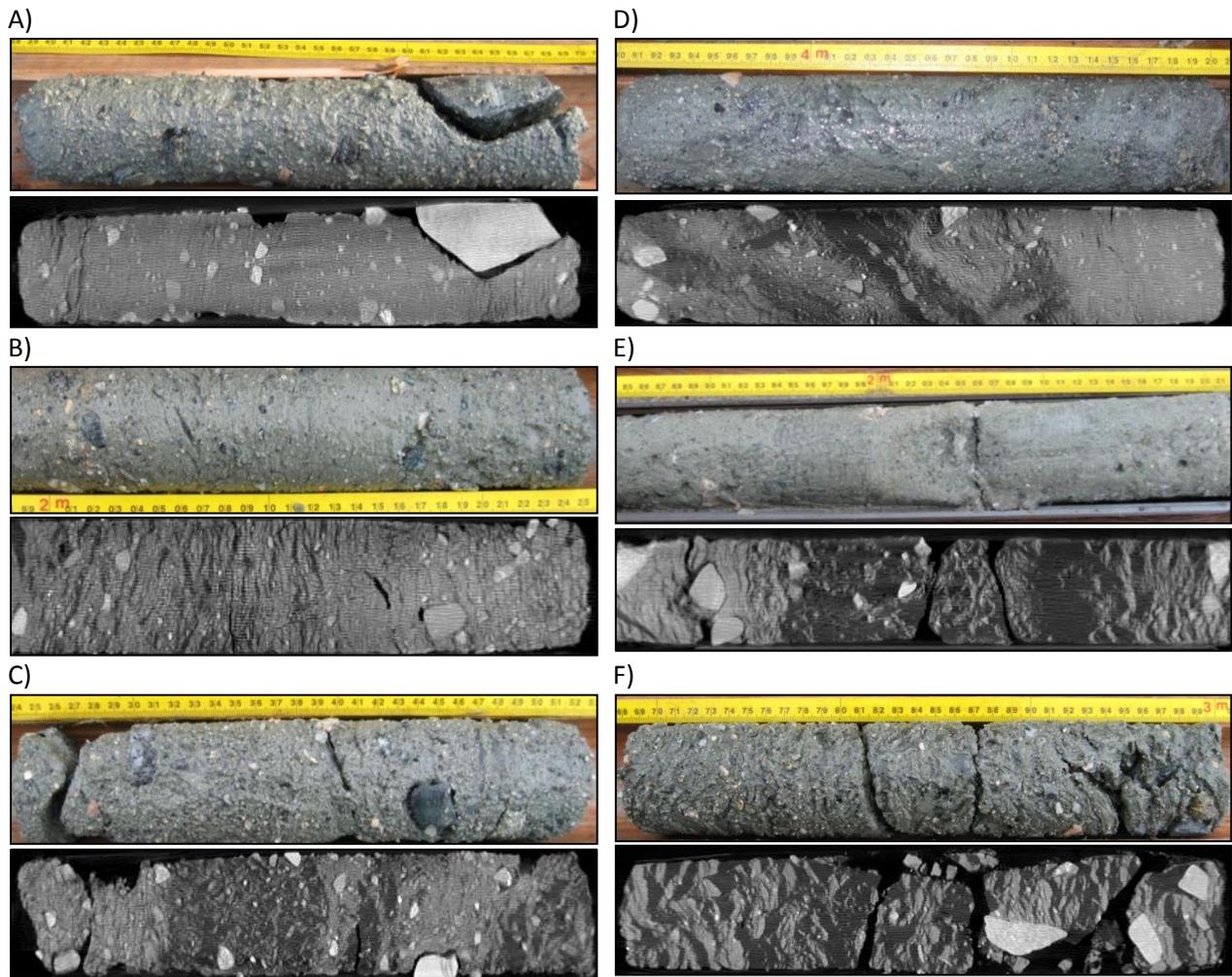
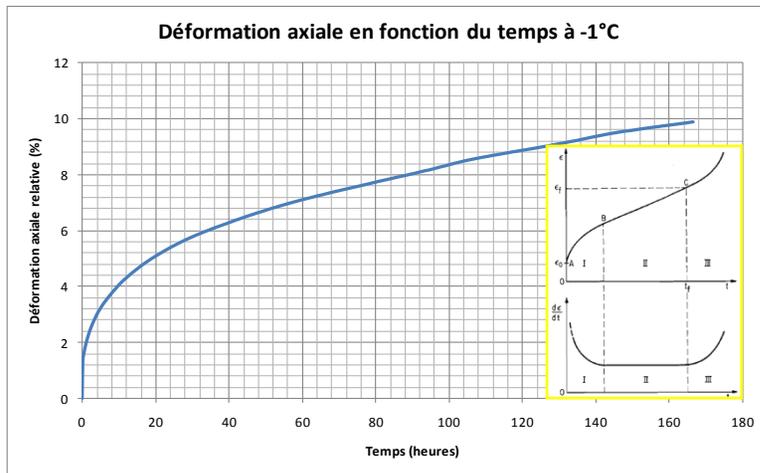
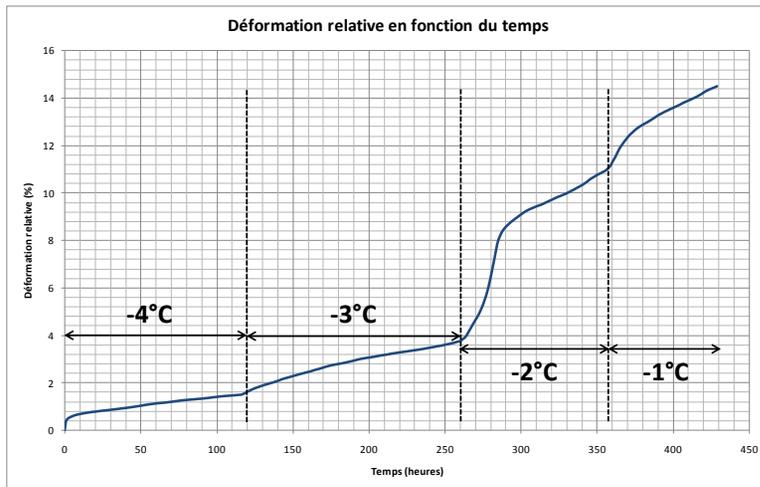


Figure 71 : A) Échantillon de till avec lentilles de glace millimétriques stratifiées prélevé au forage SAL_F1 entre 2,40 m et 2,70 m de profondeur. Au forage SAL_F3, B) till riche en glace avec structure lenticulaire entre 1,97 et 2,25 m de profondeur, C) couche riche en glace rencontrée entre 2,25 et 2,51 m de profondeur et D) till riche en glace prélevé juste avant d'atteindre le socle rocheux à 4,20 m de profondeur. Au forage SAL_F5, E) plafond du pergélisol riche en glace entre 1,92 m à 2,12 m et F) dépôt très riche en glace entre 2,7 et 3 m de profondeur avec fragments de till suspendus.

A)



B)



C)

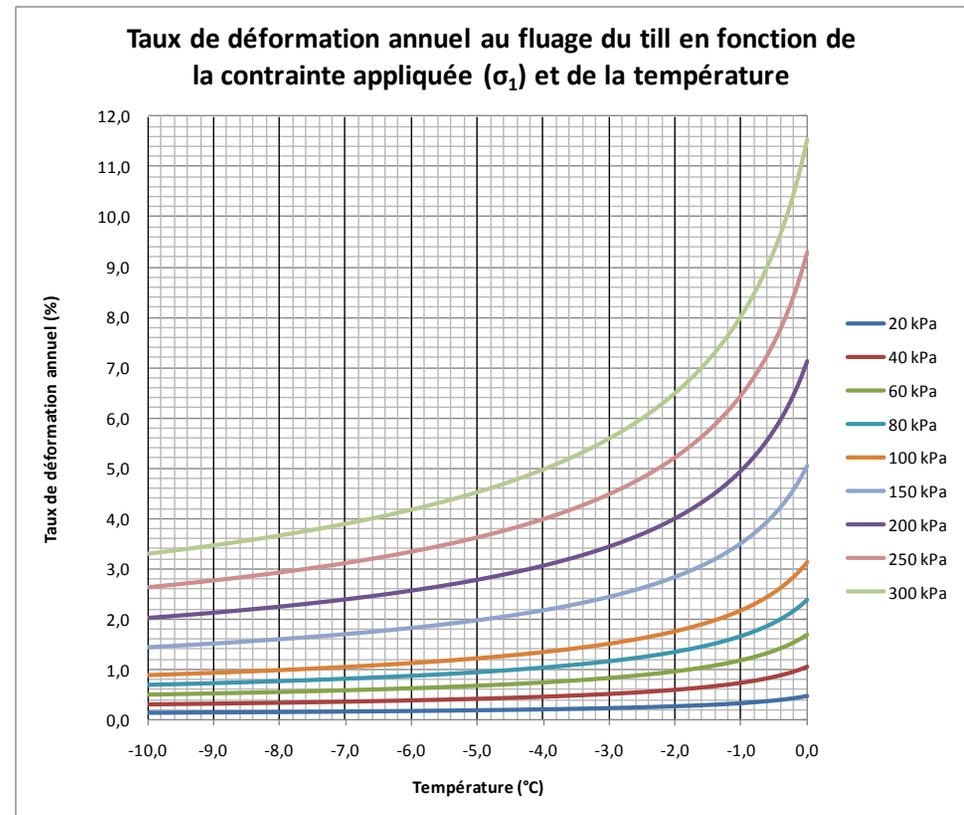


Figure 72: A) Courbe de fluage (déformation en fonction du temps) obtenue lors d'un essai réalisé sur un échantillon de till gelé (SAL_F2_244-257). Encadré jaune : Phases de fluage en fonction du temps (Ladanyi, 1972). B) Courbe de fluage pour quatre paliers de température (-4, -3, -2 et -1°C) pour SAL_F2_461_475 (TG) à 200 kPa. C) Abaque du taux de déformation au fluage pour le till de Salluit.

4.5.2.2 SECTEUR DE LA ROUTE D'ACCES

La route qui relie le village de Salluit à l'aéroport traverse deux grandes unités géologiques de surface soit : le till entre les chaînages 3+692 et 2+500 m et le silt argileux riche en glace entre les chaînages 2+500 et 0+629 m. Le till sur lequel repose la route possède les mêmes caractéristiques que celui ausculté à l'aéroport, par conséquent, seules les caractéristiques géotechniques du dépôt de silt argileux seront abordées dans la présente section.

L'unité de silt argileux d'origine glaciomarine (Ma) fut déposée par les courants de fond et de turbidité dans les eaux de la mer d'Iberville lors de la transgression marine postglaciaire (Allard *et al.*, 2002). En surface, la présence de sédiments fins se manifeste sur le terrain par la présence de champs d'ostioles. La partie supérieure de cette unité est essentiellement un silt sableux dont le faciès devient graduellement plus fin en profondeur, passant rapidement dans les premiers mètres à un silt argileux. Une fois émergé et soumis au climat froid, un pergélisol épigénétique s'est développé entraînant la formation de nombreuses lentilles. Ce dépôt très riche en glace est très sensible à la thermoérosion et aux ruptures de la couche active.

À l'automne 2008, un seul forage a été réalisé en pied de remblai côté aval le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. Ce forage a atteint une profondeur de 13,63 m et ses caractéristiques stratigraphiques sont résumées au tableau 21.

Tableau 21 : Stratigraphie au forage SAL_F6.

Profondeur	Stratigraphie
0,00 à 0,08 m	Couverture de matière organique en surface.
0,08 à 0,76 m	Silt sableux de couleur beige.
0,76 à 3,85 m	Silt argileux grisâtre avec lentilles de glaces réticulées plurimillimétriques et centimétriques faiblement espacées. Couche de glace massive entre 0,76 et 0,90 m qui correspond au plafond actuel du pergélisol.
3,85 à 9,30 m	Silt argileux avec lentilles de glace réticulées pluricentimétriques étroitement espacées (< 4 cm).
9,30 à 13,63 m	Silt argileux avec sections stratifiées composées de matériel plus grossier (silt ou sable fin). Présence de lentilles de glace pluricentimétrique subverticales ou légèrement inclinées faiblement espacées (< 5 cm). À cette profondeur, les lentilles de glace sont épaisses et plus espacées que celles observées dans les premiers mètres sous la surface.
	Le socle rocheux n'a pas été atteint.

Comme en témoignent les observations réalisées au forage SAL_F6, ces sédiments glaciomarins atteignent des épaisseurs importantes. Les analyses granulométriques réalisées à partir des échantillons prélevés au forage SAL_F6 démontrent que le dépôt affiche une signature granulométrique uniforme dans son ensemble, c'est-à-dire une distribution des particules selon leur diamètre comparable (Voir courbes granulométriques annexes). Ainsi, le pourcentage moyen des particules de gravier, sable et silt atteint respectivement des valeurs de 1, 28 et 71 %. Des résultats similaires avaient également été obtenus à partir d'un forage superficiel réalisé à proximité de la route par L'Hérault (2009) dont la proportion de silt avait été évaluée à environ 73 %. La teneur en eau moyenne à l'intérieur du dépôt est d'environ 37 % et peut atteindre des valeurs aussi élevées que 124 % à certaines profondeurs. D'ordre général, c'est entre 1 et 2 m de profondeur que l'on retrouve les valeurs les plus élevées, soit dans le premier mètre du pergélisol directement sous la couche active. C'est également dans le premier mètre du pergélisol que Fortier *et al.* (2004) avaient obtenu, pour la même unité, des valeurs de teneur en eau comprise entre 90 et 150 %. Ces fortes concentrations en glace dans la partie supérieure du pergélisol sont clairement visibles sur les images de densités obtenues par tomodynamométrie. Ces images font également ressortir la structure de la glace qui se présente essentiellement sous forme de lentilles

réticulées ou couches massive avec inclusion de sol en suspension (Figure 73A et B). Plus en profondeur, La structure de la glace demeure réticulée, mais les lentilles tendent à être plus espacées et plus épaisses (Figure 73C et D).

D'après les limites de consistances, ce dépôt consiste en une argile inorganique de faible plasticité de type CL. L'indice de plasticité est pour l'ensemble des échantillons analysés inférieur à 23 % avec une valeur moyenne de 20 % tandis que la limite de liquidité est en moyenne de 26,5 % (Annexe voir tableau 50). En général, la teneur en eau (glace) du pergélisol surpasse la limite de liquidité du dépôt, ce qui le rend susceptible à la liquéfaction en cas de dégel. L'identification visuelle de fragments de coquillages dans les échantillons prélevés au forage SAL_F6 confirme l'origine marine des dépôts donc sujets à contenir des sels dissous. Fait confirmé par des valeurs de salinité obtenues par Fortier et *al.* (2004) d'environ 4 grammes de NaCl par litre à 1 m de profondeur et 19 g/L à 4 m de profondeur pour le même dépôt.

Un seul essai de consolidation au dégel a été réalisé sur le silt argileux aux abords de la route. L'échantillon sélectionné se situe entre 2,9 et 3,04 m de profondeur dans un silt argileux assez compact avec une teneur en eau de 28 % et une cryostratigraphie qui se caractérise par de fines lentilles de glace millimétriques. Le potentiel de tassement ainsi mesuré est assez faible, soit de 6 et 9 % sous une contrainte respective de 100 et 200 kPa (Voir annexe tableau 60). Il est important de noter que malheureusement, l'échantillon soumis à l'essai de consolidation n'est aucunement représentatif des conditions en vigueur au plafond du pergélisol tant en raison de la structure de la glace que de sa quantité. Avec des teneurs en eau aussi élevée que 124 % et une structure de glace massive avec fragments de sol en suspension, il ne fait aucun doute que le potentiel de tassement du plafond du pergélisol en cas de dégel est bien au-delà des valeurs obtenues. En effet, une simple estimation du volume de la glace dans le sol à l'aide des images de densités permet d'évaluer le potentiel de tassement à environ 70 % pour la section supérieure du pergélisol située 0,76 et 1,8 m de profondeur. Pour le même dépôt, Allard et *al.*, (1994) avaient également estimé à partir de forage et de levés géophysiques des valeurs volumétriques en glace très élevées pouvant atteindre près de 77 % dans les 10 premiers mètres du sol.

Les paramètres au fluage pour le silt argileux de Salluit ont également été déterminés. À la suite de plusieurs essais réussis (Tableau 22 et figure 74A), les moyennes des paramètres ont été insérées dans l'équation (17) afin de bâtir, une fois de plus, un abaque qui permet de connaître rapidement le taux de déformation annuel au fluage associé à une température et à une contrainte données. Pour le calcul des moyennes des paramètres, les données indiquées en rouge ont été rejetées en raison de l'incohérence de la courbe de fluage ou en raison de données trop à l'écart par rapport aux autres. Comme le silt argileux est salin, une zone hachurée entre -2 et 0 °C indique que le sol est cryotique mais son comportement à ces températures s'apparente à celui d'un sol non gelé (Figure 74B).

$$\dot{\epsilon}_{min} = \dot{\epsilon}_c \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{c\theta}} \right)^n = \dot{\epsilon}_c \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{co}(1 + |T|)^w} \right)^n = \dot{\epsilon}_c \left(\frac{\sigma_d}{0,127(1 + |T|)^{0,42}} \right)^{2,21} \quad (17)$$

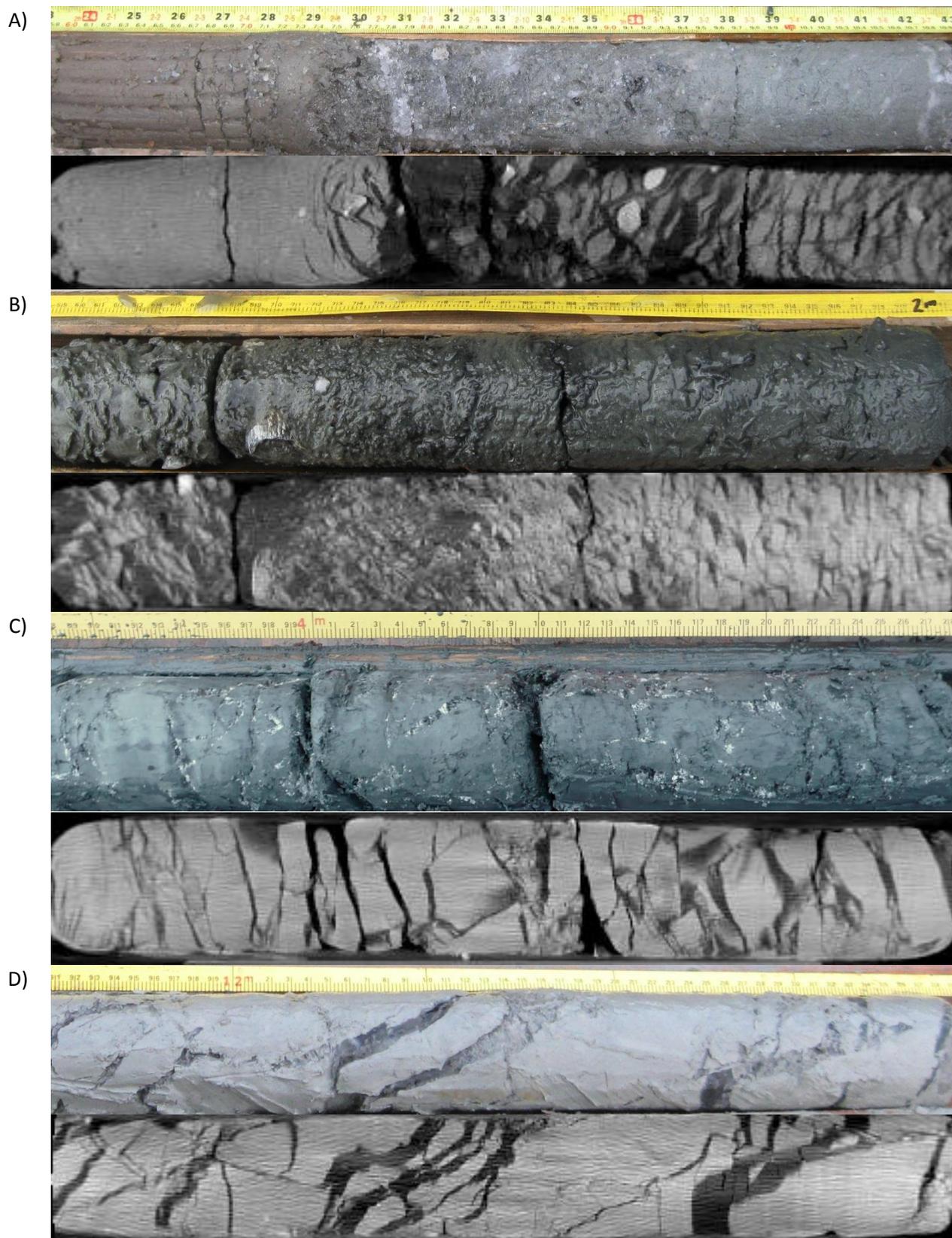


Figure 73 : Au forage SAL_F6 ; A) couche importante de glace située entre 0,76 m et 0,9 m de profondeur et identifiée comme étant le plafond actuel du pergélisol ; section riche en glace entre 1,20 et 1,54 m (B), entre 3,85 et 4,27 m (C) et entre 11,91 et 12,38 m de profondeur (D).

Tableau 22: Sommaire des résultats des essais au fluage pour le silt argileux de salluit.

Échantillon	Type de sol	Paramètres de fluage				Durée de l'essai (hrs)	Température de l'essai (°C)	Contrainte verticale σ_1 (kPa)	Taux de fluage (année ⁻¹)	RMSE	Résultat de l'essai
		b	n	σ_{co} (MPa)	w						
SAL_F6_233-247	SA	0,10	2,18	0,129	0,43	100,0	-4,0	200	1,12%	0,186	Succès
SAL_F6_247-260	SA	0,12	2,14	0,140	0,48	114,2	-3,0	200	1,03%	0,058	Succès
SAL_F6_750-765	SA	0,14	2,26	0,125	0,38	116,5	-3,0	200	1,60%	0,077	Succès
SAL_F6_765-779	SA	0,22	2,16	0,121	0,40	69,4	-4,0	200	1,46%	0,112	Succès
SAL_F6_805-820	SA	0,15	2,08	0,118	0,40	93,5	-4,0	200	1,63%	0,859	Partiel
SAL_F6_894-908	SA	0,10	2,29	0,120	0,41	83,3	-5,0	200	1,07%	0,313	Succès
SAL_F6_933-948	SA	n.d	n.d	n.d	n.d	0,1	-2,0	200	n.d	n.d	Échec
Moyenne		0,14	2,21	0,127	0,42						
Écart-type		0,05	0,06	0,008	0,04						

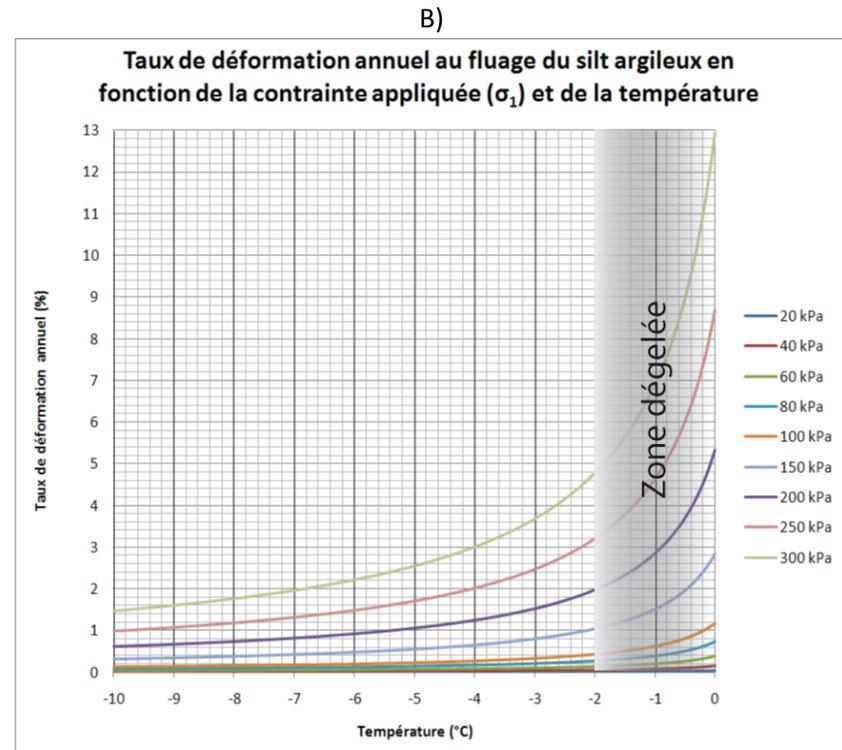
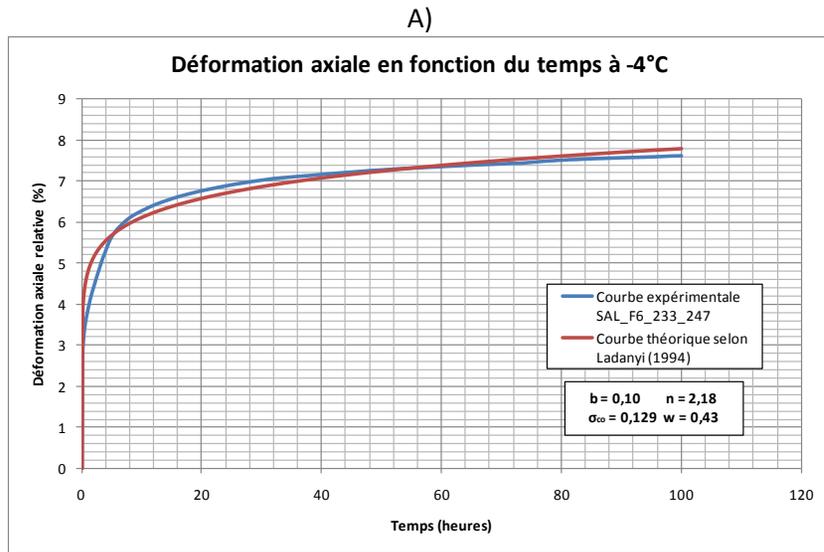


Figure 74 : A) Courbes de fluage pour SAL_F6_233_247 (SA) à 200 kPa et -4°C. B) Abaque simplifié du taux de déformation au fluage du silt argileux de Salluit.

4.5.3 CONDITIONS THERMIQUES DU PERGÉLISOL

4.5.3.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : PÉRIODE 1990-2010

Lors de la campagne de forage du Ministère de 2008, six (6) forages ont été faits à Salluit. Cinq (5) de ces forages se trouvent à proximité de la piste et aucun n'a fait l'objet d'une automatisation des lectures de températures. Toutefois, des tuyaux de PVC remplis d'huile de silicone ont été insérés dans ces puits de forage. De cette manière, il a été possible de procéder à des mesures ponctuelles de températures dans le sol à l'aide d'un multimètre et d'une thermistance. Ces températures du sol mesurées ponctuellement à la fin octobre 2008 le long de la piste sont présentées à la figure 75.

Pour la plupart des puits de forage, les positions du front de dégel ont été observées visuellement lors des forages. Ces positions varient entre 1,8 m (SAL_F5) et 2,20 m (SAL_F1). Au moment de la réalisation des forages, les positions du front de dégel identifiées délimitent l'épaisseur maximale du mollisol atteint lors de la saison de dégel 2008. Pour l'ensemble des puits de forages, les données thermiques mesurées plus en profondeur correspondent aux valeurs enregistrées par les câbles existants installés en permanence dans le sol en bordure et sous le remblai actuel de la piste d'atterrissage. Par exemple, à 6 m de profondeur, la température est inférieure à -3 °C. Dans l'ensemble, les températures du sol dans les premiers mètres sont plus chaudes aux puits de forages nouvellement réalisés que celles enregistrées par le câble à thermistance permanent HT-155 qui sert de référence. Cette différence s'explique principalement par un apport indéniable de chaleur latente induite dans le sol par les opérations de forage. Cette perturbation thermique s'estompera graduellement et les profils futurs qui y seront mesurés seront plus représentatifs. Dans le futur, il serait également préférable de loger en permanence des câbles à thermistances dans les puits jugés importants pour permettre un suivi thermique de haute qualité assuré par une meilleure stabilisation thermique des thermistances avec les conditions du sol environnantes.

Outre les lectures ponctuelles réalisées dans les puits de forages, la piste est munie de plusieurs câbles à thermistances non automatisés. À partir des lectures de ces câbles, on remarque que la couche active, depuis une décennie, s'est épaissie considérablement en milieu naturel (HT-155 et HT-160) (Figure 76). Par exemple, au câble HT-155, la couche active est passée d'une épaisseur d'environ 1,3 m en 1989 à plus de 3 m en 2008. Quoique légèrement moins marquée, cette augmentation de la couche active est également tangible au câble HT-160 où son épaisseur est passée de 1,2 m à 2,8 m pour la même période. En contrepartie, les mesures thermiques aux câbles installés dans la piste (HT-172 et HT-179) montrent une couche active relativement stable. En effet, depuis la construction, le front de dégel au câble HT-179 est demeuré dans le remblai ou juste sous celui-ci à une profondeur inférieure à 2,3 m tandis qu'au câble HT-172, celui-ci varie selon les années entre 2,3 et 3 m de profondeur et se maintient toujours dans le remblai. La disparité des mesures ponctuelles prises à l'aéroport limite les possibilités d'analyses thermiques et la comparaison entre les sites.

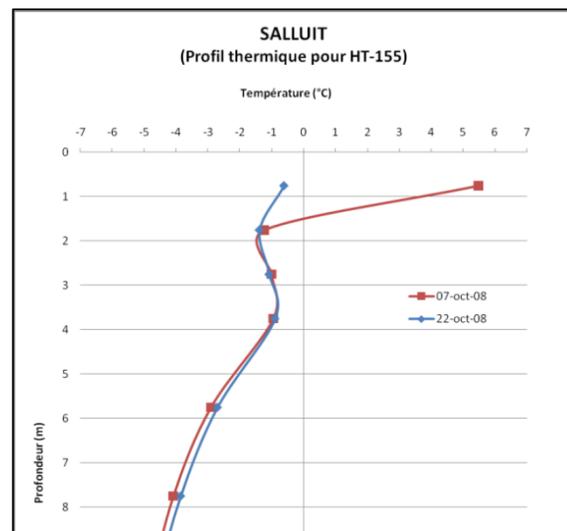
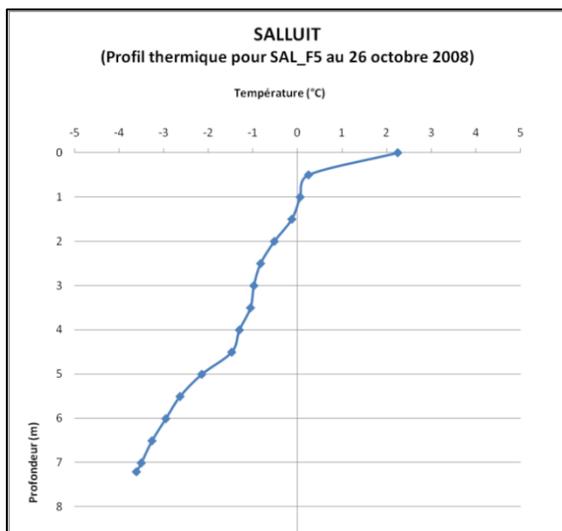
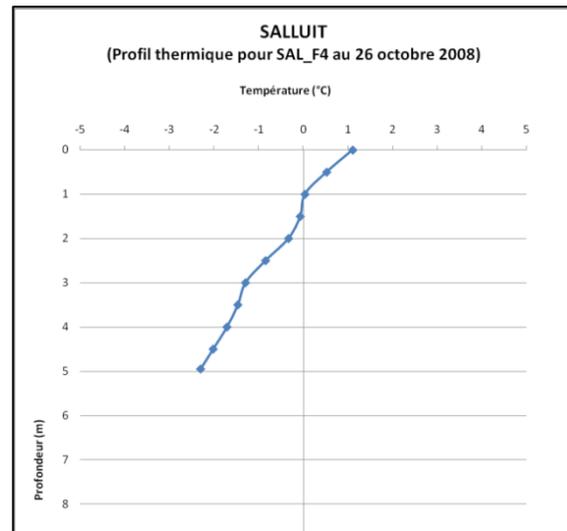
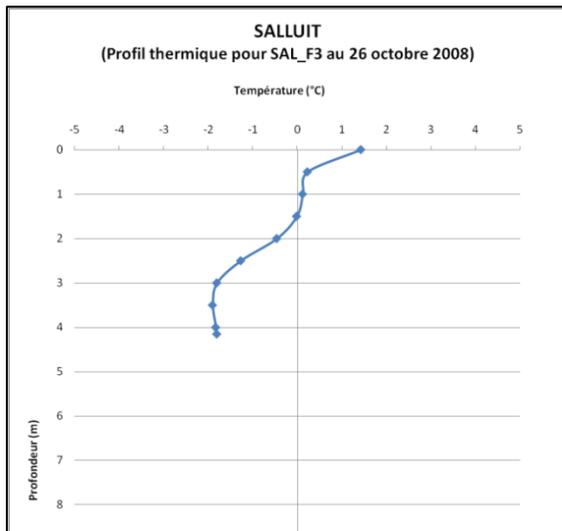
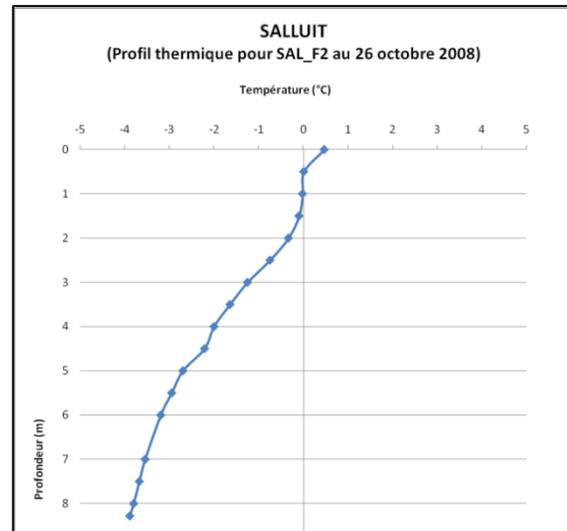
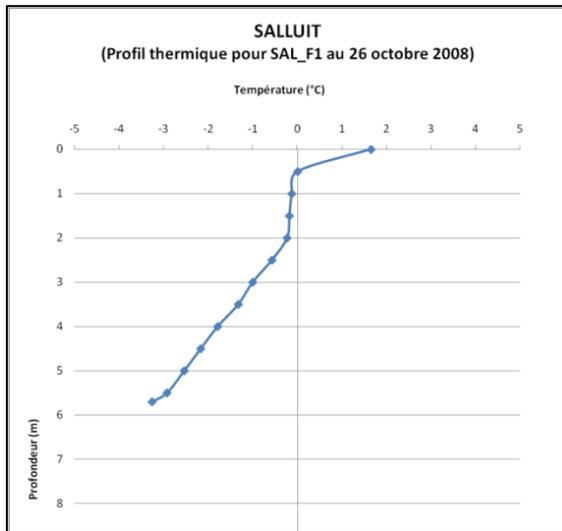


Figure 75 : Températures du sol mesurées manuellement à différentes profondeurs à l'emplacement des puits de forages SAL_F1, SAL_F2, SAL_F3, SAL_F4 et SAL_F5. Températures du sol mesurées automatiquement par le câble HT-155.

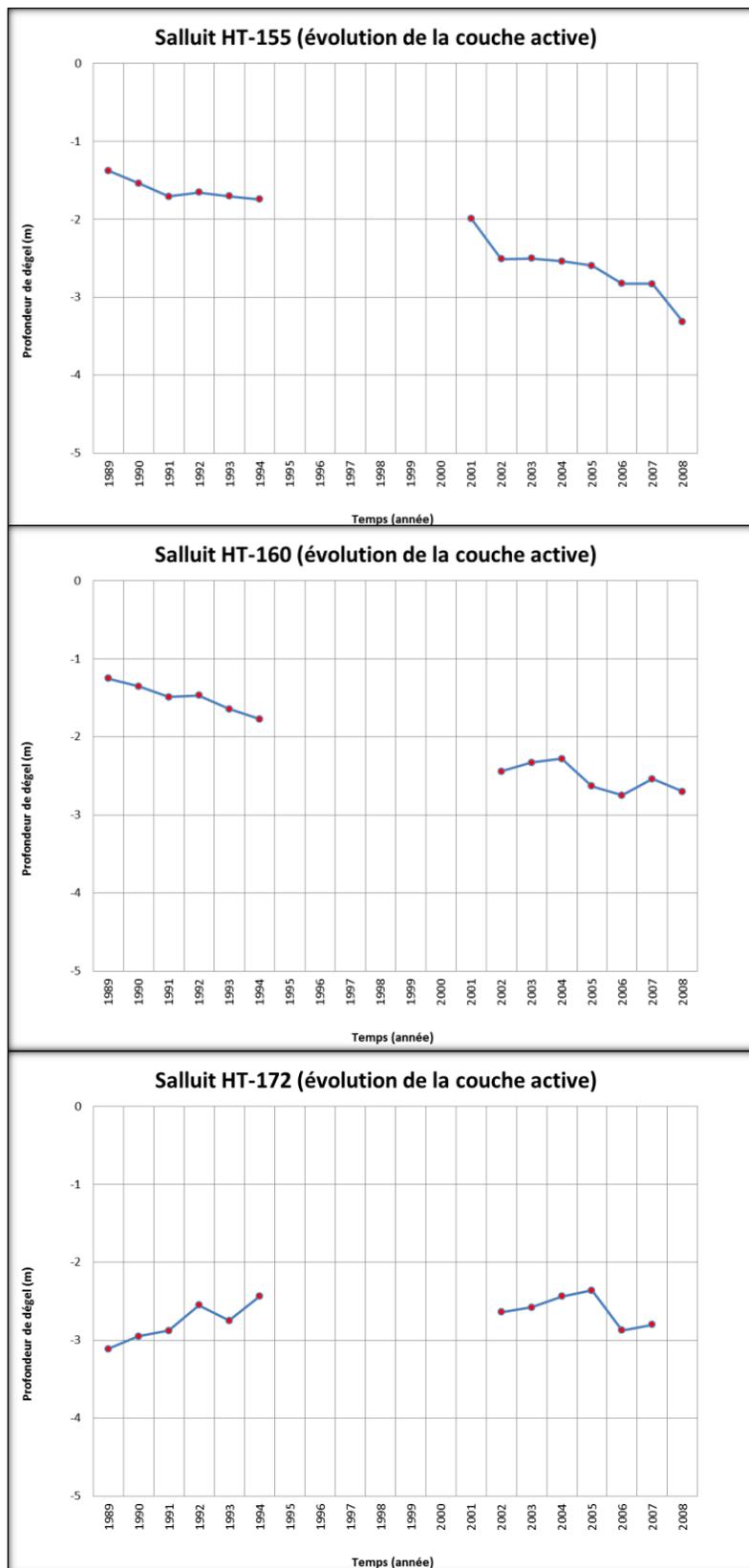


Figure 76: Variation de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel en terrain naturel (HT-155 et HT-160) et dans le remblai de la piste (HT-172) pour la période 1989-2008, aéroport de Salluit.

4.5.3.2 ÉVOLUTION FUTURE : PÉRIODE 2010-2050

4.5.3.2.1 CALIBRATION

Pour la piste de Salluit, un modèle numérique a été construit pour reproduire le régime thermique au centre-piste au chaînage 2+645 m. Ce modèle a été paramétré à partir des informations stratigraphiques issues du forage HT-172 et des propriétés géotechniques du till provenant du forage SAL_F5 réalisé à proximité. Une fois construit, le modèle a été calibré à partir des lectures du câble à thermistances HT-172 présent à proximité. Pour ce modèle, les résultats de la calibration montrent une excellente correspondance entre les épaisseurs de dégel observées et celles simulées avec une différence inférieure à $\pm 3\%$ (Tableau 24). Des exercices de modélisation du régime thermique du pergélisol en pied de remblai ont également été entrepris. L'inconsistance des résultats obtenus lors de ces exercices, probablement en raison d'une calibration et validation déficiente du modèle en l'absence de données thermiques réelles disponibles, a forcé leurs exclusions.

Tableau 23: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol en marge et sous la piste de Salluit.

chaînages 2+645 m, centre-piste (forage HT-172 et SAL_F5)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	
5,00 à 0,00	Remblai	2500	3380	90	90	0,05
0,00 à -1,00	Till	2236	3213	110,64	109,92	0,15
-1,00 à -3,00	Till riche en glace	2260	3240	220	154	0,3
-3,00 à -18,00	Roc	2490	2490	146,9	146,9	0

Tableau 24: Épaisseurs de la couche active observées et simulées, piste de Salluit.

chaînages 2+645 m, centre-piste (HT-172)				
Années	Observation (m)	Simulation (m)	Différence (m)	Différence (%)
2004	-2,23	-2,25	-2,00	1
2005	-2,61	-2,60	1,00	-1
2006	-2,63	-2,62	1,00	0
2007	-2,56	-2,49	7,00	-3

4.5.3.2.2 PROJECTIONS ET TASSEMENTS À VENIR

D'après les exercices de simulation, la couche active au centre-piste devrait augmenter de l'ordre de 0,74 m (AEV) à 1,12 m (AHA) d'ici 2050 pour atteindre des épaisseurs comprises entre 3,2 et 4,5 m (Figure 77A). En raison de l'épaisseur considérable du remblai sur une bonne section de la piste, l'épaisseur de la couche active projetée se limitera au remblai ce qui, malgré la susceptibilité élevée de retrouver un till riche en glace sous la piste, ne devrait pas générer de tassements. Toutefois, dans certains secteurs en déblai déjà fragilisés ou aux endroits où le remblai est mince, l'augmentation projetée entraînera nécessairement des tassements. En plus des tassements liés à la fonte et consolidation du till, le réchauffement des températures plus en profondeur pourrait favoriser le fluage interne du till riche en glace, particulièrement dans les secteurs où le remblai est très épais. Ce fluage interne, d'après les essais réalisés, va s'accélérer avec le réchauffement des températures et pourrait contribuer à la dégradation lente de l'infrastructure. Au centre-piste, sous le scénario AEV, le profil de température du sol en fonction de la profondeur restera relativement similaire à l'actuel (Figure 77B). Toutefois, sous le scénario AHA, les résultats des simulations numériques indiquent que le sol se

réchauffera considérablement d'ici 2050 (Figure 77C). L'augmentation sera d'environ 2 °C en moyenne pour l'ensemble des profondeurs. Ainsi les températures du sol à 5 m et 10 m de profondeur passeront respectivement de -3,96 °C à -1,82 °C et de -4,16 °C à -1,51 °C. Selon l'abaque de fluage propre au till (Figure 72C), ces températures plus chaudes sont susceptibles d'accentuer le fluage interne du till et ainsi générer des tassements annuels pouvant atteindre près de 6,5 % sous des contraintes de 300 kPa.

Les difficultés à prédire les variations du régime thermique en pied de remblai ne permettent pas d'évaluer l'ampleur des tassements qui pourraient s'y produire. Cependant, de récentes mesures de nivellement indiquent que dans certains secteurs, les accotements se sont affaissés de 6,5 à 11 cm entre 2005 et 2010. Ces affaissements témoignent de la sensibilité du pergélisol en pied de remblai, particulièrement aux endroits où l'on retrouve de fortes accumulations de neige et où le drainage est déficient.

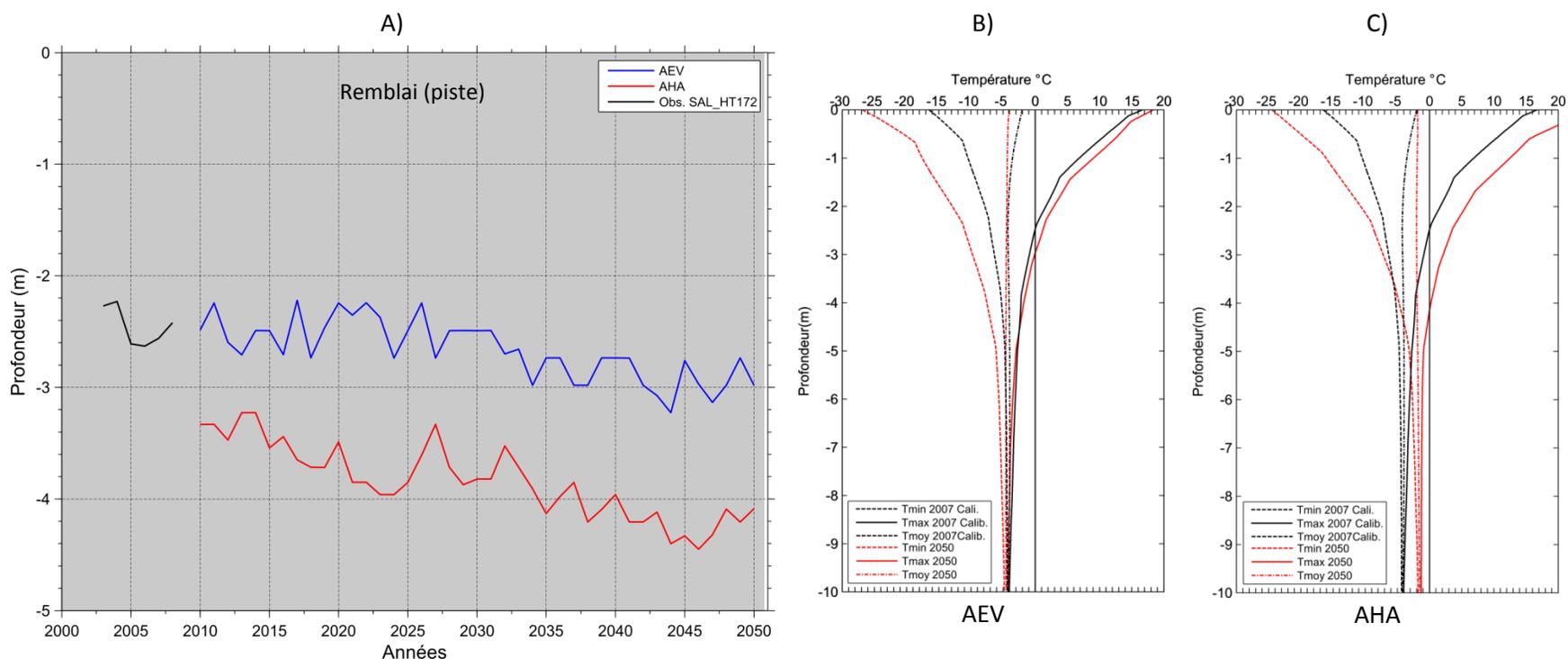


Figure 77: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel (A) et profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le centre-piste selon les scénarios AEV (B) et AHA (C), aéroport de Salluit, chaînage 2+645 m (HT-172).

4.5.4 STRATÉGIES D'ADAPTATION ENVISAGÉES :

4.5.4.1 PISTE D'ATERRISSAGE

Le long de la piste de Salluit, plusieurs dépressions ont aussi été observées tout au long de la bordure est de la piste. Elles s'accompagnent quasi automatiquement de la présence de mares en pied de remblai. Cette fonte préférentiellement localisée sur le côté est découle, d'après Allard et al. (2007), de l'accumulation de grandes épaisseurs de neige dans les dépressions topographiques ainsi que d'un mauvais système de drainage qui retient l'eau contre le pied du remblai et, même, qui favorise son infiltration sous la piste par endroits. À la demande du MTQ, un plan de rénovation de la piste de Salluit a été élaboré de manière à mieux adapter l'infrastructure à la sensibilité du terrain. Ce plan sommaire de rénovation est présenté à la figure 78.

La stratégie de protection proposée pour la piste d'atterrissage de Salluit a pour objectif de diminuer l'impact sur le régime thermique de l'accumulation de neige en pied de remblai et de l'écoulement d'eau sous la piste. Dans cette optique, l'emphase a été mise d'une part, sur la réfection du réseau de drainage en vue d'améliorer son efficacité et d'autre part, sur l'amélioration de l'aérodynamisme du profil transversal de la piste afin de faciliter la mobilisation de la neige par le vent et ainsi diminuer les accumulations nivales en pied de remblai. Ainsi, une bonne partie du côté est du remblai de la piste devra être adoucie avec des pentes de 1/6 et certaines dépressions majeures présentes en pied de remblai devront être drainées puis comblées par la suite. Afin d'éviter tout impact thermique potentiel du lac situé sur le côté est entre les chaînages 2+340 et 2+380 m, le niveau de celui-ci se doit d'être abaissé d'au moins 0,5 m en surcreusant son exutoire.

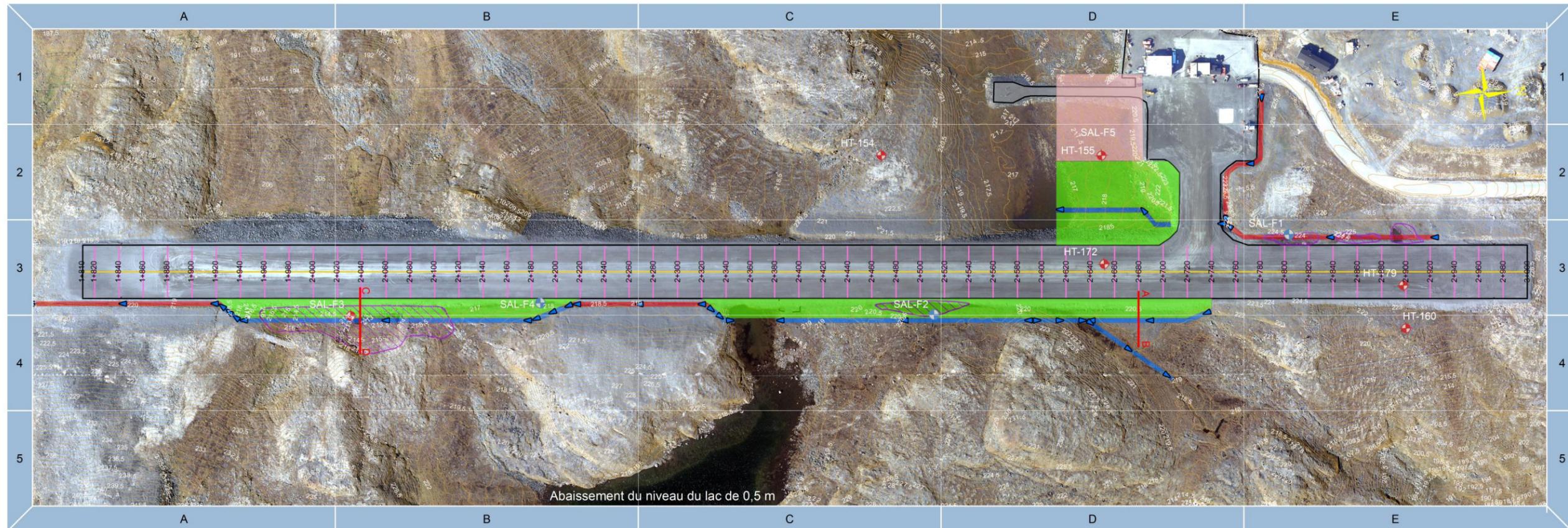
Parallèlement à la stratégie d'adaptation proposée, les actions supplémentaires suivantes sont recommandées afin d'assurer un suivi thermique du pergélisol en zones non perturbées (centre-piste) et perturbées (pied de remblai) et une évaluation à long terme des méthodes de mitigation mises en place.

- Automatiser la lecture des câbles HT-172 et HT-155 à l'aide d'un datalogger afin d'assurer le suivi du régime thermique en continu sous la piste et la nouvelle extension de l'aire de trafic.
- Instrumenter et automatiser les puits de forage SAL_F2 et SAL_F5 situés en pied de remblai. En cas de travaux de réfection, il s'avère essentiel de préserver l'instrumentation, car celle-ci permettra d'évaluer ultérieurement l'efficacité de la méthode de mitigation mise en place.

4.5.4.2 ROUTE D'ACCÈS

Le long de la route d'accès, le mauvais système de drainage retient l'eau contre le pied du remblai sur le côté ouest ce qui favorise son infiltration sous le remblai à des endroits bien localisés et donne naissance à une série de dépressions transversales affectant la pleine largeur de l'infrastructure. Également, de nombreuses fissures longitudinales en bordure des accotements témoignent de tassements localisés sous l'épaulement. Ces tassements sont susceptibles de progresser au cours des prochaines années. De plus, en raison des propriétés géotechniques du dépôt sur lequel la route a été construite, le risque de rupture de la couche active est également élevé. Le déclenchement de ce processus est complexe et son occurrence difficilement prévisible (L'Hérault, 2009). Des travaux de stabilisation de versant ont été réalisés à l'automne 2010 à l'emplacement de telles ruptures survenues en pied de remblai au chaînage 0+960 m à l'été 2005 et 2010.

Le MTQ a entrepris de refaire la portion de la route sur argile en changeant sa géométrie transversale et en la dotant d'un système de drain de chaleur. Une instrumentation spéciale est prévue pour évaluer la performance de ce nouveau concept d'ingénierie routière sur pergélisol.



Stratégie d'adaptation, aéroport de Salluit.

Infrastructures et instrumentation

- Forages géotechniques avec câble à thermistances
 - Forages géotechniques
 - Centre piste
 - Chainage transversal
 - Courbe de niveau (50 cm)
 - Limite de la surface profilée
 - Position du pied de remblai
- 1 cm = 30 m
- 0 25 50 100 150 m

Modifications proposées

- Sens de l'écoulement des fossés de drainage
- Nouveau fossé de drainage peu profond (< 500 mm)
- Reprofilage des fossés de drainage existants par comblement
- Drainage et comblement de la dépression avec un matériau meuble
- Remblai à pente adoucie (6:1) avec fossé de drainage peu profond
- Nouvelle extension de l'aire de trafic

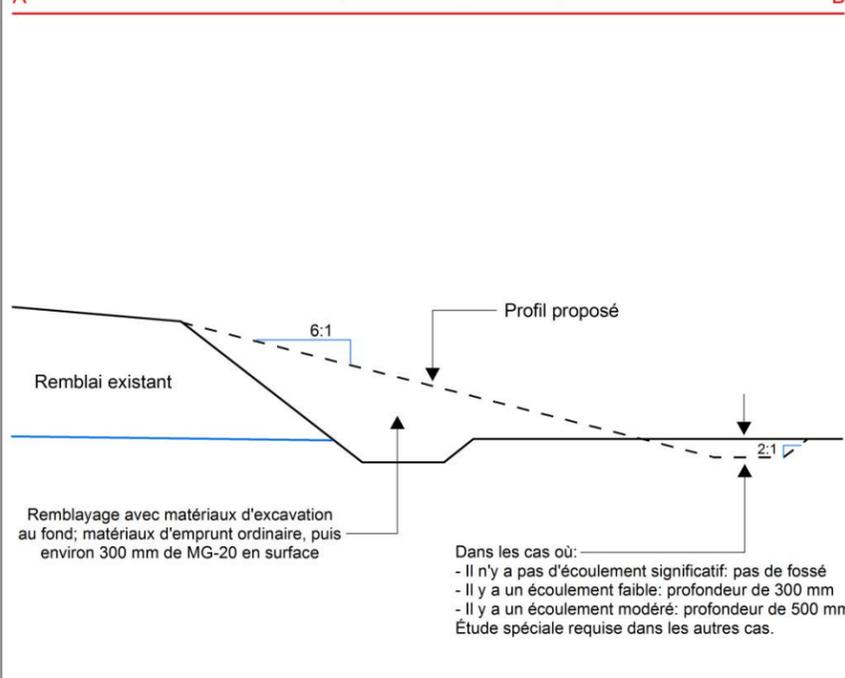
Réalisation: E. L'Héroult, M. Allard et G. Doré, septembre 2011, Centre d'études nordiques, Université Laval.
Système de référence: NAD83 ; Projection: MTM zone 10



A

Pente adoucie avec fossé de drainage peu profond: secteur sans drainage et comblement de dépressions

B



C

Pente adoucie et fossé de drainage peu profond: secteur avec drainage et comblement de dépressions.

D

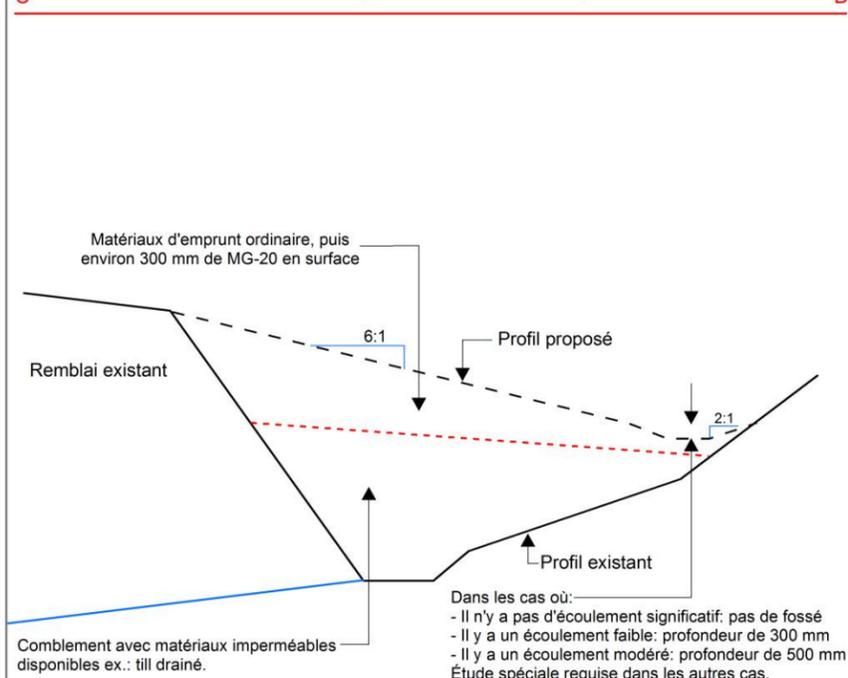


Figure 78: Plan d'adaptation proposé pour la piste de Salluit.

4.6 QUAQTAQ

4.6.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

Situé dans la zone de pergélisol continu à une altitude d'environ 30 m, l'aéroport de Quaqtac a été achevé en 1989. D'après les plans « tel que construit », la piste d'atterrissage de Quaqtac est orientée dans un axe nord-ouest sud-est (155-335°) avec une longueur totale de 1190 m, du chaînage 0+640 m au chaînage 1+830 m, et une largeur de 44 m.

En raison de la pente naturelle du terrain qui s'incline de l'est vers l'ouest et l'orientation de la piste qui est nord-nord-ouest sud-sud-est, la piste d'atterrissage entrave l'écoulement naturel de l'eau et agit comme barrage. Afin de faciliter le transfert de l'eau de l'est vers l'ouest, un fossé de drainage longe la piste sur son côté est et descend vers le sud, puis contourne le bout de la piste et remonte du côté ouest pour ensuite se déverser dans un ruisseau canalisé en direction du village. L'obstruction du drainage dans la section sud de la piste lors de la fonte printanière est un problème potentiellement récurrent alors que l'obturation des fossés par la neige empêche l'évacuation de l'eau et submerge une bonne partie des terrains bas environnants. Par exemple, lors de la réalisation des travaux de forages par l'équipe technique du CEN au mois de juin 2009, la présence à l'extrémité sud de l'infrastructure d'un important culot de glace dans le canal de drainage avait conduit à l'enneigement d'une bonne partie du terrain naturel sur le côté est de la piste (Figure 79). D'après Allard *et al.*, (2007), des évidences d'érosion et des « lignes d'eau » dans le fossé le long de la piste indiquent que le fossé se remplit d'eau au printemps, ce qui contribue à une légère érosion des flancs de la piste.

Lors d'études antérieures (Beaulac et Doré, 2005; Beaulac, 2006; Allard *et al.*, 2007) aucun problème majeur n'avait été détecté sur cette piste à l'exception d'un secteur limité entre les chaînages 1+260 et 1+320 où un léger tassement au cours des années récentes semblait s'être produit mais n'était pas documenté. En 2007, un tassement a été observé par des employés du MTQ sur le côté est de la piste, aux environs du chaînage 1+290 m, vis-à-vis le boîtier du câble à thermistance QUA-178. En 2009, cette section a été rechargée au courant de l'été, mais le tassement s'est poursuivi. Au mois de septembre 2009, la dépression à cet endroit a été estimée à environ 5 cm par un employé de l'Administration Régionale Kativik (ARK) et a continué à se dégrader en 2010 (Figure 80A et B). De récentes mesures de nivellement à partir d'une plaque de tassement située dans l'accotement au chaînage 1+272 m (Figure 81A) ont révélées un affaissement d'environ 10 cm entre 2009 et 2010. D'après les observations réalisées par l'équipe technique du CEN au mois de juin 2009, un écoulement d'eau sortait de sous la piste à l'emplacement du boîtier du câble à thermistance (Figure 80C). Les indices portent à croire que l'eau provient de l'autre côté du remblai et s'écoule à travers la piste à cet endroit ce qui a donné naissance à une dépression linéaire qui traverse perpendiculairement la piste. Afin d'assurer un suivi de la dépression recensée dans le secteur, une nouvelle plaque de tassement a été installée en 2009.

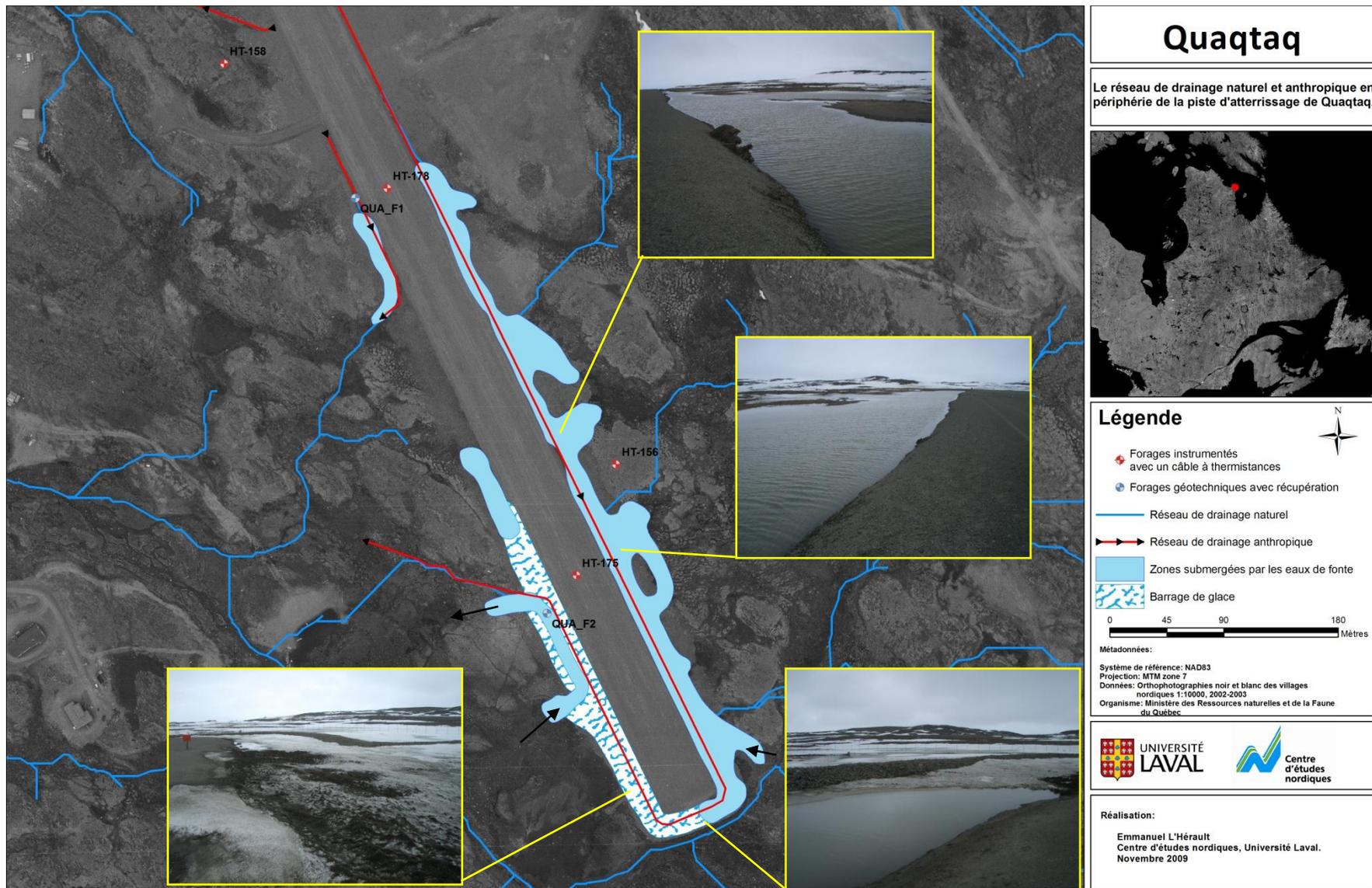


Figure 79 : Problèmes de drainage des eaux de fonte printanières le long de la piste de Quaqtac tels qu'observés en juin 2009.

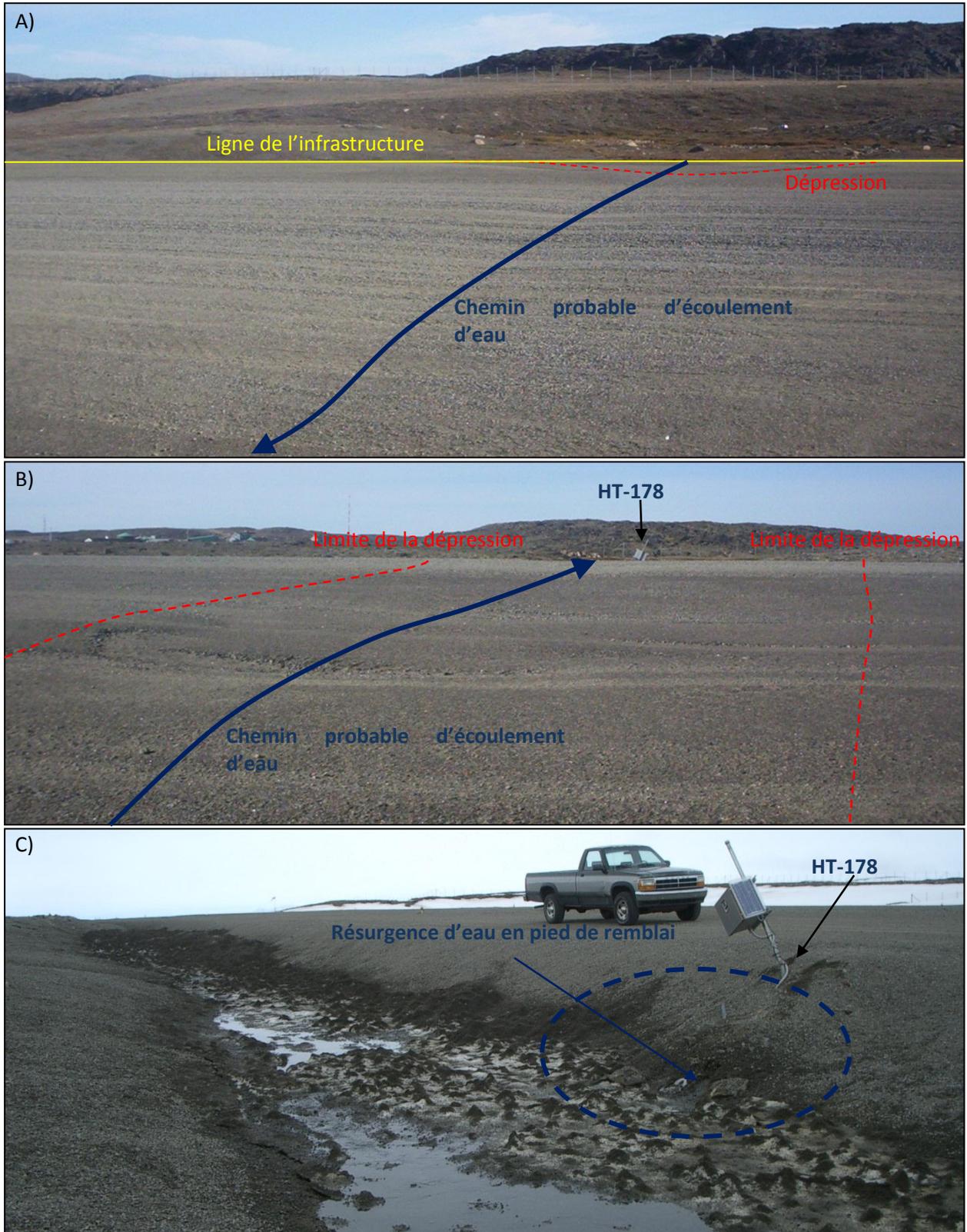


Figure 80 : Dépression entre les chaînages 1+290 et 1+310 telle qu'observée au mois de septembre 2010. A) Vue vers l'est. B) Vue vers l'ouest. C) Résurgence d'eau en pied de remblai vis-à-vis le câble HT-178 observée au mois de juin 2009.

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

D'après la carte des unités géologiques de surface (Figure 81B), la piste d'atterrissage de Quaqaq repose sur trois unités qui se résument à : 1) des affleurements rocheux de gneiss granitique à grain moyen (R), 2) des dépôts de sable et gravier littoraux et pré-littoraux (Mb) et 3) des dépôts minces de sable fin silteux mal drainés d'origine alluviale qui recouvrent un till (Ap/T). Les dépôts littoraux et pré-littoraux de sables et graviers (Mb) constituent généralement une mince couche qui recouvre de 2 à 3 m le roc ou le till sous-jacent. Les secteurs déprimés mal drainés sont recouverts de végétation herbacée et de mousses en surface et sont traversés de réseaux de drainage diffus à l'origine des dépôts d'alluvions (Ap) que l'on y retrouve. Ces dépôts d'alluvions sont interprétés comme étant le résultat du remaniement par l'écoulement fluvial diffus des dépôts de sable et gravier littoraux et pré-littoraux. D'après le patron spatial complexe de répartition des affleurements rocheux et des plaines alluviales, les sédiments alluviaux de fond de vallée forment une couverture très mince sur le till ou le substrat rocheux sous-jacent (Ap/T).

Dans le secteur nord-ouest, du chaînage 0+640 à 1+120 m, la piste repose en bonne partie sur des dépôts de plage épais composés de sable et gravier (Mb) ou directement sur le socle rocheux, à l'exception de l'extrémité nord, entre les chaînages 0+660 et 0+800 m, où la piste repose sur un secteur humide mal drainé interprété comme des alluvions. Une bonne partie de la piste, entre la voie de circulation et la balise de navigation, est d'ailleurs établie directement sur une surface rocheuse nivelée qui a servi de fond de carrière lors de la construction pour fournir le matériel de remplissage aux extrémités. La prédominance des affleurements rocheux dans le secteur semble indiquer que l'épaisseur de dépôts meubles qui le recouvre est faible. Fait confirmé par l'abondance de grands réflecteurs hyperboliques sur le profil GPR qui suggère que le remblai repose essentiellement sur le socle rocheux. À la transition entre le roc et les dépôts meubles, soit à partir du chaînage 1+120, la section sud de la piste repose sur deux types de terrain : 1) une surface humide à drainage diffus composée d'alluvions sur till (Ap/T) et 2) des dépôts quaternaires pré-littoraux composés de sable et gravier mal trié et riches en coquilles (Mb). Les dépôts de sable et gravier littoraux et pré-littoraux (Mb) forment des buttes surélevées bien drainées et contiennent souvent des coquilles marines fossiles. Le terrain est sillonné par des fentes de gel qui forment un réseau polygonal non organisé. D'après Allard et *al.*, (2007), les excavations réalisées en 2004 n'ont pas permis de détecter la présence de coins de glace quoiqu'il pourrait fort bien y en avoir considérant les conditions climatiques actuelles. En raison de la granulométrie du matériau, celui-ci est peu gélif, donc peu propice à la formation de glace de ségrégation et contient essentiellement de la glace interstitielle équivalente à la porosité du matériel. Lors du dégel, les tassements associés à la fonte de la glace interstitielle seront de faible ampleur. L'épaisseur de cette unité est relativement variable, mais d'après les sondages réalisés par le passé (Terratech, 1984), pendant (Allard et *al.*, 1988; Allard et *al.*, 1993) et après la construction de la piste (Allard et *al.*, 2007; Allard et *al.*, 2009), l'épaisseur de cette unité est estimée à environ 2-3 m. Ces dépôts reposent fréquemment sur les affleurements rocheux existants et recouvrent également, dans certains secteurs, le till sous-jacent. La piste passe par-dessus ces buttes sableuses basses à plusieurs reprises, soit entre les chaînages 1+260 et 1+300, 1+400 et 1+475, 1+510, 1+580 et 1+700 et 1+820 (Figure 81B).

Au mois de juin 2009, 2 forages ont été réalisés dans la section sud de la piste. En raison d'un problème de drainage et de l'inondation d'une bonne section du côté est de la piste, les deux forages ont été réalisés sur le côté ouest. Les emplacements exacts des puits de forages sont présentés à la figure 81B. Les positions de ces forages selon le chaînage ainsi que les profondeurs maximales atteintes sont résumées au tableau 25. Ces forages révèlent que les alluvions, essentiellement un sable fin silteux brunâtre (USCS : SM) dans lequel il est fréquent de retrouver de la glace interstitielle et quelques très

fines lentilles de glace millimétriques qui se forment annuellement dans la couche active (Figure 83A), reposent habituellement sur un dépôt hétérométrique grisâtre mal trié (till) (Figure 83B et C). Dans la couche active, les teneurs en eau mesurées dans le till sont inférieures à 15 % et la proportion de particules fines atteint environ 24 %. Un essai de consolidation effectué sur le till échantillonné entre 1,78 et 1,9 m de profondeur au forage QUA_F2 indique, avec une teneur en eau mesurée de 9 %, un taux de consolidation entre 6,1 (100 kPa) et 6,7 % (200 kPa) (Voir annexe tableau 61). En raison de la faible profondeur de l'échantillon, il est fort probable que celui-ci ait été prélevé dans la couche active, donc déjà dégelé puis consolidé, ce qui ne permet pas d'évaluer le vrai potentiel au tassement du till pergélisolé présent sous la piste. L'épaisseur du till, d'après les forages réalisés avant la construction de la piste d'atterrissage (Terratech, 1984) ainsi que ceux réalisés en 2009, semble généralement comprise entre 1 et 2 m, mais vraisemblablement plus importante à l'intérieur des dépressions offertes par le relief ondulé du substrat rocheux de la région. Par exemple, le long de la zone en déblai, entre les chaînages 1+273 et 1+349, des relevés de résistivité électrique et de polarisation provoquée réalisés par Lévesque et al., (1990) suggèrent la présence d'une petite cuvette qui atteint possiblement une profondeur d'au plus 4 à 5 m dans le roc et qui serait comblée d'un dépôt fin de sable silteux. C'est également à partir du chaînage 1+150 m, dans la zone en déblai, que Savard (2006) nota une atténuation du signal des ondes électromagnétiques à partir de 4 m de profondeur associée à une faible résistivité électrique du matériau qui compose la base résiduelle de la butte cryogène. Avant la construction, ce secteur avait la forme d'une butte au sommet plat ou légèrement convexe et surélevée d'environ 1,8 m. Le sommet a été nivelé à l'automne 1987, créant un secteur en déblai. Selon le consultant responsable des travaux, la section du sol excavée consistait en un sol à granulométrie fine ne contenant pas de lentilles de glace, mais plutôt une glace diffuse interstitielle. Compte tenu de la texture fine du matériel nivelé, un géotextile a été étendu sur cette section puis recouvert d'une couche de matériel 0-56 mm de 15 cm d'épaisseur pour éviter la contamination de la section grossière du soubassement du remblai de la piste. À cet endroit, le remblai de la piste atteint une épaisseur totale estimée de 1,4 m. En date de la construction, la tranche de terrain déblayée était supérieure à l'épaisseur du mollisol forçant la piste à reposer directement sur le pergélisol, lequel contient généralement plus de glace que le mollisol. Un forage réalisé à proximité par Seguin et Lévesque (1990) indique que le matériel récupéré consistait en un sable moyen à fin légèrement silteux (7 à 12 % < 63 µm) dont la teneur en eau mesurée entre 1,35 et 1,54 m de profondeur était comprise entre 12 et 18 %.

À partir du chaînage 1+350 jusqu'au 1+675 m, le signal électromagnétique s'atténue moins rapidement que dans la zone en déblai. Un réflecteur localisé à une profondeur d'environ 5 m de profondeur est associé au contact entre les dépôts meubles et le roc sous-jacent. Le forage QUA-F2 réalisé en marge de la piste sur le côté ouest au chaînage 1+650 a atteint le socle rocheux à 2,6 m de profondeur. Toutefois, il est fort probable que la profondeur du roc sous la piste de Quaqtaq soit sous-estimée dans cette section, car le forage apparaît se trouver dans l'axe d'un important affleurement rocheux qui se prolonge vraisemblablement sous les dépôts meubles. En raison de la propriété des matériaux, les levés de géoradar réalisés en 2004 offrent une faible pénétration du signal ce qui rend difficile la détermination avec précision de la profondeur du socle rocheux sous la piste. De plus, en raison du peu de forages réalisés ainsi que de leur localisation en bordure de piste, il est également difficilement de corrélérer les levés de géoradar avec les informations stratigraphiques obtenues par forage. Par conséquent, les contacts entre les différentes unités ainsi que les épaisseurs de ces unités sur la planche synthèse (Figure 81C) doivent être considérées avec prudence et n'offrent qu'une grossière estimation du contexte géologique sous la piste.

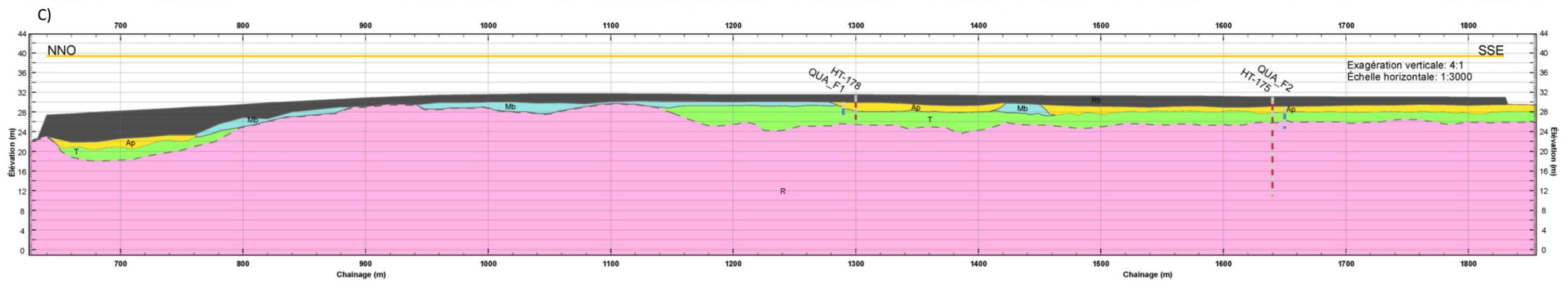
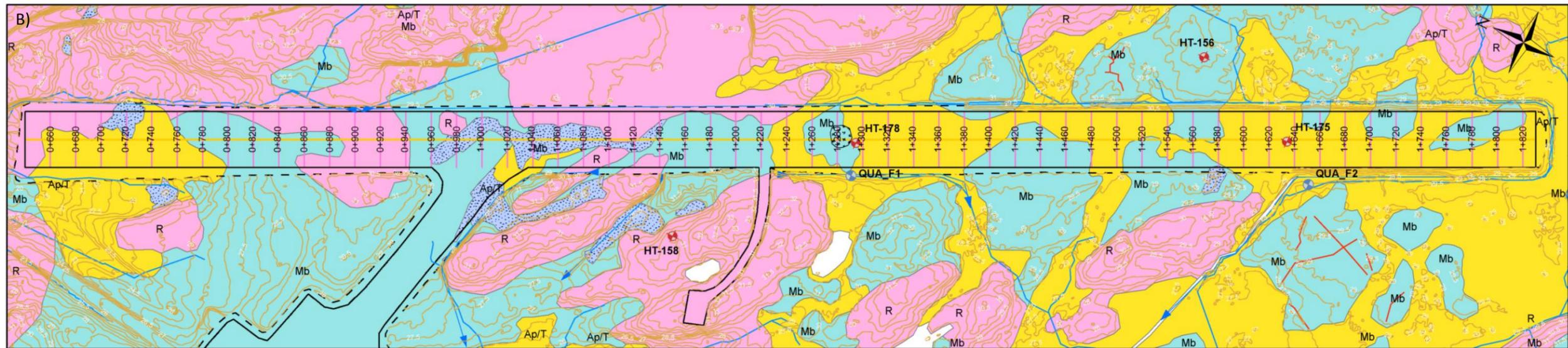
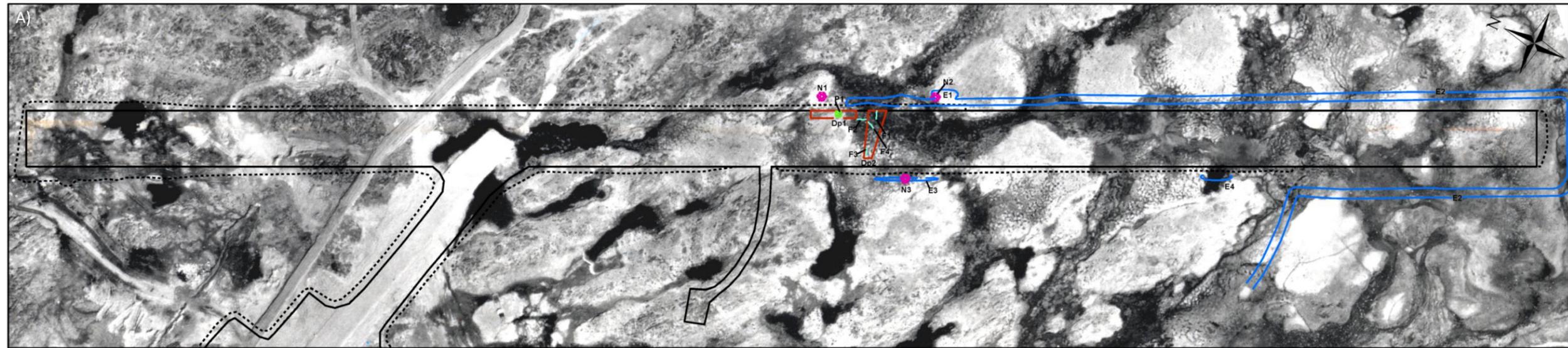


Figure 81 : Planche synthèse de la piste de Quaqtac.

Dépôts de surface

Sédiments alluviaux

- Ap
SÉDIMENTS ALLUVIAUX ACTUELS: Sable, silt sableux et sable graveleux en couverture mince, partiellement recouvert de végétation herbacée et de mousses; zone généralement mal drainée et inondée lors de la fonte des neiges.
- Ap/T
SÉDIMENTS ALLUVIAUX ACTUELS SUR TILL: Sable, silt sableux et sable graveleux en couverture mince, partiellement recouvert de végétation herbacée et de mousses; zone généralement mal drainée et inondée lors de la fonte des neiges. Cette couche repose sur un diamicton à matrice sablo-silteuse incorporant des graviers et quelques blocs anguleux (till).

Sédiments marins

- Mb
SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers stratifiés généralement bien triés, en couverture relativement mince; mis en place en eau peu profonde lors de la phase plénimarine et lors de l'exondation; fréquemment marqués par des crêtes de plage et des fentes de gel.

Sédiments glaciaires

- T
TILL NON DIFFÉRENCIÉ: Diamicton à matrice sablo-silteuse incorporant des graviers et quelques blocs anguleux.

Substrat rocheux

- R
ROCHE EN PLACE: Affleurements rocheux et roc à mince couverture de sédiments meubles.

Anthropique

- Rb
ANTHROPIQUE: Remblai.

Hydrographie

- Ruisseaux
- Direction du drainage
- Plans d'eau
- Lacs drainés lors de la mise en place de l'infrastructure

Formes de terrain

- Fentes de gel
- Buttes saisonnières à noyau de glace
- Contact géologique approximatif

Forages

- Forages géotechniques instrumentés avec un câble à thermistances
- Forages géotechniques avec récupération
- Courbe de niveau (50 cm)

Infrastructures

- Centre-piste
- Chainage transversal
- Limite de la surface profilée
- Limite du pied de remblai
- Bâtiments

Informations relatives à l'aéroport

- Fissuration
- Accumulation d'eau en bordure de piste
- Dépressions
- Mesures d'enneigement effectuées sur une base annuelle
- Plaque de tassement

Tableau 25 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Quaqtqa au printemps 2009.

Nom du forage	Localisation par rapport au chaînage existant	Profondeur atteinte
QUA_F1	Côté ouest, chaînage 1+290 m, à 3 m au nord-ouest de la station d'enregistrement du câble HT-178 et 2,6 m du pied du remblai.	2,9 m
QUA_F2	Côté ouest, chaînage 1+650 m, à environ 20 m au sud-sud-est de la station d'enregistrement du câble HT-175 et 9 m du pied du remblai, de l'autre côté du canal de drainage.	4,53 m

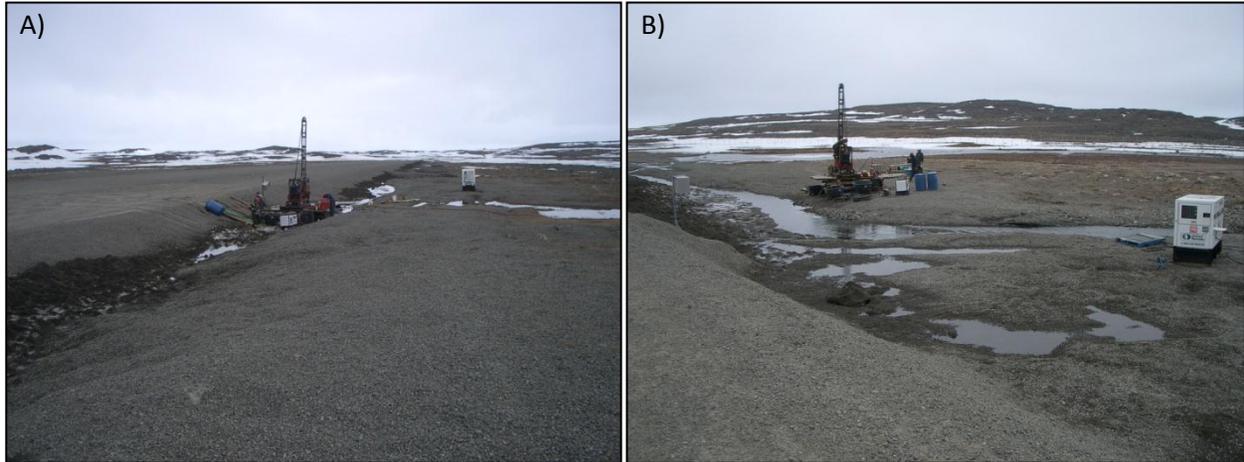


Figure 82 : Équipement de forage en pied de remblai à l'emplacement des forages QUA_F1 (A) et QUA_F2 (B).



Figure 83 : Échantillons gelés prélevés au forage QUA-F2. A) Sable moyen à grossier brunâtre avec traces de silt (alluvions (AP)) prélevé entre 0,52 et 0,85 m de profondeur. Matériel hétérométrique non trié grisâtre (Till (T)) avec glace interstitielle prélevé entre 1,43 et 1,90 m (B) et entre 1,90 et 2,22 m (C) de profondeur.

4.6.3 CONDITIONS THERMIQUES DU PERGÉLISOL

4.6.3.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : PÉRIODE 1988-2010

Lors de la construction de la piste d'atterrissage, quatre câbles à thermistances ont été installés. Trois d'entre eux atteignent des profondeurs d'environ 20 m. Le premier est dans le roc (HT-158), le second dans les sables et graviers 80 m à l'est de la piste (HT-156); le troisième commence dans le remblai à 20 m du bord et se prolonge dans les sables et graviers sous la piste (HT-175). Le quatrième câble (HT-178) est au chaînage 1+290, perce le remblai et le géotextile jusqu'à une profondeur de 5 m dans un dépôt de sable silteux (Figure 81B).

Depuis la construction de la piste en 1988, l'épaisseur de la couche active a atteint sous la piste des valeurs maximales de 241 cm au câble HT-175 et de 251 cm au câble HT-178, ce qui représente une augmentation de l'épaisseur de la couche active de 17,5 % et 14 % par rapport à l'épaisseur de dégel qui avait été mesurée en 1988 par Allard et *al.*, (1988) (Tableau 26). Dans le terrain naturel, l'augmentation de l'épaisseur de la couche active a été plus marquée passant dans les sables et graviers (HT-156) de 122 cm en 1988 à 208 cm en 2010, ce qui correspond à une augmentation de 70,5 %. Le suivi thermique des températures du sol aux câbles HT-178 et HT-175 montre que la couche active au centre-piste est relativement stable depuis 2004 avec une variation de l'épaisseur interannuelle (Δ %) généralement inférieure à 3 %. Plus en profondeur, la température du sol s'est également réchauffée. Par exemple, à 20,55 m de profondeur au câble HT-175, la température a augmenté de 1,5°C passant de -4,8 °C en 1988 à -3,3°C en 2010.

Tableau 26 : Épaisseurs (en mètres) de la couche active mesurées pour différents câbles à thermistances installés dans la piste de Quaqtac et dans le terrain naturel.

Années	HT-156 Sable et gravier (milieu naturel)			HT-158 Roc (milieu naturel)			HT-175 Sables et graviers (Centre-piste)			HT-178 Sable silteux Centre-piste		
	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)
1988	122,00	n.a	n.a	460	n.a	n.a	205,00	n.a	n.a	220,00	n.a	n.a
2004	155,00	33,00	27,05	519,1	59,10	12,85	238,00	33,00	16,10	234,00	14,00	6,36
2005	176,00	21,00	13,55	n.d	n.a	n.a	238,00	0,00	0,00	239,00	5,00	2,14
2006	194,00	18,00	10,23	n.d	n.a	n.a	241,00	3,00	1,26	242,00	3,00	1,26
2007	176,00	-18,00	-9,28	592	n.a	n.a	235,00	-6,00	-2,49	239,00	-3,00	-1,24
2008	171,00	-5,00	-2,84	556,4	-35,60	-6,01	230,00	-5,00	-2,13	239,00	0,00	0,00
2009	160,00	-11,00	-6,43	495,5	-60,90	-10,95	231,00	1,00	0,43	238,00	-1,00	-0,42
2010	208,00	48,00	30,00	n.d	n.a	n.a	237,00	6,00	2,60	251,00	13,00	5,46
Total		86,00	70,49		132,00	28,70		36,00	17,56		31,00	14,09

Dans les terrains traversés par la piste d'atterrissage, le pergélisol apparaît dans l'ensemble peu sensible au dégel. En effet, pour sa partie centrale, celle-ci repose en partie sur le roc ou des dépôts de sable littoraux et pré-littoraux (MB). Son extrémité nord-nord-ouest traverse une section où les dépôts meubles sont semblables à ceux retrouvés dans la moitié sud-sud-est, soit des alluvions sur du till (Ap/T) contenant possiblement de la glace. Toutefois, en raison de l'épaisseur importante du remblai dans cette partie de l'infrastructure (> 4 m) et de la profondeur de dégel au centre-piste mesurée aux câbles HT-178 et HT-175 qui est en moyenne de 2,4 m, le dégel n'atteint pas le sol naturel sous la piste. Le seul endroit qui est actuellement sujet à tassement est le secteur en déblai dont le sédiment à granulométrie fine

(fort probablement un till) est susceptible de contenir un peu de glace de ségrégation. À cet endroit, l'épaisseur du remblai est évaluée à 1,6 m d'après les plans « tels que construits ». En effet, un sondage réalisé avant la construction de la piste au chaînage 1+260, soit 30 m au nord de la butte de pergélisol déblayée, avait atteint le front de dégel autour de 0,9 m vers la fin du mois de juillet (Terratech, 1984). Cette information permet d'estimer à environ un mètre la position du plafond du pergélisol dans le terrain naturel sous la piste avant la construction. Par conséquent, il est probable que le front de dégel pénètre actuellement dans l'ancien plafond du pergélisol avant construction. Relativement stable depuis 2006, la couche active s'est épaissie en 2010 à la faveur d'un été plus chaud que la moyenne comme le démontre les mesures enregistrées aux câbles HT-178 (piste) et HT-156 (terrain naturel). C'est également entre 2009 et 2010 que de récentes mesures de nivellement ont révélé un affaissement d'environ 10 cm dans le secteur.

Une analyse plus approfondie de la signature thermique des câbles à thermistance suggère également un apport de chaleur résultant de l'écoulement d'eau dans le remblai. Cet apport de chaleur très localisé pourrait contribuer à la dégradation du pergélisol et expliquer l'apparition de la dépression linéaire qui traverse actuellement la piste au chaînage 1+300 m. L'impact thermique possiblement dû à un écoulement d'eau est mis en évidence par les lectures aux câbles HT-156, HT-178 et HT-175 (Figure 84). En effet, on remarque que la température à l'intérieur du remblai à l'emplacement du câble HT-178 augmente rapidement en début d'été entre 2 et 2,5 m de profondeur indépendamment des températures enregistrées en surface et dans les premiers mètres du remblai. Il apparaît ainsi probable qu'un apport de chaleur externe comme l'écoulement d'eau dans le remblai à cette profondeur soit à l'origine de ce phénomène. Il est également possible d'observer ces augmentations brusques de température aux autres câbles, mais elles sont beaucoup moins prononcées. De plus, au forage HT-156 la hausse de température se produit plus près de la surface et quelques jours plus tôt, ce qui laisse supposer que l'apport de chaleur provient de la surface, possiblement en raison du début de la fonte de la neige induit par la radiation solaire.

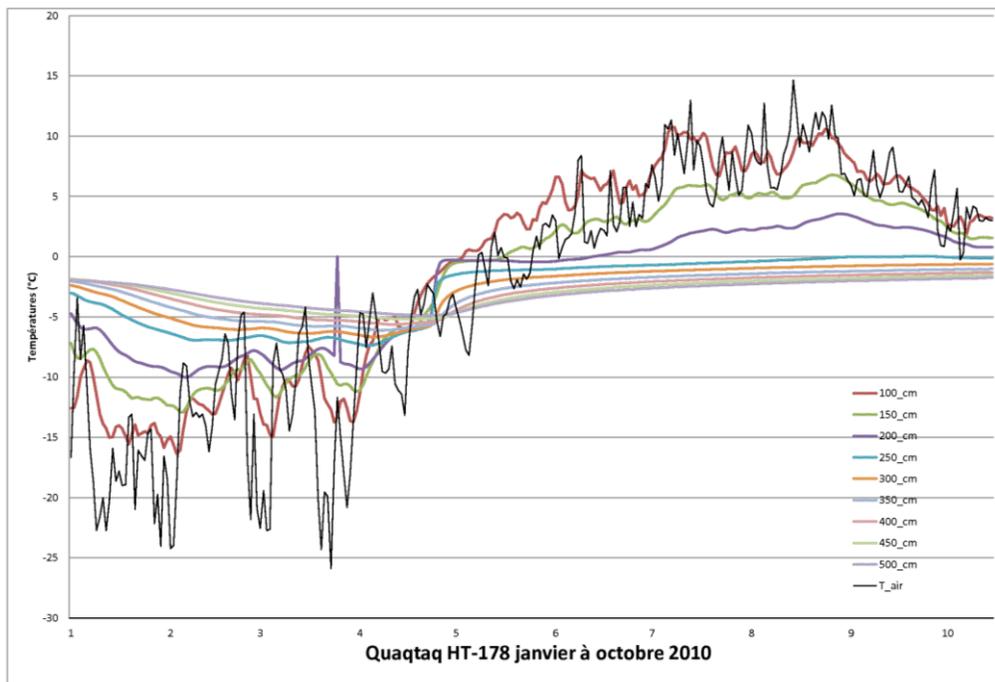
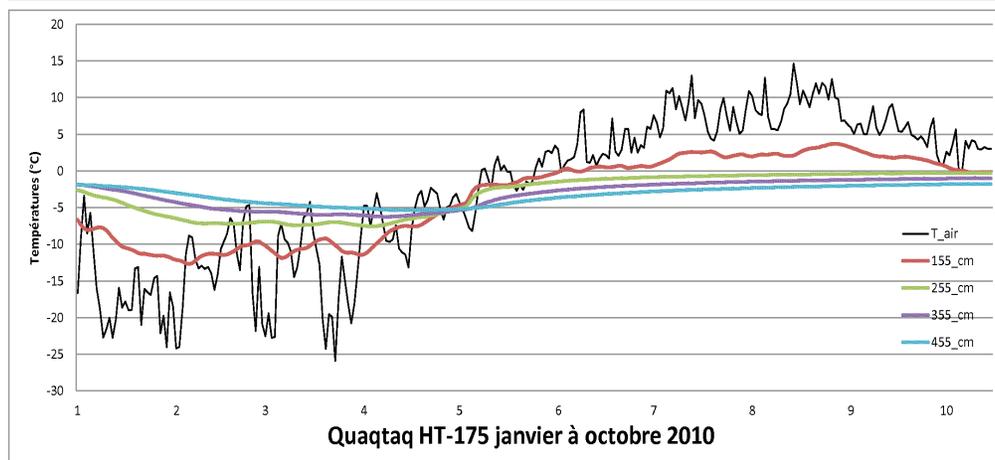
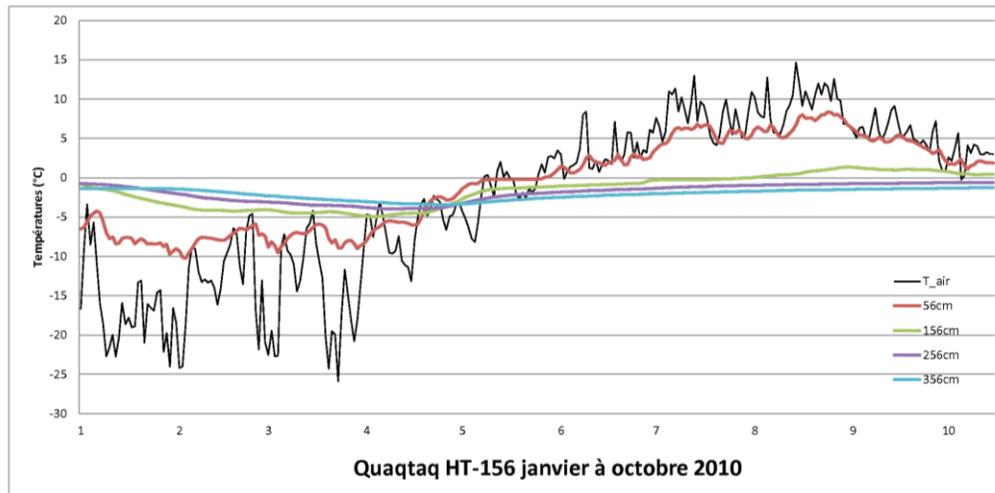


Figure 84 : Variations des températures dans le sol en fonction du temps et de la profondeur entre janvier et octobre pour l'année 2010, aéroport de Quaqtaq, Nunavik.

4.6.3.2 ÉVOLUTION FUTURE : PÉRIODE 2010-2050

4.6.3.2.1 CALIBRATION

La section type sur laquelle est basée la construction du modèle de la piste de Quaqtq se situe au chaînage 1+290. Les données thermiques du sol utilisées pour la calibration du modèle proviennent du câble HT-178 et les températures de l'air proviennent de la station HT-156 situé sur le terrain naturel en bordure de piste. La calibration et les simulations du modèle de la piste de Quaqtq ont été effectuées à partir des données de températures de l'air allant du 1 juillet 2005 au 29 septembre 2010. Les informations stratigraphiques et géotechniques de la section type ont été extraites des descriptions du rapport de forage QUA-F1 situé dans le terrain naturel sur le côté ouest près du pied du remblai (Allard *et al.*, 2009). En raison de la topographie environnante et l'orientation des affleurements rocheux, on peut supposer la présence d'une cuvette sous la piste où le remblai au centre-piste, selon les plans « tel que construit », atteint une épaisseur d'environ 1,4 m. Le modèle s'étend en profondeur jusqu'à 20 m. Les conditions de surface appliquées au modèle sont produites par des données de température quotidienne enregistrées (câble HT-156). Afin de simuler les effets thermiques induits soit par le couvert de neige ou soit par la végétation, un facteur-n équivalent à une épaisseur de neige de ~1,72 m a été paramétré à même les températures de l'air entrant dans le modèle. La calibration du modèle et l'ajustement des différentes propriétés a permis de reproduire le dégel annuel de la couche active sous la piste avec une marge d'erreur assez faible (Tableau 28). La différence entre les profondeurs de dégel observées et simulées est inférieure à 10 %.

Tableau 27: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol en pied de remblai et au centre-piste de la piste de Quaqtq.

chaînage 1+290, centre-piste (forage HT-178)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	
1,4 à 0,00	Remblai	2000	2500	120	130	0,05
0,00 à -1,25	Sable moyen à grossier	2301	2520	160	149	0,08
-1,25 à -5,25	Till	2000	2600	270	100	0,18
-5,25 à -20,0	Roc	2490	2490	146,9	146,9	0
chaînage 1+290, pied de remblai (forage QUA_F1)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	
0,00 à -1,4	Sable moyen à grossier	2301	2520	160	149	0,08
-1,4 à -20,0	Roc	2490	2490	146,9	146,9	0

Tableau 28: Épaisseurs de la couche active observées et simulées au centre-piste, aéroport de Quaqtq.

chaînage 1+290, centre-piste (forage HT-178)				
Années	Observation (m)	Simulation (m)	Différence (m)	Différence (%)
2006	-2,42	-2,47	-0,05	2,08
2007	-2,40	-2,35	0,04	-1,79
2008	-2,39	-2,35	0,04	-1,82
2009	-2,39	-2,18	0,20	-8,47
2010	-2,51	-2,65	-0,14	5,53

4.6.3.2.2 PROJECTIONS ET TASSEMENTS À VENIR

D'après les résultats des simulations réalisées au chaînage 1+290 m pour la période 2010-2050, la profondeur de dégel en pied de remblai atteindra d'ici 2015 une profondeur maximale de plus de 15 m sous le scénario AEV (Figure 85A). En raison de l'absence de câble à thermistances en pied de remblai dans le secteur, il est impossible de savoir la position exacte du front de dégel en 2010, quoiqu'en raison de la conductivité thermique du roc et de l'effet isolant de la neige, il est fort probable que le dégel atteigne déjà plusieurs mètres de profondeur. À l'opposé, l'augmentation de la profondeur de dégel au centre-piste sera moins drastique. En effet, pour le centre-piste, les projections sous les deux scénarios climatiques montrent que le front de dégel va être relativement stable au cours des prochaines années avec une progression peu marquée. Toutefois, pour la projection issue du scénario AHA, une nette progression du front de dégel surviendra après 2040 avec un dégel complet de la couche de dépôts meubles d'ici 2047. Cette propagation plus en profondeur du front de dégel est une réponse directe du régime thermique face à une hausse subite de la température de l'air autour de 2040 anticipé par le scénario AHA. Sous le scénario AEV, le front de dégel au centre-piste variera entre la base de la couche d'alluvions et le sommet de la couche de till. À cet endroit, le front de dégel atteindra -3,2 m de profondeur d'ici 2050 ce qui correspond à une augmentation d'environ 0,69 m par rapport à la position actuelle du front de dégel mesurée au câble HT-178.

La comparaison du profil de température du sol simulé en pied de remblai pour l'année 2010 avec ceux projetés pour l'année de 2050 (AEV et AHA) permet de quantifier les changements de température anticipés en profondeur (Figure 86). D'ici 2050, le profil du sol en pied de remblai sera complètement dégelé sur plus de 10 m de profondeur sous les deux projections. Sous la projection AEV, la température moyenne du sol à 5 et 10 m de profondeur augmentera respectivement de 1,4 °C et 2,47 °C, passant ainsi de 0,28 °C à 1,65 °C et de -0,82 °C à 1,66 °C. Sous la projection AHA, une augmentation moyenne des températures dans le sol d'environ 3 °C est anticipée pour l'ensemble des profondeurs. Plus spécifiquement, la température dans le sol à 5 m et 10 m de profondeur passera de 0,28 °C à 3,35 °C et de -0,82 °C à 3,55 °C. Pour la même période, le profil des températures dans le sol au centre-piste, initialement plus froid que celui observé en pied de remblai (câble HT-178), se réchauffera également. Le réchauffement sera très limité sous la projection AEV avec des valeurs de températures anticipées similaires à celles actuellement mesurées au câble HT-178, c'est-à-dire sous 0 °C à partir de 3 m et autour de -3 °C à 5 m de profondeur. Le réchauffement anticipé est toutefois de plus grande importance sous la projection AHA avec une augmentation des températures d'environ 3,7 °C à 5 m de profondeur, passant ainsi de -3 °C à 0,7 °C, et avec une température moyenne à 10 m de profondeur supérieure à 0 °C.

Dans la mesure où l'évolution du climat sera conforme aux projections proposées, la dégradation du pergélisol sous la piste de Quaqtac va se poursuivre. Malheureusement, en raison du peu d'information disponible sur les caractéristiques des dépôts ainsi que leurs épaisseurs sous la piste, il est impossible d'évaluer les tassements à venir. Actuellement, l'une des causes de la dégradation du pergélisol est sans contredit l'écoulement d'eau localisé à travers le remblai, phénomène exclu lors des simulations en raison de sa complexité, mais qui ne doit pas être négligé lors de l'élaboration de la stratégie d'adaptation pour préserver l'intégrité du pergélisol en périphérie et sous la piste d'atterrissage.

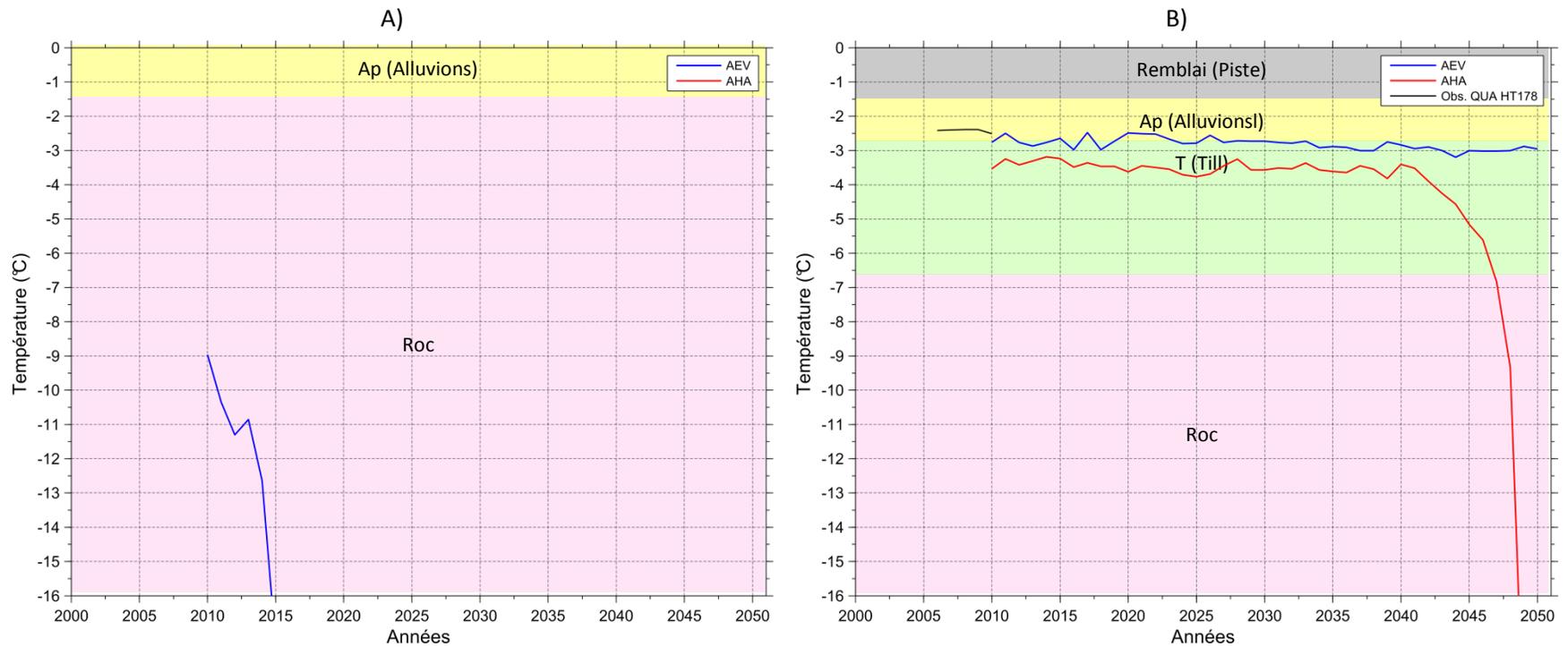
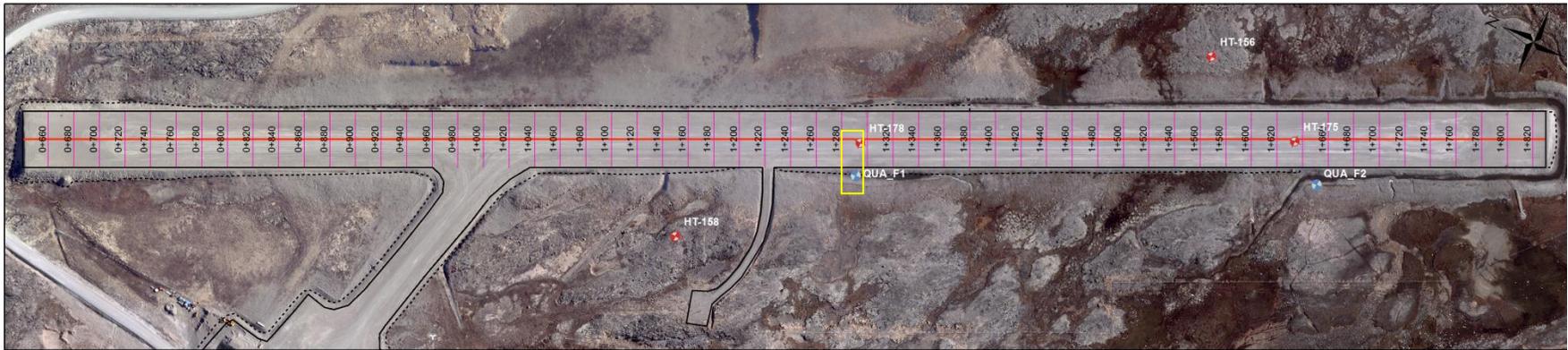


Figure 85: Projection de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au centre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport de Quaqtaq, chaînage 1+290 m, vis-à-vis le câble HT-178.

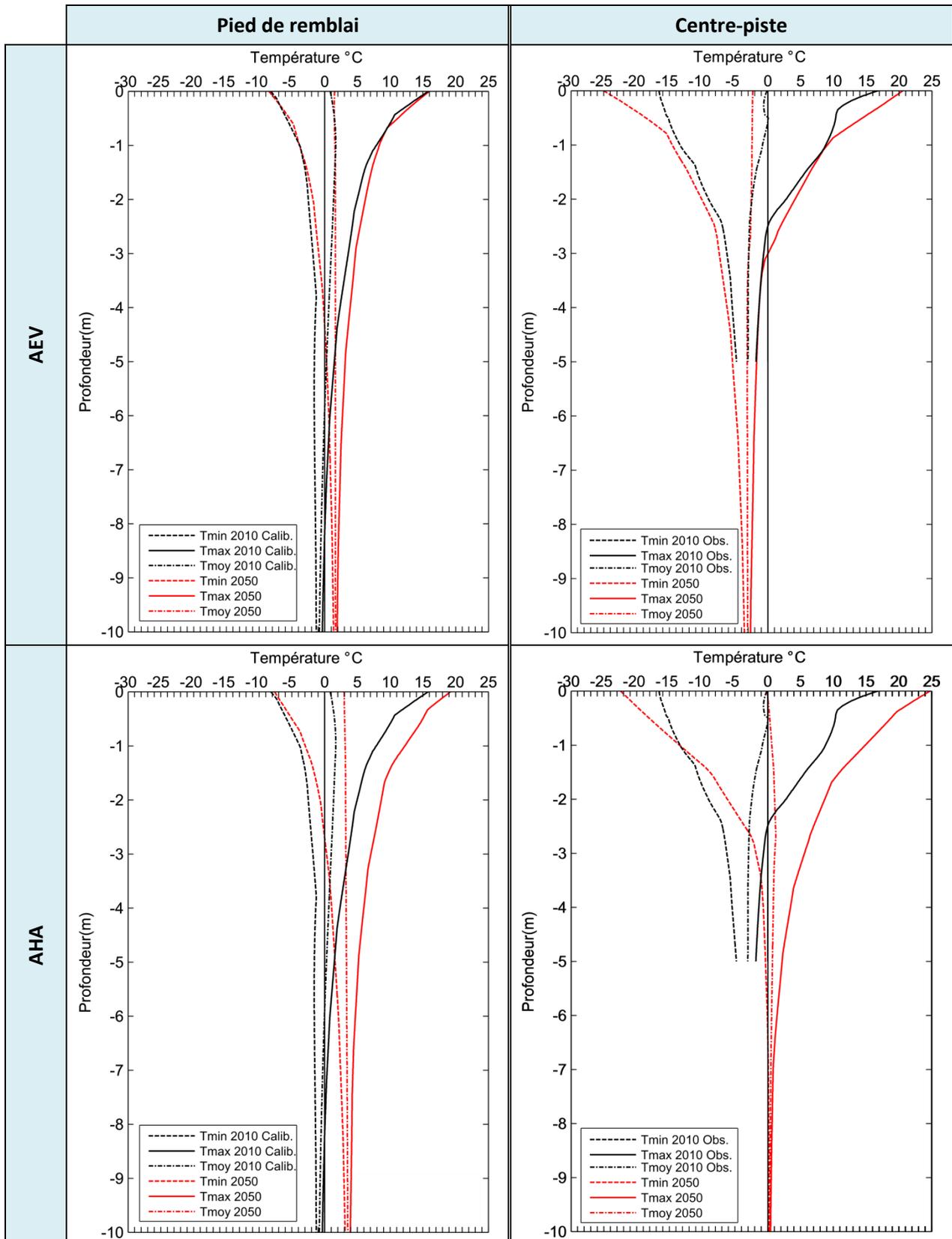


Figure 86: Profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le pied de remblai et le centre-piste selon les scénarios AEV et AHA, aéroport de Quaqtaq, chaînage 1+290 m (QUA-F1 et HT-178).

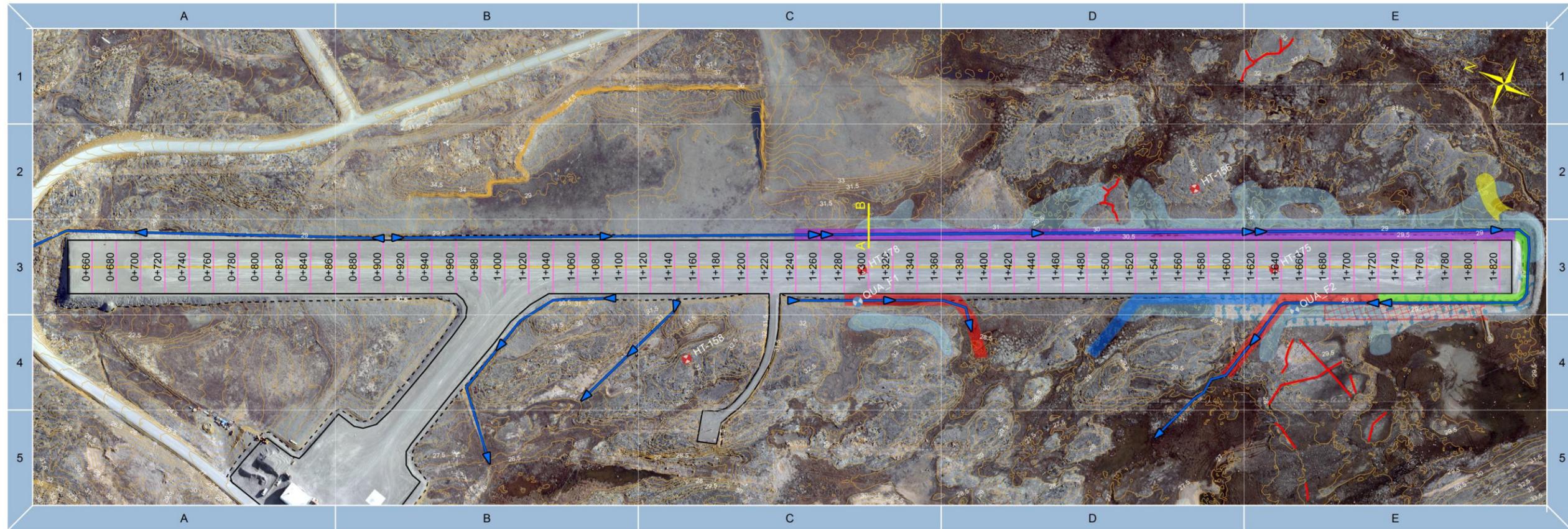
4.6.4 STRATÉGIES D'ADAPTATION ENVISAGÉES

Actuellement, les signes de dégradation le long de la piste de Quaqtq sont exclusivement localisés entre les chaînages 1+260 et 1+320 où une dépression sur toute la largeur de la piste ainsi que des fissures de tension sont observées. Des infiltrations d'eau forcées sous la piste par la pente naturelle du terrain lors de la fonte printanière semblent à l'origine de la dégradation de l'infrastructure à cet endroit. En effet, au printemps, les fossés obstrués par la neige favorisent une remontée d'eau jusqu'en bordure de la partie supérieure du remblai inondant ainsi la structure de la piste. Il en résulte une hausse rapide de la température jusqu'à 0 °C dans le remblai (HT-178). Les connaissances sur le contenu en glace du sol et les dimensions de la zone affectée, quoique sommaires, suggèrent que les tassements seront localisés et d'une ampleur limitée. Par conséquent, un entretien régulier qui consiste au comblement des dépressions avec du gravier devrait être suffisant à court terme pour assurer la sécurité d'opération. Toutefois, selon la microtopographie préconstruction, d'autres voies préférentielles d'écoulement pourraient se créer sous la piste advenant l'épaississement de la couche active. Ainsi, la prévention des infiltrations d'eau sous la piste et le contrôle de l'enneigement sont les éléments primordiaux à mettre en œuvre à moyen terme pour préserver l'intégrité du pergélisol en périphérie et sous la piste d'atterrissage.

La stratégie d'adaptation proposée pour la piste de Quaqtq et présentée à la figure 87 a pour objectif de diminuer la dégradation thermique du pergélisol causé par un écoulement potentiel d'eau sous le remblai. La stratégie proposée se résume à la mise en place d'un remblai à pente adoucie (8 :1) et d'une membrane polymère étanche sur une section du côté est du remblai, la prolongation de la digue vers l'est, le profilage des fossés de drainage par comblement et leur déneigement/déglaçage en fin d'hiver, juste avant la crue printanière.

Parallèlement à la stratégie d'adaptation proposée, les actions supplémentaires suivantes sont recommandées :

- Porter une attention particulière à l'entretien des fossés de drainage lors de la fonte de la neige printanière afin d'éviter que ceux-ci soient obstrués par de la glace et qu'une remontée des eaux de fonte dans les fossés de drainage survienne.
- En raison du peu de précisions sur le volume et les caractéristiques des sols sensibles sous le remblai entre les chaînages 1+290 et 1+310, une évaluation des conditions du pergélisol et de la profondeur au roc plus poussée sous l'infrastructure et non en périphérie est nécessaire afin de préciser la zone à protéger par le remblai à pente adoucie et membrane polymère imperméable. La réalisation de sondages en mode destructif (foreuse pneumatique) permettrait de sonder la profondeur du roc et ainsi estimer l'épaisseur des dépôts meubles et l'ampleur des tassements à venir.



Stratégie d'adaptation, aéroport de Quaqtaq.

Infrastructures et instrumentation

- Forages géotechniques avec câble à thermistances
- Forages géotechniques
- Centre piste
- Chaînage transversal
- Courbe de niveau (50 cm)
- Sillons de coins de glace
- Zone inondée telle qu'observée en juin 2009
- Embâcle tel qu'observé en juin 2009
- Limite de la surface profilée
- Position du pied de remblai



Modifications proposées

- Sens de l'écoulement des fossés de drainage
- Nouveau fossé de drainage peu profond (< 500 mm)
- Reprofilage des fossés de drainage existants par comblement
- Remblai à pente adoucie (8:1) avec membrane en polymère étanche
- Prolongement proposé de la digue
- Surélever le terrain pour empêcher l'écoulement d'eau provenant du terrain naturel
- Zone à surveiller au printemps pour la formation d'embâcle. Dégagement au besoin

Réalisation: E. L'Hérault, M. Allard et G. Doré, septembre 2011, Centre d'études nordiques, Université Laval.
Système de référence: NAD83 ; Projection: MTM zone 10



Remblai à pente adoucie (8:1) avec membrane polymère étanche Côté ouest, entre le chaînage 1+240 et 1+840

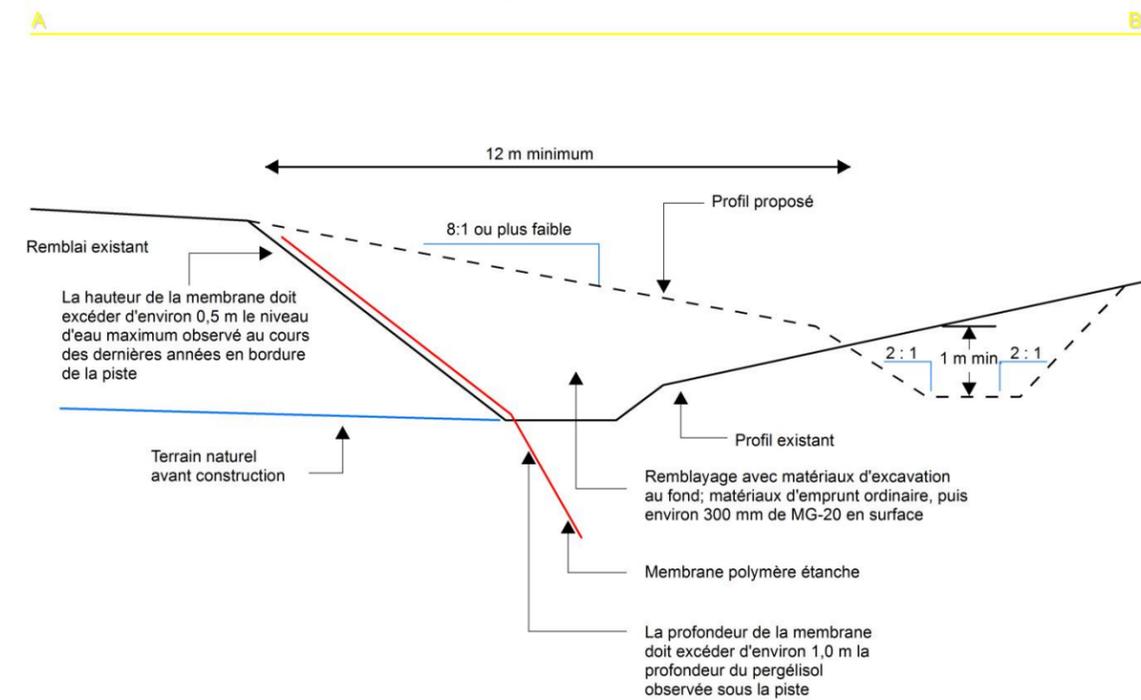


Figure 87: Plan d'adaptation proposé pour la piste de Quaqtaq.

4.7 KANGIRSUK

4.7.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

Achevé en 1987, l'aéroport de Kangirsuk est situé dans la zone de pergélisol continu sur la rive nord de la rivière Arnaud. La piste d'atterrissage, d'une longueur totale de 1190 m entre le chaînage 0+540 m et 1+730 m et d'une largeur de 44 m, est orientée dans un axe nord-nord-est sud-sud-ouest.

Fait intéressant, lors de la construction de la piste, une excavation de 280 m de long et de 5 m de profondeur fut réalisée par dynamitage du pergélisol afin de niveler le terrain entre les chaînages 0+760 et 1+040 m. Dans cette section en déblai, le terrain naturel a été recouvert d'un géotextile avant d'y déposer le remblai. Cette section jugée sensible fit l'objet d'un suivi par Tremblay et Doré (1988) afin d'évaluer le comportement de la piste dans les premières années suivant sa construction. Les paramètres tels que la pénétration du front de dégel, l'évolution des tassements et le soulèvement par le gel, la capacité portante de la sous-fondation et la stabilité de pente ont été mesurés. Leurs résultats ont démontré qu'après la première année, des tassements moyens de 15 cm et pouvant atteindre localement 23 cm ont été mesurés. Ils ont été accompagnés de tassements additionnels de 1 à 5 cm au cours de la seconde année. Le processus de dégradation dans la section en déblai en lien avec le réajustement du régime thermique du pergélisol suite à son excavation et la mise en place de l'infrastructure est clairement illustré par le schéma synthèse réalisée par Allard et al., (2007) (Figure 88). En 2004, le tassement cumulé dans cette section depuis la construction de la piste avait été évalué à 46 cm par Beulac (2005) (Figure 89A). L'ampleur du tassement fut confirmée par des épaisseurs de MG-20 atteignant jusqu'à 61 cm par endroits au lieu des 15 cm initialement déposés lors de la construction. D'après Allard et al., (2007), ces surplus sont attribuables aux fréquents travaux de resurfacement qui ont pour but de contrecarrer les affaissements et de garder la piste opérationnelle.

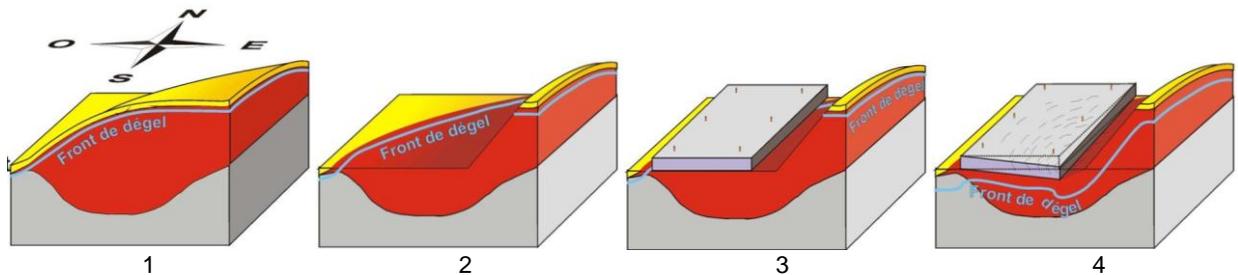


Figure 88: Figure de synthèse sur le processus de perturbation du pergélisol provoquée par le nivellement du terrain lors de la construction de la piste de Kangirsuk (modifiée de Allard et al., 2007). Terrain avant (1) et après nivellement (2). Remblai de piste après construction (3) et suite au réajustement du régime thermique du pergélisol et consolidation du matériel dégelé (4).

De récentes mesures de nivellement démontrent que le secteur s'affaisse toujours. En effet, entre 2007 et 2010, des tassements cumulatifs compris entre 2 et 5 cm (Figure 89B) ont été mesurés à partir des plaques de tassements installées dans l'accotement et au centre-piste (voir localisation des plaques figure 90A). C'est également dans ce secteur côté est, entre les chaînages 0+720 m et 0+740 m et 0+900 m et 1+020 m, que des tassements ainsi que de nombreuses fissures longitudinales ont été recensés en 2007. Lors de la réalisation des travaux de forage au mois de juin 2009, ces signes de dégradation de l'infrastructure étaient toujours présents et une dépression non recensée était maintenant clairement visible entre le chaînage 1+075 m et 1+115 m (Figure 89C). Cette nouvelle dépression mesure environ 40 m de longueur et affecte la section de la piste comprise entre les feux de bordure et l'extrémité est de l'accotement. À l'extrémité nord de cette dépression, un ponceau est placé perpendiculairement à la piste et permet le drainage des eaux de ruissellement du versant est le long de l'infrastructure. Afin de forcer l'eau à emprunter le ponceau pour ultimement l'évacuer de l'autre côté de la piste (côté ouest), une berme à angle droit a été érigée. Toutefois, lors de la visite de l'équipe

technique du CEN, une partie de l'eau qui devait s'écouler par le ponceau s'infiltrait entre le ponceau et le remblai puis ressurgissait 30 m plus au sud du même côté, soit du côté est (Figure 89C). Du côté ouest, aucune résurgence n'a été observée, par conséquent, l'existence d'un écoulement transversal à la piste apparaît peu probable. Toutefois, il est important de noter qu'en bordure de la piste, la partie superficielle du terrain naturel comprise entre 0 et 1,4 m de profondeur est couverte d'une importante couche de gravier en surface (remblai) et d'un sable et gravier grossier (Allard et *al.*, 2007). La présence de ce matériel grossier peut favoriser un réseau d'écoulement souterrain non visible qui nécessiterait une investigation hydrogéologique plus approfondie.

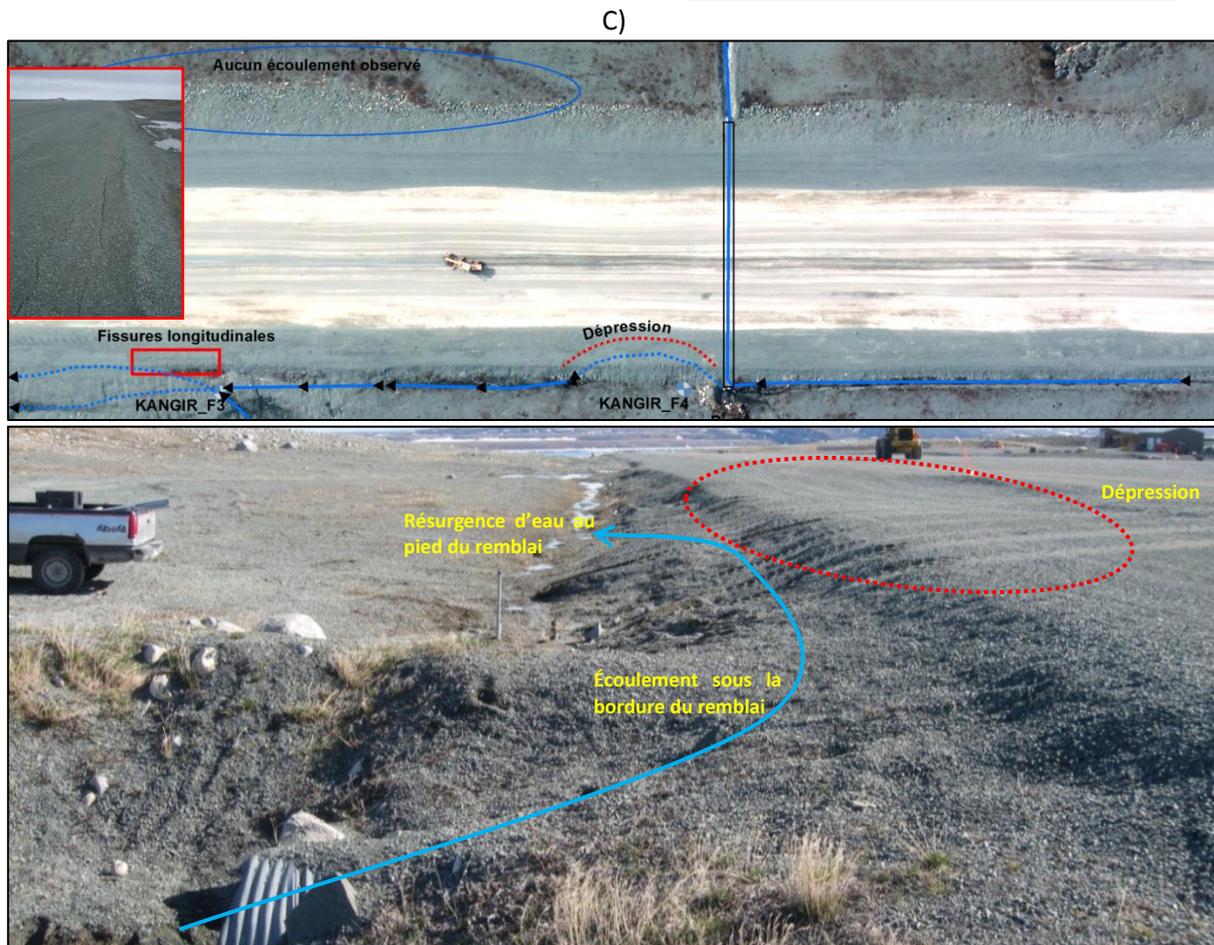
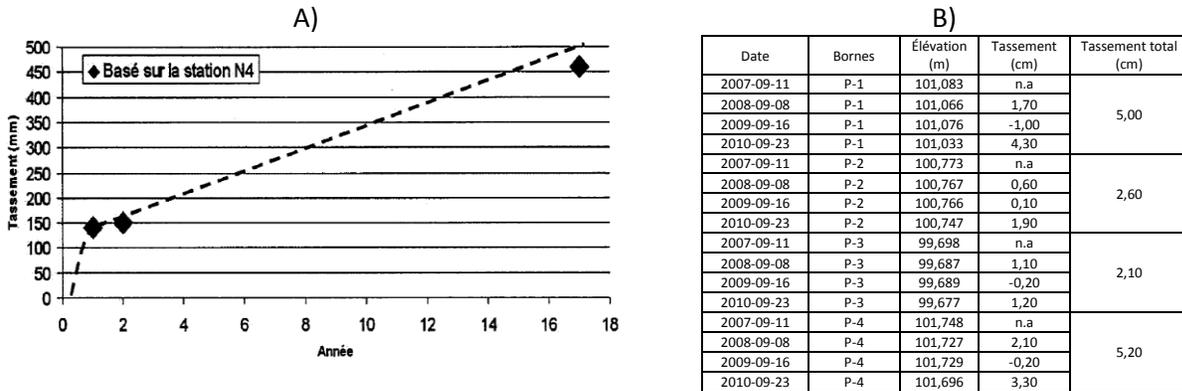


Figure 89: A) Historique des tassements cumulatifs dans la section en déblai de la piste d'atterrissage de Kangirsuk (Beaulac (2005) ; Tremblay et Doré (1988)). B) Mesures de nivellements réalisées par le personnel du MTQ, aéroport de Kangirsuk (MTQ, 2010). C) Problème de drainage et signes de dégradation tels qu'observés en juin 2009 le long de piste de Kangirsuk.

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

La piste d'atterrissage, juchée à une altitude de plus de 95 m, repose essentiellement, à l'exclusion du secteur en déblai entre les chaînages 0+760 m et 1+040 m, sur une couverture de sables et graviers grossiers oxydés souvent supérieure à 1 m, mais n'excédant que très rarement 2 m d'épaisseur (Figure 90B et C). D'une distribution granulométrique assez uniforme, ce dépôt consiste en un mélange de gravier (48 %) et de sable (45 %) avec moins de 10 % de particules fines (silt et argile) (Voir annexe tableau 52). Les teneurs en eau mesurées sont dans l'ensemble inférieures à 10 % et en moyenne autour de 8 %. En raison sa composition granulométrique, cette couche superficielle est considérée stable au dégel. Cette unité stratifiée correspond à un faciès de dépôts littoraux et pré-littoraux (Mb) et recouvre par endroits un diamicton à matrice fine sablo-silteuse (till) incorporant des graviers et quelques blocs anguleux dont la surface a été remaniée par la mer (Mm/Tr ou Mb/Tr). Dans les secteurs où ces dépôts recouvrent le till, le contact entre les deux unités est assez franc. L'oxydation des sables et des graviers témoigne d'une fluctuation importante de la nappe phréatique à l'intérieur de la couche active et dont la base est retenue par la couche imperméable que représente le till pergélisolé, zone souvent sursaturée favorisant la liquéfaction et le fluage du sédiment (Figure 91A). Au total, quatre (4) forages ont été réalisés au mois de juin 2009 le long de la piste d'atterrissage de Kangirsuk. Ces forages sont tous localisés sur le côté est de la piste à proximité des signes de dégradations recensés en 2007 (Allard et *al.*, 2007). L'emplacement exact des forages est illustré à la figure 90B et leurs caractéristiques générales résumées au tableau 29. Dans l'ensemble de ces forages, cette couche superficielle de sables et graviers a été rencontrée à des profondeurs comprises entre 0 et 2 m avant d'atteindre le till sous-jacent (Figure 91B, C, D et E). Entre les chaînages 0+540 m et 0+630 m et 1+280 m et 1+730 m, les sables et graviers littoraux et pré-littoraux (Mb) repose directement sur la roche en place sous forme de minces placages (Mm/R). Dans la moitié nord de la piste, le roc (R) affleure également à de nombreux endroits sur le côté ouest avec une surface habituellement fortement altérée par l'action du gel et dégel.

D'après les relevés géophysiques et les excavations réalisées en 2005 par Allard et *al.*, (2007), le till est présent sous les sables et graviers littoraux et pré-littoraux (Mb) seulement dans la section sud de la piste d'atterrissage (chaînages 0+630 et 1+280 m) et est concentré essentiellement à l'intérieur d'une série de dépressions topographiques au sein de la roche en place (Figure 90B et C). L'occurrence du till dans ce secteur fut confirmée par les forages réalisés en 2009. C'est également à l'aide de ces nouveaux forages qu'une évaluation de l'épaisseur des dépôts dans les dépressions topographiques du substrat rocheux a pu être réalisée. D'après les résultats des forages, l'épaisseur des dépôts dans ces cuvettes peut atteindre jusqu'à 10 m d'épaisseur (KANGIR_F1) dont le premier mètre consiste habituellement à un sable et gravier grossier oxydé (Mb) qui repose sur le till (Tr).

Dans la zone en déblai, entre les chaînages 0+760 m et 1+040 m, la topographie initiale a été aplanie lors de la construction de la piste, forçant l'excavation de près de 5 m de dépôt par endroits. Dans cette section, la piste repose actuellement directement sur le till dont l'épaisseur est estimée entre 2 et 3 m. D'après Tremblay et Doré (1988), le till pergélisolé présentait alors d'importantes quantités de glace estimées à environ 50 %, une teneur en eau moyenne de 30 % et un contenu en particules fines de 40 %. En 2005, Allard et *al.*, (2007) ont procédé à une excavation au centre-piste (Figure 92A) et constatèrent que le remblai original de la piste, initialement de 0,85 m d'épaisseur, mesurait maintenant plus de 1,40 m, avec une épaisseur de MG-20 excédant 50 cm (Figure 92B). Sous le remblai, entre 1,40 et 2 m de profondeur, le sol était sec et pauvre en glace pour ensuite, au-delà de 2 m de profondeur, présenter un contenu en glace légèrement plus élevé typique du till pergélisolé de la région.

C'est essentiellement l'évaluation des épaisseurs et caractéristiques géotechniques du till sous la piste que visait la campagne de forage de 2009. D'après les résultats de forages et les levés géophysiques, le till se retrouve exclusivement entre les chaînages 0+630 et 1+280 m avec une épaisseur qui varie entre 2

(KANGIR_F2) et 9 m (KANGIR_F1). Le till consiste en un matériel hétérométrique non trié grisâtre composé d'un mélange de sable et de silt avec un peu de gravier anguleux et quelques cailloux décimétriques anguleux épars. Les proportions de gravier, sable et particules fines (silt et argile) sont respectivement de 23, 46 et 31 % dont cette dernière peut atteindre à l'occasion plus de 50 % (voir annexe tableau 52 et tableau 53). Le till dans la couche active est assez compact et de faible teneur en glace dont la structure se présente essentiellement sous forme interstitielle (Figure 93A, B et C). Dans la section du sol gelé (pergélisol), des lentilles de glace plurimillimétriques relativement espacées ont été observées dans plusieurs échantillons (Figure 93D, E et F). Toutefois, dans la majorité des échantillons prélevés, c'est néanmoins la présence de glace interstitielle qui prédomine. Cette glace occupe un volume assez faible, fait confirmé par une teneur en eau moyenne du till pergélisolé de 11 % et qui excède rarement plus de 15 %. Avec une limite de liquidité moyenne de 15 % et un indice de plasticité trop faible pour pouvoir le mesurer, la fraction fine du till est non plastique ou de faible plasticité. Pour cette raison, dès que la teneur en eau se rapproche ou dépasse la limite de plasticité, le till se comporte comme un fluide visqueux et tend à fluer. Sur le long terme, la partie supérieure du dépôt exposée à l'air, donc soumise aux cycles de gel et dégel, subira graduellement l'effet de la gravité et fluera lentement le long des versants.

Neuf (9) essais de consolidation ont été réalisés sur le till de Kangirsuk. Les essais ont été réalisés sur des échantillons qui proviennent de différents forages et de profondeurs variées. À la lueur des résultats obtenus, le potentiel de consolidation du till est inférieur à 15 % et peut atteindre des valeurs presque nulles (Tableau 30). Des échantillons prélevés dans la couche active (KANGIR_F2_188-199 et KANGIR_F2_265-280) montrent que le till, une fois dégelé, drainé et consolidé, est assez stable avec un potentiel de consolidation inférieure à 1 % même sous des contraintes de 200 kPa. Des valeurs similaires ont été observées suite à des essais de consolidation réalisés dans le même dépôt, mais plus en profondeur, c'est-à-dire au sein du pergélisol (KANGIR_F3-690-705). Lorsque l'on compare les teneurs en eau avec les valeurs de tassement et de consolidation, ces dernières augmentent significativement dès que la teneur en eau dépasse 9 %, valeur qui semble correspondre à celle de la porosité à saturation du till. Les coefficients de consolidation du till mesurés dans la présente étude ne permettent pas d'expliquer l'ampleur des tassements qui se sont produits dans la section en déblai depuis la construction. En effet, d'après les mesures de Tremblay et Doré (1988), dès la première année, le réajustement du régime thermique a fait progresser le front de dégel de 40 à 60 cm dans le pergélisol sous le remblai et entraîner des tassements irréguliers d'environ 15 cm en moyenne. La couche de till pergélisolé soumise au dégel aurait ainsi tassé d'environ 25 à 40 %, soit bien au-delà des résultats obtenus lors des essais de consolidation. On obtient également un coefficient de consolidation nettement supérieur ($\approx 35\%$) lorsque la valeur de tassement cumulatif de 46 cm proposée par Beaulac (2005) est utilisée et mise en relation avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche active pour la même période (augmentation de 131 cm). Ces différences entre les coefficients de consolidation mesurés en laboratoire et ceux estimés indirectement par les mesures de nivellement découlent probablement de la variabilité du contenu en glace du till et possiblement de l'ajout d'une composante du tassement attribuable au fluage interne qui n'a pas été mesurée. Chose certaine, le till sous la piste reste sensible au dégel. De récentes mesures de nivellement indiquent que le centre-piste au chaînage 0+980 m (plaque P-1) s'est affaissé de 5 cm entre 2007 et 2010. Au cours de cette période, les tassements sont irréguliers et se développent essentiellement lors d'étés chauds durant lesquels le front de dégel pénètre dans le pergélisol. À l'inverse, au cours des étés plus froids caractérisés par une remontée du plafond du pergélisol, les valeurs de tassements sont nulles ou même négatives ce qui suppose un gonflement du sol par le gel. Par exemple, entre les saisons de dégel 2008 et 2009, l'épaisseur maximale de la couche active est passée respectivement de 2,21 à 1,92 m et les mesures de nivellements réalisées au cours de cette période montrent une stabilisation du tassement et dans certains cas un soulèvement au gel inférieur à 1 cm (Figure 94).

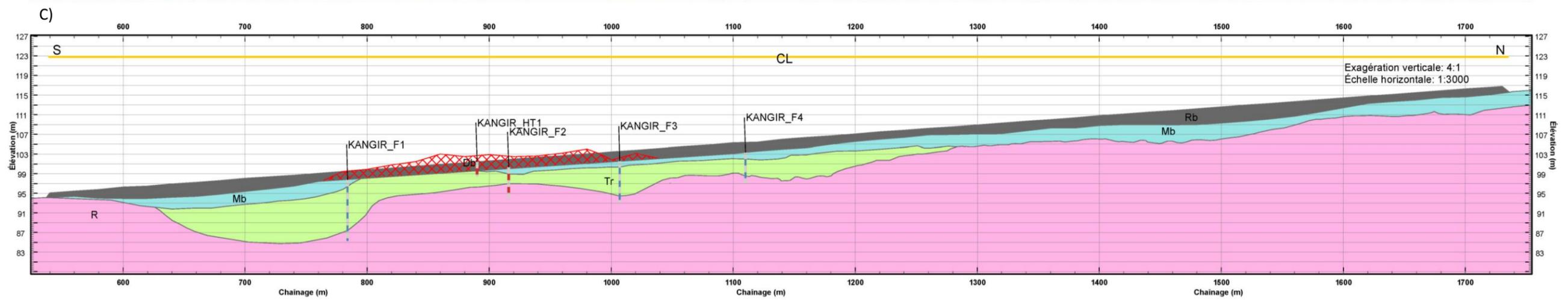
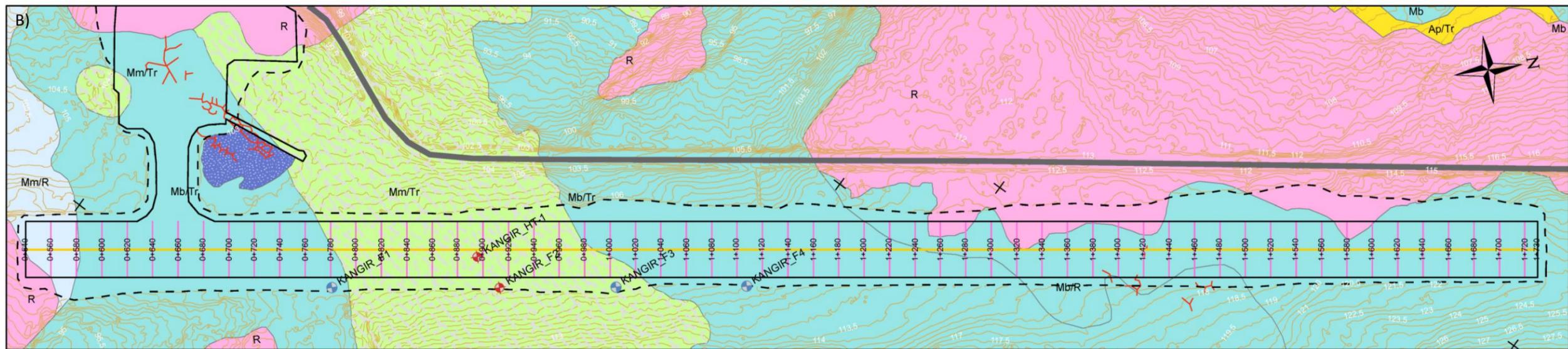
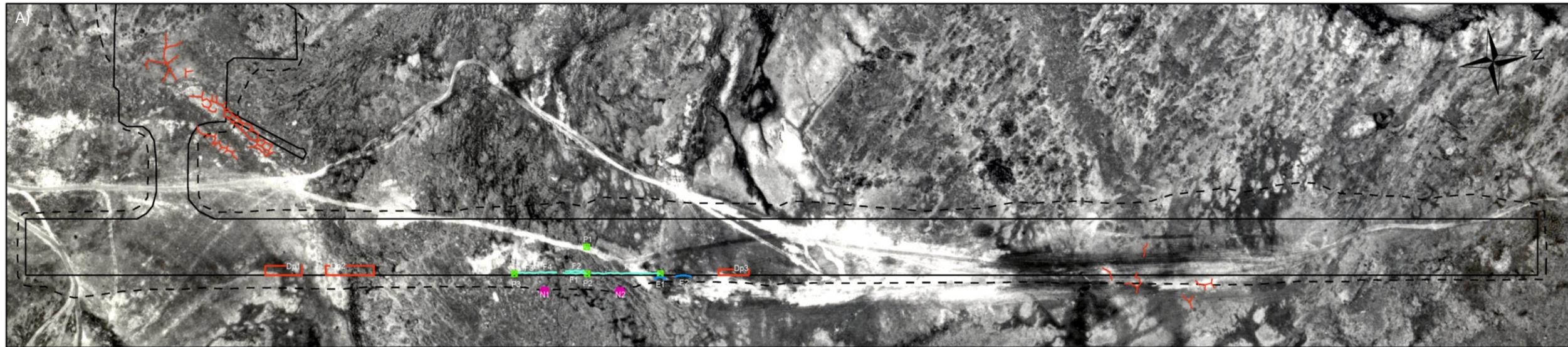


Figure 90 : Planche synthèse de la piste de Kangirsuk.

Dépôts de surface

Sédiments alluviaux

Ap/Tr

SÉDIMENTS ALLUVIAUX SUR TILL REMANIÉ: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers contenant fréquemment de la matière organique. Cette couche repose sur un diamicton à matrice sablo-silteuse incorporant des graviers et quelques blocs anguleux pluricentimétriques (till remanié).

Sédiments marins

Mb

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX: Sable grossier et graviers littoraux (épaisseur supérieure à 1 mètre); mis en place en eau peu profonde lors de la phase plémarine et lors de l'exondation (Mer d'Iberville); surface parfois marquée par des crêtes de plage et des fentes de gel.

Mb/Tr

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR TILL REMANIÉ: Sable grossier et graviers littoraux (épaisseur supérieure à 1 mètre); reposent sur un diamicton à matrice sablo-silteuse incorporant des graviers et quelques blocs anguleux décimétriques (Till remanié); surface parfois marquée par des crêtes de plage et des fentes de gel.

Mb/R

SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR ROC: Sable grossier et graviers littoraux (épaisseur supérieure à 1 mètre); reposent directement sur la roche en place.

Mm/Tr

SÉDIMENTS LITTORAUX MINCES SUR TILL REMANIÉ: Sable grossier et graviers littoraux en couverture relativement mince (inférieure à 1 mètre); reposent sur un diamicton à matrice sablo-silteuse incorporant des graviers et quelques blocs anguleux décimétriques (Till remanié).

Mm/R

SÉDIMENTS LITTORAUX MINCES SUR ROC: Sable grossier et graviers littoraux en couverture relativement mince (inférieure à 1 mètre) reposent directement sur la roche en place.

Sédiments glaciaires

Tr

TILL REMANIÉ: Diamicton à matrice sablo-silteuse incorporant des graviers et quelques blocs anguleux décimétriques; matériel dont la partie superficielle a été remaniée par les vagues et courants marins de la mer d'Iberville.

Substrat rocheux

R

ROCHE EN PLACE: Affleurements rocheux et roc (schiste de la formation géologique de Churchill du Bouclier canadien) à mince couverture de sédiments meubles.

Anthropique

Rb

ANTHROPIQUE: Remblai.

Hydrographie



Ruisseaux



Zone d'accumulation d'eau en bordure de piste

Formes de terrain



Affleurement rocheux isolé



Fentes de gel



Sols structurés (ostioles, ostioles à bourrelets, sols striés sur les pentes, cercles de pierres, etc.)



Déblai

Forages



Forages géotechniques instrumentés avec un câble à thermistances



Forages géotechniques avec récupération



Courbe de niveau (50 cm)

Infrastructures



Routes



Centre-piste



Chainage transversal



Limite de la surface profilée



Limite du pied de remblai



Bâtiments

Identification des défauts



Fissuration



Accumulation d'eau en bordure de piste



Dépressions



Mesures d'enneigement effectuées sur une base annuelle



Plaque de tassement

Tableau 29: Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Kangirsuk au printemps 2009.

Nom du forage	Localisation par rapport au chaînage existant	Profondeur atteinte
KANGIR_F1	Côté est, chaînage 0+784 m, à 3,5 m du pied du remblai.	12,43 m
KANGIR_F2	Côté est, chaînage 0+916 m, à environ 17 m au nord de la station d'enregistrement du câble KANGIR_HT-1 et 2 m du pied du remblai.	6,40 m
KANGIR_F3	Côté est, chaînage 1+007 m à 1,5 m du pied du remblai.	8,67 m
KANGIR_F4	Côté est, chaînage 1+110 m, 10 m au sud du centre du ponceau et 1 m du pied du remblai.	6,36 m

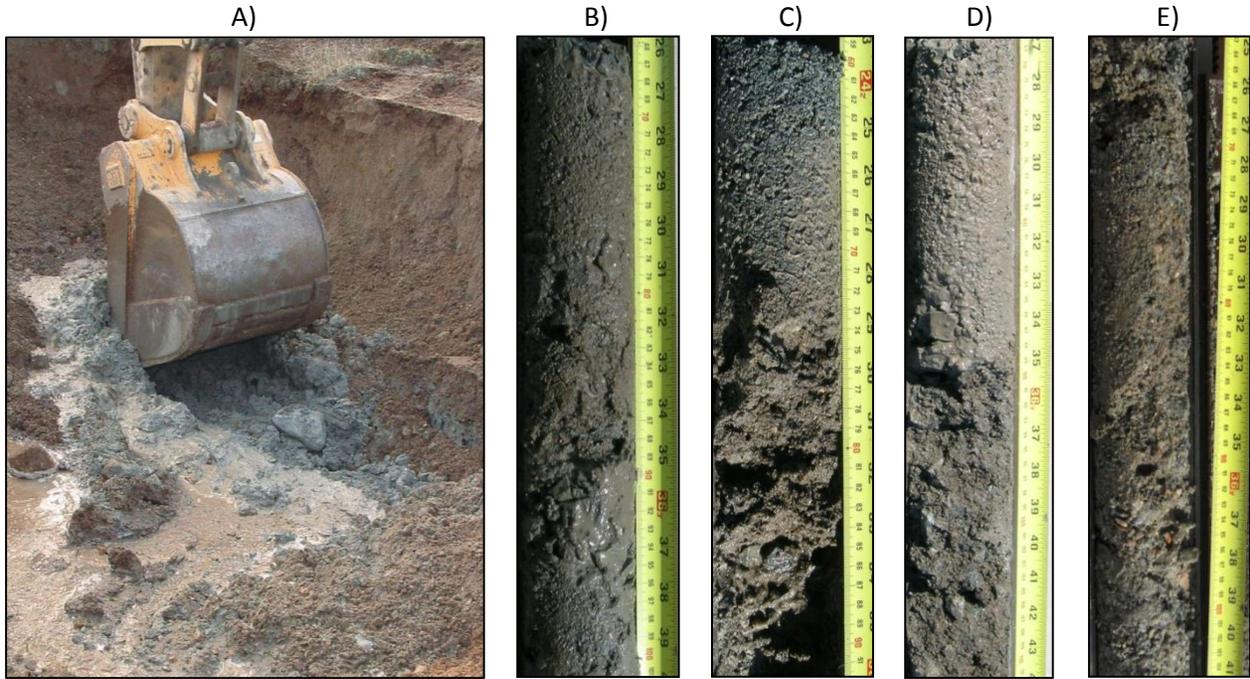


Figure 91: A) Excavation jusqu'au till réalisé en 2005 en bordure de la piste de Kangirsuk à travers les sédiments littoraux et pré-littoraux (Mb) (Allard et al., 2007). Échantillons de sables et graviers prélevés entre : B) 0,66 et 1,16 m (KANGIR_F1), C) 1,20 et 1,57 m (KANGIR_F2), D) 0,65 et 1,15 m (KANGIR_F3) et E) 0,60 et 1,10 m (KANGIR_F4).



Figure 92: Stratigraphie du remblai et du terrain naturel sus-jacent tel qu'observé lors de l'excavation réalisée en 2005 par Allard et al. (2007).

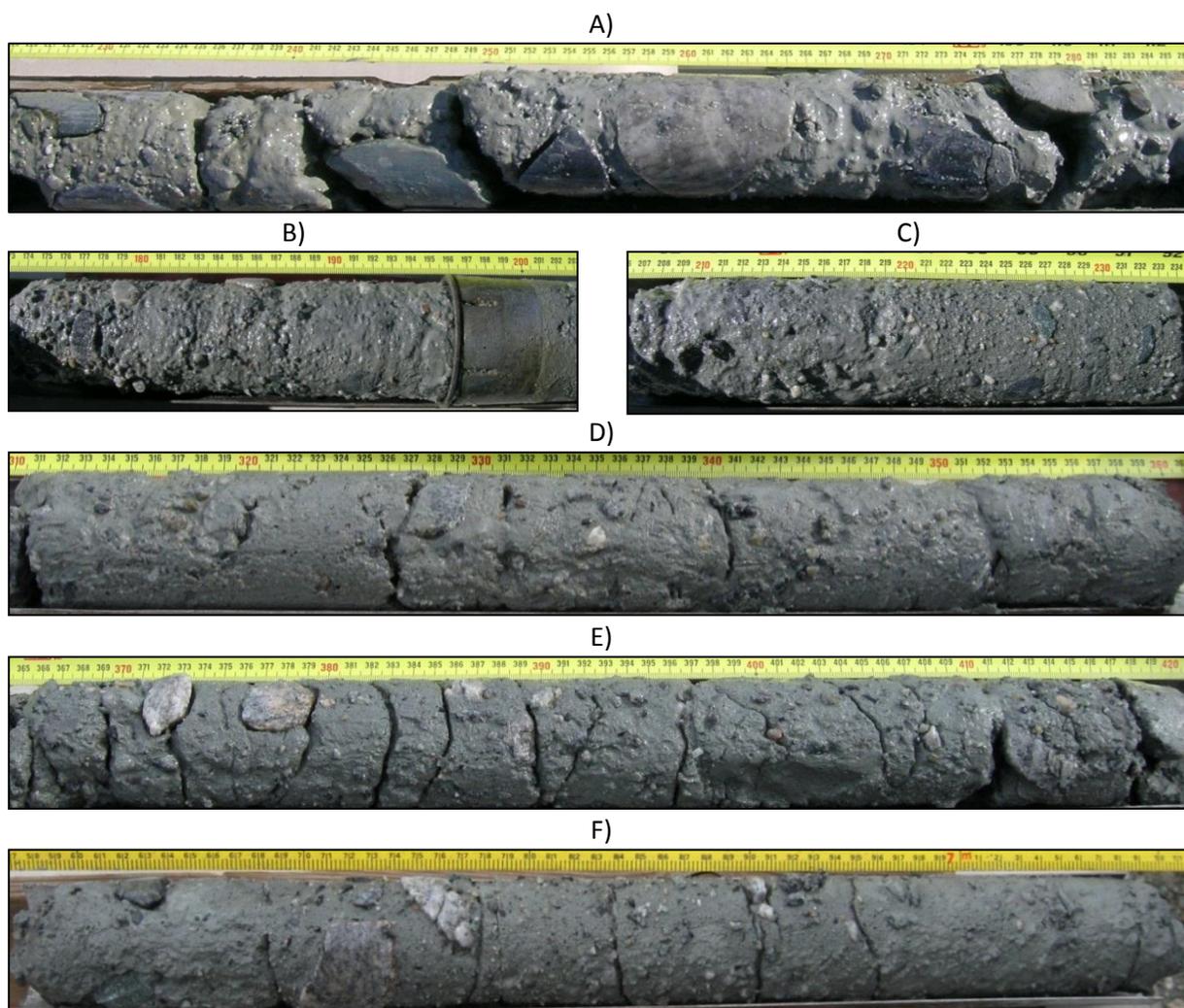


Figure 93 : Échantillons de till prélevés dans la couche active entre : A) 2,20 et 2,95 m de profondeur au forage KANGIR_F1, B) 1,65 et 2,05 m et C) 2,05 et 2,40 m de profondeur au forage KANGIR_F2. Échantillons de till gelé avec lentilles de glace plurimillimétriques prélevés au forage KANGIR_F3 entre : D) 3,10 et 3,60 m, E) 3,65 et 4,2 m et F) 6,58 et 7,10 m de profondeur.

Tableau 30: Sommaire des résultats des essais de consolidation réalisés sur le till à l'aéroport de Kangirsuk.

Nom de l'échantillon	Profondeur		Teneur en eau	Indice des vides (e0)	Contrainte (kPa)	Indice des vides (ef)	Taux de consolidation
	Sommet	Base					
KANGIR_F2_188-199	-1,88	-1,99	9,45%	0,277	150	0,270	0,55%
					200	0,265	0,96%
KANGIR_F2_265-280	-2,65	-2,80	9,58%	0,267	200	0,260	0,56%
					100	0,277	3,28%
KANGIR_F2_280-292	-2,80	-2,92	9,93%	0,320	150	0,262	4,39%
					200	0,256	4,81%
KANGIR_F3_238-248	-2,38	-2,48	10,96%	0,435	100	0,266	11,75%
					200	0,242	13,41%
KANGIR_F3_250-265	-2,50	-2,65	10,32%	0,362	200	0,279	6,08%
KANGIR_F3_440-454	-4,40	-4,54	10,93%	0,354	100	0,322	2,34%
					200	0,198	11,50%
KANGIR_F3_457-472	-4,57	-4,72	12,51%	0,428	100	0,227	14,11%
					200	0,209	15,37%
KANGIR_F3_675-690	-6,75	-6,90	10,45%	0,377	200	0,353	1,75%
KANGIR_F3_690-705	-6,90	-7,05	9,35%	0,288	200	0,278	0,74%

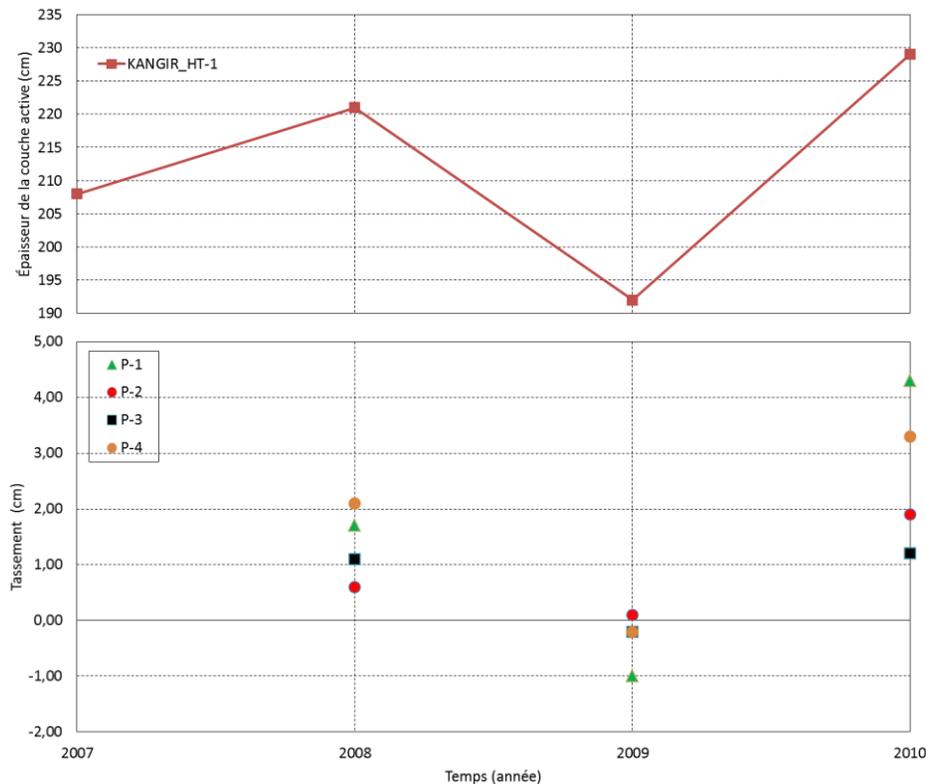


Figure 94: Variation de l'épaisseur de la couche active au centre-piste (KANGIR_HT-1) et valeurs de tassement mesurées pour la période 2007 à 2010, piste d'atterrissage de Kangirsuk.

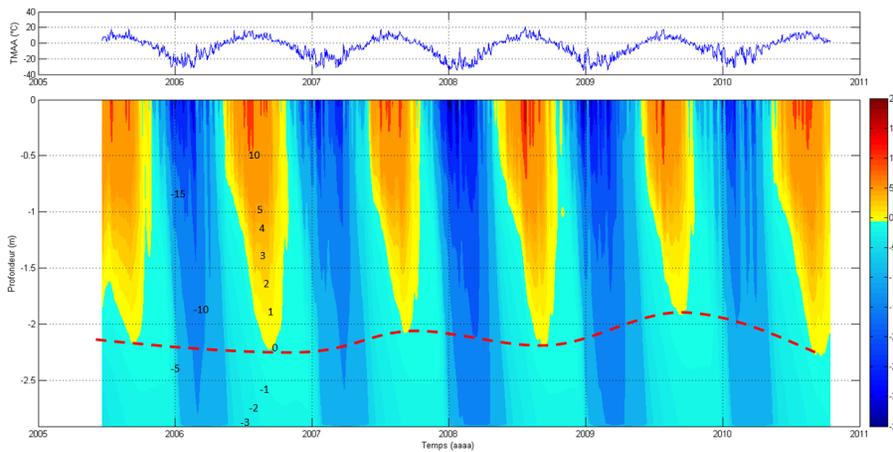
4.7.3 CONDITIONS THERMIQUES DU PERGÉLISOL

4.7.3.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : PÉRIODE 1990-2010

Depuis 2005, un suivi thermique dans la section en déblai en centre-piste est assuré par un câble à thermistances (KANGIR_HT-1). D'une longueur de 2,9 m, ce câble mesure le régime thermique à l'intérieur du remblai et du sol sous-jacent. Depuis 2005, ces données thermiques montrent que l'épaisseur de la couche active a augmenté de 13 cm (6 %) (Figure 95). Cette augmentation n'est toutefois pas constante et régulière dans le temps, marquée à l'occasion par quelques remontées du plafond du pergélisol. Par exemple, entre 2008 et 2009, l'épaisseur de la couche active est passée de 2,21 m à 1,92 m, soit une diminution de 29 cm, tandis qu'en 2010, elle a augmenté de 37 cm par rapport à 2009 pour atteindre 2,29 m. Au centre-piste, cette fluctuation dans l'épaisseur de la couche active, en raison de l'absence de neige, est directement liée et proportionnelle avec la variation de la température moyenne annuelle de l'air. Depuis la construction de la piste, le plafond du pergélisol, initialement positionné directement sous le remblai de la piste à 0,85 m de profondeur, s'est approfondi pour atteindre 2,29 m de profondeur en 2010. Cet approfondissement se chiffre par une croissance de l'épaisseur de la couche active de 144 cm par rapport à 1986, ce qui correspond à une augmentation de près de 170 %.

Depuis octobre 2010, le puits de forage KANGIR_F2 a été instrumenté à l'aide d'un câble à thermistances. La position en pied de remblai de ce nouveau câble, situé sur le côté est au chaînage 0+916 m, permet d'assurer le suivi thermique en bord de piste. Les données préliminaires révèlent que la couche active a atteint une épaisseur de 2,78 m en 2010. La couche active est donc de 50 cm plus épaisse en pied de remblai qu'au centre-piste. D'après les mesures thermiques de Tremblay et Doré

(1988), la couche active en pied de remblai, d'une épaisseur de 1,6 m, était d'une quinzaine de centimètres plus épaisse qu'au centre-piste, et ce, dans l'année suivant la construction. Cette différence s'explique en partie par la présence d'une couche de neige d'environ 0,7 m (relevé de neige N1, MTQ (2010)) qui s'accumule dans le fossé et le long du talus du remblai, mais également par des propriétés thermiques différentes.



KANGIR_HT-1 (Centre-piste)			
Années	Z (cm)	Δ (cm)	Δ (%)
1986	85 ¹	n.a	n.a
1986	145 ²	60	70,6
2005	216	71	49,0
2006	223	7	3,2
2007	208	-15	-6,7
2008	221	13	6,3
2009	192	-29	-13,1
2010	229	37	19,3
Total		144	169,4

¹Position du plafond du pergélisol sous le remblai.

²Profondeur observée à la station

Figure 95: Température du sol journalière en fonction de la profondeur et du temps (juin 2005 à octobre 2010), câble KANGIR_HT-1. La fluctuation interannuelle de la profondeur maximale atteinte par le dégel est mise en évidence par la ligne pointillée rouge.

4.7.3.2 ÉVOLUTION FUTURE : PÉRIODE 2010-2050

4.7.3.2.1 CALIBRATION

Pour la piste de Kangirsuk, un modèle numérique a été construit pour reproduire le régime thermique au centre-piste au chaînage 0+895 m. Ce modèle a été paramétré à partir des informations stratigraphiques issues de l'excavation réalisée en 2005 par Allard et *al.*, (2007) en vue de l'installation du câble à thermistances KANGIR_HT-1. La stratigraphie utilisée dans le modèle est présentée au tableau 31. Les caractéristiques propres au till ont été déterminées à partir des analyses en laboratoire réalisées sur les échantillons prélevés au forage KANGIR_F2 situé en pied de remblai au chaînage 0+915 m. Le modèle a été calibré à partir des lectures du câble à thermistances KANGIR_HT-1 disponible pour une période qui s'étend de juin 2005 à octobre 2010.

Les épaisseurs de la couche active simulées par le modèle coïncident très bien avec celles estimées à partir des mesures thermiques enregistrées par le câble à thermistances KANGIR_HT-1. Le modèle tend à sous-estimer l'épaisseur de la couche active de moins de 3 %, ce qui, dans le pire des cas, se chiffre par une différence d'épaisseur de 6 cm tout au plus (Tableau 32).

Tableau 31: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol au centre-piste de la piste de Kangirsuk.

Chaînage 0+895 m (câble KANGIR_HT-1)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	
1,4 à 0,00	Remblai	2500	3380	200,8	380	0,05
0,00 à -3,30	Till	2236	3213	202,64	200,92	0,15
-3,30 à -9,00	Roc	2490	2490	146,9	146,9	0

Tableau 32: Épaisseurs de la couche active observées (KANGIR_HT-1) et simulées au centre-piste, aéroport de Kangirsuk.

Années	Observation (m)	Simulation (m)	Différence (m)	Différence (%)
2006	-2,23	-2,22	0,01	-0,58
2007	-2,08	-2,07	0,01	-0,56
2008	-2,21	-2,18	0,03	-1,34
2009	-1,92	-1,87	0,06	-2,89
2010	-2,29	-2,25	0,03	-1,42

4.7.3.2.2 PROJECTIONS ET TASSEMENTS À VENIR

Les résultats des exercices de modélisation suggèrent que d'ici 2050, l'épaisseur de la couche active au centre-piste atteindra une profondeur maximale de 2,25 m sous le scénario AEV et de 2,80 m sous AHA. Par rapport à l'épaisseur de la couche active mesurée au câble KANGIR_HT-1 en 2010, le scénario AEV va entraîner une diminution de la couche active de 4 cm tandis que sous AHA, celle-ci va augmenter de 51 cm. L'augmentation de la couche active proposée par le scénario AHA s'effectuera de façon relativement graduelle, mais marquée à l'occasion par de brusques remontées ou approfondissements du front de dégel.

En réponse au scénario AEV et AHA, le profil de température du sol en fonction de la profondeur restera relativement similaire à l'actuel dans les trois premiers mètres (Figure 96B). En raison de la longueur limitée du câble à thermistances KANGIR_HT-1, il est impossible d'évaluer l'amplitude des changements thermiques que ce scénario entraînera plus en profondeur. Toutefois, entre 2010 et 2050, pour le centre-piste, les températures moyennes dans le sol à 5 et 10 m de profondeur passeront respectivement de -5,35 à -4,36 °C et de -5,21 à -4,33 °C sous la projection AEV et de -3,78 à -2,36 °C et de -3,73 à -2,19 °C sous la projection AHA. D'après ces simulations, le profil de température du sol restera gelé (sous 0 °C) à partir de 3 m de profondeur malgré le réchauffement anticipé des températures moyennes du sol.

Jusqu'à tout récemment, la couverture de sables et graviers grossiers qui recouvre le till, d'une épaisseur généralement inférieure à 2 m, offrait une fondation stable pour la piste en raison de sa stabilité au dégel. Toutefois, l'apparition en bordure de la piste d'importantes dépressions suggère que le front de dégel pénètre désormais dans le till. Ces dépressions pourraient s'étendre graduellement au centre-piste à mesure que l'épaisseur de la couche active augmente en réponse à un réchauffement éventuel des températures de l'air. Les secteurs où le remblai ou la couche de sables et graviers est le plus mince se dégraderont en premier. Les sections de la piste où le cumul du remblai et de la couche de sable et gravier fait plus de 3 m d'épaisseur ou qui reposent directement sur une couche de dépôt de sables et graviers sur roc (Mb/R) devraient demeurer stable advenant une augmentation de l'épaisseur de la couche active telle que proposée par les projections. Les secteurs de la piste qui reposent directement sur le till, soit essentiellement dans la zone en déblai, continueront de se déformer. En réponse à l'augmentation de la couche active anticipée sous le scénario climatique AHA et en considérant un coefficient de consolidation du till approximatif de l'ordre de 10 à 15 %, des tassements de l'ordre de 5 à 8 cm devraient y apparaître d'ici 2050.

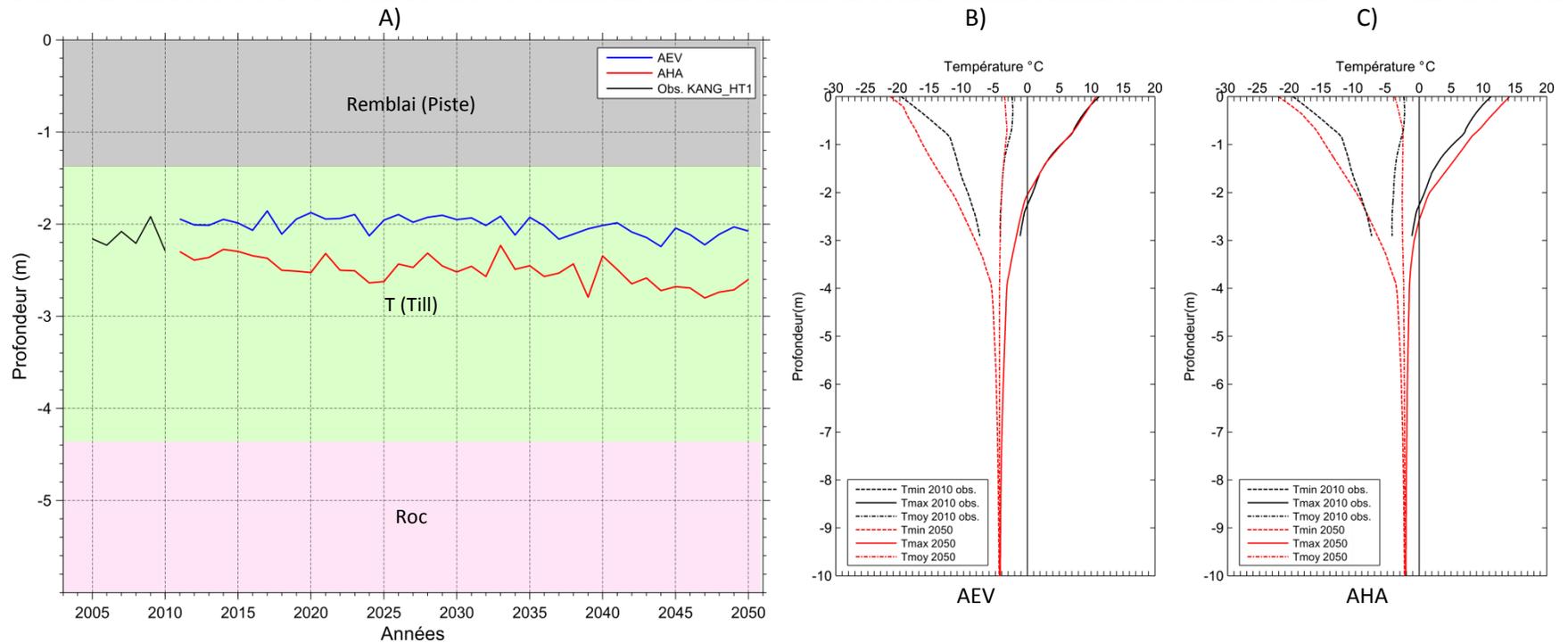


Figure 96: A) Projection de la variation de la profondeur du front de dégel au centre-piste pour la période 2011-2050, aéroport de Kangirsuk, chaînage 0+895 m (câble à thermistances KANGIR_HT-1). Profils des températures minimales, maximales et moyennes projetées pour le centre-piste selon les scénarios AEV (B) et AHA (C), aéroport de Kangirsuk, chaînage 0+895 m (KANGIR_HT-1).

4.7.4 STRATÉGIES D'ADAPTATION ENVISAGÉES

En raison de l'approfondissement de la couche active au centre-piste, des tassements dans la section en déblai sont à prévoir. Dans les secteurs où la couche de sable et de graviers pré littoraux n'a pas été enlevée avant la construction, son épaisseur d'environ 1 à 2 m offre une couche protectrice non gélive sous le remblai qui semble avoir préservé, jusqu'à tout récemment, la piste malgré l'augmentation considérable de l'épaisseur de la couche active depuis la construction. Toutefois, les signes de dégradation tels que les dépressions et fissures longitudinales actuellement visibles le long des accotements entre les chaînages 0+720 m et 0+820 m suggèrent que le front de dégel a atteint le till et que la fonte de celui-ci entraîne localement un basculement de l'épaulement. Graduellement, des dépressions d'ampleur similaires devraient survenir au centre-piste à mesure que le réchauffement des températures de l'air prédit par les scénarios climatiques favorise une pénétration du front de dégel à des profondeurs plus importantes. Néanmoins, en raison du coefficient de consolidation relativement faible du till (<15 %), les tassements anticipés devraient être d'ampleurs limitées et un rechargement régulier devrait assurer un fonctionnement sécuritaire de l'infrastructure.

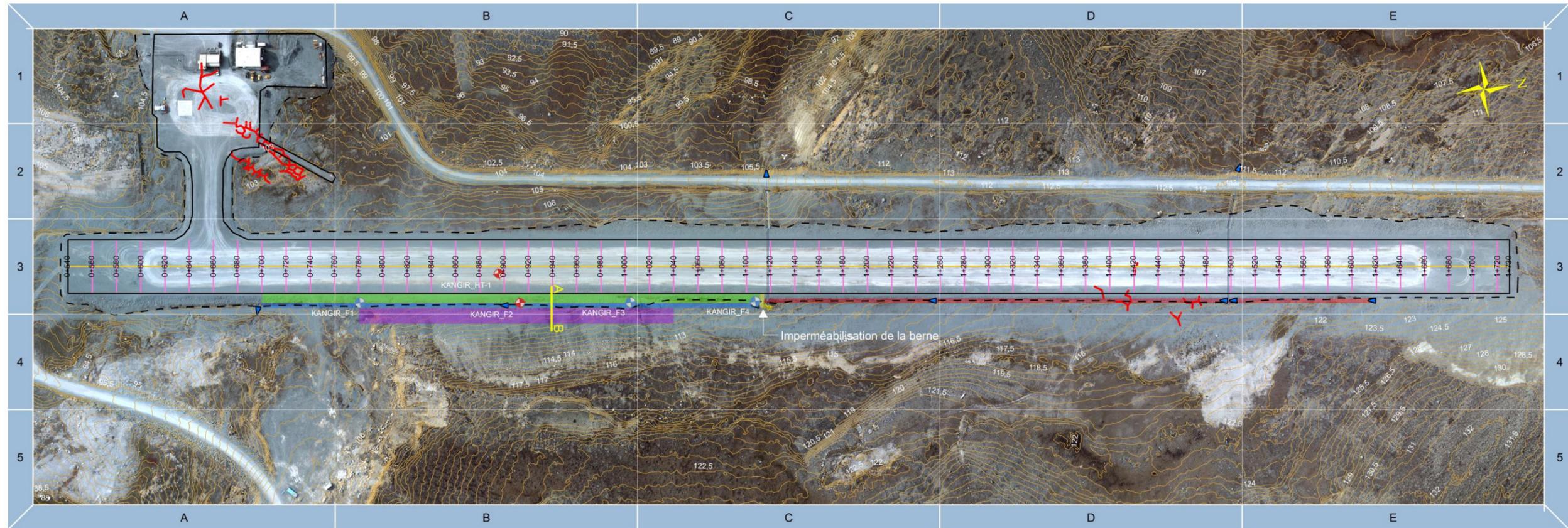
Il importe toutefois d'éviter tout risque de fonte accélérée du pergélisol induite par l'écoulement d'eau sous le remblai. Pour cause, les récentes déficiences recensées le long de la piste d'atterrissage semblent essentiellement provenir d'une dégradation localisée du pergélisol due à l'écoulement d'eau à travers le remblai. En effet, des problèmes de drainage ont été identifiés au chaînage 1+120 m à l'emplacement d'un ponceau qui traverse toute la largeur de la piste. Ce ponceau, placé perpendiculairement à la piste, permet au drainage des eaux de ruissellement provenant du versant est de s'écouler vers l'ouest de l'autre côté de la piste. Pour forcer le drainage à emprunter le ponceau, une berme à angle droit a été érigée. Cette berme n'est pas totalement efficace, car une partie de l'eau s'infiltré entre le ponceau et le remblai puis ressurgit 30 m plus au sud du même côté. L'apport de chaleur par cet écoulement d'eau localisé contribue à la dégradation du pergélisol sous l'accotement et a donné naissance à une dépression d'une quarantaine de mètres de longueur sur le côté est, entre le chaînage 1+075 m et 1+115 m. Plus au sud, dans la section en déblai, le fluage du versant côté est semble avoir déformé le profil du fossé ce qui limite sa capacité à drainer efficacement l'eau le long de l'infrastructure. C'est d'ailleurs dans ce secteur que des dépressions et des fissures de tension ont été observées. D'après les observations de terrain et l'emplacement des déficiences, l'existence d'un écoulement transversal à la piste apparaît peu probable, mais une investigation hydrogéologique plus approfondie permettrait de s'en assurer.

Afin de freiner la dégradation des accotements et éviter tout écoulement d'eau transversal éventuel dans le remblai, la stratégie d'adaptation proposée à la figure 97 se résume à :

- Procéder à l'imperméabilisation de la berme (chaînage 1+120 m) qui segmente le drainage sur le côté est et qui permet à l'eau d'emprunter le ponceau et de s'écouler de l'autre côté de la piste. L'imperméabilisation du fossé devra se faire sur quelques mètres (20 m) afin de favoriser l'écoulement d'eau dans le ponceau. Une géomembrane devra couvrir le fond du fossé et la pente du remblai jusqu'à 0,5 m du sommet afin de minimiser l'apport d'eau dans la piste. L'adoucissement de l'angle de la berme serait à privilégier afin de rediriger l'écoulement d'eau vers le ponceau.
- Procéder au reprofilage par comblement du fossé de drainage côté est entre les chaînages 1+120 m et 1+620 m.
- Éloigner l'eau de surface du pied de remblai côté est dans la section en aval du ponceau entre les chaînages 0+700 m et 1+110 m. L'utilisation d'un remblai à pente adoucie (6 :1) avec fossés de

drainage peu profonds permettrait d'éloigner le drainage de la zone vitale de l'infrastructure (centre-piste) et également de minimiser l'accumulation de neige en pied de remblai.

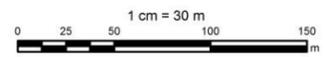
- Procéder à la stabilisation du versant opposé à la piste dans la zone en déblai entre les chaînages 0+780 m et 1+040 m. Il est suggéré d'excaver le matériel sur environ 0,5 m de profondeur, d'y déposer un géotextile et d'ajouter un empierrement sur une épaisseur d'environ 50 cm. La largeur de la zone à excaver reste à déterminer afin d'assurer une stabilisation adéquate du versant. Le till excavé pourrait servir de matériau de remblayage pour tapisser la pente du remblai actuel qui devra être adoucie.



Stratégie d'adaptation, aéroport de Kangirsuk.

Infrastructures et instrumentation

- Forages géotechniques avec câble à thermistances
- Forages géotechniques
- Centre piste
- Chaînage transversal
- Courbe de niveau (50 cm)
- Sillons de coins de glace
- Limite de la surface profilée
- Position du pied de remblai
- Ponceau



Modifications proposées

- Sens de l'écoulement des fossés de drainage
- Remblai à pente adoucie (6:1)
- Nouveau fossé de drainage peu profond
- Stabilisation du versant
- Imperméabilisation de la berne
- Reprofilage des fossés de drainage existants par comblement

Réalisation: E. L'Héroult, M. Allard et G. Doré, septembre 2011, Centre d'études nordiques, Université Laval.
Système de référence: NAD83 ; Projection: MTM zone 10



Remblai à pente adoucie (6:1) avec stabilisation du versant opposé, chaînage 0+940 m

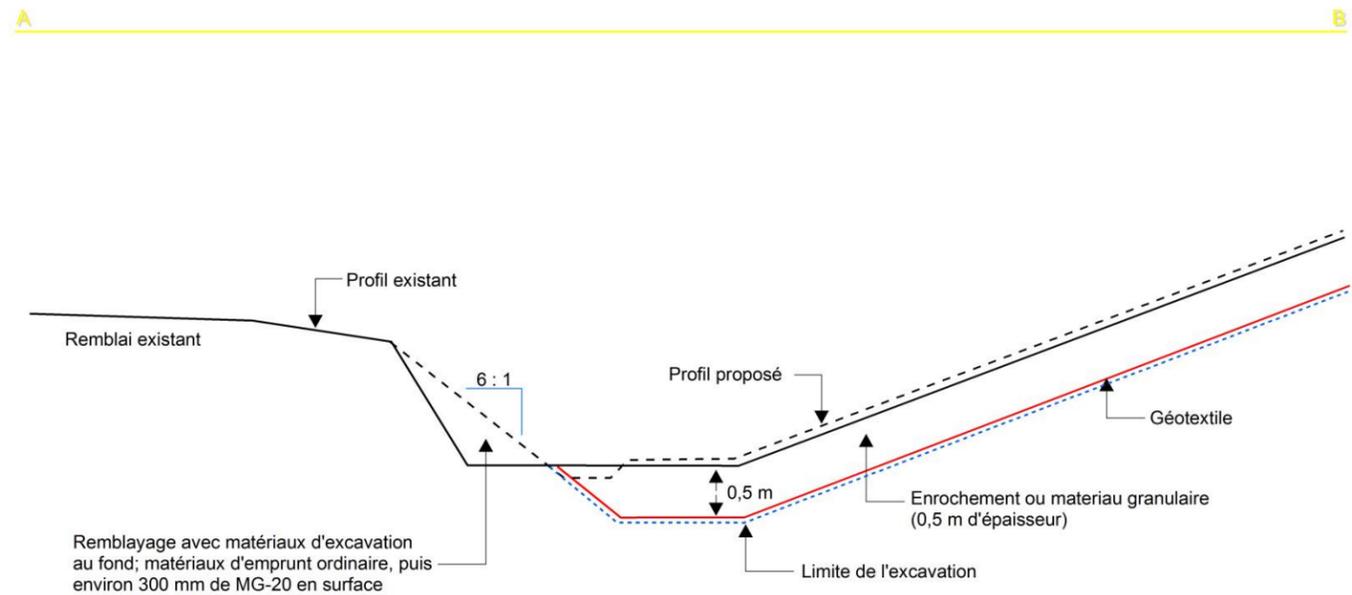


Figure 97: Plan d'adaptation proposé pour la piste de Kangirsuk.

4.8 TASIUJAQ

4.8.1 OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET SYNTHÈSE DES DÉFECTUOSITÉS

Achevé en 1990, l'aéroport de Tasiujaq est situé dans la zone de pergélisol continu sur la rive ouest de la rivière Bérard, sur une de ses terrasses fluviales dont l'altitude est d'environ 30 m au-dessus du niveau actuel de la mer. La surface de cette terrasse est recouverte par endroits d'un placage de dépôts fluviaux et d'alluvions anciens (Allard et *al.*, 2007). La piste d'atterrissage, orientée dans un axe nord-est sud-ouest, possède une longueur totale de 1190 m du chaînage 4+940 m au chaînage 6+130 m et une largeur de 44 m. Une des particularités de la piste de Tasiujaq est qu'elle traverse, entre les chaînages 5+820 m et 5+865 m, un ancien méandre abandonné qui forme un petit lac peu profond. Le drainage naturel de ce lac s'effectue principalement par un ruisseau qui coule le long du côté ouest de la piste en direction nord.

La piste d'atterrissage de Tasiujaq présente plusieurs tassements différentiels répartis sur sa longueur. Cependant, ceux-ci affectent davantage son accotement est et sont contenus essentiellement entre les feux de bordure et le haut du remblai (Beaulac et Doré, 2006), fait confirmé par les relevés effectués par le personnel du MTQ en 2005 qui recensent plusieurs dépressions et fissures sur le côté est de la piste ainsi qu'à son extrémité sud du côté ouest. En 2004, d'importants tassements étaient observables à proximité de la voie de circulation, entre les chaînages 5+100 et 5+140 m, et des fissures de tension accompagnaient ces dépressions qui pouvaient atteindre jusqu'à 50 cm de profondeur par rapport à la surface originale (Figure 98A et B) (Allard et *al.*, 2007). C'est d'ailleurs dans cette section de la piste que des planches d'essais ont été érigées par le groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval (GRINCH) afin d'expérimenter diverses méthodes de protection contre la dégradation du pergélisol (Figure 98C et D).

En 2007, la piste a été rechargée et nivelée. Au cours de ces travaux, les dépressions recensées lors des travaux d'Allard et *al.*, (2007) et lors des relevés effectués par le personnel du MTQ ont été comblées. Les pentes ont également été adoucies afin de minimiser l'enneigement. Depuis, quelques signes de dégradation sont réapparus avec une ampleur moindre, tels que des fissures et tassements localisés en marge de l'infrastructure. Un exemple de ces signes de dégradation est l'effondrement de l'épaulement du remblai sur le côté est de l'infrastructure. Cet effondrement entraîne une rupture de pente marquée par d'importantes fissures latérales dans l'axe de la piste (Figure 98F).

En 2010 est apparue une dépression transversale associée probablement à un écoulement traversant latéralement le remblai de la piste (Figure 99A). De telles infiltrations porteuses de chaleur seront susceptibles de se reproduire ailleurs à mesure que les mares d'eau déjà existantes s'agrandiront et submergeront la base du remblai. À court terme c'est le principal danger qui menace la piste.



Figure 98: Importante dépression (A) et fissures longitudinales (B) telles qu'observées en 2004 sur le côté est de la piste entre les chaînages 5+100 et 5+140 m (Allard et *al.*, 2007). C) Planches d'essais de diverses méthodes de protection contre la dégradation du pergélisol. D) Accumulation d'eau au pied du remblai côté est au mois de juillet 2009. E) Géométrie de la pente des remblais côté ouest après les travaux d'adoucissement. F) Rupture de l'angle de la pente côté est telle qu'observée en 2009.

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

La piste de Tasiusaq repose entièrement sur une séquence de couches de dépôts meubles d'origine marine mises en place au cours de l'Holocène. L'épaisseur de ces dépôts est supérieure à 25 m, soit la profondeur maximale atteinte lors des forages géotechniques réalisés en 2009 en bordure de la piste. Au total, quatre (4) forages ont été réalisés en pied de remblai dont l'emplacement exact est présenté à la figure 99B et les caractéristiques résumées au tableau 33.

En surface, on retrouve essentiellement une couverture de sédiments fluviatiles d'une épaisseur inégale comprise entre 1 et 2 m (Ax). Clairement visible sur la photographie aérienne avant construction (Figure 99A), ce dépôt se caractérise par une alternance de chenaux évasés peu profonds et de barres alluviales basses et plates. Dans les chenaux évasés, déprimés et souvent mal drainés, l'horizon organique de surface fait de 5 à 30 cm d'épaisseur et varie en fonction de la microtopographie. À l'inverse, les barres alluviales (Axb), caractérisées par une forme légèrement bombée, sont généralement bien drainées et composées de sédiments sablo-graveleux stratifiés pauvres en glace. Dans son ensemble, ce dépôt d'origine fluviatile repose sur des sédiments intertidaux (Ax/Mi).

Les sédiments intertidaux (Mi), non visibles en surface, ont été rencontrés dans chacun des forages réalisés en 2009. La répartition des forages de part et d'autre de la piste ainsi que sur toute sa longueur confirme l'occurrence de ces sédiments sous l'ensemble de l'infrastructure. Cette couche de sédiments fut également identifiée sur les profils de géoradar permettant ainsi d'en évaluer la profondeur entre les emplacements de forage. De manière générale, ce dépôt se retrouve à une profondeur inférieure à 2 m sous la surface ou de la base du remblai (Figure 99C). Entre les chaînages 5+070 m et 5+100 m, la profondeur de ce dépôt est inférieure à 1 m. Pour cause, avant la construction de la piste, le secteur était caractérisé par la présence d'une petite butte sableuse d'environ 2 m de hauteur et 30 m de diamètre (Allard et al., 1994). Un sondage réalisé en son cœur a révélé la présence en surface de 1,75 m de sable très grossier sur un dépôt plus fin constitué de sable et silt cimenté par une glace interstitielle avec une teneur en eau entre 11 et 21 %. Le contact stratigraphique entre les deux matériaux correspondait également à l'interface de la couche active et du pergélisol. Le sommet de la butte a été arasé d'environ 1,8 m puis recouvert d'un isolant thermique en polystyrène avant d'y déposer le remblai. Ce dépôt de sable et silt ainsi observé s'apparente aux sédiments intertidaux retrouvés ailleurs sous la piste et qui sont recouverts en surface par une couche de sable et gravier fluviatile.

D'une épaisseur qui varie entre 1,6 (TAS_F4) et 6 m (TAS_F1), les sédiments intertidaux se présentent sous forme d'un diamicton avec aucune stratification apparente et présence de poches noirâtres (matières organiques enfouies) et de fragments de coquillages. La composition granulométrique se résume à un mélange de sable et de silt (USCS : SM) avec un peu de gravier. La proportion de gravier, sable et silt est en moyenne de 9, 56 et 35 % respectivement, mais la proportion de particules fines (silt et argile) peut atteindre jusqu'à 50 %. Avec une limite de liquidité moyenne de 17 % et un indice de plasticité inférieure à 4, les particules fines sont non plastiques. Dans la section pergélisolée, la structure de la glace se présente essentiellement sous forme interstitielle avec quelques lentilles de glace millimétriques localisées (Figure 100A) qui totalisent une teneur en eau d'environ 20 %. À l'occasion, la distribution des lentilles de glace se densifie et elles deviennent faiblement espacées (< 1 cm) (Figure 100B). C'est dans ces sections, généralement entre 2 et 4 m de profondeur, que la teneur en eau augmente et peut atteindre près de 27 %. D'après Allard et al. (2007), l'eau 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. Au total, cinq essais de consolidation ont été réalisés sur ce type de dépôt. Le coefficient de consolidation mesuré est en moyenne compris entre 10 et 15 %, mais peut atteindre jusqu'à 20 et 23 % sous des contraintes de 100 et 200 kPa respectivement (Tableau 34). Ce sont dans les sections à forte densité de lentilles de glace et, en

l'occurrence, là où les teneurs en eau sont les plus élevées que les plus hauts taux de consolidation ont été mesurés. À l'inverse, lorsque la teneur en eau tombe sous la barre des 17 %, le taux de consolidation diminue pour atteindre des valeurs inférieures à 10 %.

Plus en profondeur, la proportion de sable et gravier augmente graduellement au détriment des particules fines. Il s'agit d'une transition graduelle entre l'unité de sable silteux intertidal (Mi) avec l'unité de sédiments pré littoraux (Mb) sous-jacente (Figure 100C). Cette dernière se caractérise par une granulométrie très grossière se résumant en un sable grossier et gravier avec fragments de coquillages et quelques cailloux décimétriques (Figure 100D). La proportion moyenne de gravier, sable et particules fines (silt et argile) est de 57, 41 et 2 % respectivement. Cette unité est très pauvre en glace; cette dernière s'y présente essentiellement sous forme interstitielle et représente des teneurs en eau pondérale inférieure à 16 % et en moyenne autour de 9 %. Un essai de consolidation réalisé dans une section plus sableuse de cette unité (TAS_F2_522_533) a permis d'évaluer le taux de consolidation à moins de 6 % (Tableau 34).

Sous cette unité de sable et gravier, on retrouve une quatrième unité d'origine glaciomarine composée de sédiments fins d'eau profonde massifs et grisâtres (MGa) (Figure 99C). Ce dépôt repose à des profondeurs qui varient entre 9,7 m (TAS_F2) et 13 m (TAS_F1) sous la surface, soit pratiquement au niveau du lit actuel de la rivière Bérard. D'après les informations de forage, son épaisseur peut atteindre plus de 7 m (TAS_F1 et TAS_F2). La composition granulométrique de ce dépôt consiste en un mélange de sables et de particules fines (silts et argiles) dont les proportions moyennes sont de 34 % et 65 % respectivement avec moins de 1 % de graviers. La proportion de particules fines peut atteindre à certaines profondeurs près de 98 % et leur comportement s'apparente à celui d'une argile inorganique de faible plasticité (USCS : CL ou SC-CL). Ce dépôt présente un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées parfois entrecoupé par des lentilles de glace horizontales et subverticales centimétriques espacées (Figure 100E). La teneur en eau moyenne est de 33 % avec des valeurs maximales pouvant atteindre près de 50 %. Deux essais de consolidation ont été réalisés sur ce type de sédiment. L'un sur un échantillon caractérisé par un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées peu développé et l'autre par un réseau bien développé avec également la présence d'une lentille de glace pluricentimétrique. Le taux de consolidation obtenu est inférieur à 13 % dans le premier cas et d'environ 23 % dans le second (Tableau 34). Dans cette unité, les taux de consolidation vont varier considérablement en fonction de la densité du réseau (faible ou élevé) et la morphologie des lentilles de glace (millimétrique ou centimétrique), mais devraient être d'au moins 10 % dans les sections plus pauvres en glace.

La dernière unité, rencontrée exclusivement au forage TAS_F3, se retrouve au-delà de 17 m de profondeur sous l'unité 4 (MGa). Elle se présente comme un dépôt de sable fin à moyen silteux grisâtre très compact entrecoupé de quelques couches minces de silt argileux. Ce dépôt consiste en un sable silteux (USCS : SM), c'est-à-dire un mélange composé en moyenne de 73 % de sable et de 27 % de silt. La glace s'organise principalement sous forme interstitielle, mais parfois sous forme de lentilles centimétriques subhorizontales localisées exclusivement dans les couches plus silteuses (Figure 100F). Sa teneur en eau est d'environ 27 % en moyenne. Malheureusement, aucun essai de consolidation n'a été réalisé sur ce type de sédiment, toutefois, en raison de sa profondeur, celui-ci ne devrait pas représenter de problèmes immédiats pour la stabilité de la piste.

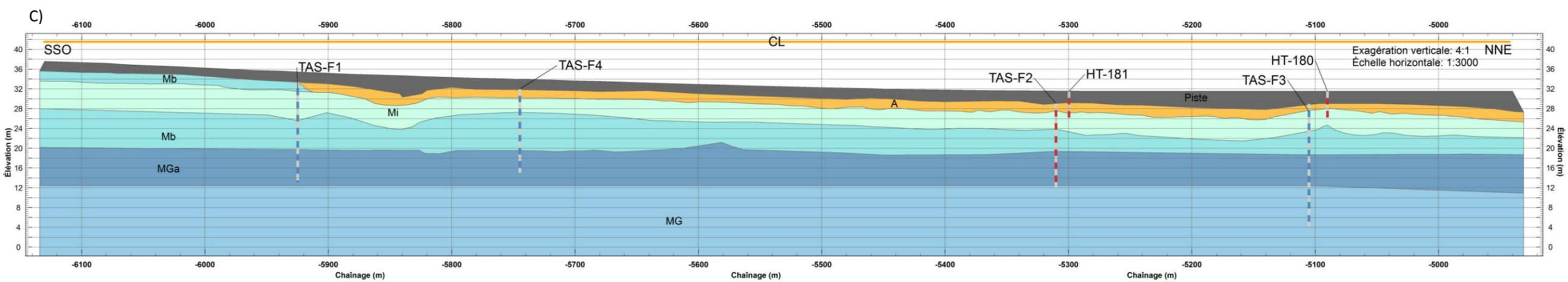
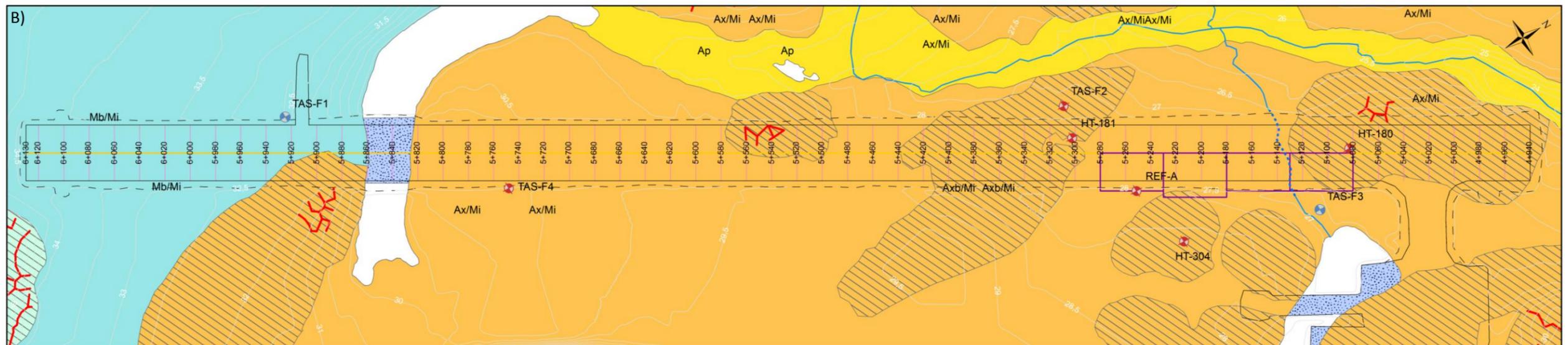
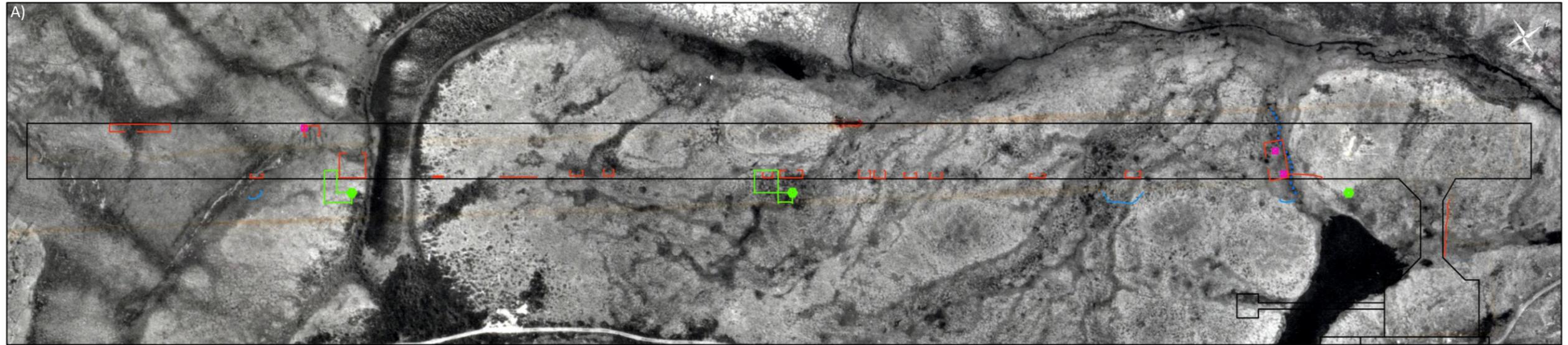


Figure 99 : Planche synthèse de la piste de Tasiujaq.

Dépôts de surface

Sédiments alluviaux

- Ap
ALLUVIONS ACTUELLES: Sable, silt sableux, sable graveleux et gravier en couverture mince, contenant fréquemment de la matière organique; généralement marquées par des levées et barres alluviales actives.
- Ax/Mi
ALLUVIONS DES TERRASSES FLUVIATILES ANCIENNES: Sable moyen à grossier avec gravier centimétrique et un peu de silt en couverture relativement mince (moins de 2 m d'épaisseur); surface caractérisée par des barres alluviales et quelques fentes de gel; cette couche repose sur des sédiments intertidaux.
- Axb/Mi
BARRES ALLUVIALES: Buttes profilées basses et plates d'origine fluviales caractérisées par des sédiments grossiers; présence fréquente de fentes de gel en surface; repose sur des sédiments intertidaux.

Sédiments marins

- Mb
SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX: Sable avec traces de silt, quelques graviers et fragments de coquillages; d'une épaisseur supérieure à 1 m; mis en place en eau peu profonde lors de la phase plénumarine et lors de l'exondation.
- Mb/Mi
SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR SÉDIMENTS INTERTIDUAUX: Sable avec traces de silt, quelques graviers et fragments de coquillages; d'une épaisseur supérieure à 1 m; surface marquée par des fentes de gel; reposent sur des sédiments intertidaux.
- Mi
SÉDIMENTS INTERTIDUAUX: Sable et silt avec traces de graviers et fragments de coquillages; contient des poches de matières organiques, des fragments de coquillages; mis en place en zone intertidale ou infratidale dans des baies ou bras de mer abrités; contient de la glace interstitielle et des lentilles de glace; surface marquée par des buttes intertidales et quelques fentes de gel.
- Mib
BUTTES INTERTIDALES: Buttes basses et plates caractérisées par des sédiments grossiers; présence fréquente de fentes de gel en surface.

Sédiments glaciomarins

- MGa
SÉDIMENTS MARINS D'EAU PROFONDE: Dépôt massif grisâtre à granulométrie fine composé de silt et d'argile; mis en place principalement par décantation durant la phase d'inondation glaciomarine; présence de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées à l'occasion par des lentilles de glace horizontales centimétriques.
- MG
SÉDIMENTS GLACIOMARINS NON DIFFÉRENCIÉS: Sable et sable silteux stratifié.

Anthropique

- Rb
ANTHROPIQUE: Remblai.

Hydrographie

- Ruisseaux
- Écoulement d'eau probable sous la piste
- Zone d'accumulation d'eau en bordure de piste
- Lacs drainés lors de la mise en place de l'infrastructure
- Plans d'eau

Formes de terrain

- Affleurement rocheux isolé
- Fentes de gel

Forages

- Forages géotechniques instrumentés avec un câble à thermistances
- Forages géotechniques avec récupération
- Courbe de niveau (50 cm)

Infrastructures

- Routes
- Centre-piste
- Chainage transversal
- Limite de la surface profilée
- Limite du pied de remblai
- Bâtiments
- Planches expérimentales

Identification des défauts

- Fissuration
- Accumulation d'eau en bordure de piste
- Dépressions
- Mesures d'enneigement effectuées sur une base annuelle
- Plaque de tassement

Tableau 33 : Caractéristiques générales des forages réalisés en bordure de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.

Nom du forage	Localisation par rapport au chaînage existant	Profondeur atteinte
TAS_F1	Côté ouest, chaînage 5+925 m à 2 m du pied du remblai.	20,30 m
TAS_F2	Côté ouest, chaînage 5+310 m à 10 m du pied du remblai. Le forage a été réalisé à 7 m au sud de la station d'enregistrement du câble HT-181.	19,08 m
TAS_F3	Côté est, chaînage 5+105 m à 16 m du pied du remblai.	25,20 m
TAS_F4	Côté est, chaînage 5+745 m à 2 m du pied du remblai.	16,95 m

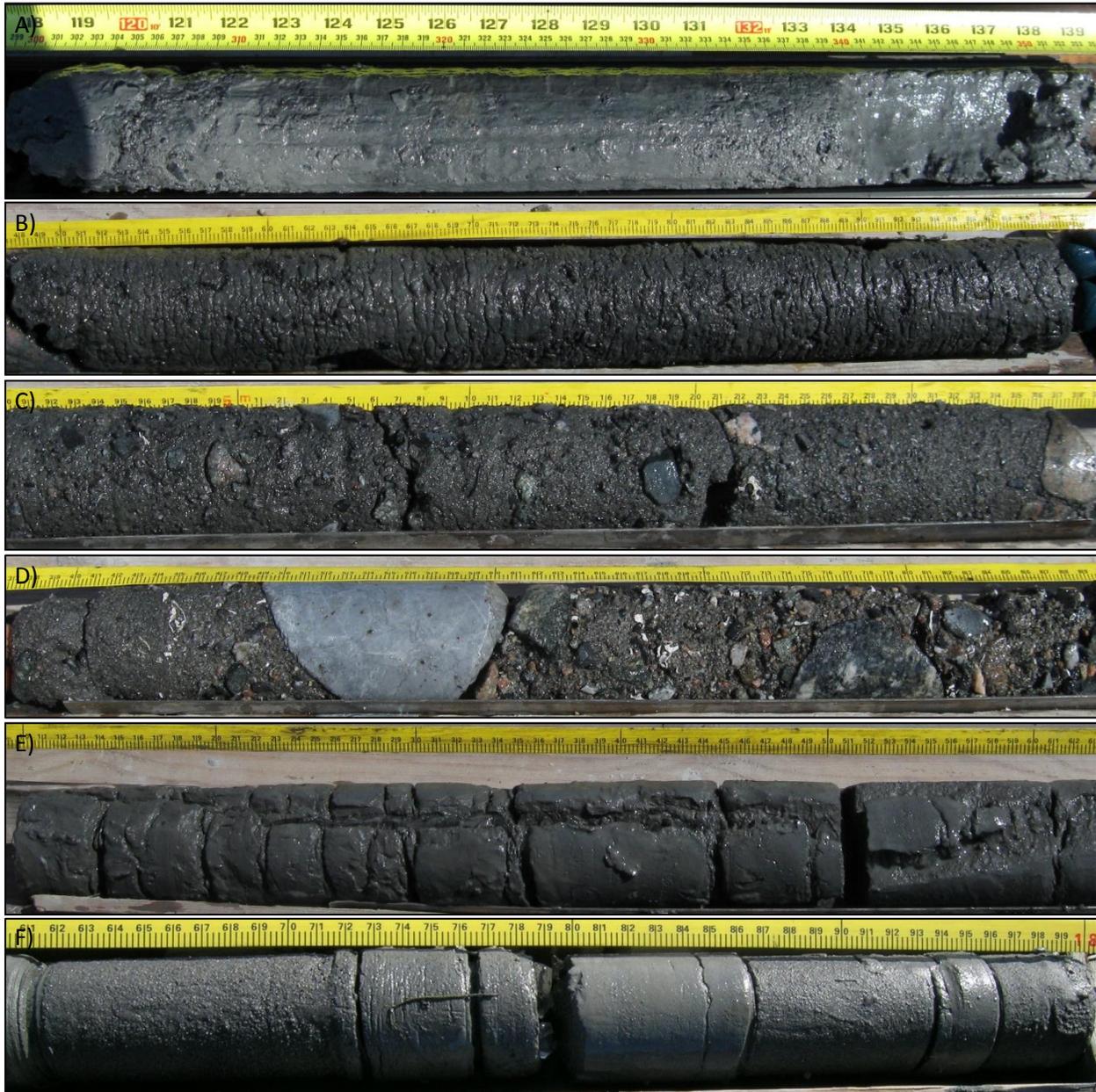


Figure 100 : A) Unité 2 : sédiments intertidaux diamictiques (Mi) grisâtres composés de sable et silt avec trace de gravier échantillonnés au forage TAS_F1 entre 3 et 3,54 m de profondeur. B) Sédiments intertidaux diamictiques (Mi) avec de nombreuses lentilles de glace millimétriques échantillonnés au forage TAS_F2 entre 2,48 et 3 m de profondeur. C) Transition graduelle entre les sédiments intertidaux diamictiques (unité 2) et le dépôt de sable grossier et de gravier avec fragments de coquillages (Unité 3). D) Unité 3 : dépôt de sable et gravier grossier (Mb) avec fragments de coquillages et glace interstitielle. E) Unité 4 : sédiments fins d'eau profonde grisâtres et massifs (MGa) avec réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées par des lentilles de glace centimétriques horizontales et subverticales. F) Unité 5 : sable fin à moyen silteux grisâtre (MG) très compact entrecoupé de quelques couches minces de silt argileux.

Tableau 34: Sommaire des résultats des essais de consolidation réalisés à l'aéroport de Tasiujaq.

Nom de l'échantillon	Unité stratigraphique	Profondeur		Teneur en eau	Indice des vides (e0)	Contrainte (kPa)	Indice des vides (ef)	Taux de consolidation
		Sommet	Base					
TAS_F1_310_323	Unité 2: Mi	-3,10	-3,23	23,26%	0,717	100	0,511	11,98%
						150	0,498	12,75%
						200	0,483	13,62%
TAS_F1_643_658	Unité 2: Mi	-6,43	-6,58	15,99%	0,528	100	0,434	6,16%
						200	0,400	8,42%
TAS_F2_252_261	Unité 2: Mi	-2,52	-2,61	27,01%	0,896	100	0,511	20,29%
						200	0,461	22,95%
TAS_F3_321_333	Unité 2: Mi	-3,21	-3,33	25,55%	0,856	100	0,603	13,62%
						150	0,581	14,83%
						200	0,558	16,03%
TAS_F3_375_385	Unité 2: Mi	-3,75	-3,85	23,30%	0,824	100	0,758	3,61%
						200	0,732	5,04%
TAS_F2_522_533	Unité 3: Mb	-5,22	-5,33	16,53%	0,640	100	0,555	5,19%
						200	0,541	6,03%
TAS_F2_1675_1690	Unité 4: MGa	-16,75	-16,90	34,24%	1,091	100	0,616	22,72%
TAS_F2_1697_1706	Unité 4: MGa	-16,97	-17,06	29,14%	0,861	100	0,656	11,03%
						200	0,622	12,85%

4.8.1 CONDITIONS THERMIQUES DU PERGÉLISOL

4.8.1.1 ÉVOLUTION RÉCENTE : PÉRIODE 1990-2010

Trois câbles à thermistances ont été installés dans l'enceinte de l'aéroport lors de sa construction. L'un est situé dans le milieu naturel à une quarantaine de mètres de la piste (HT-304). Un autre atteint 5 m de profondeur et est situé au chaînage 5+300 (HT-181) et le dernier est situé au chaînage 5+090 dans la section en déblai à l'emplacement de l'ancienne butte (HT-180). Récemment, un câble a été installé en 2007 dans la pente du talus côté est au chaînage 5+250 m afin de fournir un site de référence (REF-A) pour l'évaluation des méthodes de mitigation contre la fonte du pergélisol (Lemelin et *al.*, 2008). Les emplacements exacts des câbles sont présentés à la figure 99B. L'analyse thermique de ces différents câbles, par leur emplacement stratégique aux abords et sous l'infrastructure, permet une comparaison du régime thermique du pergélisol en milieu naturel, en pied de remblai et au centre-piste.

En milieu naturel (HT-304), la couche active, d'une épaisseur de 1,52 m en 1993, a atteint une épaisseur maximale de 2,51 m en 2009, ce qui représente une augmentation d'environ 1 m, soit près de 65 % (Tableau 35). Le suivi thermique des trois années après la construction démontre que le dégel est relativement stable sous l'infrastructure et ne dépasse pas l'ancienne couche active à l'exception de la zone en déblai où le dégel a pénétré sur les 50 premiers centimètres du pergélisol sans toutefois générer de tassement en raison du faible volume de glace dans le sol impliqué (Allard et *al.*, 1994). Dans la section de la piste en déblai et dont la base du remblai a été isolée (câble HT-180), l'épaisseur de la couche active est passée de 2,53 à 3,08 m entre 1989 et 2010. Ceci correspond à une augmentation de l'épaisseur de la couche active d'environ 55 cm, soit de 22 % par rapport à l'année de référence qui est 1989 (Tableau 35). Pour la même période, la couche active dans la section de la piste non isolée (câble HT-181) est passée d'une épaisseur de 3,13 à 3,63 m, soit une augmentation d'une cinquantaine de centimètres (16 %) 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 2010 a augmenté de manière similaire entre les deux sections de piste instrumentées (section isolée et section non isolée). Initialement plus épaisse, l'épaisseur de la couche active dans la section de la piste non isolée montre une plus grande variabilité interannuelle. Cette variabilité découle probablement de l'absence d'isolant qui n'entrave pas l'échange thermique entre le remblai et le sol sous-jacent, mais également par la présence de matériaux aux propriétés

thermiques différentes à la base du remblai. En effet, la section non isolée a été construite directement sur la couche de sable et gravier alluvial (Ax) qui, dans la section isolée, avait été excavée complètement jusqu'à la couche de sable fin silteux intertidal (Mi).

Le câble dans le talus de la piste (REF-A), initialement installé à titre de câble de référence, témoigne de la sensibilité des accotements et pied de remblai face aux facteurs environnements locaux (enneigement et accumulation d'eau). Au mois de septembre 2007, la présence d'eau sous le remblai a compliqué la réalisation du forage qui fut remplacé par une excavation de 5 m de profondeur afin de permettre l'installation du câble (Figure 101A). En raison de la configuration du secteur, la section de référence se trouve dans un chenal évasé circonscrit de part et d'autre par deux bombements topographiques (barres alluviales) et dont la pente s'incline vers la piste. Cette situation favorise l'accumulation d'eau en pied de remblai dont l'influence thermique entraîne des conditions plus chaudes (Figure 101B). La comparaison du régime thermique mesuré dans le talus du remblai (REF-A) avec celui mesuré au centre-piste (câble HT-181) (Figure 101C et D) permet de faire ressortir des différences significatives entre les conditions thermiques rencontrées en périphérie et celles observées au centre de l'infrastructure. Par exemple, outre la profondeur de dégel qui est plus importante, l'effet d'une importante masse d'eau en pied de remblai réchauffe graduellement le profil thermique du sol par l'apport de chaleur latente qui retarde le refroidissement et le regel de la couche active à l'hiver. Le regel est d'autant plus retardé par la présence d'importantes accumulations de neige qui isolent la surface du sol des froides températures de l'air hivernales. À la figure 101C, l'isotherme de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pénètre désormais difficilement dans le sol, ce qui témoigne d'un réchauffement des températures du sol en hiver qui s'accroît d'année en année. L'hiver légèrement plus doux de 2010 ne peut en expliquer la cause, ce qui confirme l'influence conjointe de la chaleur latente par l'eau et l'isolement par la neige dans ce réchauffement. Fait intéressant, il apparaît également y avoir un apport latéral de chaleur entre 1,5 et 3 mètres de profondeur, ce qui correspond à l'interface base du remblai/surface naturelle. Cet apport de chaleur se confirme graphiquement par la présence de poches de chaleur isolées de la surface à des profondeurs bien localisées (voir carrés noirs à figure 101C). L'hypothèse actuelle est que lors de la fonte de la neige, l'eau s'infiltrerait graduellement dans le remblai et dans le sol naturel sous-jacent apportant ainsi une quantité importante de chaleur latente favorisant un dégel par convection plutôt que par conduction. D'après les mesures de températures du sol au câble REF-A, l'épaisseur de la couche active est au-delà de 5 m de profondeur, soit la profondeur de la dernière thermistance. À cette profondeur, le sol ne gèle que vers la fin décembre et ses températures demeurent comprises entre 0 et $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tableau 35: Épaisseurs maximales de la couche active à l'emplacement des différents câbles à thermistances ou puits de forages au cours de la période 1992-2010, aéroport d'Akulivik.

Années	HT-180 Centre-piste (section isolée)			HT-181 Centre-piste (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	253,00	n.a	n.a	313,00	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1990	253,00	0,00	0,00	289,00	-24,00	-7,67	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1991	256,00	3,00	1,19	304,00	15,00	5,19	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	255,88	-0,12	-0,05	n.d	n.a	n.a	152,30*	n.a	n.a	152,30	n.a	n.a
1994	251,48	-4,39	-1,72	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	159,03	6,73	4,42
1995	256,76	5,28	2,10	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	170,07	11,04	6,94
1996	262,81	6,04	2,35	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	174,68	4,61	2,71
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	261,35	-1,46	-0,56	326,93	22,93	7,54	n.d	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a
1999	261,37	0,02	0,01	323,59	-3,34	-1,02	n.d	n.a	n.a	184,53	9,85	5,64
2000	267,38	6,00	2,30	330,43	6,83	2,11	n.d	n.a	n.a	187,15	2,62	1,42
2001	269,11	1,74	0,65	334,68	4,25	1,29	n.d	n.a	n.a	194,70	7,56	4,04
2002	n.d	n.a	n.a	331,24	-3,44	-1,03	n.d	n.a	n.a	185,52	-9,19	-4,72
2003	275,67	6,56	2,44	342,97	11,73	3,54	n.d	n.a	n.a	193,76	8,25	4,45
2004	280,33	4,65	1,69	322,10	-20,87	-6,08	n.d	n.a	n.a	191,00	-2,76	-1,43
2005	288,04	7,71	2,75	340,73	18,63	5,78	n.d	n.a	n.a	207,61	16,61	8,70
2006	296,29	8,26	2,87	350,97	10,23	3,00	n.d	n.a	n.a	223,84	16,23	7,82
2007	297,81	1,52	0,51	332,57	-18,40	-5,24	>313**	>161,00	>106,00	210,14	-13,69	-6,12
2008	300,79	2,97	1,00	351,54	18,97	5,70	>313**	n.a	n.a	223,13	12,99	6,18
2009	297,32	-3,46	-1,15	316,22	-35,32	-10,05	>313**	n.a	n.a	251,00	27,87	12,49
2010	308,03	10,71	3,60	363,05	46,83	14,81	>313**	n.a	n.a	238,83	-12,17	-4,85
Total:		55,03	21,75		50,05	15,99		>161,00	>106,00		98,70	64,80

*Épaisseur de la couche active observée dans le milieu naturel HT-232.

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

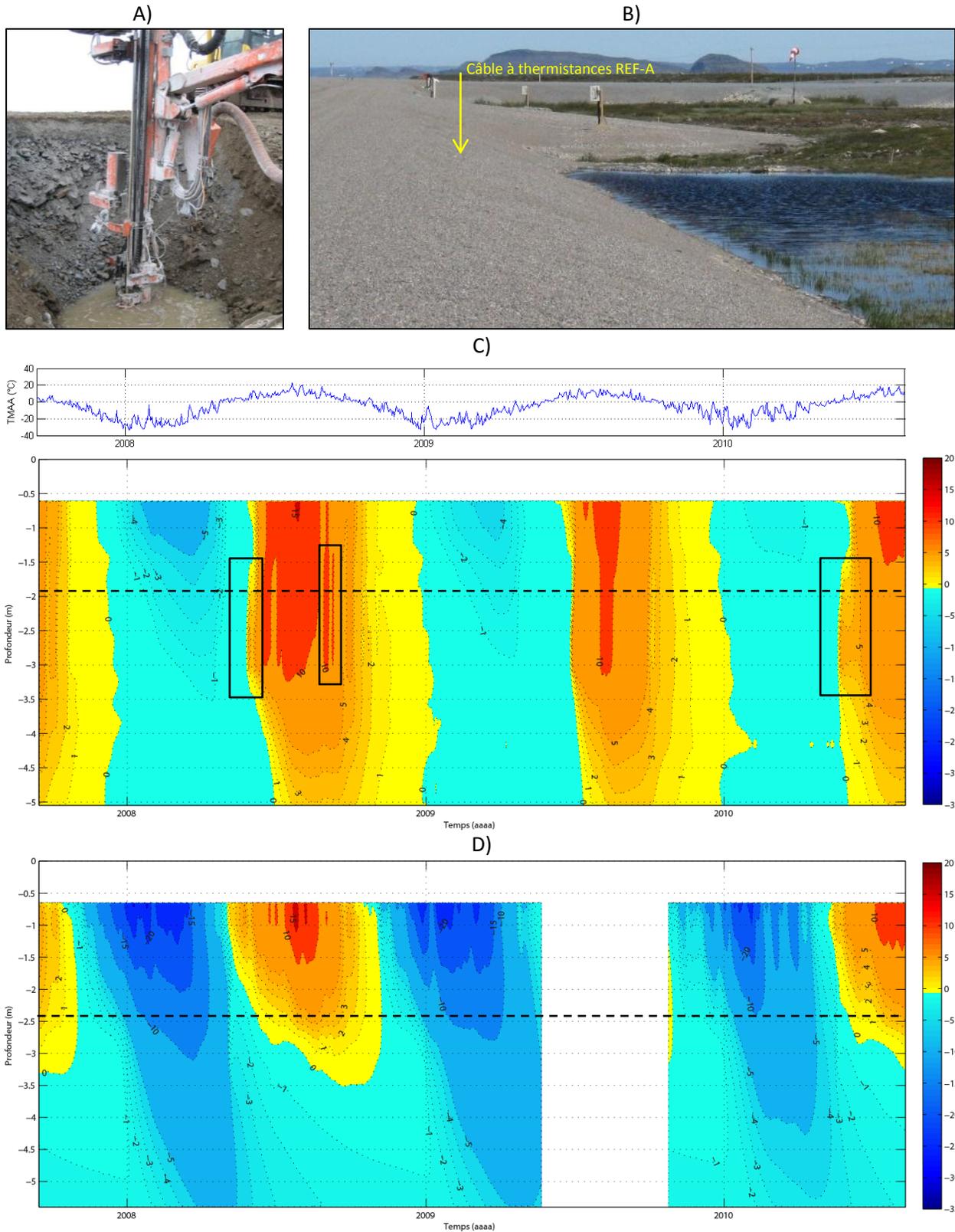


Figure 101: A) Tentative de forage lors de l'instrumentation de la section de référence (tirée de Lemelin et *al.*, 2008). B) Accumulation d'eau au pied de la section de référence au mois de juillet 2009. Température du sol journalière en fonction de la profondeur et du temps (septembre 2007 à octobre 2010) pour C) la section de référence et D) le centre-piste (câble HT-181). Le contact entre le remblai et le terrain naturel est illustré par la ligne pointillée.

4.8.1.1.1 CALIBRATION

La section type qui a servi à élaborer les modèles numériques construits pour reproduire le régime thermique en pied de remblai et au centre-piste se situent au chaînage 5+300 m. Les paramètres stratigraphiques et géotechniques intégrés aux modèles sont basés sur les informations qui proviennent du forage TAS_F2 (Allard *et al.*, 2009) et les plans originaux « tels que construit » (Tableau 36). En pied de remblai, un facteur-n a été appliqué aux températures de l'air pour simuler l'influence thermique du couvert de neige au cours de la saison hivernale. L'épaisseur du couvert nival atteint fréquemment plus de 1,7 m en pied de remblai, comme en témoignent les photos prises au mois d'avril 2005 (Figure 102A et B).



Figure 102: Couverture de neige à l'extrémité nord de la piste côté ouest (A) et à l'extrémité sud de la piste côté ouest (B). (Tirée de Savard, 2006) (Photos : Frédéric Vinet, 2005).

Une fois construit, le modèle pour le centre-piste a été calibré à partir des lectures du câble à thermistances HT-181. Pour la période de calibration, les résultats de simulation pour le centre-piste montrent que le modèle tend, de manière générale, à sous-estimer légèrement l'épaisseur réelle de la couche active (Tableau 37). La différence entre les profondeurs maximales de dégel observées et simulées est généralement inférieure à 11 cm, soit moins de 3 %. Malheureusement, en raison de l'absence de câble à thermistances à proximité, le modèle en pied de remblai n'a pu être validé et calibré. Par conséquent, les résultats issus des exercices de modélisation en pied de remblai devront être considérés avec prudence.

Tableau 36: Propriétés physiques programmées pour les simulations numériques du régime thermique du pergélisol au centre-piste de la piste de Tasiujaq.

Chaînage 5+300, centre-piste (câble HT-181 et le forage TAS_F2)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	
2,45 à 0,00	Remblai	2000	2500	364,8	370,4	0,03
0,00 à -1,45	Sable moyen à grossier	1631	2971	340	230	0,2
-1,45 à -5,20	Sable moyen silteux	2212	2965	248	243	0,15
-5,20 à -9,7	Sable grossier et gravier	1631	2636	250	171	0,1
9,7 à -27	Silts et argiles	1937	3378	286	202	0,35
Chaînage 5+300, pied de remblai (forage TAS_F2)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m ³ /°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m ³ /m ³)
		Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	
0,00 à -1,45	Sable moyen à grossier	1631	2971	340	230	0,2
-1,45 à -5,20	Sable moyen silteux	2212	2965	248	243	0,15
-5,20 à -9,7	Sable grossier et gravier	1631	2636	250	171	0,1
9,7 à -27	Silts et argiles	1937	3378	286	202	0,35

Tableau 37: Épaisseurs de la couche active observées (HT-181) et simulées au centre-piste, aéroport de Tasiujaq.

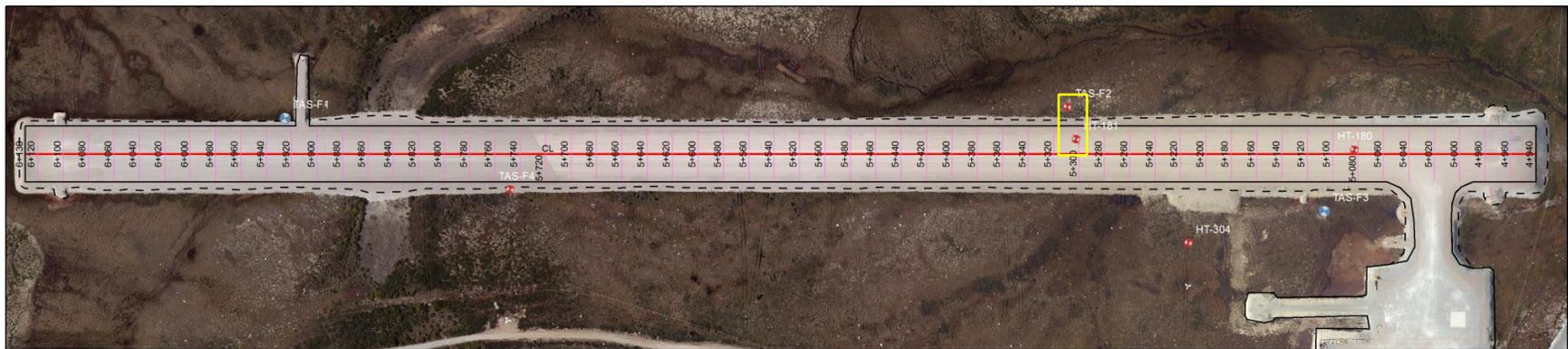
Années	Observation (m)	Simulation (m)	Différence (m)	Différence (%)
2006	-3,51	-3,57	-0,06	-1,73
2007	-3,33	-3,28	0,05	1,37
2008	-3,52	-3,41	0,11	3,11
2009	-3,18	-3,08	0,10	3,06
2010	-3,63	-3,60	0,03	0,85

4.8.1.1.2 PROJECTIONS ET TASSEMENTS À VENIR

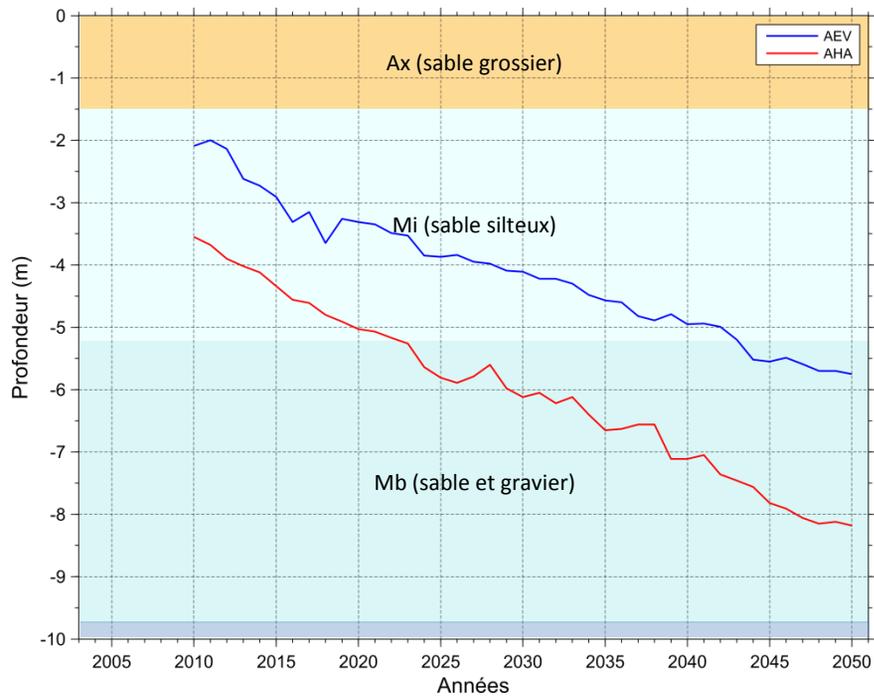
D'après les exercices de simulations numériques, le front de dégel en pied de remblai va atteindre une profondeur maximale de 5,75 m sous la projection AEV et de 8,15 m sous la projection AHA, soit une augmentation de 3,75 m et 4,60 m respectivement par rapport à sa position initiale au début de la période de projection (2010). Sous les deux projections, le front de dégel va continuer sa progression en profondeur à un rythme soutenu (Figure 103A). Il est important de noter que les deux exercices de projections en pied de remblai considèrent exactement les mêmes épaisseurs de neige. L'influence de la neige favorise donc, indépendamment des températures de l'air proposées par les deux scénarios climatiques, un réchauffement croissant du sol en pied de remblai. Présentement, d'après les exercices de simulations, le front de dégel se trouve à l'intérieur de la couche de sédiments intertidaux (sable silteux) sensible au dégel (Figure 103A). Malheureusement, l'absence de câble en pied de remblai à l'emplacement de la section de la piste modélisée ne permet pas d'évaluer la position actuelle du front de dégel. Malgré cela, nos exercices de simulation prévoient un dégel complet de cette couche d'ici 2050, et ce, sous les deux scénarios climatiques proposés (AEV et AHA). Avec un coefficient de consolidation estimé entre 10 et 15 %, le dégel de cette couche de sol sensible pourrait entraîner, tout dépendant de l'épaisseur de sol qui reste à dégeler et qui est malheureusement non déterminée, des tassements atteignant 50 centimètres dans l'accotement. Selon la tendance du réchauffement à long terme, les tassements devraient s'échelonner jusqu'en 2023 sous AHA et jusqu'en 2043 sous AEV, années où le dégel complet de la couche de sol sensible est anticipé. Dans certains secteurs, là où d'importantes accumulations de neige et d'eau sont présentes, le dégel peut atteindre des profondeurs plus importantes que celles projetées par les exercices de modélisations. Par exemple, dans la pente du talus, les données thermiques enregistrées par le câble REF-A suggèrent que le front de dégel, sous le talus du remblai, pénètre de plus de 3 m dans le sol sous la piste. C'est dans ces secteurs que la dégradation du pergélisol est la plus avancée et où les défauts sont marquants (Figure 99A).

Au centre-piste, le front de dégel devrait atteindre d'ici 2050 une profondeur maximale de 4,02 et 4,58 m sous les scénarios AEV et AHA respectivement. Ainsi, par rapport à l'épaisseur de la couche active mesurée dans la piste en 2010 par le câble HT-181 ($\approx 3,63$ m) (Tableau 35), un épaissement de la couche active compris entre 0,39 et 0,95 m est anticipé. Avec la projection AEV, la couche active devrait rester dans la couche de sable grossier (alluvions) pauvre en glace et ainsi entraîner que peu de tassements (Figure 103B). À l'inverse, sous la projection AHA, le front de dégel qui est déjà situé dans la couche de sable silteux (sédiments intertidaux), devrait progresser d'une soixantaine de centimètres supplémentaires. Avec un coefficient de consolidation estimé entre 10 et 15 %, ce dégel supplémentaire de la couche de sable silteux entraînerait des tassements assez limités estimés entre 6 et 9 cm. Ces tassements pourraient devenir plus importants aux endroits sujets à un écoulement d'eau sous le remblai qui favorisent la fonte accélérée du pergélisol par transfert de chaleur par convection.

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 intertidaux, que le dégel de la couche active atteigne des profondeurs plus importantes que celles proposées par les exercices de modélisation (figure 103A et B).



A)



B)

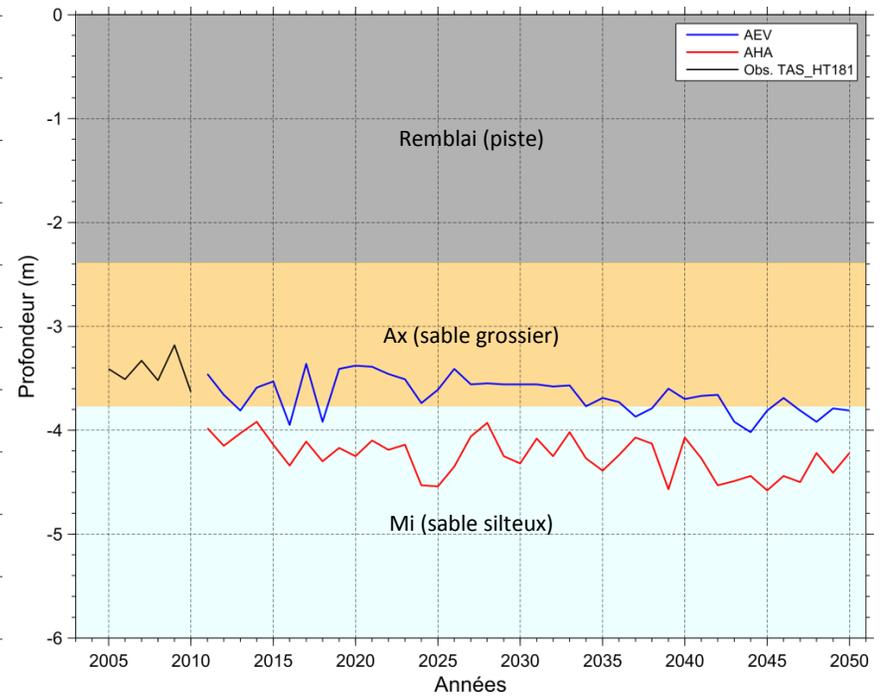


Figure 103: Projections de la variation de la profondeur du front de dégel en pied de remblai (A) et au c entre-piste (B) pour la période 2011-2050, aéroport de Tasiujaq, chaînage 5+300 m.

4.8.2 STRATÉGIES D'ADAPTATION ENVISAGÉES

Les signes de dégradations localisés en marge de l'infrastructure, tels que les fissures et tassements recensés sur le côté est du remblai, confirment que le pergélisol sous les accotements est fortement dégradé. Cette dégradation accélérée du pergélisol découle principalement des importantes accumulations de neige en pied de remblai qui ont pour effet d'isoler le sol et de maintenir sa température en surface près de 0 °C au cours de la période hivernale. En été, cette dégradation est d'autant plus favorisée par l'accumulation d'eau en pied de remblai causée par le mauvais drainage des secteurs nouvellement déprimés suite au tassement du pergélisol dégelé. La combinaison de l'enneigement et du drainage contribue ainsi à maintenir les températures du sol plus chaudes ce qui entraîne indubitablement une modification du régime thermique du pergélisol vers des conditions de fonte. Depuis les travaux de rechargement réalisés en 2007, certaines déficiences sont réapparues et attestent que le processus de dégradation est toujours actif. Les mesures thermiques et l'information provenant des forages révèlent que l'épaisseur de la couche active dans le talus du remblai peut atteindre à l'occasion plus de 5 mètres. À ces endroits, les sédiments intertidaux sensibles au dégel sont presque complètement dégelés, ce qui pourrait expliquer l'envergure des tassements qui sont survenus dans certains secteurs depuis la construction de la piste. Récemment, une dépression transversale à la piste associée probablement à un écoulement d'eau sous le remblai est apparue. De telles infiltrations porteuses de chaleur seront susceptibles de se reproduire ailleurs à mesure que les mares d'eau déjà existantes s'agrandiront et inonderont la base du remblai. À court terme, c'est le principal danger qui menace la piste.

Pour le centre-piste, les lectures thermiques récentes montrent que la couche active, à l'exception des zones en déblai où le remblai est mince et le pergélisol plus près de la surface, se limite encore au remblai ou dans l'ancienne couche-active d'avant la construction. À long terme, d'après les résultats des simulations numériques, l'épaisseur de la couche active augmentera de 0,50 à 0,60 m d'ici 2050. Le front de dégel progressera graduellement à l'intérieur des sédiments intertidaux pergélisolés dont l'épaisseur varie entre 3,5 et 7,5 m. La fonte partielle de cette couche de sédiments, en raison de son coefficient de consolidation d'environ 10 à 15 %, va entraîner des tassements localisés et d'ampleur limitée qui nécessiteront un rechargement périodique.

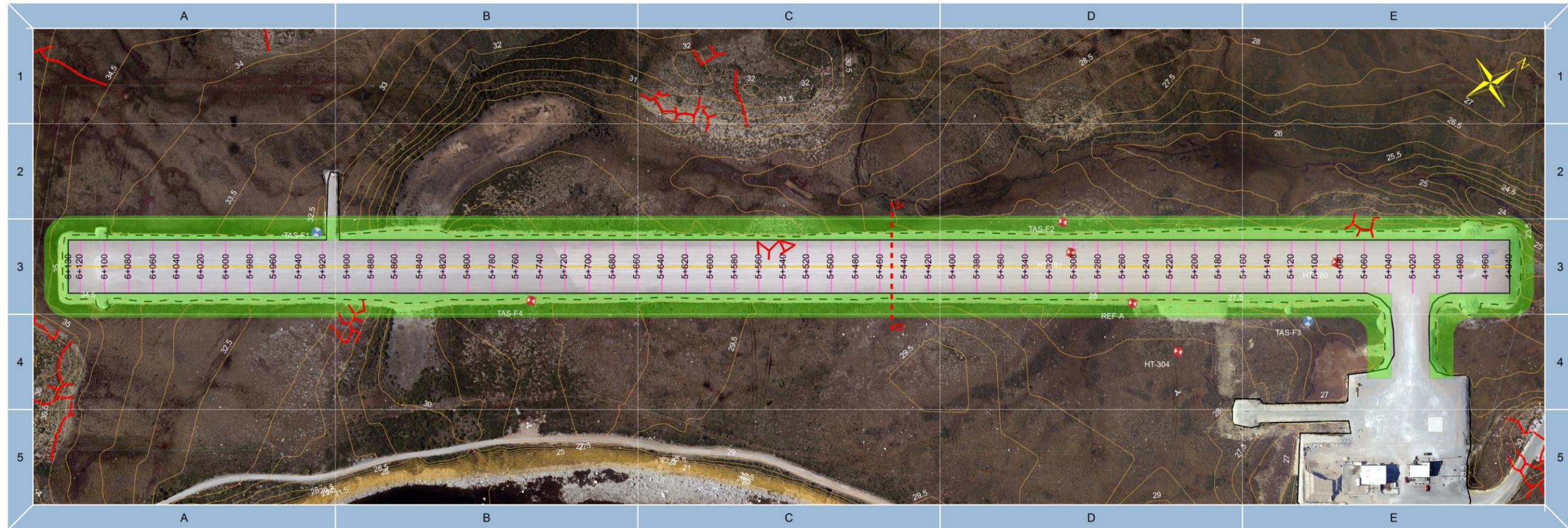
Afin de freiner la dégradation des accotements et éviter tout écoulement d'eau transversal éventuel dans le remblai, la stratégie d'adaptation proposée à la figure 104 se résume à :

- À court terme, par une intensification de l'entretien par le rechargement des dépressions. Prévoir une quantité suffisante de concassé disponible dans la réserve ainsi que la disponibilité d'une niveleuse sur une base régulière.
- À moyen terme, par l'installation de clôtures à neige afin de minimiser les accumulations de neige en bordure des remblais. Une telle approche demande une étude préalable élaborée de l'enneigement en fonction de la topographie environnante, des précipitations et du vent.
- À long terme et selon l'efficacité des clôtures à neige, par la mise en place de remblai à pente adoucie (6 :1 ou 7 :1) pour l'ensemble de la piste. D'après les résultats des planches d'essais, cette méthode s'avère efficace pour restaurer le pergélisol en pied de remblai et sous les accotements. Comme des tassements sont anticipés sur toute la superficie de la piste dans le futur, une analyse coûts-bénéfices est nécessaire afin d'évaluer toutes les options d'adaptations potentielles, incluant la relocalisation de l'infrastructure.

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 en zones perturbées (pied de remblai) et d'évaluer, au besoin, l'efficacité à long terme des méthodes de mitigation mises en place.

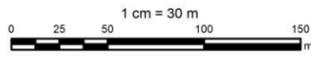
- Instrumenter avec des câbles à thermistances le pied de remblai à plusieurs endroits. Ces câbles pourraient servir de sections témoins pour les planches d'essais déjà en place. De plus, ils permettraient d'évaluer ultérieurement l'efficacité de la méthode de mitigation mise en place.
- Réaliser des relevés au MASW afin d'avoir le profil des sols dégelés le long de transects partant du centre-piste vers le pied de remblai et le terrain naturel. Refaire les relevés aux mêmes endroits quelques années après la mise en place de la méthode de mitigation afin d'évaluer l'état de restauration thermique des pieds de remblai.
- Il est également recommandé d'instrumenter le câble Tas-F4 afin de valider la présence probable d'un talik dans le secteur.



Stratégie d'adaptation, aéroport de Tasiujaq.

Infrastructures et instrumentation

- Forages géotechniques avec câble à thermistances
- Forages géotechniques
- Centre piste
- Chaînage transversal
- Courbe de niveau (50 cm)
- Sillons de coins de glace
- Limite de la surface profilée
- Position du pied de remblai



Modifications proposées

- Remblai à pente adoucie (6:1 ou 7:1)

Réalisation: E. L'Héroult, M. Allard et G. Doré, septembre 2011, Centre d'études nordiques, Université Laval.
Système de référence: NAD83 ; Projection: MTM zone 10

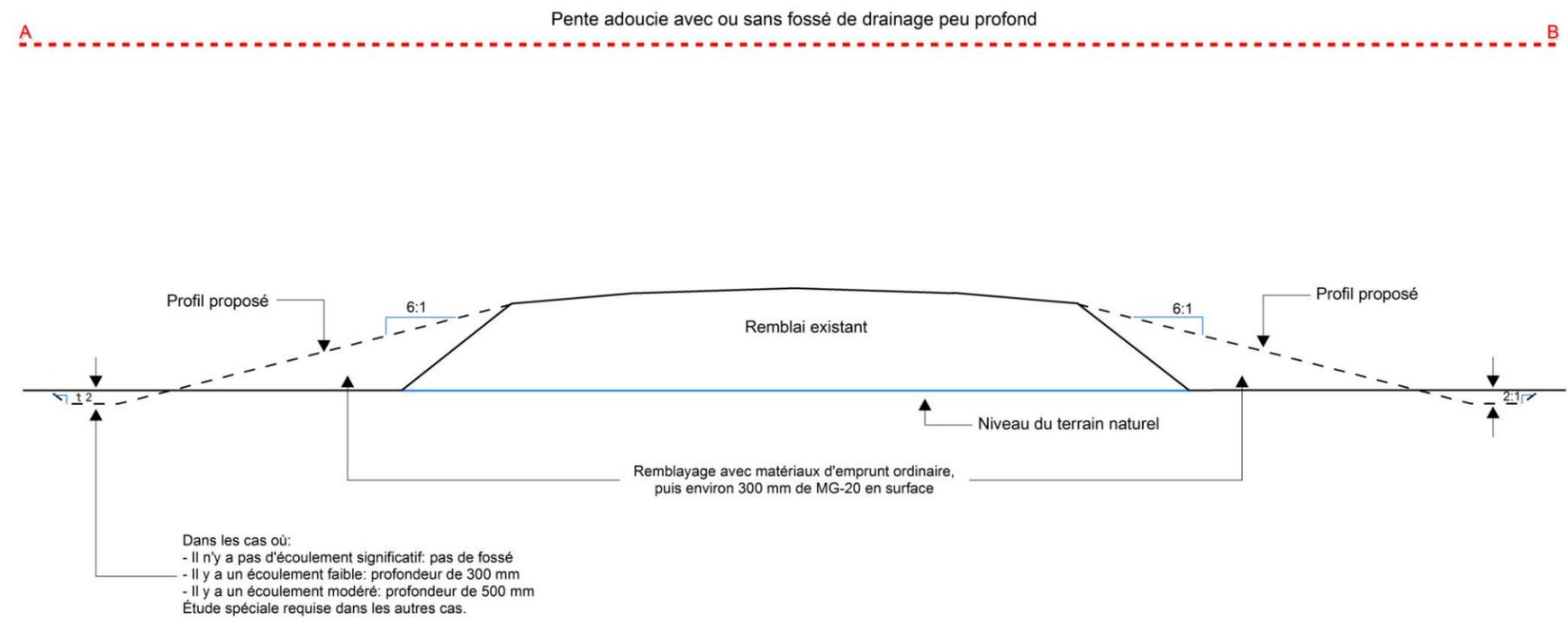


Figure 104 : Plan d'adaptation proposé pour la piste de Tasiujaq.

5 SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet, chacune des pistes d'atterrissage a fait l'objet d'une analyse approfondie des conditions du pergélisol par une cartographie détaillée des dépôts de surface et une auscultation géotechnique par forages (stratigraphie, types et épaisseur des dépôts et profondeur du roc). Les analyses en laboratoire ont permis de préciser le comportement au dégel des différents dépôts et de délimiter les portions de pistes disposées sur des sols susceptibles aux tassements en raison du dégel du pergélisol. Les travaux de modélisation numérique entrepris dans cette étude avaient pour objectif général de simuler le régime thermique sous et en périphérie des pistes d'atterrissage et routes 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.). Les modèles géothermiques ont été alimentés par deux sorties de projections de la température moyenne annuelle de l'air disponibles par pistes (sorties AEV et AHA du MRCC version 4.2.3). Ces sorties du MRCC ont été sélectionnées, car elles représentent approximativement les deux extrêmes climatiques projetés pour la période 2011-2050. C'est à partir de ces projections de changements dans le régime thermique, plus spécifiquement ceux liés à la position de l'isotherme 0 °C, que les estimations de tassements à anticiper suite au dégel du pergélisol ont été réalisées. L'évaluation des tassements, par la complexité et la variabilité de ses composantes (répartition et épaisseurs des dépôts meubles, caractéristiques géotechniques et conditions de pergélisol associées, variabilité et validité des projections climatiques locales), demeure une estimation et doit faire l'objet d'un regard très critique dans la planification des entretiens à venir. Il est important de mentionner que la réaction du pergélisol en réponse aux changements climatiques se produit à des vitesses qui diffèrent d'un site à l'autre en raison de la variabilité dans le temps et l'espace des propriétés thermiques et des conditions environnementales locales. Il est donc nécessaire de considérer avec prudence les résultats des exercices de modélisation numérique présentés dans ce rapport malgré leur grande cohérence avec les températures du pergélisol mesurées *in situ* par les câbles à thermistances lors des calibrations. Néanmoins, ces exercices permettent de comprendre et d'évaluer les réactions thermiques potentielles des sols dans des contextes climatiques changeants, mais somme toute imprévisibles. Les exercices de simulation ont également permis, par l'utilisation de modèles numériques bidimensionnels le long de profils transversaux stratégiquement localisés, de reproduire les impacts thermiques sur le pergélisol causés par les accumulations de neige et la formation de nappes d'eau contre les remblais.

Les nombreux exercices de modélisation numériques réalisés, lesquels ne reproduisent que les transferts de chaleur par conduction, proposent que le dégel, en réponse aux différents scénarios climatiques proposés, va effectivement pénétrer plus en profondeur sous et en périphérie des pistes. La partie centrale des pistes, dégagée de toute couverture de neige durant l'hiver, se caractérise par un régime thermique influencé presque exclusivement par les températures de l'air. Par conséquent, les températures de surface et dans le sol en hiver sont généralement plus froides et l'épaisseur de la couche active en été y est moins importante qu'en pied de remblai. Par l'absence de facteurs contributifs à la fonte du pergélisol tels que les accumulations de neige et d'eau, la progression du front de dégel sera synchrone et proportionnelle aux réchauffements des températures de l'air que connaîtra le Nunavik dans le futur, si aucun autre apport de chaleur par convection (arrivée d'eau) ne vient empirer la situation. Ainsi, aux sections des pistes construites sur sols sensibles au dégel, les tassements au centre-piste seront graduels et débiteront d'abord dans les zones en déblai où le remblai est plus mince et où le pergélisol est moins profond. Les tassements anticipés aux centres-pistes devraient être d'ampleurs limitées et souvent, un simple rechargement régulier devrait assurer un fonctionnement sécuritaire de l'infrastructure.

Les pieds de remblai, quant à eux, sont généralement recouverts d'une couverture de neige qui isole la surface du sol des conditions atmosphériques hivernales. Dans ce cas, les températures de surface mesurées sont généralement plus élevées que celles de l'air, ce qui favorise des conditions plus chaudes dans le sol et ultimement une profondeur de dégel plus importante. À l'occasion, l'épaisseur de neige où l'accumulation d'eau est telle que le sol ne parvient pas à regeler complètement au cours de l'hiver ce qui crée une zone non gelée (talik). Cette zone non gelée continue à transmettre de la chaleur au pergélisol sous-jacent et avoisinant au cours de l'hiver ce qui favorise une dégradation même lorsque les températures de l'air sont sous le point de congélation. Ce dégel soutenu, qui s'effectue à un rythme constant et de façon assez linéaire, permet d'expliquer l'épaisseur importante de la couche non gelée observée au pied des remblais lors de la campagne de forage de 2008-2009. Cette situation thermique précaire des pieds de remblai, engendrée par la modification des facteurs environnementaux locaux tels que l'enneigement et le drainage par la simple présence de l'infrastructure, est à l'origine même de la majorité des signes de dégradation recensés le long des pistes. En effet, les accumulations de neige et le mauvais drainage conduisent à la rétention d'eau en pied de remblai et dans les fossés. Éventuellement l'eau pénètre sous la piste et la chaleur qu'elle véhicule provoque des fontes localisées sous les accotements. Ce sont ces fontes localisées et le tassement du pergélisol associé qui entraînent le basculement des épaulements et l'apparition de dépressions et de fissures longitudinales dans les accotements. Une fois le processus de dégradation enclenché, le milieu se transforme et favorise une rétroaction positive. Par exemple, après la construction d'une piste, la distribution de la neige se trouve modifiée, les importantes accumulations de neige en pied de remblai isolent le sol des températures froides hivernales ce qui a pour conséquence de réchauffer le pergélisol. Il s'en suit habituellement un approfondissement de la couche active qui, suite au tassement dont l'ampleur dépendra du coefficient de consolidation, donnera naissance à une dépression. Cette dépression favorisera l'accumulation d'eau au courant de l'été qui, par son apport de chaleur latente, retardera le regel de la couche active à l'hiver. L'hiver suivant, la dépression favorisera une accumulation plus importante de neige dont l'effet isolant se retrouvera bonifié en fonction du gain d'épaisseur de la couverture nivale. Au printemps, lors de la fonte de la neige, l'eau restera piégée à l'intérieur de la dépression. Par son faible albédo, l'eau captera ainsi plus de rayonnement solaire que la surface végétalisée d'origine ce qui favorisera le réchauffement de la surface et du sol et ainsi de suite. Ce phénomène de rétroaction positive est synthétisé à la figure 105.

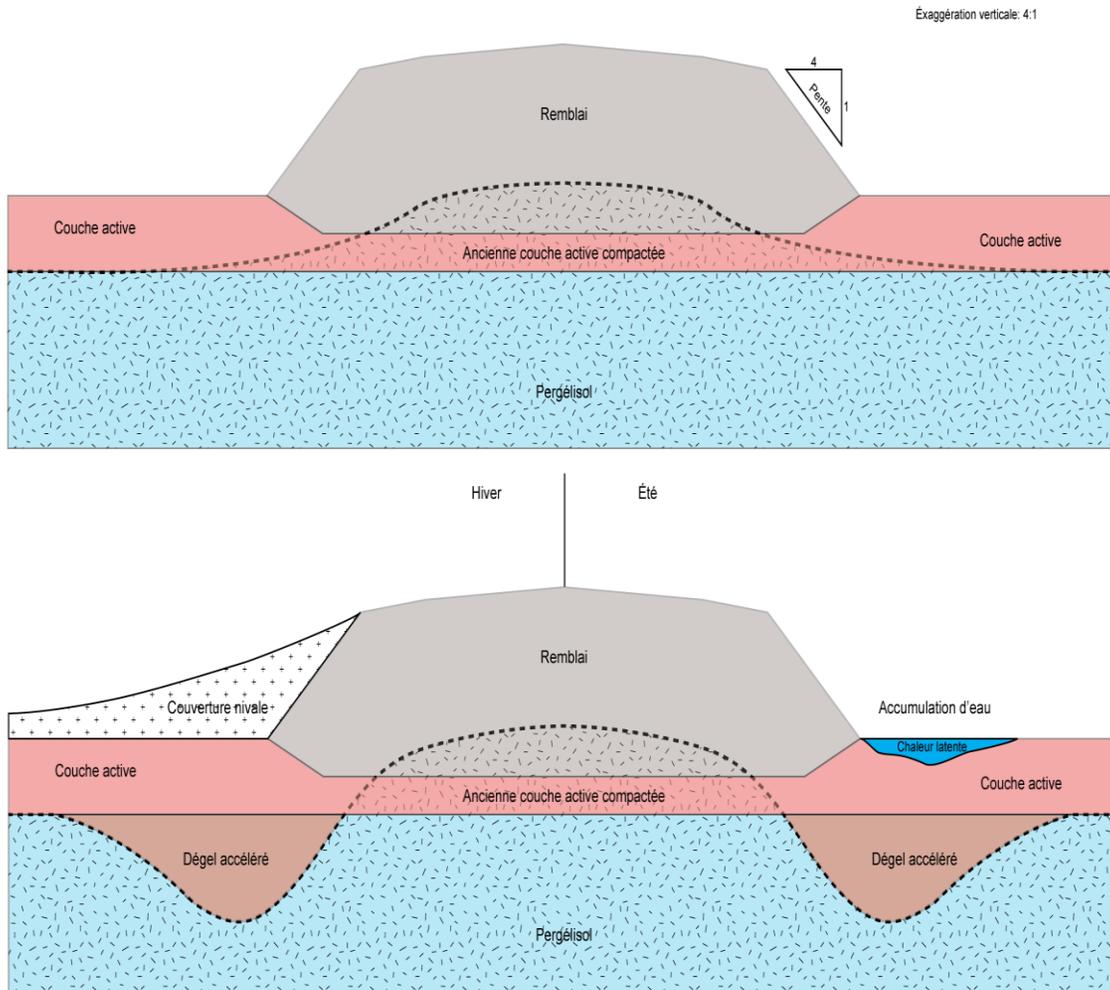


Figure 105: A) Situation initiale après la construction des pistes. B) Situation actuelle pour la plupart des pistes à l'étude aux endroits où le remblai favorise l'accumulation de neige ou entrave le drainage naturel.

Pour les pistes d'atterrissage, la dégradation du pergélisol liée à l'enneigement et le drainage donne naissance à des dépressions et fissures qui se limitent pour l'instant aux accotements et qui se prolongent rarement plus loin que les feux de bord de piste. Dans certains cas, tel qu'observé aux pistes de Puvirnituk, Quaqtaq, Kangirsuk et Tasiujaq, l'écoulement d'eau sous le remblai a donné naissance à des dépressions linéaires suivant le chemin préférentiel d'écoulement de l'eau sous l'infrastructure. À long terme, la perturbation thermique du pied de remblai et des accotements peut s'étendre vers le centre si les conditions particulières à l'origine de la dégradation thermique du pergélisol ne sont pas corrigées. Afin de freiner la dégradation des accotements et éviter tout transfert de chaleur latéral éventuel qui pourrait graduellement affecter la stabilité du pergélisol sous la piste, il importe de venir modifier les composantes de l'infrastructure qui en sont en partie responsables (Pente du remblai trop abrupte, fossé de drainage trop profond, ponceau inopérant, etc.). Pour cette raison, les stratégies d'adaptation proposées dans la présente étude mettent l'accent essentiellement sur la modification de l'angle des talus de remblai et l'optimisation des fossés de drainage de manière à minimiser l'accumulation de neige et de permettre un drainage rapide et efficace de l'eau loin de l'infrastructure. L'utilisation de remblais à pente adoucie (6 :1) ou convectifs avec drains thermiques dont l'efficacité a été démontrée (Fisher et Doré, 2009) ainsi que l'utilisation de fossés de drainage peu profonds permettent de freiner la dégradation du pergélisol et même de le restaurer dans la plupart des cas. Leur

utilisation nécessite toutefois une planification minutieuse qui doit tenir compte des caractéristiques de chaque piste (hauteur du remblai, pente) ainsi que des conditions physiques du milieu (la topographie, la géologie, le type de pergélisol, l'hydrographie et l'enneigement local) afin d'en optimiser l'efficacité. C'est par cette planification minutieuse que les stratégies d'adaptation intégrées et optimisées propres à chaque site aéroportuaire ont été développées. Schématisées sous forme de plan d'adaptation, ces mesures permettront de prévenir ou atténuer le dégel du pergélisol en vue de préserver et de prolonger l'intégrité des infrastructures dans un contexte de réchauffement du climat.

Bien que les plans d'adaptation proposés pour les infrastructures du MTQ construites sur pergélisol s'appuient actuellement sur des mesures climatiques, géothermiques, géophysiques et géotechniques de qualité de même que sur une connaissance approfondie des processus de surface et des risques qu'ils représentent, le comportement futur du climat et du pergélisol n'a été estimé qu'à partir de modèles de simulation numérique. Or, ces modèles reposent sur des hypothèses de changement climatique qui jusqu'à présent n'ont pas reproduit avec une précision suffisante les importantes variations récentes du climat. Ils comportent ainsi 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.

GLOSSAIRE

Coin de glace : Glace massive, généralement en forme de coin dont la pointe est dirigée vers le bas. Elle résulte du gel de l'eau dans des fentes de contraction thermique. Le gel saisonnier de l'eau au niveau du pergélisol permet la croissance du coin de glace.

Couche active : Couche de sol en surface soumise au cycle annuel de gel et de dégel. Synonyme: mollisol.

Cryofaciès : Composition et structure du pergélisol constituée de sédiments et de glace.

Cryostratigraphie : Succession verticale d'une séquence de cryofaciès.

Cryosuccion : Processus de succion survenant lors de la congélation. L'eau interstitielle est aspirée par capillarité vers le front de gel.

Facteur n : Le rapport entre l'indice de gel ou de dégel à la surface du sol et l'indice de gel ou de dégel de l'air.

Gélif : Sol dans lequel se forme de la glace de ségrégation (lentilles) causant des soulèvements lorsque les conditions d'apport d'eau et de basses températures sont suffisantes et persistantes.

Gélifluxion : Déplacement en masse d'un sol dégelé gorgé d'eau sur un sol gelé. Par exemple, la couche active qui dégèle en été flue sur les versants par gravité sur le pergélisol sous-jacent. Il s'agit d'un mouvement relativement lent qui entraîne des déplacements de l'ordre de quelques centimètres par an et en vient à constituer des formes telles que des lobes ou des nappes de gélifluxion sur les versants.

Glace interstitielle : Glace contenue dans les vides du sol.

Glace de ségrégation : Glace se formant en lentilles le long du front de gel suite à la migration de l'eau interstitielle vers celui-ci.

Glace réticulée : Glace sous forme de veines horizontales et verticales qui structurent un réseau tridimensionnel, rectangulaire ou carrée.

Pergélisol : Sol (ou roche) qui demeure à une température inférieure à 0 °C pour une période d'au moins deux années consécutives.

Plafond du pergélisol : Limite supérieure du pergélisol.

Sol structuré : Terme général pour tout sol présentant en surface un patron morphologique ordonné plus ou moins symétrique. (ex. : polygones à coins de glace, ostioles)

Talik : Couche ou partie de sol non gelée qui survient dans une zone de pergélisol en raison d'une anomalie locale dans les conditions thermiques, hydrologiques, hydrogéologiques ou hydrochimiques.

Thermokarst : Processus aboutissant à la fonte du pergélisol et à la formation d'une topographie irrégulière caractérisée par des dépressions et des affaissements de terrain dus aux vides laissés dans le sol par la fonte de la glace. Cette fonte peut être généralisée et avoir une cause climatique (dégel dû à un réchauffement) ou bien anthropique (impact d'une construction, déforestation). Elle peut également être locale et due à la circulation d'une eau liquide sur un sol gelé.

REFERENCES

- 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. 2007. 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., R. Lévesque, M. K.-Séguin et J. A. Pilon (1988). Le pergélisol et les infrastructures de transport au Québec Nordique: Rapport de la saison de terrain 1988. Sainte-Foy, Université Laval, 68 p.
- 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., Wang, B.L. et Pilon, J.A. 1995. Recent cooling along the southern shore of Hudson Strait, Quebec, Canada, documented from permafrost temperature-measurements. *Arctic and Alpine Research*, **27**(2): 157-166.
- Allard, M. et Sarrazin, D. (2007), Monitoring des thermistances - collecte et interprétation des données: Aéroports de Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk, Quaqaq, Akulivik, Salluit et Puvirnituaq au Nunavik. Rapport Annuel au Ministère des Transports (Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 41 p.
- Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (1994). *An Introduction to Frozen Ground Engineering*, Chapman & Hall, 351 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.
- Blackwell, D. D. et Richards, M. (2004). *Geothermal Map of North America*. American Association of Petroleum Geologist (AAPG), 1 Feuillet, échelle 1:6,500,000.
- Bouchard, F. (2005). Topoclimat et microclimats de la vallée de Salluit (Nunavik) : influence sur le régime thermique du pergélisol. Département de géographie, Université Laval. Thèse (M.Sc.), 145 p.
- Boucher, M., Grondin, G. et Guimond, A. (2010). Auscultation et investigations du pergélisol sous les infrastructures du ministère des Transports du Québec au Nunavik : vers une stratégie d'adaptation. 63^e Conférence géotechnique canadienne et la 6^e conférence canadienne sur le pergélisol, Calgary, 500-508
- 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.
- Chouinard, C., R. Fortier and J. C. Mareschal (2007). "Recent climate variations in the subarctic inferred from three borehole temperature profiles in northern Quebec, Canada." *Earth and Planetary Science Letters* 263(3-4): 355-369.

- Fortier, R., M. Allard, O. Gagnon and R. Dubuc (2003). Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik: Conditions du pergélisol et du mollisol à Salluit; compte-rendu des campagnes de terrain été 2002, hiver 2003. Rapport d'étape 2. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 150 p.
- Fortier, R., M. Allard, O. Gagnon and A. M. LeBlanc (2004). Assessment of permafrost conditions at Salluit, Nunavik, using cone penetration tests. 57^{ème} Congrès Canadien de Géotechnique, 5^{ème} Congrès Conjoint SCG/AIH-CNN, Québec.39-47
- Fortier, R. and M. Bolduc (2008). Thaw settlement of degrading permafrost: A geohazard affecting the performance of man-made infrastructures at Umiujaq in Nunavik (Québec). 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management, Québec, Presse de l'Université Laval. 594 p.
- Fortier, R., A. M. LeBlanc and W. B. Yu (2011). "Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada." Canadian Geotechnical Journal 48(5): 720-740.
- Harris, C. (1981). Periglacial mass-wasting : a review of research. Norwich, Geo, 204 p.
- Holtz, R. D. and W. D. Kovacs (1991). Introduction à la géotechnique. Montréal, Éditions de l'École polytechnique de Montréal, 808 p.
- Johnston, G. H. (1981). Permafrost : engineering design and construction. Toronto, J. Wiley, 540 p.
- Kersten, M. S. (1949). Thermal properties of soils. University of Minnesota, Eng. Exp. Station, Bull. 28
- Ladanyi, B. (1972). An Engineering Theory of Creep of Frozen Soils, Canadian Geotechnical Journal, vol. 9, p. 63-80.
- Lemelin, J-C., Doré, G., Pierre, P. et Juneau, S. (2008). Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik-Aéroport de Tasiujaq. Rapport d'étape 1 : Compte rendu des travaux d'instrumentation et de supervision de construction des planches expérimentales de l'aéroport de Tasiujaq, description des planches construites et de l'instrumentation installée. Québec, Département de génie civil, Université Laval. Rapport no. : GCT-2008-04, 43 p.
- Leroueil, S., Dionne, G., et Allard, M. (1991). Tassement et consolidation au dégel d'un silt argileux à Kangiqsualujuaq , Canadian Geotechnical Journal, vol. 28, p. 678-689.
- Lévesque, R., M. Allard, M. K. Séguin et P. J. (1990). Données préliminaires sur le régime thermique du pergélisol dans quelques localités du Nunavik, Québec. Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. C. d. é. 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. Québec, Université Laval. Thèse (M. Sc.), 149 p.
- L'Hérault, E., M. Allard, G. Doré, D. Sarrazin and J. Verreault (2009). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport d'étape 1 : État d'avancement du projet et résultats préliminaires. Québec, Centre d'études nordique, Université Laval. 135 p.
- Mesinger, F., G. DiMego, E. Kalnay, K. Mitchell, P. C. Shafran, W. Ebisuzaki, D. Jovic, J. Woollen, E. Rogers, E. H. Berbery, M. B. Ek, Y. Fan, R. Grumbine, W. Higgins, H. Li, Y. Lin, G. Manikin, D. Parrish and W. Shi (2006). "North American regional reanalysis." Bulletin of the American Meteorological Society 87(3): 343-
- Morgenstern, N. R. and Nixon, J. F. (1971). "One-dimensional Consolidation of Thawing Soils", Canadian Geotechnical Journal, vol. 8, p. 558-565.

- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. et Dadi, Z. (2000). Special report on emissions scenarios, Intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, 612 p.
- Nixon, J. F. et Lem, G. (1984). Creep and strength testing of frozen saline fine-grained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 21, p. 518-529.
- Nixon, J. F. and McRoberts, E. C. (1973). "A Study of Some Factors Affecting the Thawing of Frozen Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 10, p. 439-452.
- Osterkamp, T. E. and V. E. Romanovsky (1999). "Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska." *Permafrost and Periglacial Processes* 10(1): 17-37.
- Radar-Inspection (2005). Interprétation des relevés de géoradar aux sites aéroportuaires de Salluit, Kangirsuk, Tasiujaq, Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Umiujaq et Quaqtaq au Nunavik. Rapport final - Août 2005, 35 p.
- Riseborough, D. W., N. Shiklomanov, B. Etzelmuller, S. Gruber and S. Marchenko (2008). "Recent advances in permafrost modelling." *Permafrost and Periglacial Processes* 19(2): 137-156.
- Sarrazin, D., M. Allard and E. L'Hérault (2010). Monitoring des thermistances - Collecte et interprétation des données: Aéroports de Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq au Nunavik. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 141 p.
- Savard, C. (2006). Imagerie électrique de la sous-fondation pergélisolée des pistes d'atterrissage au Nunavik. Québec, Université Laval. 244 p.
- Savigny, K. W. et Morgenstern, N. R. (1986). Creep behaviour of undisturbed clay permafrost, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 23, p. 515-527.
- Sazonova, T. S. and V. E. Romanovsky (2003). "A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active layer thickness and mean annual ground temperatures." *Permafrost and Periglacial Processes* 14(2): 125-139.
- Smith, S. L., V. E. Romanovsky, A. G. Lewkowicz, C. R. Burn, M. Allard, G. D. Clow, K. Yoshikawa and J. Throop (2010). "Thermal State of Permafrost in North America: A Contribution to the International Polar Year." *Permafrost and Periglacial Processes* 21(2): 117-135.
- Wijeweera, H. et Joshi, R. C. (1991). Creep behavior of fine-grained frozen soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 28, p. 489-502.
- Zhang, T., T. E. Osterkamp and K. Stamnes (1996). "Influence of the depth hoar layer of the seasonal snow cover on the ground thermal regime." *Water Resources Research* 32(7): 2075-2086.
- Zhang, T., T. E. Osterkamp and K. Stamnes (1997). "Effects of climate on the active layer and permafrost on the North Slope of Alaska, U.S.A." *Permafrost and Periglacial Processes* 8: 45-67.
- Zhang, T. and K. Stamnes (1998). "Impact of climatic factors on the active layer and permafrost at Barrow, Alaska." *Permafrost and Periglacial Processes* 9: 229-246.
- Zhang, Y. S., S. K. Carey and W. L. Quinton (2008). "Evaluation of the algorithms and parameterizations for ground thawing and freezing simulation in permafrost regions." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 113(D17).

ANNEXES:

No.	Position	Stratigraphie		Caractéristiques géotechniques				Profondeur de dégel		Tassement anticipé Horizon 2050
		Profondeur (m)	Description	Granulométrie	USCS	Teneur en eau	Coefficient de consolidation	Actuelle 2008-2010	Projetée 2050	
Umiujaq										
UMI-F1	Route d'accès Pied de remblai Chainage 2+452	0,00 à -0,04	Couverture de tourbe mince	n.d	n.d	n.d	n.d	5,2 m ¹	AHA > 8 m	D'après les exercices de simulations numériques, un dégel complet de la couche de dépôt meuble riche en glace sous la route pourrait survenir d'ici l'horizon 2025. Ce dégel complet, d'après les teneurs en glace observées au forage UMI_F1, engendrera des tassements significatifs supplémentaires d'une ampleur équivalente à ceux déjà observés depuis la construction de la route.
		-0,04 à -1,10	Sable fin très bien trié de couleur beige avec traces d'oxydation.	100 % sable	SP	10-15	n.d			
		-1,10 à -2,40	Sable moyen à grossier de couleur beige avec présence de lits de minéraux lourds et quelques fragments de coquillages à la base de l'unité.	100 % sable	SP	10-15	n.d			
		-2,40 à -7,98	Dépôt de silt argileux et sable fin. Présence de lentilles de glace pluricentimétriques qui peuvent atteindre 2 à 4 cm d'épaisseur. Couche massive de glace entre -5,20 et -5,35 m qui pourrait correspondre au plafond actuel du pergélisol. Alternance de lits de silt avec des lits de sable moyen à grossier à la base de cette unité.	49% sable 51% silt	SC-CL	Mollisol 22-30% Pergélisol 40-70%	n.d			
		-7,98	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
Inukjuak										
INU-F1	Aéroport Pied de remblai Chainage 5+210	0,00 à -0,11	Couche de matière organique recouverte en surface par du gravier MG-20 qui provient de la piste.	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,11 à -4,64	Sable fin à grossier grisâtre avec un peu de silt et trace de gravier. Présence de couches de matériel plus grossier essentiellement composées de gravier et de sable grossier. Bloc pluricentimétrique rencontré entre 4,05 m et 4,32 m.	8% gravier 75% sable 17% silt	SM	14-19 %	n.d			
		-4,64	Socle rocheux.	n.a	n.a	n.a	n.a			
INU-F2	Aéroport Pied de remblai Chainage 4+989	0,00 à -2,60	Silt et sable fin grisâtre avec trace de graviers et fragments de coquillages.	2% gravier 47% sable 51% silt	SM SM-ML	22-25%	n.d	5,8 m ²	AEV > 14 m AHA > 14 m	Le pergélisol en pied de remblai continuera à se dégrader d'après les projections forcées par les températures de l'air (série AEV et AHA) et la présence d'une couverture nivale importante. L'absence d'échantillon gelé non perturbé ne permet pas l'évaluation des tassements à venir.
		-2,60 à -4,70	Silt argileux grisâtre avec un peu de sable et quelques fragments de coquillages. La proportion de sable augmente plus en profondeur.	20% sable 80% silt	ML CL-ML	23-32%	n.d			
		-4,70 à -10,90	Sable et silt grisâtre avec trace de gravier. La proportion de particules fines diminue en profondeur.	7% gravier 63% sable 30% silt	SM	10-26%	n.d			
		-10,90	Socle rocheux.	n.a	n.a	n.a	n.a			
INU-F3	Aéroport Pied de remblai Chainage 5+704 m	0,00 à -1,80	Sable fin silteux grisâtre avec fragments de coquillages.	70% sable 30% silt		20%	n.d	6,8 m ²	AEV 12,4 m AHA 13 m	Au forage INU_F3 en pied de remblai, le front de dégel atteint actuellement le socle rocheux sous les dépôts meubles. Par conséquent, aucun tassement supplémentaire n'est à anticiper à cet endroit.
		-1,80 à -3,70	Silt sableux avec trace de gravier et fragments de coquillages.	10% gravier 34% sable 56% silt	n.d	18-24%	n.d			
		-3,70 à -6,80	Sable moyen à fin silteux grisâtre avec un peu de gravier.	10% gravier 60% sable 23% silt	SM	<12%	n.d			
		-6,80	Socle rocheux.	n.a	n.a	n.a	n.a			
INU-F4	Aéroport Pied de remblai Chainage 6+006 m	0,00 à -0,80	Gravier grossier MG-20, fossé de drainage.	n.d	n.d	n.d	n.d	6,35 m ²	n.d	n.d
		-0,80 à -2,60	Sable fin et silt grisâtre avec trace de gravier. Forte présence de fragments de coquillages.	5% gravier 44% sable 51% silt	SM	17%	n.d			
		-2,60 à -5,90	Silt avec un peu de sable grisâtre. Très forte présence de fragments de coquilles dans la section supérieure de cette unité.	24% sable 75% silt	n.d	21%	n.d			
		-5,90 à -9,25	Sable fin à grossier avec gravier et traces de silt. Lit de fragments de coquillages à certaines profondeurs. La proportion de sable grossier et de gravier augmente en profondeur.	15% gravier 60% sable 25% silt	n.d	7%	n.d			
		-9,25	Socle rocheux.	n.a	n.a	n.a	n.a			

1: Profondeur maximale du dégel estimée lors du forage. 2: Profondeur maximale du dégel estimée par lectures thermiques. 3: Valeur issue d'analyses réalisées sur des échantillons analogues.

No.	Position	Stratigraphie		Caractéristiques géotechniques				Profondeur de dégel		Tassement anticipé Horizon 2050
		Profondeur (m)	Description	Granulométrie	USCS	Teneur en eau	Coefficient de consolidation	Actuelle 2008-2010	Projetée 2050	
Inukjuak										
INU-F5	Aéroport Milieu naturel chaînage 5+280	0,00 à 0,06	Couverture de matière organique en surface (tourbe).	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,06 à -1,28	Sable fin à moyen avec trace de silt.	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-1,28	Socle rocheux.	n.a	n.a	n.a	n.a			
INU-F6	Aéroport Milieu naturel chaînage 5+302	0,00 à -0,10	Couverture de matières organiques en surface (tourbe).	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,10 à -1,92	Sable silteux ou silt sableux grisâtre. Front de dégel rencontré à 1,53 m. Présence de glace interstitielle dans la section du sol qui est gelée.	54% sable 46% silt	SM	19%	n.d			
		-1,92	Socle rocheux.	n.a	n.a	n.a	n.a			
Puvirnituk										
PUV-F1	Aéroport Pied de remblai chaînage 6+237	0,00 à -0,12	Gravier en surface (remblai)	n.d	n.d	n.d	n.d	5,6 m ²	n.d	Absence
		-0,12 à -0,20	Couche de M.O	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-0,20 à -1,60	Sable moyen à fin beige avec un peu de silt et gravier grossier.	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-1,60 à -3,20	Sable moyen silteux grisâtre avec quelques fragments de coquillages. À la base de cette unité, le matériel a une consistance très molle.	17% gravier 60% sable 22% silt	SM	16	n.d			
		-3,20 à -8,28	Silt et argile grisâtre avec quelques lits de coquilles. Consistance molle. Quelques graviers à la base de cette unité.	2% gravier 20% sable 78% silt	ML-CL CL	30	n.d			
		-8,28 à -12,92	Diamicton grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (probablement du till). Présence de blocs pluridécimétriques.	24% gravier 47% sable 30% silt	SM	10	n.d			
		-12,92	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
PUV-F2	Aéroport Pied de remblai Chaînage 6+197	0,00 à -0,10	Couverture de matière organique mélangée avec du gravier MG-20 en surface	n.d	n.d	n.d	n.d	5,75 m ²	n.d	n.d
		-0,10 à -1,98	Sable moyen silteux grisâtre avec quelques fragments de coquillages. À la base de cette unité, le matériel a une consistance très molle et est majoritairement composé de sable fin silteux avec quelques cailloux centimétriques.	22% gravier 56% sable 22% silt	SM	11%	n.d			
		-1,98 à -11,24	Silt et argile grisâtre avec quelques fragments de coquillages. Consistance molle dans les premiers mètres du dépôt. Dans la section encore gelée, présence de quelques cristaux et lentilles de glace millimétriques éparses. Peut présenter une structure en polyèdres avec des espaces subhorizontaux plurimillimétriques à pluricentimétriques à l'emplacement de lentilles de glace qui ont fondu.	26% sable 74% silt	ML-CL ou CL	29%	n.d			
		-11,24 à -15,6	Diamicton grisâtre composé de sable moyen à grossier grisâtre et silt avec trace de gravier. Présence de poches de sable fin silteux avec quelques fragments de coquillages. Présence de blocs pluridécimétriques. Pas de glace apparente. (till probable). Le socle rocheux n'a pas été atteint.	14% gravier 57% sable 30% silt	SM ou SM-ML	11%	n.d			

1: Profondeur maximale du dégel estimée lors du forage. 2: Profondeur maximale du dégel estimée par lectures thermiques. 3: Valeur issue d'analyses réalisées sur des échantillons analogues.

No.	Position	Stratigraphie		Caractéristiques géotechniques				Profondeur de dégel		Tassement anticipé Horizon 2050
		Profondeur (m)	Description	Granulomé- trie	USCS	Teneur en eau	Coefficient de consolidation	Actuelle 2008-2010	Projetée 2050	
Puvirnituk										
PUV-F3	Aéroport Terrain naturel Chainage 6+617	0,00 à -0,13	Couche de matière organique en surface	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,13 à -2,40	Silt sableux grisâtre avec trace de gravier et quelques fragments de coquillage.	33% sable 67% silt	ML-CL	17%	n.d			
		-2,40 à -3,76	Dépôt hétérométrique grisâtre non trié composé principalement de sable et de silt avec un peu de gravier anguleux. Probablement du till.	19% gravier 52% sable 30% silt	SM	10%	n.d			
		-3,76	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
PUV-F4	Aéroport Terrain naturel Chainage 6+654	0,00 à -0,16	Couche de matière organique	n.d	n.d	n.d	n.d	2,52 m ¹	n.d	n.d
		-0,16 à -3,18	Dépôt hétérométrique grisâtre non trié composé principalement de sable et de silt avec un peu de gravier anguleux. Probablement du till. Le front de dégel a été observé à environ 2,52 m de profondeur. Dans la section du sol sous-jacente, aucune lentille de glace n'a été observée.	21% gravier 53% sable 26% silt	n.d	11%	n.d			
		-3,18	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
PUV-F5	Aéroport Pied de remblai Chainage 6+315	0,00 à -0,30	Couche matière organique	n.d	n.d	n.d	n.d	6,75 m ²	n.d	n.d
		-0,30 à -1,33	Sable moyen à grossier avec gravier grisâtre et trace de silt. Présence de nombreux cailloux (5-10 cm de diamètre) entre 0,60 et 0,90 m.	28% gravier 60% sable 12% silt	n.d	10	n.d			
		-1,33 à -5,61	Silt et argile avec trace de sable fin, de coquilles et de gravier fin. Matériel qui se liquéfie après manipulation. Le sol a une structure en polyèdre avec des espaces plurimillimétriques à pluricentimétriques possiblement occupés par des lentilles de glace qui ont fondu.	6% gravier 21% sable 73% silt	ML-CL	20	n.d			
		-5,61	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
Akulivik										
AKU-F1	Aéroport Terrain naturel Chainage 6+010	0,00 à -0,13	Couche de matière organique recouverte en surface par du gravier MG-20 qui provient de la piste.	n.d	n.d	n.d	n.d	2,70 m ²	n.d	n.d
		-0,13 à -0,75	Sable fin à moyen brunâtre avec trace de gravier plurimillimétrique subanguleux	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-0,75 à -15,00	Sable et silt grisâtre avec un peu de gravier plurimillimétrique anguleux. Présence de blocs pluricentimétriques. Dépôt hétérométrique non trié identifié comme un till. Socle rocheux pas atteint	17% gravier 50% sable 34% silt	SM ou SM-ML	10	5 à 8%			
AKU-F2	Aéroport Pied de remblai Chainage 5+825	0,00 à -0,18	Couche de matière organique avec gravier MG-20 qui provient de la piste.	n.d	n.d	n.d	n.d	6,20 m ²	n.d	n.d
		-0,18 à -0,76	Sable fin à grossier brunâtre avec traces de silt et gravier. Présence de fragments de coquillages.	29% gravier 60% sable 12% silt	n.d	n.d	n.d			
		-0,76 à -0,88	Couche de matière organique enfouie.	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-0,88 à -3,50	Silt sableux avec traces de gravier et présence de fragments de coquillages.	4% gravier 44% sable 51% silt	ML-CL	15	30 à 40% ³			
		-3,50 à -15,00	Sable et silt grisâtre avec un peu de gravier plurimillimétrique anguleux. Présence de blocs pluricentimétriques. Dépôt hétérométrique non trié identifié comme un till. Le socle rocheux n'a pas été atteint.	18% gravier 42% sable 40% silt	SM-ML	12	n.d			

No.	Position	Stratigraphie		Caractéristiques géotechniques				Profondeur de dégel		Tassement anticipé Horizon 2050
		Profondeur (m)	Description	Granulomé- trie	USCS	Teneur en eau	Coefficient de consolidation	Actuelle 2008-2010	Projetée 2050	
Akulivik										
AKU-F3	Aéroport Pied de remblai Chainage 6+000	0,00 à -0,05	Matière organique avec gravier MG-20 qui provient de la piste.	n.d	n.d	n.d	n.d	5,9 m ²	AEV 15,5 m AHA 20 m	Environ de 50 à 113 cm
		-0,05 à -9,60	Sable et silt grisâtre avec un peu de gravier plurimillimétrique anguleux. Présence de blocs pluricentimétriques et pluridécimétriques. Dépôt hétérométrique non trié identifié comme étant un till. Le socle rocheux n'a pas été atteint.	18% gravier 42% sable 40% silt	SM ou SM- ML	10%	n.d			
AKU-F4	Aéroport Pied de remblai Chainage 5+155	0,00 à -0,20	Matière organique avec gravier MG-20 qui provient de la piste. Présence de fragments de coquillages.	n.d	n.d	n.d	n.d	3,47 m ²	AEV 6,6 m AHA 12,4 m	Environ de 40 à 104 cm
		-0,20 à -1,90	Sable moyen à grossier avec trace de silt. Importantes concentrations de fragments de coquillages	5% gravier 86% sable 9% silt	SP-SM	19%	n.d			
		-1,90 à -4,50	Silt avec un peu de sable fin, grisâtre, avec traces de gravier moyen. Dans la section gelée, des traces de lentilles de glaces fondues plurimillimétriques subhorizontales ont été observées.	5% gravier 38% sable 55% silt	SM-ML ou ML-CL	22%	30 à 40% ³			
		-4,50 à -10,40	Silt et sable fin à grossier grisâtre avec un peu de gravier. Présence de cailloux décimétriques. Dépôt hétérométrique non trié (till). Socle rocheux n'a pas été atteint.	28% gravier 38% sable 34% silt	SM-ML	13%	n.d			
Salluit										
SAL-F1	Aéroport Pied de remblai Chainage 2+802	0,00 à -0,20	Matériel hétérométrique grossier avec matrice sableuse (remblai). Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (till). Présence de cailloux et ou blocs pluricentimétriques.	n.d	n.d	n.d	n.d	2,20 m ¹	n.d	n.d
		0,20 à -3,81	Front de dégel rencontré à 2,20 m de profondeur. Présence de lentilles de glace millimétriques et glace interstitielle dans la section de sol gelé sous-jacente.	21% gravier 50% sable 28% silt	SM		Mollisol < 10% Pergélisol ≈ 20%			
		-3,81	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
SAL-F2	A.éroport Milieu naturel Chainage 2+510	0,00 à -0,08	Couverture de matière organique avec gravier MG-20 provenant de la piste.	n.d	n.d	n.d	n.d	2,10 m ¹	n.d	n.d
		-0,08 à -6,96	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (till). Présence de cailloux et ou blocs pluricentimétriques. Front de dégel rencontré à 2,09 m de profondeur. Présence de lentilles de glace millimétriques en alternance et glace interstitielle dans la section de sol gelé sous-jacente. Proportion importante de glace entre 2,09 m et 2,50 m qui correspond au plafond du pergélisol actuel.	26% gravier 48% sable 26% silt	SM		Mollisol < 10% Pergélisol ≈ 24%			
		-6,96	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
SAL-F3	Aéroport Pied de remblai Chainage 2+030	0,00 à -0,04	Couverture de matière organique.	n.d	n.d	n.d	n.d	1,85 m ¹	n.d	n.d
		-0,04 à -0,91	Sable grossier avec gravier centimétrique et bloc pluridécimétrique.	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-0,91 à -4,20	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (till). Présence de lentilles de glace plurimillimétriques et centimétriques en alternance dans la section de sol gelé sous-jacente.	28% gravier 43% sable 29% silt	SM		Mollisol < 10% Pergélisol ≈ 45%			
		-4,20	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			

No.	Position	Stratigraphie		Caractéristiques géotechniques				Profondeur de dégel		Tassement anticipé Horizon 2050
		Profondeur (m)	Description	Granulomé- trie	USCS	Teneur en eau	Coefficient de consolidation	Actuelle 2008-2010	Projetée 2050	
Salluit										
SAL-F4	Aéroport Pied de remblai Chainage 2+185	0,00 à -0,15	Gravier MG-20 qui provient du remblai de la piste.	n.d	n.d	n.d	n.d	2,15 m ¹	n.d	n.d
		-0,15 à -3,04	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (till). Présence de quelques lentilles de glace millimétriques et glace interstitielle dans la section de sol gelé sous-jacente.	26% gravier 48% sable 26% silt	SM	Pergélisol ≈ 23%	n.d			
		-3,04	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
SAL-F5	Aéroport Milieu naturel Chainage 2+645	0,00 à -0,03	Couverture de matière organique en surface					1,8 à 2 m ¹	n.d	n.d
		-0,03 à -0,75	Sable moyen silteux de couleur beige avec trace de gravier.	2% gravier 49% sable 49% silt	n.d	34%	n.d			
		-0,75 à -5,74	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (till). Présence de cailloux et ou blocs pluricentimétriques. Couche de glace massive avec inclusion de fragments de till directement sous le front de dégel entre 1,80 m et 3,00 m. La partie très riche en glace, entre 1,92 m et 2,12 m de profondeur, correspond au plafond actuel du pergélisol. À partir d'environ 3 m de profondeur, la glace se présente sous forme de lentilles plurimillimétriques à centimétriques subhorizontales faiblement espacées.	28% gravier 41% sable 31% silt	SM	Pergélisol ≈ 59%	n.d			
		-5,74	Socle rocheux							
SAL-F6	Route d'accès Pied de remblai Chainage 1+560	0,00 à -0,08	Couverture de matière organique en surface.	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,08 à -0,76	Silt sableux de couleur beige.	32% sable 67% silt	n.d	19%	n.d			
		-0,76 à -3,85	Silt argileux grisâtre avec lentilles de glaces réticulées plurimillimétriques et centimétriques faiblement espacées. Couche de glace massive entre 0,76 et 0,90 m qui correspond au plafond actuel du pergélisol.							
		-3,85 à -9,30	Silt argileux avec lentilles de glace réticulées pluricentimétriques faiblement espacées (< 4 cm).							
		-9,30 à -13,63	Silt argileux avec sections stratifiées composées de matériel plus grossier (silt ou sable fin). Présence de lentilles de glace pluricentimétriques subverticales ou légèrement inclinées faiblement espacées (< 5 cm). À cette profondeur, les lentilles de glace sont épaisses et plus espacées que celles observées dans les premiers mètres sous la surface. Le socle rocheux n'a pas été atteint.	1% gravier 28% sable 71% silt	CL	Plafond du pergélisol 102% Pergélisol ≈ 31%	Plafond du pergélisol n.d Pergélisol 6-9%			
Quaqtaq										
QUA-F1	Aéroport Pied de remblai Chainage 1+290	0,00 à -0,13	Matériel hétérométrique grossier avec matrice sableuse (remblai).	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	AEV > 16 m	Au forage QUA_F1 en pied de remblai, le front de dégel atteint actuellement le socle rocheux sous les dépôts meubles. Par conséquent, aucun tassement supplémentaire n'est à anticiper à cet endroit.
		-0,13 à -1,37	Sable moyen à fin avec silt et un peu de gravier anguleux.	10% gravier 60% sable 30% silt	SM	9%	n.d			
		-1,37	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			

1: Profondeur maximale du dégel estimée lors du forage. 2: Profondeur maximale du dégel estimée par lectures thermiques. 3: Valeur issue d'analyses réalisées sur des échantillons analogues.

No.	Position	Stratigraphie		Caractéristiques géotechniques				Profondeur de dégel		Tassement anticipé Horizon 2050
		Profondeur (m)	Description	Granulomé- trie	USCS	Teneur en eau	Coefficient de consolidation	Actuelle 2008-2010	Projetée 2050	
Quaqtaq										
QUA-F2	Aéroport Milieu naturel Chainage 1+650	0,00 à -0,13	Matériel hétérométrique grossier avec matrice sableuse (remblai).	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,13 à -1,25	Sable moyen à grossier brunâtre avec traces de silt.	19% gravier 64% sable 17% silt	SM	15%	n.d			
		-1,25 à -2,61	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable moyen à fin avec silt et un peu de gravier anguleux (Till probable). Présence de glace interstitielle.	15% gravier 63% sable 22% silt	SM	9%	6-7%			
		-2,61	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
Kangirsuk										
KANGIR-F1	Aéroport Pied de remblai Chainage 0+784	0,00 à -1,31	Sable grossier et gravier brunâtre-grisâtre.	51% gravier 42% sable 7% silt	n.d	7%	n.d	n.d	n.d	n.d
		-1,31 à -10,35	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (Till). Quelques cailloux décimétriques anguleux épars. Le front de dégel a été rencontré à 1,41 m de profondeur. Présence de glace interstitielle dans la section de sol gelé.	24% gravier 47% sable 29% silt	SM	11%	n.d			
		-10,35	Substrat rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
KANGIR-F2	Aéroport Pied de remblai Chainage 0+916	0,00 à -1,37	Sable grossier et gravier.	47% gravier 46% sable 7% silt	n.d	10%	n.d	n.d	n.d	n.d
		-1,37 à -3,38	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (Till). Quelques cailloux décimétriques anguleux épars. Présence de glace interstitielle.	23% gravier 38% sable 38% silt	SM	9%	< 5%			
		-3,38	Substrat rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
KANGIR-F3	Aéroport Pied de remblai Chainage 1+007	0,00 à -1,20	Sable grossier et gravier brunâtre.	47% gravier 43% sable 10% silt	n.d	8%	n.d	n.d	n.d	n.d
		-1,20 à -7,10	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (Till). Quelques cailloux décimétriques anguleux épars. Présence de lentilles de glace plurimillimétriques faiblement espacées et de glace interstitielle.	21% gravier 48% sable 31% silt	SM	11%	10 à 15%			
		-7,10	Substrat rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
KANGIR-F4	Aéroport Pied de remblai Chainage 1+110	0,00 à -1,34	Sable grossier et gravier de couleur beige.	38% gravier 57% sable 5% silt	n.d	9%	n.d	n.d	n.d	n.d
		-1,34 à -4,80	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (Till). Quelques cailloux décimétriques anguleux épars. Présence de glace interstitielle ainsi que de quelques lentilles de glace plurimillimétriques.	25% gravier 47% sable 27% silt	SM	9%	n.d			
		-4,80	Substrat rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			
		0,00 à -3,30	Matériel hétérométrique non trié grisâtre composé de sable silteux avec un peu de gravier anguleux (Till). Quelques cailloux décimétriques anguleux épars. Présence de glace interstitielle et de ségrégation dans la section de sol gelé.	24% gravier 38% sable 38% silt	SM	9	n.d			
		-3,30	Socle rocheux	n.a	n.a	n.a	n.a			

1: Profondeur maximale du dégel estimée lors du forage. 2: Profondeur maximale du dégel estimée par lectures thermiques. 3: Valeur issue d'analyses réalisées sur des échantillons analogues.

No.	Position	Stratigraphie		Caractéristiques géotechniques				Profondeur de dégel		Tassement anticipé Horizon 2050
		Profondeur (m)	Description	Granulomé- trie	USCS	Teneur en eau	Coefficient de consolidation	Actuelle 2008-2010	Projetée 2050	
Tasiujaq										
TAS-F1	Aéroport Pied de remblai Chainage 5+925	0,00 à -0,21	Matière organique avec présence de gravier MG-20 provenant de la piste.	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,21 à -1,90	Sable moyen à grossier avec gravier centimétrique et un peu de silt grisâtre.	22% gravier 59% sable 19% silt	SM	12%	n.d			
		-1,90 à -7,80	Dépôt hétérométrique grisâtre composé de sable silteux et un peu de gravier. Présence de matières organiques enfouies et de fragments de coquillages. Présence de glace interstitielle et quelques lentilles de glace millimétriques localisées. Transition graduelle vers un matériel composé de sable grossier et de gravier.	10% gravier 58% sable 32% silt	SM	16%	6 à 14%			
		-7,80 à -12,99	Sable grossier et gravier avec fragments de coquillages et quelques cailloux décimétriques. Présence de glace interstitielle.	n.d	n.d	12%	n.d			
		-12,99 à -20,30	Dépôt grisâtre à granulométrie fine composé de silt et sable fin. Présence d'un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées par des lentilles de glace horizontales centimétriques faiblement espacées. Le substrat rocheux n'a pas été atteint.	1% gravier 42% sable 57% silt	SC-CL	33%	n.d			
TAS-F2	Aéroport Pied de remblai Chainage 5+300	0,00 à -1,45	Sable moyen à grossier avec gravier centimétrique et un peu de silt .	n.d	n.d	n.d	n.d	≈ 3 m	AEV 5,75 m AHA 8,15 m	L'absence de câble en pied de remblai ne permet pas d'évaluer la position actuelle du front de dégel. Toutefois, selon les deux scénarios climatiques proposés (AEV et AHA) et un coefficient de consolidation estimé entre 10 et 15 %, l'augmentation de la profondeur de dégel pourrait entraîner, tout dépendant de l'épaisseur de sol qui reste à dégeler, des tassements pouvant atteindre 50 cm dans l'accotement
		-1,45 à -5,20	Dépôt hétérométrique grisâtre composé de sable silteux et un peu de gravier. Présence de matières organiques enfouies et de fragments de coquillages. Transition graduelle vers un matériel composé de sable grossier et de gravier.	4% gravier 59% sable 37% silt	SM ou SM- ML	23%	20 à 23%			
		-5,20 à -9,70	Sable grossier et gravier grossier avec fragments de coquillages et plusieurs cailloux décimétriques.	59% gravier 40% sable 1% silt	GP ou SP- SM	9%	5 à 6%			
		-9,70 à -17,08	Dépôt grisâtre à granulométrie fine composé de silt et d'argile. Le substrat rocheux n'a pas été atteint.	1% gravier 18% sable 82% silt	CL	32%	11 à 22%			
TAS-F3	Aéroport Milieu naturel Chainage 5+105	0,00 à -0,20	Couverture de matière organique en surface.	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,20 à -1,80	Sable moyen à grossier avec gravier et un peu de silt grisâtre.	27% gravier 65% sable 8% silt	SP-SM	11%	n.d			
		-1,80 à -6,02	Dépôt hétérométrique grisâtre composé de sable silteux et un peu de gravier. Présence de poches noirâtres (matières organiques enfouies) et de fragments de coquillages. Présence de glace interstitielle et de nombreuses lentilles de glace millimétriques faiblement espacées (< 1cm).	5% gravier 57% sable 38% silt	SM	22%	13 à 16%			
		-6,02 à -10,80	Sable grossier et gravier grossier avec fragments de coquillages et plusieurs cailloux décimétriques. Présence de glace interstitielle.	46% gravier 53% sable 1% silt	SP ou G	10%	n.d			
		-10,80 à -17,00	Dépôt grisâtre à granulométrie fine composé de silt et d'argile. Présence d'un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées par quelques lentilles de glace centimétriques subhorizontales localisées.	39% sable 61% silt	CL	34%	n.d			
		-17,00 à -25,20	Dépôt de sable fin à moyen silteux grisâtre très compact entrecoupé de quelques couches minces de silt argileux. Présence de glace interstitielle et de quelques lentilles de glace centimétriques subhorizontales localisées exclusivement dans les couches de silt argileux. Le substrat rocheux n'a pas été atteint.	73% sable 27% silt	SM	27%	n.d			

No.	Position	Stratigraphie		Caractéristiques géotechniques				Profondeur de dégel		Tassement anticipé Horizon 2050
		Profondeur (m)	Description	Granulomé- trie	USCS	Teneur en eau	Coefficient de consolidation	Actuelle 2008-2010	Projetée 2050	
Tasiujaq										
TAS-F4	Aéroport Pied de remblai Chainage 5+745	0,00 à -0,22	Couverture de matière organique en surface avec sable fin à moyen.	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
		-0,22 à -1,85	Sable moyen à grossier avec gravier centimétrique et un peu de silt grisâtre.	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-1,85 à -3,45	Dépôt hétérométrique grisâtre composé de sable silteux et un peu de gravier. Présence de poches noirâtres (matières organiques enfouies) et de fragments de coquillages. Présence de glace interstitielle.	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-3,45 à -12,14	Sable grossier et gravier grossier avec fragments de coquillages et plusieurs cailloux décimétriques. La matrice sablo-graveleuse a été lavée par les opérations de forage et seulement les graviers et cailloux subarrondis ont été récupérés	n.d	n.d	n.d	n.d			
		-12,14 à -16,95	Dépôt grisâtre à granulométrie fine composé de silt et d'argile. Présence d'un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées par quelques lentilles de glace centimétriques subhorizontales localisées. Le substrat rocheux n'a pas été atteint.	1% gravier 27% sable 72% silt	CL	34%	n.d			

1: Profondeur maximale du dégel estimée lors du forage. 2: Profondeur maximale du dégel estimée par lectures thermiques. 3: Valeur issue d'analyses réalisées sur des échantillons analogues.

- Ⓐ Tête de chargement drainée
 - Ⓑ Pierres poreuses ($\phi = 70$ mm)
 - Ⓒ Papiers-filtres
 - Ⓓ Échantillon de sol gelé
 - Ⓔ Base de chargement non drainée
-
- Ⓕ Tige de chargement axial reliée à la presse hydraulique
 - Ⓖ Cellule de charge (± 6 kN)
 - Ⓗ Jauge de déplacement (LVDT)
 - Ⓘ Disque de positionnement relatif
 - Ⓝ Support fixe
 - Ⓚ Entrée d'air de confinement
 - Ⓛ Jauge de pression de confinement
 - Ⓜ Sonde de température environnante
 - Ⓝ Zone de contact sphérique avec Ⓞ
 - Ⓞ Paroi extérieure de la cellule triaxiale
-
- Ⓟ Tube de drainage
 - Ⓠ Creux sphérique en contact avec Ⓝ
 - Ⓡ Membrane de latex
 - Ⓢ Tube où circule le liquide réfrigérant
 - Ⓣ Entrée du liquide réfrigérant
 - Ⓤ Sortie du liquide réfrigérant
 - Ⓥ Sonde de température installée en contact avec l'échantillon
 - Ⓦ Joint étanche

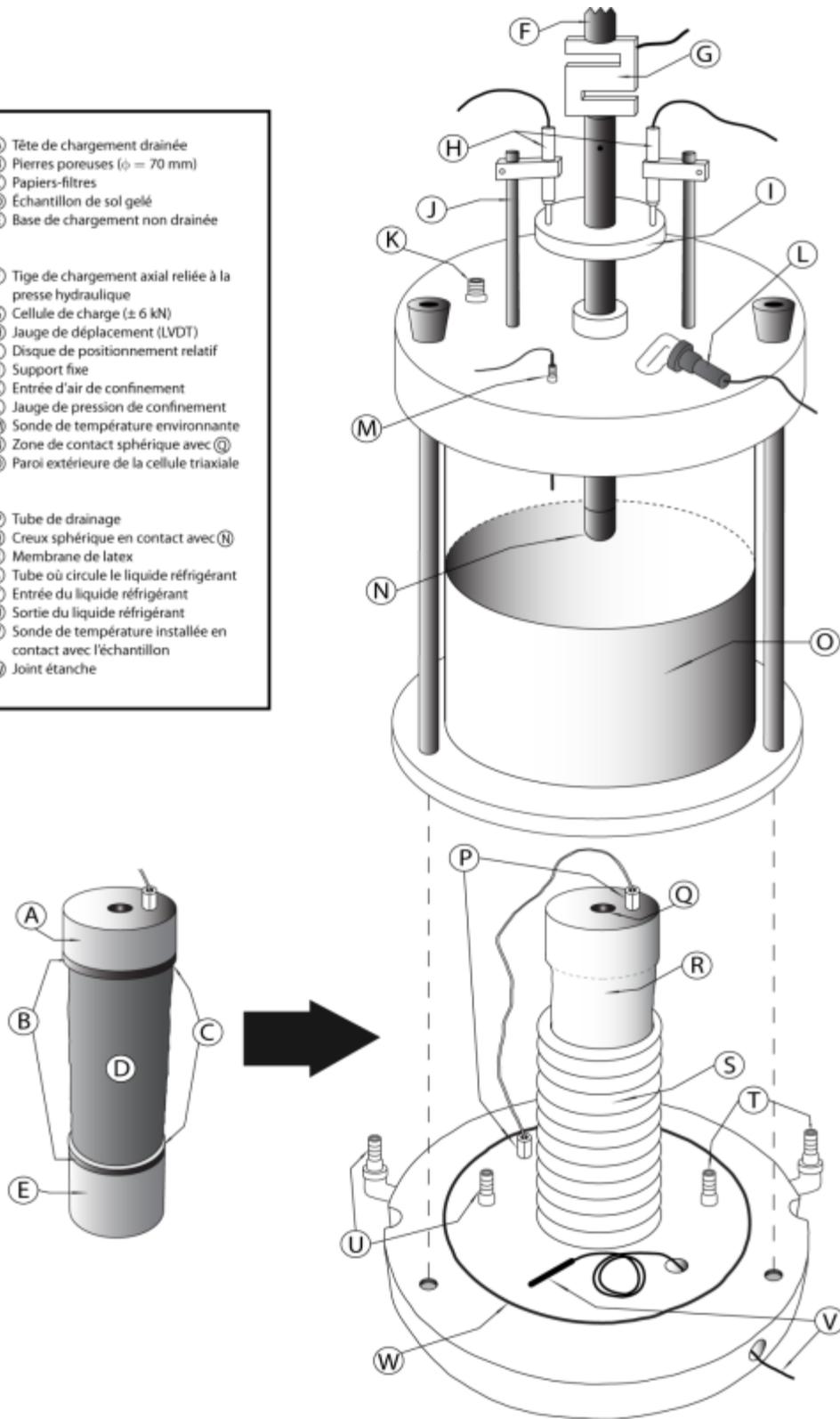


Figure 106: Cellule triaxiale utilisée pour les essais de fluage.

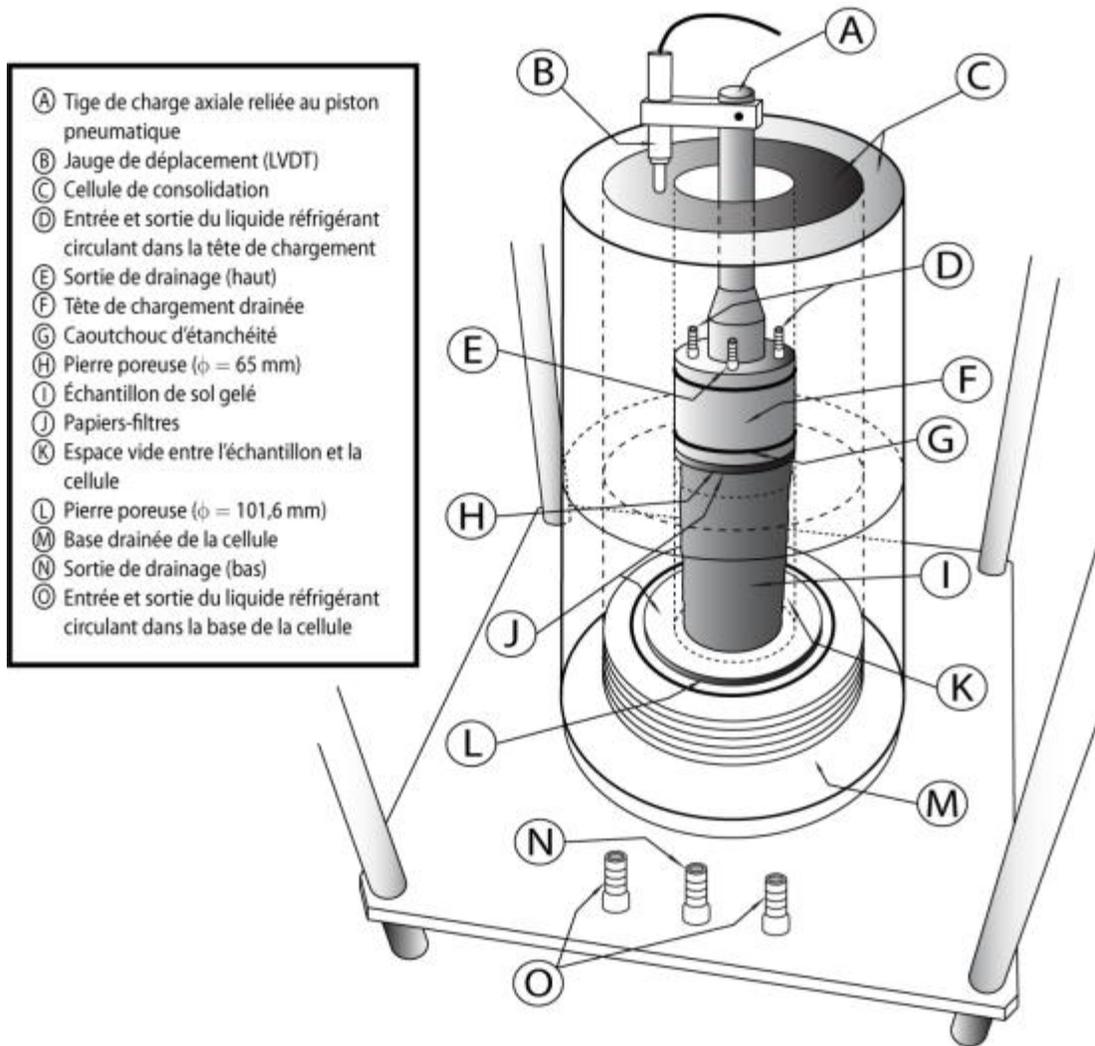


Figure 107: Cellule oedométrique utilisée pour les essais de consolidation au dégel.

Tableau 38: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage UMI_F1.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
UMI_F1_100-110	-1,00	-1,10	12,90	n.d	0,00	n.d	0,00	100,00	0,00	0,00	1,45	1,13	n.d	n.d	n.d	n.d	SP
UMI_F1_255-262	-2,55	-2,62	26,98	n.d	0,98	n.d	0,00	27,80	72,20	9,44	20,43	1,87	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
UMI_F1_330-340	-3,30	-3,40	23,58	n.d	3,36	n.d	0,00	45,86	54,14	5,83	24,42	1,36	28,17	4,03	24,15	0,81	SC-CL
UMI_F1_374-387	-3,74	-3,87	29,44	n.d	1,04	n.d	0,00	81,82	18,18	2,27	105,52	56,92	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
UMI_F1_454-464	-4,54	-4,64	22,72	n.d	1,06	n.d	3,50	68,60	27,90	1,79	118,05	0,33	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
UMI_F1_529-539	-5,29	-5,39	70,53	n.d	0,00	n.d	0,00	60,25	39,75	6,52	73,41	0,74	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
UMI_F1_560-570	-5,60	-5,70	54,48	n.d	0,77	n.d	0,00	40,18	59,82	10,33	43,03	2,29	29,83	20,82	9,02	4,31	SC-CL
UMI_F1_570-580	-5,70	-5,80	63,63	n.d	0,97	n.d	0,00	38,88	61,12	8,83	26,60	1,69					
UMI_F1_580-590	-5,80	-5,90	62,75	n.d	1,23	n.d	0,00	48,17	51,83	6,88	28,89	1,14					
UMI_F1_590-600	-5,90	-6,00	136,31	n.d	0,52	n.d	0,00	80,24	19,76	3,37	150,61	91,19	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
UMI_F1_610-620	-6,10	-6,20	56,35	n.d	1,25	n.d	0,00	45,68	54,32	4,98	19,10	1,40	29,32	21,77	7,55	4,45	SC-CL
UMI_F1_620-630	-6,20	-6,30	66,20	n.d	1,14	n.d	0,00	41,22	58,78	5,31	19,02	1,60					
UMI_F1_630-640	-6,30	-6,40	47,90	n.d	0,80	n.d	0,00	53,16	46,84	5,77	27,60	1,54					
UMI_F1_640-650	-6,40	-6,50	n.d	n.d	1,11	n.d	0,00	40,61	59,39	9,90	37,06	1,97	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
UMI_F1_650-660	-6,50	-6,60	61,40	n.d	1,26	n.d	0,00	27,90	72,10	11,30	49,07	4,15					
UMI_F1_675-685	-6,75	-6,85	56,27	n.d	1,07	n.d	0,00	43,33	56,67	5,09	18,53	1,58					
UMI_F1_685-695	-6,85	-6,95	42,77	n.d	1,20	n.d	0,00	47,13	52,87	3,10	15,37	1,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
UMI_F1_695-710	-6,95	-7,10	67,12	n.d	0,00	n.d	0,00	47,45	52,55	3,17	16,25	1,28	27,76	2,83	24,93	2,15	SC-CL
UMI_F1_710-720	-7,10	-7,20	47,45	n.d	1,49	n.d	0,00	45,13	54,87	4,69	17,27	1,17					
UMI_F1_730-740	-7,30	-7,40	44,14	n.d	0,76	n.d	0,00	47,38	52,62	4,90	17,17	1,64					
UMI_F1_750-760	-7,50	-7,60	11,65	n.d	0,43	n.d	18,93	74,52	6,55	0,11	6,54	2,96	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tableau 39: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés aux forages INU_F1, INU_F2 et INU_F3.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
INU_F1_090-100	-0,90	-1,00	13,93	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	15,68	2,06	13,62	0,87	
INU_F1_209-219	-2,09	-2,19	18,83	n.d	0,00	n.d	0,00	69,83	30,17	2,89	19,30	2,61	15,98	np	n.a	n.a	SM
INU_F1_305-315	-3,05	-3,15	17,70	n.d	0,09	n.d	10,70	84,85	4,44	0,00	4,27	1,15	n.d	n.d	n.d	n.d	SP
INU_F1_320-330	-3,20	-3,30	11,44	n.d	0,17	n.d	14,14	70,95	14,91	0,05	35,97	3,75	13,69	np	n.a	n.a	SM
INU_F2_80-90	-0,80	-0,90	22,54	n.d	0,84	n.d	0,00	54,02	45,98	1,54	8,45	1,83	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_158-168	-1,58	-1,68	24,87	n.d	0,50	n.d	0,00	31,82	68,18	2,82	6,21	0,81	17,29	np	n.a	n.a	ML
INU_F2_180-190	-1,80	-1,90	22,16	n.d	0,57	n.d	2,40	44,65	52,95	0,01	7,98	0,89	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_212-222	-2,12	-2,22	21,55	n.d	0,19	n.d	4,06	58,04	37,90	0,11	9,82	1,51	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_287-297	-2,87	-2,97	32,49	n.d	1,28	n.d	0,00	16,63	83,37	11,21	19,58	2,07	29,24	21,43	7,81	1,42	ML
INU_F2_350-360	-3,50	-3,60	27,80	n.d	0,74	n.d	0,00	19,34	80,66	8,74	15,22	1,85	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_398-408	-3,98	-4,08	26,65	n.d	0,64	n.d	0,00	13,73	86,27	10,90	18,82	2,21	20,51	14,95	5,56	2,10	CL-ML
INU_F2_456-466	-4,56	-4,66	23,35	n.d	0,40	n.d	0,00	29,96	70,04	2,73	11,54	1,44	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_506-516	-5,06	-5,16	23,80	n.d	0,43	n.d	0,00	42,65	57,35	3,19	15,53	1,52	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_526-536	-5,26	-5,36	25,94	n.d	0,23	n.d	0,00	33,89	66,11	4,16	14,32	1,54	16,26	np	n.a	n.a	ML
INU_F2_612-622	-6,12	-6,22	21,41	n.d	0,00	n.d	0,00	63,04	36,96	5,60	30,40	2,14	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_720-730	-7,20	-7,30	19,34	n.d	0,16	n.d	0,00	59,41	40,59	1,56	15,25	1,72	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_735-745	-7,35	-7,45	21,40	n.d	0,17	n.d	0,97	55,76	43,27	2,60	17,84	1,38	13,91	np	n.a	n.a	SM

INU_F2_771-781	-7,71	-7,81	22,19	n.d	0,19	n.d	0,00	73,37	26,63	3,09	19,41	3,56	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_822-832	-8,22	-8,32	17,81	n.d	0,00	n.d	3,94	72,19	23,87	0,94	22,55	2,32	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_890-900	-8,90	-9,00	18,85	n.d	0,16	n.d	0,09	80,03	19,88	0,45	19,02	3,00	16,73	np	n.a	n.a	SM
INU_F2_920-930	-9,20	-9,30	18,42	n.d	0,00	n.d	0,05	63,03	36,91	1,36	17,17	1,16	14,26	np	n.a	n.a	SM
INU_F2_940-950	-9,40	-9,50	11,32	n.d	0,00	n.d	27,57	66,08	6,35	0,28	11,45	2,82	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_985-995	-9,85	-9,95	14,56	n.d	0,10	n.d	9,96	81,01	9,03	0,00	23,24	1,81	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F2_1001-1011	-10,01	-10,11	10,70	n.d	0,00	n.d	15,39	70,46	14,15	0,45	95,20	20,28	13,08	np	n.a	n.a	SM
INU_F2_1038-1048	-10,38	-10,48	9,97	n.d	0,33	n.d	27,47	61,46	11,08	0,07	49,28	9,82	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_139-144	-1,39	-1,44	20,42	n.d	0,18	n.d	0,00	68,71	31,29	4,13	12,84	2,40	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_205-215	-2,05	-2,15	17,37	n.d	0,25	n.d	32,82	31,47	35,70	0,00	125,41	0,07	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_240-250	-2,40	-2,50	23,64	n.d	0,29	n.d	8,20	27,79	64,02	3,42	13,24	1,32	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_280-290	-2,80	-2,90	24,18	n.d	0,00	n.d	0,00	36,20	63,80	3,80	14,21	1,32	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_335-345	-3,35	-3,45	23,39	n.d	0,00	n.d	0,00	38,60	61,40	3,60	13,13	1,40	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_393-403	-3,93	-4,03	17,41	n.d	0,15	n.d	3,11	76,69	20,21	0,60	15,98	1,99	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_425-435	-4,25	-4,35	7,15	n.d	0,00	n.d	25,10	42,23	32,67	0,37	102,43	0,24	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_484-494	-4,84	-4,94	11,41	n.d	0,00	n.d	17,94	55,36	26,70	0,17	14,17	1,46	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F3_540-552	-5,40	-5,52	8,26	n.d	0,00	n.d	15,84	51,33	32,83	0,21	30,47	0,71	14,43	np	n.a	n.a	SM
INU_F3_660-671	-6,60	-6,71	10,89	n.d	0,27	n.d	24,41	72,92	2,68	0,00	6,34	1,64	n.d	n.d	n.d	n.d	SW

Tableau 40: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage INU_F4.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
INU_F4_80-90	-0,80	-0,90	18,77	n.d	1,10	n.d	0,13	24,60	75,27	0,06	3,35	0,78	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_104-114	-1,04	-1,14	19,45	n.d	1,13	n.d	0,00	28,08	71,92	0,00	4,26	0,85	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_140-152	-1,40	-1,52	15,76	n.d	0,46	n.d	5,15	56,96	37,88	0,10	9,98	1,26	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_170-180	-1,70	-1,80	16,63	n.d	0,26	n.d	5,15	56,96	37,88	0,10	9,98	1,26	20,59	np	n.a	n.a	SM
INU_F4_210-220	-2,10	-2,20	14,41	n.d	0,24	n.d	13,94	53,67	32,39	1,40	13,95	1,80	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_250-260	-2,50	-2,60	25,16	n.d	1,38	n.d	0,00	15,60	84,40	13,33	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_260-270	-2,60	-2,70	17,74	n.d	0,63	n.d	0,00	32,46	67,54	15,78	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_291-301	-2,91	-3,01	18,87	n.d	0,31	n.d	0,00	27,42	72,58	14,16	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_320-330	-3,20	-3,30	24,54	n.d	0,61	n.d	0,00	14,11	85,89	4,13	2,74	1,04	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_345-355	-3,45	-3,55	23,49	n.d	0,82	n.d	0,00	17,12	82,88	7,94	12,81	1,61	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_365-375	-3,65	-3,75	22,50	n.d	0,79	n.d	0,00	11,56	88,44	2,66	2,56	1,04	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_405-420	-4,05	-4,20	24,18	n.d	1,04	n.d	0,00	12,56	87,44	2,59	4,38	0,98	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_420-435	-4,20	-4,35	22,42	n.d	0,63	n.d	0,00	26,66	73,34	6,17	15,21	1,53	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_440-450	-4,40	-4,50	14,85	n.d	0,30	n.d	0,00	39,23	60,77	4,49	14,31	1,51	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_520-530	-5,20	-5,30	13,50	n.d	0,32	n.d	3,85	52,88	43,27	1,29	17,24	0,95	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_538-550	-5,38	-5,50	21,89	n.d	0,00	n.d	0,00	29,55	70,45	4,94	14,64	1,56	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_575-592	-5,75	-5,92	17,04	n.d	0,16	n.d	0,00	12,70	87,30	1,94	6,49	1,35	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F4_592-615	-5,92	-6,15	6,44	n.d	0,18	n.d	14,89	58,82	26,29	0,71	36,86	1,25	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F6_90-100	-0,90	-1,00	13,93	n.d	0,48	n.d	0,00	33,21	66,79	10,46	31,11	2,27	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F6_153-160	-1,53	-1,60	21,12	n.d	0,00	n.d	0,00	58,54	41,46	6,03	28,78	1,54	n.d	n.d	n.d	n.d	
INU_F6_Env. 180	-1,80	-1,85	22,68	n.d	0,00	n.d	1,14	68,82	30,04	0,80	16,21	2,06	14,88	np	n.a	n.a	SM

Tableau 41: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F1.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₂ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
PUV_F1_150-163	-1,50	-1,63	9,78	n.d	0,00	n.d	48,91	39,38	11,71	0,05	236,95	3,58	n.d	n.d	n.d	n.d	GP-GM
PUV_F1_163-172	-1,63	-1,72	13,24	n.d	0,00	n.d	14,16	71,09	14,75	0,50	44,87	4,31	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_187-197	-1,87	-1,97	15,35	n.d	0,00	n.d	19,23	65,41	15,36	1,26	187,53	1,82	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_197-210	-1,97	-2,10	16,75	n.d	0,00	n.d	1,61	62,59	35,79	5,45	36,25	1,55	9,72	NP	n.a	n.a	SM
PUV_F1_251-261	-2,51	-2,61	20,37	n.d	0,00	n.d	0,69	56,92	42,39	5,94	25,05	2,03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_300-360	-3,00	-3,60	18,94	n.d	0,00	n.d	20,03	67,32	12,65	0,62	50,10	0,33	18,80	NP	n.a	n.a	SM
PUV_F1_400-420	-4,00	-4,20	25,93	n.d	0,00	n.d	0,66	27,87	71,47	11,12	37,61	2,48	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_420-430	-4,20	-4,30	29,86	n.d	0,00	n.d	7,90	13,91	78,19	13,34	46,62	3,68	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_430-440	-4,30	-4,40	34,56	n.d	0,00	n.d	1,69	17,17	81,14	5,54	10,82	1,17	22,97	17,51	5,46	3,12	ML-CL
PUV_F1_440-446	-4,40	-4,46	33,63	n.d	0,00	n.d	10,94	15,66	73,40	8,22	14,77	1,39	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_530-540	-5,30	-5,40	37,44	n.d	1,23	n.d	0,03	27,71	72,26	0,76	7,72	0,98	24,19	19,43	4,76	3,78	ML-CL
PUV_F1_540-555	-5,40	-5,55	29,48	n.d	0,00	n.d	2,25	22,53	75,22	2,32	11,03	1,09	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_562-569	-5,62	-5,69	32,59	n.d	1,48	n.d	0,00	24,39	75,61	0,81	7,42	0,86	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_576-583	-5,76	-5,83	34,87	n.d	1,41	n.d	0,00	25,98	74,02	0,46	7,27	0,81	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_590-597	-5,90	-5,97	31,16	n.d	0,00	n.d	0,00	8,00	92,00	14,83	27,49	3,04	28,37	20,45	7,93	1,09	CL
PUV_F1_600-610	-6,00	-6,10	29,08	n.d	0,90	n.d											
PUV_F1_650-653	-6,50	-6,53	23,66	n.d	0,77	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_705-713	-7,05	-7,13	20,62	n.d	0,93	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_730-740	-7,30	-7,40	30,21	n.d	1,02	n.d	0,15	13,45	86,40	4,91	7,87	1,13	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_750-760	-7,50	-7,60	17,40	n.d	0,51	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.a	n.a	19,03	13,97	5,06	0,68	ML-CL
PUV_F1_810-820	-8,10	-8,20	12,95	n.d	0,96	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_910-920	-9,10	-9,20	9,38	n.d	0,00	n.d	10,42	49,85	39,73	0,01	31,73	0,36	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_940-950	-9,40	-9,50	4,64	n.d	0,00	n.d	55,05	28,97	15,98	0,01	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_966-976	-9,66	-9,76	8,62	n.d	0,00	n.d	16,39	45,09	38,52	0,15	67,52	0,20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_1152-1159	-11,52	-11,59	8,90	n.d	0,00	n.d	21,77	57,41	20,81	0,03	95,69	1,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_1218-1238	-12,18	-12,38	6,87	n.d	0,00	n.d	14,34	51,34	34,32	0,21	95,81	0,22	13,39	NP	n.a	n.a	SM

Tableau 42: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F2.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
PUV_F2_75-80	-0,75	-0,80	11,95	n.d	0,00	n.d	21,81	55,25	22,94	0,00	27,26	1,09	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_90-99	-0,90	-0,99	10,84	n.d	1,86	n.d	22,46	56,90	20,64	0,75	178,16	1,29	12,03	NP	n.a	n.a	SM
PUV_F2_123-133	-1,23	-1,33	13,37	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_188-198	-1,88	-1,98	15,94	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_230-240	-2,30	-2,40	23,61	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	18,11	NP	n.a	n.a	n.d
PUV_F2_280-290	-2,80	-2,90	26,99	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_330-360	-3,30	-3,60	23,82	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	20,82	18,02	2,80	2,07	n.d
PUV_F2_430-440	-4,30	-4,40	37,08	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	29,41	22,54	6,87	2,12	n.d
PUV_F2_460-470	-4,60	-4,70	38,47	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_490-500	-4,90	-5,00	31,32	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_550-560	-5,50	-5,60	38,91	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_608-610	-6,08	-6,10	32,91	n.d	1,37	n.d	0,00	33,68	66,32	3,34	12,40	0,89	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_660-670	-6,60	-6,70	28,75	n.d	0,00	n.d	0,00	34,11	65,89	2,12	11,56	0,85	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_680-690	-6,80	-6,90	31,23	n.d	1,03	n.d	0,00	20,28	79,72	1,89	7,72	1,00	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_700-710	-7,00	-7,10	27,25	n.d	1,24	n.d	0,00	16,38	83,62	1,21	7,03	1,01	25,69	19,30	6,38	1,25	ML-CL
PUV_F2_750-760	-7,50	-7,60	27,31	n.d	1,33	n.d	0,00	17,51	82,49	2,82	8,93	1,10	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_770-780	-7,70	-7,80	26,18	n.d	0,76	n.d	0,04	17,01	82,94	4,78	10,42	1,08	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_780-840#2	-7,80	-8,40	24,18	n.d	1,17	n.d	0,60	30,16	69,23	3,77	14,39	1,05	23,21	18,05	5,16	1,38	ML-CL
PUV_F2_780-840#4	-7,80	-8,40	26,54	n.d	1,10	n.d	0,12	29,86	70,02	2,52	11,29	1,02	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_780-840#6	-7,80	-8,40	23,49	n.d	1,00	n.d	0,04	31,17	68,79	3,05	14,05	1,11	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_780-840#8	-7,80	-8,40	27,43	n.d	0,80	n.d	0,00	32,54	67,46	3,08	13,64	1,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_910-920	-9,10	-9,20	17,67	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	18,78	14,83	3,95	0,72	n.d
PUV_F2_1045-1056	-10,45	-10,56	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	12,59	NP	n.a	n.a	n.d
PUV_F2_1080-1090	-10,80	-10,90	26,64	n.d	0,38	n.d	0,05	89,81	10,15	0,00	3,55	1,13	n.d	n.d	n.d	n.d	SP-SM
PUV_F2_1112-1124	-11,12	-11,24	8,56	n.d	0,00	n.d	17,46	57,47	25,07	0,06	44,03	1,12	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_1150-1160	-11,50	-11,60	11,88	n.d	0,26	n.d	3,90	69,65	26,45	0,01	20,17	1,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_1170-1184	-11,70	-11,84	12,30	n.d	0,26	n.d	2,59	67,14	30,27	0,00	14,70	1,34	15,36	NP	n.a	n.a	SM
PUV_F2_1204-1214	-12,04	-12,14	15,17	n.d	0,29	n.d	8,67	85,16	6,17	0,00	6,17	1,03	n.d	n.d	n.d	n.d	SW-SM
PUV_F2_1238-1248	-12,38	-12,48	11,58	n.d	0,00	n.d	8,15	45,56	46,29	0,34	17,88	0,56	14,90	NP	n.a	n.a	SM-ML
PUV_F2_1304-1315	-13,04	-13,15	11,37	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	16,09	NP	n.a	n.a	n.d
PUV_F2_1358-1368	-13,58	-13,68	17,57	n.d	0,22	n.d	0,00	50,90	49,10	0,00	5,96	1,28	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_1387-1397	-13,87	-13,97	8,22	n.d	0,31	n.d	35,62	49,98	14,40	0,00	95,80	2,20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_1458-1468	-14,58	-14,68	10,23	n.d	0,23	n.d	12,69	49,67	37,63	0,01	21,48	0,62	13,07	NP	n.a	n.a	SM-ML
PUV_F2_1503-1513	-15,03	-15,13	6,95	n.d	0,19	n.d	32,43	33,61	33,96	0,00	151,09	0,10	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tableau 43: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F3, PUV_F4 et PUV_F5.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₂ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
PUV_F3_26-36	-0,26	-0,36	16,59	n.d	0,00	n.d	0,00	26,39	73,61	3,98	13,16	1,18	17,34	12,71	4,63	0,84	ML-CL
PUV_F3_60-65	-0,60	-0,65	17,57	n.d	0,87	n.d	0,00	39,72	60,28	6,15	22,11	1,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F3_130-135	-1,30	-1,35	16,16	n.d	0,66	n.d	7,50	45,22	47,28	0,62	15,22	0,93	13,41	11,69	1,72	2,60	SM-ML
PUV_F3_245-250	-2,45	-2,50	10,87	n.d	0,09	n.d	21,96	50,87	27,17	0,00	47,40	0,41	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F3_260-270	-2,60	-2,70	9,54	n.d	0,12	n.d	15,57	52,29	32,14	0,01	18,62	0,87	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_20-30	-0,20	-0,30	18,21	n.d	1,47	n.d	14,65	51,65	33,69	0,00	18,58	0,75	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_81-86	-0,81	-0,86	11,59	n.d	0,45	n.d	8,59	51,74	39,66	0,03	20,29	0,60	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_120-128	-1,20	-1,28	8,76	n.d	0,53	n.d	23,91	51,23	24,86	0,00	63,31	0,44	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_190-200	-1,90	-2,00	7,81	n.d	0,15	n.d	29,13	48,56	22,31	0,00	73,80	0,37	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_242-252	-2,42	-2,52	8,47	n.d	0,18	n.d	22,93	57,08	19,99	0,00	39,09	0,52	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_252-266	-2,52	-2,66	9,75	n.d	0,16	n.d	26,80	56,41	16,78	0,00	57,16	0,64	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_270-275	-2,70	-2,75	12,15	n.d	0,22	n.d	7,51	50,75	41,74	0,00	12,23	0,77	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_283-293	-2,83	-2,93	10,78	n.d	0,12	n.d	n.d	n.d	0,00	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_128-133	-1,28	-1,33	8,89	n.d	0,71	n.d	44,21	48,88	6,91	0,00	49,70	1,34	n.d	n.d	n.d	n.d	SW-SM
PUV_F5_133-138	-1,33	-1,38	11,70	n.d	0,58	n.d	11,85	70,87	17,29	0,34	88,89	1,39	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_195-205	-1,95	-2,05	27,71	n.d	1,19	n.d	0,00	21,12	78,88	0,56	6,77	0,88	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_215-225	-2,15	-2,25	27,34	n.d	1,09	n.d	0,00	15,80	84,20	1,08	6,70	0,98	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_260-270	-2,60	-2,70	25,04	n.d	0,83	n.d	0,00	13,84	86,16	3,25	7,75	1,09	21,19	17,70	3,48	2,11	ML
PUV_F5_280-290	-2,80	-2,90	10,10	n.d	0,85	n.d	16,93	11,69	71,38	1,91	9,87	0,98	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_324-334	-3,24	-3,34	22,14	n.d	0,51	n.d	0,00	14,69	85,31	3,74	8,64	1,06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_344-354	-3,44	-3,54	25,04	n.d	0,70	n.d	0,00	15,21	84,79	4,36	9,30	1,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_398-418	-3,98	-4,18	23,92	n.d	0,67	n.d	1,60	25,57	72,84	2,42	10,57	1,00	14,68	9,82	4,85	2,91	ML-CL
PUV_F5_420-437	-4,20	-4,37	9,67	n.d	0,10	n.d	25,50	52,93	21,57	0,19	88,39	0,47	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_480-492	-4,80	-4,92	18,77	n.d	0,18	n.d	6,35	16,20	77,45	0,13	4,24	1,11	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_502-512	-5,02	-5,12	20,68	n.d	0,85	n.d	0,35	27,17	72,48	0,14	4,30	1,24	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_540-550	-5,40	-5,50	14,48	n.d	0,14	n.d	11,93	17,60	70,46	0,13	4,95	1,03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_550-557	-5,50	-5,57	8,38	n.d	0,19	n.d	18,11	59,81	22,09	0,10	100,35	0,64	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tableau 44: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage AKU_F1.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
AKU_F1_88-98	-0,88	-0,98	8,42	n.d	n.d	n.d	8,65	46,50	44,85	0,10	22,31	0,38	14,38	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F1_98-105	-0,98	-1,05	17,58	n.d	n.d	n.d	33,11	62,69	4,20	0,00	1,97	1,23	n.d	n.d	n.d	n.d	SP
AKU_F1_133-141	-1,33	-1,41	8,82	n.d	n.d	n.d	19,00	40,94	40,05	0,00	32,41	0,29	14,97	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F1_195-205	-1,95	-2,05	6,29	n.d	n.d	n.d	29,02	55,06	15,92	0,79	158,32	72,83	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_215-225	-2,15	-2,25	8,52	n.d	n.d	n.d	14,14	71,10	14,76	0,60	100,49	25,05	15,16	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F1_245-250	-2,45	-2,50	9,01	n.d	n.d	n.d	5,41	35,45	59,14	0,17	11,61	0,43	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_281-291	-2,81	-2,91	9,51	n.d	n.d	n.d	11,50	51,63	36,87	2,30	135,43	0,14	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_298-308	-2,98	-3,08	8,94	n.d	n.d	n.d	12,38	40,65	46,96	0,11	31,28	0,22	15,13	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F1_353-361	-3,53	-3,61	7,72	n.d	n.d	n.d	21,35	44,33	34,32	0,10	71,88	0,30	15,00	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F1_376-386	-3,76	-3,86	10,85	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_env400	-4,00	0,00	13,18	n.d	0,44	n.d	7,11	28,38	64,50	0,55	9,11	0,57	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_416-431	-4,16	-4,31	10,21	n.d	0,87	n.d	20,50	45,30	34,20	0,09	49,71	0,41	14,88	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F1_442-451	-4,42	-4,51	9,64	n.d	0,75	n.d	21,43	41,06	37,51	0,00	55,91	0,23	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_451-460	-4,51	-4,60	11,56	n.d	1,09	n.d	20,40	52,23	27,37	0,00	52,65	0,69	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_486-496	-4,86	-4,96	n.d	n.d	n.d	n.d	32,82	64,13	3,05	0,56	2,76	0,91	n.d	n.d	n.d	n.d	SP
AKU_F1_670-675	-6,70	-6,75	12,60	n.d	n.d	n.d	16,32	73,67	10,00	0,00	38,86	20,40	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_724-748	-7,24	-7,48	n.d	n.d	n.d	n.d	100,0	0,00	0,00	0,00	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_828-838	-8,28	-8,38	11,13	n.d	n.d	n.d	14,37	32,50	53,13	1,41	22,68	0,34	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_848-858	-8,48	-8,58	11,19	n.d	0,81	n.d	12,97	51,72	35,31	0,09	82,86	0,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_919-929	-9,19	-9,29	13,60	n.d	0,82	n.d	8,66	44,54	46,81	0,11	27,32	0,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_939-949	-9,39	-9,49	14,44	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_1033-1043	-10,33	-10,43	10,74	n.d	n.d	n.d	14,81	74,36	10,84	0,00	46,41	26,66	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_1280-1290	-12,80	-12,90	19,23	n.d	n.d	n.d	73,08	20,55	6,37	0,04	15,08	4,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F1_1303-1313	-13,03	-13,13	12,11	n.d	n.d	n.d	7,95	77,18	14,88	0,36	104,34	55,95	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tableau 45: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage AKU_F2.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
AKU_F2_60-70	-0,60	-0,70	18,04	n.d	n.d	35*	6,94	82,87	10,19	0,00	29,31	1,08	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_95-105	-0,95	-1,05	9,74	n.d	n.d	9*	50,74	36,29	12,98	0,00	285,97	1,69	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_134-144	-1,34	-1,44	9,23	n.d	n.d	9*	7,97	31,10	58,58	2,35	12,63	0,55	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_194-204	-1,94	-2,04	11,81	n.d	n.d	9*	16,35	61,91	21,55	0,19	120,01	3,83	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_214-222	-2,14	-2,22	17,96	n.d	n.d	55*	0,00	83,21	16,64	0,15	127,36	3,66	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_222-230	-2,22	-2,30	21,72	n.d	n.d	91*	0,00	15,70	76,91	7,39	3,69	0,84	22,36	16,33	6,03	0,89	ML-CL
AKU_F2_250-260	-2,50	-2,60	21,81	n.d	n.d	91*	0,00	40,67	59,33	0,00	11,06	0,38	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_270-280	-2,70	-2,80	13,87	n.d	n.d	10*	8,44	38,50	53,05	0,01	23,41	0,20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_306-316	-3,06	-3,16	17,17	n.d	n.d	10*	0,88	36,66	62,45	0,00	8,76	0,48	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_316-319	-3,16	-3,19	10,66	n.d	n.d	9*	0,00	25,94	74,06	0,00	3,94	0,72	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_354-356	-3,54	-3,56	12,09	n.d	0,44	n.d	2,45	39,21	57,55	0,79	11,23	0,43	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_364-385	-3,64	-3,85	15,04	n.d	0,62	43,69	3,94	70,99	24,96	0,10	47,94	2,29	13,17	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F2_385-388	-3,85	-3,88	n.d	n.d	n.d	n.d	3,31	45,60	49,17	1,93	32,28	0,34	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_486-496	-4,86	-4,96	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_496-502	-4,96	-5,02	10,02	n.d	n.d	n.d	16,95	56,83	26,13	0,09	145,21	0,62	14,19	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F2_547-557	-5,47	-5,57	9,66	n.d	n.d	n.d	17,37	68,34	14,14	0,14	79,21	35,42	14,44	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F2_557-565	-5,57	-5,65	9,81	n.d	n.d	n.d	11,17	36,29	49,95	2,59	14,84	0,41	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_584-600	-5,84	-6,00	10,17	n.d	0,74	n.d	19,62	47,56	32,63	0,19	55,21	0,38	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_600-612	-6,00	-6,12	15,29	n.d	0,81	n.d	11,92	27,89	59,99	0,20	9,55	0,39	14,43	NP	n.a	n.a	ML
AKU_F2_760-763	-7,60	-7,63	10,77	n.d	0,82	n.d	33,28	27,63	39,10	0,00	138,32	0,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_773-786	-7,73	-7,86	15,16	n.d	0,62	n.d	11,16	38,12	50,43	0,30	16,07	0,31	15,21	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F2_868-878	-8,68	-8,78	13,24	n.d	n.d	n.d	15,52	37,87	46,27	0,34	49,34	0,15	17,17	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F2_888-898	-8,88	-8,98	13,74	n.d	n.d	n.d	5,26	32,49	61,35	0,90	10,71	0,56	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_940-945	-9,40	-9,45	11,96	n.d	n.d	n.d	25,87	64,04	10,09	0,00	41,17	21,22	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_945-950	-9,45	-9,50	12,92	n.d	0,79	n.d	11,67	46,00	42,32	0,00	31,98	0,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_973-980	-9,73	-9,80	11,14	n.d	n.d	n.d	17,89	30,51	48,87	2,73	31,12	0,30	14,82	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F2_1167-1177	-11,67	-11,77	10,21	n.d	n.d	n.d	21,45	34,15	43,76	0,64	47,03	0,20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F2_1184-1194	-11,84	-11,94	9,48	n.d	n.d	n.d	26,83	38,94	33,64	0,59	149,25	0,17	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

*Pourcentage en carbonate (CO₃) évalué visuellement.

Tableau 46: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage AKU_F3.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
AKU_F3_15-21	-0,15	-0,21	9,35	n.d	1,95	n.d	8,55	50,35	41,09	0,00	40,34	0,24	15,95	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F3_80-90	-0,80	-0,90	9,30	n.d	n.d	n.d	25,46	29,48	44,99	0,07	36,42	0,21	16,25	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F3_135-145	-1,35	-1,45	n.d	n.d	n.d	n.d	0,00	87,09	12,91	0,00	8,37	4,14	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_150-160	-1,50	-1,60	7,83	n.d	0,90	n.d	24,88	29,04	45,93	0,14	46,30	0,15	14,67	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F3_170-180	-1,70	-1,80	8,59	n.d	0,32	n.d	19,88	58,88	21,16	0,08	143,06	8,01	14,57	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F3_240-250	-2,40	-2,50	7,59	n.d	1,02	n.d	54,29	42,37	3,33	0,00	5,68	0,80	n.d	n.d	n.d	n.d	GP
AKU_F3_252-257	-2,52	-2,57	7,77	n.d	n.d	n.d	33,31	35,88	29,51	1,30	259,03	0,20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_398-400	-3,98	-4,00	14,19	n.d	0,43	n.d	8,54	33,84	57,38	0,25	11,25	0,37	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_446-456	-4,46	-4,56	9,73	n.d	n.d	n.d	18,45	44,36	37,19	0,00	95,75	0,11	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_456-466	-4,56	-4,66	8,19	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_466-476	-4,66	-4,76	10,77	n.d	n.d	n.d	9,69	48,22	42,08	0,01	46,01	0,18	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_525-537	-5,25	-5,37	11,44	n.d	0,70	n.d	7,88	46,15	45,65	0,33	28,99	0,27	14,82	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F3_550-551	-5,50	-5,51	13,24	n.d	0,40	n.d	16,15	32,15	51,59	0,11	20,22	0,29	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_630-639	-6,30	-6,39	12,22	n.d	0,39	n.d	8,15	39,17	52,45	0,23	17,44	0,34	14,85	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F3_639-645	-6,39	-6,45	10,37	n.d	0,58	n.d	26,45	31,42	42,13	0,00	46,37	0,16	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_661-671	-6,61	-6,71	14,54	n.d	6,00	n.d	9,82	45,29	44,81	0,08	30,44	0,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F3_870-880	-8,70	-8,80	12,62	n.d	0,66	n.d	10,37	31,39	58,01	0,22	13,87	0,36	14,86	NP	n.a	n.a	ML
AKU_F3_880-893	-8,80	-8,93	10,50	n.d	0,18	n.d	21,61	29,88	48,39	0,11	35,71	0,16	14,86	NP	n.a	n.a	SM-ML

Tableau 47: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage AKU_F4.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
AKU_F4_19-27	-0,19	-0,27	20,90	n.d	1,05	50*	8,26	78,96	12,78	0,00	18,70	3,77	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_70-80	-0,70	-0,80	17,81	n.d	1,66	80*	0,00	91,00	9,00	0,00	3,44	1,85	n.d	n.d	n.d	n.d	SP-SM
AKU_F4_90-100	-0,90	-1,00	20,79	n.d	0,18	95*	0,00	90,18	9,83	0,00	5,08	2,11	n.d	n.d	n.d	n.d	SP-SM
AKU_F4_135-145	-1,35	-1,45	21,15	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_180-188	-1,80	-1,88	15,44	n.d	0,66	50*	11,04	83,18	5,78	0,00	10,28	0,45	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_188-201	-1,88	-2,01	20,90	n.d	1,32	n.d	0,00	46,51	52,81	0,67	16,85	0,56	28,51	19,37	9,14	0,17	SM-ML
AKU_F4_201-211	-2,01	-2,11	21,73	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_211-221	-2,11	-2,21	n.d	n.d	0,49	n.d	0,00	20,10	77,09	2,81	8,20	0,95	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_240-250	-2,40	-2,50	n.d	n.d	1,43	n.d	35,82	38,43	25,68	0,07	143,64	0,40	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_250-260	-2,50	-2,60	20,40	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_260-268	-2,60	-2,68	25,23	n.d	1,69	n.d	0,00	29,81	63,16	7,02	15,23	1,18	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_280-290	-2,80	-2,90	20,52	n.d	0,51	n.d	0,74	66,53	32,46	0,27	104,97	0,27	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_304-310	-3,04	-3,10	18,05	n.d	1,51	n.d	3,63	20,37	74,67	1,33	8,33	0,92	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_310-318	-3,10	-3,18	30,45	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_318-329	-3,18	-3,29	27,64	n.d	3,95	n.d	0,84	23,33	74,98	0,86	7,54	0,87	21,48	15,87	5,61	2,10	ML-CL
AKU_F4_329-340	-3,29	-3,40	29,18	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_340-349	-3,40	-3,49	27,94	n.d	4,81	n.d	0,84	26,94	69,42	2,81	8,95	0,82	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_349-356	-3,49	-3,56	30,22	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_386-394	-3,86	-3,94	12,42	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_394-403	-3,94	-4,03	13,98	n.d	n.d	3,08	3,54	55,19	40,76	0,51	56,63	0,22	12,95	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F4_403-411	-4,03	-4,11	13,30	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_411-420	-4,11	-4,20	13,63	n.d	0,61	2,44	7,64	54,36	37,38	0,62	70,17	0,22	12,95	NP	n.a	n.a	SM
AKU_F4_450-465	-4,50	-4,65	5,65	n.d	0,54	n.d	56,09	25,05	18,86	0,00	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_486-497	-4,86	-4,97	12,19	n.d	1,02	n.d	9,18	46,02	44,55	0,26	36,44	0,26	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_503-510	-5,03	-5,10	11,18	n.d	0,95	n.d	12,23	43,06	44,29	0,42	39,07	0,25	13,85	NP	n.a	n.a	SM-ML
AKU_F4_510-519	-5,10	-5,19	7,48	n.d	0,67	n.d	24,86	24,69	48,65	1,80	35,07	0,29	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_646-649	-6,46	-6,49	11,35	n.d	0,82	n.d	12,48	38,22	48,98	0,32	28,60	0,28	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_657-690#1	-6,57	-6,90	7,29	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_657-690#2	-6,57	-6,90	9,67	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_747-760	-7,47	-7,60	44,84	n.d	5,00	n.d	10,71	59,23	29,60	0,46	27,09	1,76	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
AKU_F4_795-805	-7,95	-8,05	5,65	n.d	0,20	n.d	67,81	28,31	3,70	0,18	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

*Pourcentage en carbonate (CO₃) évalué visuellement.

Tableau 48: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage SAL_F1 et SAL_F2.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
SAL_F1_0-20	0,00	-0,20	9,38														
SAL_F1_60-73	-0,60	-0,73	7,30		1,04	0,00	35,09	44,93	19,98	0,00	144,18	0,37					
SAL_F1_73-82	-0,73	-0,82	8,58		0,72	0,00	10,32	61,21	28,47	0,00	17,92	1,74					
SAL_F1_130-135	-1,30	-1,35	9,01		0,45	0,00	20,17	51,25	28,58	0,00	29,96	1,38					
SAL_F1_185-190	-1,85	-1,90	7,55		0,41	0,00	36,20	40,28	23,53	0,00	181,71	0,46					
SAL_F1_190-200	-1,90	-2,00	12,67		0,39	0,00	28,15	46,35	25,50	0,00	136,42	0,64					
SAL_F1_200-209	-2,00	-2,09	19,76		0,87	0,00	8,59	49,08	42,33	0,00	19,45	0,43	13,49	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F1_330-335	-3,30	-3,35	19,03		0,62	0,00	9,30	59,89	30,80	0,01	30,82	1,07					
SAL_F2_72-82	-0,72	-0,82	9,39		0,90	0,00	19,26	54,46	25,32	0,96	70,57	0,58					
SAL_F2_130-136	-1,30	-1,36	7,01		0,54	0,00	36,15	39,60	23,56	0,70	204,70	0,75					
SAL_F2_208-215	-2,08	-2,15	28,63		0,31	0,00	7,65	64,48	27,66	0,20	41,63	1,17	15,00	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F2_215-226	-2,15	-2,26	24,72		0,17	0,00	20,70	49,42	29,70	0,18	50,91	0,61					
SAL_F2_233-244	-2,33	-2,44	22,85		0,39	0,00	35,84	51,87	11,84	0,45	53,23	3,15					
SAL_F2_257-260	-2,57	-2,60	34,75		0,53	0,00	16,02	55,41	27,96	0,61	56,30	0,83					
SAL_F2_313-314	-3,13	-3,14	41,84		0,24	0,00	11,29	56,27	32,44	0,00	22,12	0,97					
SAL_F2_328-338	-3,28	-3,38	28,07		0,45	1,01	14,45	49,83	34,87	0,86	59,14	0,38	14,30	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F2_343-356	-3,43	-3,56			0,93	0,00	14,77	51,83	33,51	0,00	46,34	0,49	15,29	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F2_355-365	-3,55	-3,65	29,66		0,50	0,00	14,42	64,39	21,12	0,07	57,11	3,07					
SAL_F2_379-390	-3,79	-3,90	22,35		0,34	0,00	19,56	57,66	22,70	0,08	59,77	2,11					
SAL_F2_453-461	-4,53	-4,61	33,30		0,41	0,00	11,71	59,69	28,41	0,19	48,48	1,01					
SAL_F2_475-480	-4,75	-4,80	26,34		0,33	0,00	22,20	58,03	19,54	0,22	71,22	4,23					
SAL_F2_486-488	-4,86	-4,88	24,44		0,33	0,00	11,79	49,71	38,49	0,01	23,90	0,60					
SAL_F2_488-497	-4,88	-4,97	18,63		0,44	0,00	36,53	34,29	29,01	0,16	227,88	0,20					
SAL_F2_497-510	-4,97	-5,10	3,08		0,53	0,00	89,89	7,35	2,66	0,10							
SAL_F2_510-522	-5,10	-5,22	19,49		0,52	0,00	26,07	47,21	26,59	0,13	71,76	0,98	14,40	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F2_630-636	-6,30	-6,36	25,76		0,00	0,00	18,94	49,34	31,71	0,00	31,66	0,94					
SAL_F2_648-660	-6,48	-6,60	20,13		0,33	0,00	14,98	58,55	26,34	0,13	33,41	1,00	14,71	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F2_660-673	-6,60	-6,73	5,36		0,19	0,00	77,57	15,52	6,87	0,05							
SAL_F2_690-696	-6,90	-6,96	19,99		0,34	0,00	21,20	41,48	37,20	0,11	49,61	0,33					

Tableau 49: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage SAL_F3, SAL_F4 et SAL_F5.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
SAL_F3_144-152	-1,44	-1,52	6,98		0,43	0,00	31,34	39,88	28,78	0,00	101,57	0,29					
SAL_F3_186-194	-1,86	-1,94	11,66														
SAL_F3_194-201	-1,94	-2,01	23,87		0,88	0,00	58,71	21,31	19,89	0,08			15,55	NP	n.a	n.a	GM
SAL_F3_201-207	-2,01	-2,07	51,05														
SAL_F3_207-214	-2,07	-2,14	21,98														
SAL_F3_254-257	-2,54	-2,57	38,70		0,90	0,00	37,76	37,81	24,03	0,40	271,69	0,47					
SAL_F3_290-298	-2,90	-2,98	21,64		0,65	0,00	22,38	42,57	34,87	0,18	36,45	0,54					
SAL_F3_301-315	-3,01	-3,15	67,73		0,37	0,00	13,98	58,66	27,34	0,02	87,52	0,96					
SAL_F3_315-326	-3,15	-3,26	65,61		0,30	0,00	10,97	59,98	26,85	2,20	65,07	1,25					
SAL_F3_330-360	-3,30	-3,60	76,62		0,93	0,00	37,89	23,16	38,95	0,00							
SAL_F3_333-343	-3,33	-3,43	65,96		0,65	0,00	15,77	54,63	29,49	0,11	65,91	0,73					
SAL_F3_356-360	-3,56	-3,60	46,57		0,51	0,00	21,57	48,83	29,33	0,27	63,40	0,60					
SAL_F3_380-390	-3,80	-3,90	17,69		0,15	5,71	28,88	42,07	28,95	0,10	112,75	0,42					
SAL_F4_200-234#1	-2,00	-2,34	43,70		0,61	0,00	43,72	36,42	19,77	0,09	495,46	0,35	14,83	NP	n.a	n.a	GM
SAL_F4_200-234#2	-2,00	-2,34	15,48														
SAL_F4_200-234#3	-2,00	-2,34	20,22		0,49	0,00	14,63	56,17	28,98	0,22	45,32	0,85					
SAL_F4_240-245	-2,40	-2,45	28,12		0,80	0,00	10,03	54,61	35,22	0,14	38,99	0,53					
SAL_F4_245-258	-2,45	-2,58	14,51		0,50	0,00	37,69	40,16	21,85	0,30	205,80	0,61					
SAL_F4_258-270	-2,58	-2,70	16,90		0,76	0,00	21,96	53,35	24,25	0,44	66,05	1,80	14,50	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F4_302-308	-3,02	-3,08	19,57		0,80	0,00	97,64	0,55	1,69	0,13							
SAL_F5_10-15	-0,10	-0,15	34,04		1,22	0,00	1,73	49,06	48,93	0,28	11,48	0,39					
SAL_F5_180-192	-1,80	-1,92	33,56		0,95	0,00	34,17	34,46	31,28	0,09	108,77	0,26					
SAL_F5_192-203	-1,92	-2,03	105,59										15,11	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F5_203-214	-2,03	-2,14	184,46														
SAL_F5_214-225	-2,14	-2,25	53,00		0,56	0,00	10,02	51,64	38,07	0,27	29,77	0,39					
SAL_F5_223-236	-2,23	-2,36	47,31		0,68	0,00	19,62	44,07	36,27	0,04	49,25	0,33	14,87	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F5_258-270	-2,58	-2,70	47,08		0,26	4,37	46,92	29,90	23,21	-0,04							
SAL_F5_470-485	-4,70	-4,85	19,36		0,50	0,00	28,34	42,97	28,61	0,08	63,43	0,65	14,78	NP	n.a	n.a	SM
SAL_F5_501-510	-5,01	-5,10	23,20		0,56	0,00	12,98	52,18	34,75	0,10	35,63	0,57					

Tableau 50: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage SAL_F6.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
SAL_F6_10-15	-0,10	-0,15	22,21		5,80	0,00	0,06	27,77	72,12	0,06	6,00	0,65					
SAL_F6_20-25	-0,20	-0,25	18,18		4,50	0,00	0,76	30,97	68,14	0,12	6,30	0,59					
SAL_F6_35-40	-0,35	-0,40	15,91		4,64	0,00	0,61	37,82	61,30	0,27	7,65	0,57	23,89	3,33	20,56	0,61	CL
SAL_F6_157-167	-1,57	-1,67	108,03		2,90	0,00	2,90	23,95	72,85	0,30	3,95	0,76					
SAL_F6_167-175	-1,67	-1,75	124,73														
SAL_F6_175-182	-1,75	-1,82	72,14														
SAL_F6_182-189	-1,82	-1,89	45,84														
SAL_F6_189-200	-1,89	-2,00	36,79		2,94	0,00	0,58	28,22	71,14	0,06	4,25	0,76					
SAL_F6_222-233	-2,22	-2,33	28,71		2,30	0,00	0,35	22,56	77,12	0,00	3,08	0,85	23,75	NP	n.a	n.a	CL
SAL_F6_261-207	-2,61	-2,07	20,69		2,13	0,00	2,36	30,27	67,29	0,07	3,74	0,79					
SAL_F6_285-290	-2,85	-2,90	22,02		1,90	0,00	3,65	32,50	63,71	0,14	3,91	0,77					
SAL_F6_290-304	-2,90	-3,04			2,53	0,00	0,00	18,78	81,22	0,00	3,15	0,84					
SAL_F6_304-308	-3,04	-3,08	25,83		3,03	0,00	0,13	31,79	67,91	0,17	3,87	0,75					
SAL_F6_308-318	-3,08	-3,18	25,20		2,80	0,00	0,30	19,06	80,65	0,00	3,42	0,82					
SAL_F6_335-357	-3,35	-3,57	25,60		3,26	0,00	0,05	28,58	71,36	0,00	4,13	0,69	25,26	6,88	18,37	1,02	CL
SAL_F6_430-438	-4,30	-4,38	39,65		5,18	0,00	0,74	35,64	63,50	0,12	7,54	0,43					
SAL_F6_438-448	-4,38	-4,48	54,86														
SAL_F6_448-458	-4,48	-4,58	35,84														
SAL_F6_459-470	-4,59	-4,70	43,46														
SAL_F6_470-477	-4,70	-4,77	40,63		4,72	0,00	0,08	29,46	70,46	0,01	5,08	0,58	33,31	9,83	23,48	1,31	CL
SAL_F6_541-551	-5,41	-5,51	29,70		4,07	0,00	0,00	26,93	73,05	0,01	4,45	0,70					
SAL_F6_551-557	-5,51	-5,57	37,75														
SAL_F6_557-568	-5,57	-5,68	24,81														
SAL_F6_568-577	-5,68	-5,77	28,27		4,08	0,00	0,06	29,06	70,83	0,04	5,71	0,68	25,27	8,51	16,76	1,18	CL
SAL_F6_730-780	-7,30	-7,80	26,26		3,31	0,00	0,01	28,80	71,15	0,04	5,75	0,70					
SAL_F6_784-793	-7,84	-7,93	33,97		3,27	0,00	0,00	18,22	81,75	0,03	4,00	0,85					
SAL_F6_793-800	-7,93	-8,00	35,84														
SAL_F6_800-805	-8,00	-8,05	30,44		3,08	0,00	0,08	24,91	74,90	0,11	5,73	0,79	27,31	6,63	20,69	1,15	CL
SAL_F6_820-823	-8,20	-8,23	25,28		2,53	0,00	0,00	21,37	78,63	0,00	4,48	0,78					
SAL_F6_822-836	-8,22	-8,36	29,08		4,55	0,00	0,40	32,61	66,83	0,16	7,69	0,62	26,67	6,07	20,61	1,12	CL
SAL_F6_893-894	-8,93	-8,94	20,28		4,41	0,00	0,00	37,37	62,60	0,03	8,15	0,48					
SAL_F6_1058-1065	-10,58	-10,65	15,24														

Tableau 51: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage QUA_F1 et QUA_F2.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
QUA_F1_90-98	-0,90	-0,98	8,63	n.d	0,42	0,00	10,22	60,05	29,39	0,34	40,86	0,85	14,77	NP	n.a	n.a	SM
QUA_F2_12-24	-0,12	-0,24	15,01	n.d	1,43	0,00	19,01	71,83	8,98	0,18	8,14	1,63	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
QUA_F2_51-56	-0,51	-0,56	40,66	n.d	8,16	0,00	3,52	73,84	22,52	0,12	18,21	1,32	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
QUA_F2_60-80	-0,60	-0,80	9,22	n.d	0,98	0,00	28,14	51,74	19,94	0,19	58,46	1,31	15,03	NP	n.a	n.a	SM
QUA_F2_85-99	-0,85	-0,99	18,23	n.d	0,68	0,00	25,72	60,18	14,66	0,00	16,60	2,01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
QUA_F2_125-136	-1,25	-1,36	11,65	n.d	0,73	9,88	14,85	63,12	21,89	0,14	39,59	1,71	14,09	NP	n.a	n.a	SM

Tableau 52: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage KANGIR_F1 et KANGIR_F2.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
KAN_F1_25-35	-0,25	-0,35	5,83	n.d	1,64	0,00	53,54	38,17	8,20	0,10	69,65	0,68	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_60-70	-0,60	-0,70	5,77	n.d	0,73	0,00	49,49	44,87	5,40	0,24	30,78	0,30	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_103-113	-1,03	-1,13	8,81	n.d	1,19	0,00	50,56	42,08	6,53	0,84	35,85	0,65	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_360-375	-3,60	-3,75	7,29	n.d	0,72	0,00	54,33	28,12	17,44	0,11	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_429-437	-4,29	-4,37	13,92	n.d	0,59	0,00	23,51	45,01	31,14	0,34	43,90	0,58	14,79	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F1_507-512	-5,07	-5,12	10,01	n.d	0,22	0,00	26,61	44,74	28,43	0,22	67,69	0,64	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_536-540	-5,36	-5,40	13,95	n.d	0,58	0,00	10,27	49,50	40,01	0,21	26,32	0,58	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_536-540	-5,74	-5,84	15,17	n.d	0,45	0,00	11,94	58,28	29,16	0,62	36,19	0,96	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_646-660	-6,46	-6,60	10,04	n.d	0,53	0,00	24,88	51,94	23,04	0,14	48,65	1,51	14,67	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F1_750-764	-7,50	-7,64	11,48	n.d	0,65	0,00	23,43	50,86	25,12	0,59	43,75	1,17	15,34	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F1_774-790	-7,74	-7,90	9,08	n.d	0,33	0,00	45,52	32,45	21,88	0,14	642,37	0,14	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_821-829	-8,21	-8,29	10,84	n.d	0,63	0,00	23,65	43,41	32,73	0,21	40,28	0,53	15,33	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F1_834-840	-8,34	-8,40	10,93	n.d	0,57	0,00	22,39	40,42	37,06	0,13	32,56	0,45	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_880-885	-8,80	-8,85	10,71	n.d	0,30	0,00	22,07	51,07	25,79	1,07	47,25	1,12	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F1_936-945	-9,36	-9,45	13,86	n.d	0,34	0,00	13,91	56,38	28,34	1,37	55,45	0,86	15,01	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F1_1036-1041	-10,36	-10,41	11,20	n.d	0,56	0,00	8,29	54,54	35,78	1,39	52,98	0,36	15,82	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F2_85-96	-0,85	-0,96	10,07	n.d	1,27	0,00	47,32	46,06	6,42	0,20	40,22	0,18	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F2_133-148	-1,33	-1,48	9,13	n.d	0,46	2,91	21,41	48,39	30,05	0,15	76,87	0,35	14,79	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F2_148-156	-1,48	-1,56	n.d	n.d	0,78	2,80	25,32	42,32	32,17	0,19	70,25	0,32	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F2_257-265	-2,57	-2,65	7,34	n.d	0,55	2,13	30,85	34,83	34,17	0,15	86,44	0,26	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F2_265-280	-2,65	-2,80	9,58	n.d	0,21	3,12	22,76	21,33	55,65	0,27	126,31	0,02	14,47	NP	n.a	n.a	ML
KAN_F2_280-292	-2,80	-2,92	9,93	n.d	0,17	2,66	16,67	44,23	38,89	0,20	34,08	0,41	14,40	NP	n.a	n.a	SM

Tableau 53: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage KANGIR_F3 et KANGIR_F4.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
KAN_F3_110-120	-1,10	-1,20	7,75	n.d	0,52	0,00	47,38	42,73	9,67	0,22	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F3_214-220	-2,14	-2,20	9,91	n.d	0,54	0,00	26,10	49,32	24,30	0,28	51,31	1,18	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F3_220-232	-2,20	-2,32	10,68	n.d	0,34	0,00	9,95	53,57	36,31	0,16	26,54	0,60	14,98	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F3_238-248	-2,38	-2,48	10,96	n.d	1,66	0,52	9,83	52,89	37,03	0,25	23,71	0,65	14,47	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F3_250-265	-2,50	-2,65	10,32	n.d	1,85	0,36	19,43	47,47	32,81	0,30	34,74	0,62	15,08	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F3_300-311	-3,00	-3,11	12,55	n.d	0,49	0,00	11,30	56,33	31,83	0,55	39,42	0,66	14,79	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F3_360-365	-3,60	-3,65	12,41	n.d	0,62	0,00	20,51	52,85	26,34	0,30	41,42	0,97	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F3_432-440	-4,32	-4,40	12,06	n.d	0,48	3,14	19,09	46,49	34,17	0,25	43,46	0,52	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F3_440-454	-4,40	-4,54	10,93	n.d	0,56	3,12	27,33	45,73	26,70	0,24	51,05	0,80	13,97	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F3_457-472	-4,57	-4,72	12,51	n.d	1,87	2,68	23,59	42,87	33,19	0,36	47,47	0,45	14,30	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F3_472-480	-4,72	-4,80	12,55	n.d	0,68	2,59	13,11	47,68	38,97	0,24	26,49	0,58	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F3_540-558	-5,40	-5,58	5,91	n.d	0,49	0,00	64,50	23,09	12,25	0,16	n.a	n.a	14,72	NP	n.a	n.a	n.d
KAN_F3_675-690	-6,75	-6,90	10,45	n.d	1,48	0,83	13,95	50,71	34,27	1,07	35,14	0,63	14,49	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F3_690-705	-6,90	-7,05	9,35	n.d	1,34	1,03	13,23	53,02	33,55	0,19	23,84	0,76	14,30	NP	n.a	n.a	SM
KAN_F4_7-19	-0,07	-0,19	9,37	n.d	1,50	0,00	38,24	56,85	4,80	0,11	15,87	0,60	n.d	n.d	n.d	n.d	SP
KAN_F4_215-275	-2,15	-2,75	9,52	n.d	0,27	0,00	8,07	54,02	36,35	1,56	34,66	0,73	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
KAN_F4_275-308#2	-2,75	-3,08	7,96	n.d	0,60	0,00	42,19	40,42	17,17	0,22	237,67	0,20	13,61	NP	n.a	n.a	GM

Tableau 54: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage TAS_F1.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
TAS_F1_26-41	-0,26	-0,41	n.d	n.d	4,37	0,00	32,23	48,86	19,17	-0,26	88,59	2,11	33,18	NP	n.a	n.a	SM
TAS_F1_123-133	-1,23	-1,33	10,81	n.d	0,60	0,00	12,70	67,60	19,52	0,19	23,93	1,21	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_204-212	-2,04	-2,12	12,56	n.d	1,13	0,00	21,52	59,30	18,24	0,94	35,50	2,37	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_248-254	-2,48	-2,54	16,75	n.d	1,34	4,25	2,14	61,70	34,29	1,87	28,36	0,73	17,43	NP	n.a	n.a	SM
TAS_F1_492-500	-4,92	-5,00	16,35	n.d	1,88	5,75	17,56	50,39	31,87	0,17	53,19	0,43	18,39	13,16	5,23	0,61	SM
TAS_F1_631-643	-6,31	-6,43	14,66	n.d	2,11	4,09	17,05	53,36	29,50	0,08	37,98	0,78	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_643-658	-6,43	-6,58	15,99	n.d	0,81	2,56	2,34	66,69	30,93	0,04	18,15	1,66	14,00	NP	n.a	n.a	SM
TAS_F1_780_810#1	-7,80	-7,95	16,44	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_780_810#2	-7,95	-8,10	6,81	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1353_1394#1	-13,53	-13,61	41,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1361-1369	-13,61	-13,69	39,31	n.d	2,57	0,00	1,26	34,63	62,36	1,75	12,24	0,69	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1353_1394#3	-13,69	-13,77	36,98	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1378-1386	-13,78	-13,86	41,10	n.d	4,19	0,00	0,48	50,22	49,01	0,30	21,09	0,38	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1353_1394#5	-13,85	-13,94	49,05	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1394_1420#1	-13,94	-14,05	36,99	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1403-1412	-14,03	-14,12	31,12	n.d	5,38	0,00	4,76	49,21	45,44	0,59	38,11	0,20	32,39	19,77	12,62	0,90	SC-CL
TAS_F1_1394_1420#3	-14,10	-14,20	28,45	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1655-1675	-16,55	-16,75	32,42	n.d	3,92	0,00	1,09	39,27	58,75	0,90	13,69	0,64	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1740-1750	-17,40	-17,50	32,67	n.d	2,14	0,00	0,00	47,27	51,25	1,48	15,25	0,70	30,04	15,66	14,38	1,18	SC-CL
TAS_F1_1970_2002#1	-19,70	-19,80	22,49	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1978-1986	-19,78	-19,86	26,58	n.d	3,52	0,00	0,00	44,87	54,81	0,32	13,06	0,62	29,32	17,62	11,70	0,77	SC-CL

TAS_F1_1970_2002#3	-19,90	-20,02	25,03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_1994-2002	-19,94	-20,02	26,90	n.d	3,34	0,00	0,00	34,15	65,28	0,58	9,32	0,73	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_2002_2030#1	-20,02	-20,12	26,78	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_2011-2021	-20,11	-20,21	28,12	n.d	3,62	0,00	0,00	39,28	60,16	0,57	11,47	0,79	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F1_2002_2030#3	-20,20	-20,30	28,11	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tableau 55: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage TAS_F2.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
TAS_F2_252-261	-2,52	-2,61	27,01	n.d	2,12	4,16	2,40	47,00	50,56	0,04	8,17	0,81	17,67	NP	n.a	n.a	SM-ML
TAS_F2_261-270	-2,61	-2,70	26,86	n.d	0,99	6,49	3,57	48,06	48,30	0,07	10,72	0,67	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_522-533	-5,22	-5,33	16,53	n.d	0,54	2,84	6,98	80,89	11,69	0,43	11,08	2,57	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_536-599#2	-5,36	-5,99	1,30	n.d	0,90	9,93	92,77	6,94	0,28	0,01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	G
TAS_F2_536-599#4	-5,36	-5,99	12,65	n.d	1,47	7,65	30,52	63,55	5,74	0,19	6,02	0,58	n.d	n.d	n.d	n.d	SP-SM
TAS_F2_536-599#7	-5,36	-5,99	3,47	n.d	1,18	9,23	83,65	16,06	0,21	0,08	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	G
TAS_F2_536_599#1	-5,36	-5,46	14,83	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_536_599#3	-5,56	-5,66	6,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_536_599#5	-5,76	-5,86	3,96	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_536_599#6	-5,86	-5,99	5,40	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_614-634	-6,14	-6,34	5,26	n.d	1,64	5,17	76,88	22,12	0,91	0,09	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	G
TAS_F2_644-660	-6,44	-6,60	8,02	n.d	0,68	5,26	62,66	36,60	0,55	0,19	19,32	0,80	n.d	n.d	n.d	n.d	GP
TAS_F2_686-700	-6,86	-7,00	6,17	n.d	5,63	8,07	65,18	33,01	1,66	0,15	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	G
TAS_F2_725-733	-7,25	-7,33	6,46	n.d	1,37	6,82	67,64	30,44	1,12	0,80	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	G
TAS_F2_755-775	-7,55	-7,75	5,80	n.d	2,84	6,76	65,28	34,36	0,27	0,09	15,16	0,87	n.d	n.d	n.d	n.d	GP
TAS_F2_800-810	-8,00	-8,10	7,72	n.d	1,72	5,88	55,74	43,66	0,55	0,05	15,67	0,57	n.d	n.d	n.d	n.d	GP
TAS_F2_830-840	-8,30	-8,40	8,03	n.d	2,01	6,41	59,06	40,64	0,28	0,03	19,61	0,33	n.d	n.d	n.d	n.d	GP
TAS_F2_880-892	-8,80	-8,92	7,45	n.d	2,56	5,90	61,29	38,45	0,22	0,05	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	G
TAS_F2_920_955#1	-9,20	-9,30	14,33	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_935-944	-9,35	-9,44	14,00	n.d	0,85	5,13	34,88	64,92	0,10	0,09	4,80	1,00	n.d	n.d	n.d	n.d	SP
TAS_F2_920_955#3	-9,40	-9,55	15,82	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_970-972	-9,70	-9,72	26,51	n.d	0,85	5,13	10,45	84,32	5,72	-0,50	2,64	1,35	n.d	n.d	n.d	n.d	SP-SM
TAS_F2_1670-1675	-16,70	-16,75	33,18	n.d	1,19	12,31	0,00	1,69	97,81	0,50	4,07	1,10	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_1675-1690	-16,75	-16,90	34,24	n.d	3,07	9,13	2,25	27,66	69,76	0,34	8,19	0,80	29,02	17,66	11,36	1,46	CL
TAS_F2_1690-1697	-16,90	-16,97	32,54	n.d	1,31	10,87	0,00	23,16	76,69	0,16	6,60	0,74	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F2_1697-1706	-16,97	-17,06	29,14	n.d	0,00	10,28	0,00	18,34	80,69	0,97	6,37	0,83	25,65	16,47	9,19	1,38	CL

Tableau 56: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage TAS_F3 et TAS_F4.

Nom de l'échantillon	Profondeur (m)		W (%)	NaCl (ppt)	MO (%)	CO ₃ (%)	Granulométrie (%)				Distribution		Consistance				USCS
	Sommet	Base					Gr	Sa	Si-Ar	Ar	C _u	C _c	w _L	w _p	I _p	I _L	
TAS_F3_18-28	-0,18	-0,28	52,34	n.d	13,31	4,90	0,59	71,65	27,55	0,21	27,48	1,20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_60-74	-0,60	-0,74	14,47	n.d	1,49	1,33	7,01	83,36	9,40	0,23	8,67	3,65	n.d	n.d	n.d	n.d	SP-SM
TAS_F3_90-100	-0,90	-1,00	8,10	n.d	1,06	4,30	47,04	46,79	6,06	0,12	33,47	0,74	n.d	n.d	n.d	n.d	SP-SM
TAS_F3_112-116	-1,12	-1,16	18,60	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_123-126	-1,23	-1,26	23,46	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_158-162	-1,58	-1,62	24,28	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_176-180	-1,76	-1,80	23,98	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_177-181	-1,77	-1,81	24,18	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_195-200	-1,95	-2,00	18,06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_196-199	-1,96	-1,99	20,06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_212-220	-2,12	-2,20	18,79	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_375-385	-3,75	-3,85	23,30	n.d	1,06	4,69	5,50	56,75	37,70	0,06	11,29	1,22	16,02	NP	n.a	n.a	SM
TAS_F3_625-633	-6,25	-6,33	11,73	n.d	1,06	1,39	26,96	71,71	1,19	0,14	5,38	0,44	n.d	n.d	n.d	n.d	SP
TAS_F3_714-720	-7,14	-7,20	7,51	n.d	2,03	0,00	65,33	34,18	0,48	0,01	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	G
TAS_F3_1560_1610#1	-15,60	-15,70	35,84	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_1568-1579	-15,68	-15,79	35,92	n.d	3,60	12,07	0,00	39,37	60,39	0,23	11,44	0,50	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_1560_1610#3	-15,80	-15,90	31,40	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_1586-1599	-15,86	-15,99	33,88	n.d	2,49	9,23	0,00	38,65	61,29	0,06	9,02	0,70	26,16	15,75	10,41	1,74	CL
TAS_F3_1560_1610#5	-16,00	-16,10	30,81	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F3_1855-1875	-18,55	-18,75	28,99	n.d	1,18	0,00	0,00	63,16	36,78	0,06	10,00	2,32	19,41	NP	n.a	n.a	SM
TAS_F3_2500-2515	-25,00	-25,15	25,30	n.d	0,43	2,57	0,00	82,59	17,42	-0,01	5,47	1,86	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4_12-22	-0,12	-0,22	54,16	n.d	15,67	0,00	23,95	42,28	33,74	0,03	31,77	0,45	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4≈8m	-8,00	-8,00	5,89	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4_1280_1302#1	-12,80	-12,87	32,53	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4_1287-1295	-12,87	-12,95	33,48	n.d	2,94	0,00	3,62	35,67	58,23	2,47	15,98	0,59	31,38	14,43	16,95	1,12	CL
TAS_F4_1280_1302#3	-12,95	-13,02	28,59	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4_1650_1695#1	-16,50	-16,59	28,94	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4_1650_1695#3	-16,68	-16,77	29,68	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4_1650_1695#5	-16,85	-16,95	41,62	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4_1695-1750#2	-16,95	-17,50	45,78	n.d	2,06	0,00	0,00	42,69	56,00	1,31	14,03	0,87	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
TAS_F4_1695-1750#4	-16,95	-17,50	27,98	n.d	3,77	0,00	0,25	2,10	95,63	2,03	3,35	1,01	30,40	16,56	13,84	0,82	CL

Tableau 57: Données de l'essai de consolidation au dégel réalisé sur l'échantillon AKU_F1_431_442.

AKU_F1_431_442				
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur till			
Date de début	07-déc-09			
Date de fin	15-déc-09			
Durée (h)	185,3			
Contraintes (kPa)	100, 150 et 200			
Avant l'essai				
Poids gelé (g)	663,1			
Poids CBR (g)	7386,2			
Volume (cm ³)	304,3			
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			
Indice des vides (e ₀)	0,386			
Hauteur (mm)	114,50			
	114,55			
	114,59			
	114,42			
	114,34			
Moyenne (mm)	114,48			
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	
	Φ ₁	55,18	58,88	60,42
	Φ ₂	55,35	58,54	58,84
	Φ ₃	55,32	58,93	59,70
		55,28	58,78	59,65
Moyenne (mm)	57,91			
Après l'essai				
Contrainte (kPa)	100	150	200	
Hauteur (mm)	86,9	84,8	84,5	
Diamètre (mm)	65,0	65,0	65,0	
Volume (cm ³)	288,4	281,4	280,4	
Indice des vides (e _i)	0,313	0,281	0,277	
Taux de consolidation	5,3%	7,5%	7,9%	
Teneur en eau				
Tare (g)	126,2			
Échantillon gelé (g)	661,2			
Tare + échantillon séché (g)	719,2			
Masse de sol (g)	593,0			
Masse d'eau (g)	68,2			
Teneur en eau	11,5%			
Commentaires				
L'échantillon semble très pauvre en glace. Il y a beaucoup de gravier, ce qui le rend très difficile à tailler correctement. L'échantillon a déformé très rapidement au début. Température imposée à +2°C sur la tête et 0°C sur la base afin de dégeler par le haut sur une période de 24 heures. L'essai a été réalisé à 300 kPa également, pour un taux de consolidation de <u>9,0%</u> .				



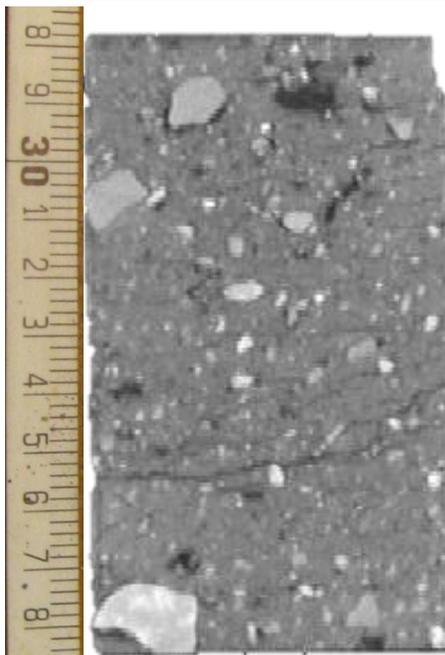
Échantillon prélevé le 30 août 2008
Aéroport d'Akulivik



Échantillon avant et après essai consolidation au dégel

Tableau 58: Données de l'essai de consolidation réalisé sur SAL_F2_328_338.

SAL_F2_328_338			
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel		
Date de début	20-juil-10		
Date de fin	22-juil-10		
Durée (h)	48,0		
Contraintes (kPa)	100 et 200		
Avant l'essai			
Poids gelé (g)	468,6		
Poids CBR (g)	7315,0		
Volume (cm ³)	252,6		
Densité des grains (g/cm ³)	2,7		
Indice des vides (e ₀)	0,864		
Hauteur (mm)	96,01		
	97,07		
	96,06		
	97,25		
	96,89		
Moyenne (mm)	96,66		
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas
φ ₁	55,6	58,24	57,81
φ ₂	56,83	60,03	57,68
φ ₃	57,03	57,81	58,08
	56,49	58,69	57,86
Moyenne (mm)	57,68		
Après l'essai			
Contrainte (kPa)	100	150	200
Hauteur (mm)	51,7		51,19
Diamètre (mm)	65,0		65,0
Volume (cm ³)	171,6		169,9
Indice des vides (e _r)	0,266		0,253
Taux de consolidation	32,1%		32,7%
Teneur en eau			
Tare (g)	197,3		
Échantillon gelé (g)	468,6		
Tare + échantillon séché (g)	563,2		
Masse de sol (g)	365,9		
Masse d'eau (g)	102,7		
Teneur en eau	28,1%		
Commentaires			



Échantillon prélevé le 11 octobre 2008
Aéroport de Salluit

Tableau 59 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur SAL_F3_343_356.

SAL_F3_343_356				
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur till			
Date de début	18-nov-09			
Date de fin	25-nov-09			
Durée (h)	163,0			
Contraintes (kPa)	100, 150 et 200			
Avant l'essai				
Poids gelé (g)	577,2			
Poids CBR (g)	7257,6			
Volume (cm ³)	336,8			
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			
Indice des vides (e ₀)	1,213			
Hauteur (mm)	126,67			
	126,60			
	126,38			
	126,92			
	126,76			
Moyenne (mm)	126,67			
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	
	φ ₁	57,24	59,18	59,32
	φ ₂	57,25	58,32	57,85
	φ ₃	58,00	58,92	59,82
	Moyenne (mm)	57,50	58,81	59,00
Moyenne (mm)	58,43			
Après l'essai				
Contrainte (kPa)	100	150	200	
Hauteur (mm)	58,0	57,0	57,0	
Diamètre (mm)	65,0	65,0	65,0	
Volume (cm ³)	192,5	189,1	189,1	
Indice des vides (e _i)	0,265	0,243	0,243	
Taux de consolidation	42,8%	43,8%	43,8%	
Teneur en eau				
Tare (g)	126,3			
Échantillon gelé (g)	577,2			
Tare + échantillon séché (g)	537,1			
Masse de sol (g)	410,8			
Masse d'eau (g)	166,4			
Teneur en eau	40,5%			
Commentaires				
Le volume de l'échantillon gelé, pour cet essai et pour les suivants, est mesuré à l'aide de la méthode du moule CBR.				
<i>Masse du moule CBR vide = 5343,2 g</i>				
<i>Volume du moule CBR = 1352,1 cm³</i>				
<i>Masse volumique du sable déposé = 1,317 g/cm³</i>				
Température imposée à +2°C sur la tête et 0°C sur la base afin de dégeler par le haut sur une période de 24 heures. Comme la consolidation a été très grande, la limite de 50 mm de déplacement du LVDT a été atteinte et les mesures prises à l'aide d'une règle.				



Échantillon prélevé le 14 octobre 2008
Aéroport de Salluit



Échantillon avant et après essai consolidation au dégel

Tableau 60 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur SAL_F6_290_304.

SAL_F6_290_304				
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur SA			
Date de début	01-déc-09			
Date de fin	07-déc-09			
Durée (h)	146,8			
Contraintes (kPa)	100, 150 et 200			
Avant l'essai				
Poids gelé (g)	776,8			
Poids CBR (g)	7370,2			
Volume (cm ³)	402,8			
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			
Indice des vides (e ₀)	0,791			
Hauteur (mm)	138,35			
	138,71			
	139,12			
	138,55			
	138,41			
Moyenne (mm)	138,63			
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	
	Φ ₁	60,91	61,26	61,06
	Φ ₂	60,85	61,43	62,07
	Φ ₃	58,30	62,50	62,42
		60,02	61,73	61,85
Moyenne (mm)	61,20			
Après l'essai				
Contrainte (kPa)	100	150	200	
Hauteur (mm)	113,9	112,2	111,0	
Diamètre (mm)	65,0	65,0	65,0	
Volume (cm ³)	378,0	372,3	368,3	
Indice des vides (e _i)	0,681	0,656	0,638	
Taux de consolidation	6,2%	7,6%	8,6%	
Teneur en eau				
Tare (g)	126,1			
Échantillon gelé (g)	776,8			
Tare + échantillon sec (g)	733,3			
Masse de sol (g)	607,2			
Masse d'eau (g)	169,6			
Teneur en eau	27,9%			
Commentaires				
Température imposée à +2°C sur la tête et 0°C sur la base afin de dégeler par le haut sur une période de 24 heures. Par la suite, et ce pour tous les essais, les températures sont augmentées à environ +5°C afin de s'assurer que l'échantillon est bien dégelé. Cet échantillon comporte des traces de coquillages.				



Échantillon prélevé le 25 octobre 2008
Aéroport de Salluit



Échantillon avant et après essai consolidation
au dégel

Tableau 61 :Données de l'essai de consolidation réalisé sur QUA_F2_178_190.

QUA_F2_178_190				
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur till			
Date de début	06-janv-10			
Date de fin	12-janv-10			
Durée (h)	141,5			
Contraintes (kPa)	100, 150 et 200			
Avant l'essai				
Poids gelé (g)	787,3			
Poids CBR (g)	7464,3			
Volume (cm ³)	339,3			
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			
Indice des vides (e ₀)	0,269			
Hauteur (mm)	118,62			
	118,41			
	118,03			
	118,06			
	118,26			
Moyenne (mm)	118,28			
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	
	φ ₁	61,11	61,89	62,28
	φ ₂	61,11	61,57	62,15
	φ ₃	60,08	61,24	61,72
		60,77	61,57	62,05
Moyenne (mm)	61,46			
Après l'essai				
Contrainte (kPa)	100	150	200	
Hauteur (mm)	96,0	95,7	95,4	
Diamètre (mm)	65,0	65,0	65,0	
Volume (cm ³)	318,6	317,6	316,6	
Indice des vides (e _r)	0,191	0,187	0,184	
Taux de consolidation	6,1%	6,4%	6,7%	
Teneur en eau				
Tare (g)	125,8			
Échantillon gelé (g)	787,3			
Tare + échantillon séché (g)	847,9			
Masse de sol (g)	722,1			
Masse d'eau (g)	65,2			
Teneur en eau	9,0%			
Commentaires				
L'échantillon est très pauvre en glace interstitielle. Il y a beaucoup de graviers moyens à grossiers dans ce till. Température imposée à +1°C sur la tête et -1°C sur la base afin de dégeler par le haut sur une période de 24 heures.				



Échantillon prélevé le 11 juin 2009
Aéroport de Quaqtaq



Échantillon avant et après essai consolidation au dégel

Tableau 62 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur KANGIR_F2_188_199.

KANGIR_F2_188_199				
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur till			
Date de début	12-janv-10			
Date de fin	21-janv-10			
Durée (h)	213,5			
Contraintes (kPa)	150 et 200			
Avant l'essai				
Poids gelé (g)	750,3			
Poids CBR (g)	7447,1			
Volume (cm ³)	324,3			
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			
Indice des vides (e ₀)	0,277			
Hauteur (mm)	113,96			
	113,87			
	114,00			
	114,06			
	114,07			
Moyenne (mm)	113,99			
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	
	Φ ₁	61,75	59,28	61,88
	Φ ₂	60,33	61,59	61,12
	Φ ₃	60,22	61,00	62,51
		60,77	60,62	61,84
Moyenne (mm)	61,08			
Après l'essai				
Contrainte (kPa)	100	150	200	
Hauteur (mm)	-	97,2	96,8	
Diamètre (mm)	-	65,0	65,0	
Volume (cm ³)	-	322,5	321,2	
Indice des vides (e _r)	-	0,270	0,265	
Taux de consolidation	N.D.	0,5%	1,0%	
Teneur en eau				
Tare (g)	126,1			
Échantillon gelé (g)	750,3			
Tare + échantillon séché (g)	811,6			
Masse de sol (g)	685,5			
Masse d'eau (g)	64,8			
Teneur en eau	9,5%			
Commentaires				
Ce till semble moins graveleux que celui de Quaqtq et légèrement plus riche en glace à première vue. Température imposée à +2°C sur la tête et 0°C sur la base afin de dégeler par le haut sur une période de 24 heures. L'essai à 100 kPa n'a pas pu être retenu compte tenu que la carotte n'occupait pas les 65 mm de diamètre d'après les calculs.				



Échantillon prélevé le 19 juin 2009
Aéroport de Kangirsuk



Échantillon avant et après essai consolidation
au dégel

Tableau 63: Données de l'essai de consolidation réalisé sur KANGIR_F2_265_280, KANGIR_F2_280_292 et KANGIR_F3_238_248.

	KANGIR_F2_265_280			KANGIR_F2_280_292			KANGIR_F3_238_248		
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur till			Essai de consolidation au dégel sur till			Essai de consolidation au dégel sur till		
Date de début	13-juil-11			08-juil-11			18-juil-11		
Date de fin	18-juil-11			13-juil-11			20-juil-11		
Durée (h)	112,0			126,0					
Contraintes (kPa)	100 - 200			100 - 150 - 200			100-200		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	915,0			775,0			555,0		
Poids CBR (g)	12530,0			12436,7			12290,0		
Volume (cm ³)	391,9			344,7			265,8		
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			2,7			2,7		
Indice des vides (e ₀)	0,267			0,320			0,435		
Hauteur (mm)	141,27			120,13			98,68		
	141,76			120,55			98,74		
	140,85			120,84			98,83		
	141,22			120,70			98,48		
	140,87			120,76			98,65		
Moyenne (mm)	141,19			120,60			98,68		
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas
φ ₁	60,48	59,62	56,76	60,93	59,60	60,84	60,59	59,05	58,92
φ ₂	58,12	60,78	60,11	59,85	60,69	61,14	58,55	57,71	57,74
φ ₃	59,63	59,34	60,17	59,59	59,58	60,69	60,69	57,64	56,22
	59,41	59,91	59,01	60,12	59,96	60,89	59,94	58,13	57,63
Moyenne (mm)	59,45			60,32			58,57		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	100	150	200	100	150	200	100	150	200
Hauteur (mm)	119,79	-	117,43	100,46	99,31	98,87	70,70	-	69,37
Diamètre (mm)	65,0	-	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	-	65,0
Volume (cm ³)	397,5	-	389,7	333,3	329,5	328,1	234,6	-	230,2
Indice des vides (e _f)	0,285	-	0,260	0,277	0,262	0,256	0,266	-	0,242
Taux de consolidation	-1,4%	-	0,6%	3,3%	4,4%	4,8%	11,8%	-	13,4%
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Tare (g)	150			155			155		
Échantillon gelé (g)	915,0			775,0			555,0		
Tare + échantillon séché (g)	985,0			860,0			655,2		
Masse de sol (g)	835,0			705,0			500,2		
Masse d'eau (g)	80,0			70,0			54,8		
Teneur en eau	9,6%			9,9%			11,0%		

Tableau 64: Données de l'essai de consolidation réalisé sur KANGIR_F3_250_265, KANGIR_F3_440_454 et KANGIR_F3_457_472.

	KANGIR_F3_250_265			KANGIR_F3_440_454			KANGIR_F3_457_472		
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur till			Essai de consolidation au dégel sur till			Essai de consolidation au dégel sur till		
Date de début	05-juil-11			27-juil-11			29-juil-11		
Date de fin	08-juil-11								
Durée (h)	44,0								
Contraintes (kPa)	200			100-200			100-200		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	882			887,0			951,6		
Poids CBR (g)	12492,0			12469,5			12459,9		
Volume (cm ³)	403,4			401,0			447,5		
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			2,7			2,7		
Indice des vides (e ₀)	0,362			0,354			0,428		
Hauteur (mm)	147,98			139,36			152,38		
	148,08			139,71			153,44		
	147,94			139,49			155,41		
	147,88			138,72			155,45		
	148,18			139,07			152,90		
Moyenne (mm)	148,01			139,27			153,92		
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas
φ ₁	60,43	59,87	57,47	57,85	60,10	60,00	62,52	60,07	61,54
φ ₂	57,94	60,29	55,58	60,81	61,28	61,05	61,04	60,11	61,70
φ ₃	60,08	60,59	57,92	59,76	61,64	62,41	61,75	60,43	58,40
	59,48	60,25	56,99	59,47	61,01	61,15	61,77	60,20	60,55
Moyenne (mm)	58,91			60,54			60,84		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	100	150	200	100	150	200	100	150	200
Hauteur (mm)	-	-	114,17	118,00	-	106,94	115,82	-	114,12
Diamètre (mm)	-	-	65,0	65,0	-	65,0	65,0	-	65,0
Volume (cm ³)	-	-	378,9	391,6	-	354,9	384,3	-	378,7
Indice des vides (e _f)	-	-	0,279	0,322	-	0,198	0,227	-	0,209
Taux de consolidation	-	-	6,1%	2,3%	-	11,5%	14,1%	-	15,4%
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Tare (g)	195,5			156,6			116,7		
Échantillon gelé (g)	882			887,0			951,6		
Tare + échantillon séché (g)	995,0			956,2			962,5		
Masse de sol (g)	799,5			799,6			845,8		
Masse d'eau (g)	82,5			87,4			105,8		
Teneur en eau	10,3%			10,9%			12,5%		

Tableau 65: Données de l'essai de consolidation réalisé sur KANGIR_F3_675_690 et KANGIR_F3_690_705.

	KANGIR_F3_675_690			KANGIR_F3_690_705		
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur till			Essai de consolidation au dégel sur till		
Date de début	05-août-11			21-juil-11		
Date de fin				27-juin-11		
Durée (h)						
Contraintes (kPa)	100-200			100-200		
	Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	868,9			864,5		
Poids CBR (g)	12454,1			12493,3		
Volume (cm ³)	401,2			377,0		
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			2,7		
Indice des vides (e ₀)	0,377			0,288		
Hauteur (mm)	151,49			143,93		
	151,31			144,39		
	151,73			144,22		
	152,66			144,98		
	152,53			144,17		
Moyenne (mm)	151,94			144,34		
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas
φ ₁	57,75	57,16	57,30	58,84	59,42	55,49
φ ₂	58,60	58,08	59,34	57,75	58,72	57,22
φ ₃	58,23	58,30	57,10	58,21	57,88	55,51
	58,19	57,85	57,91	58,27	58,67	56,07
Moyenne (mm)	57,98			57,67		
	Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	100	150	200	100	150	200
Hauteur (mm)	-	-	118,80	116,02	-	112,78
Diamètre (mm)	-	-	65,0	65,0	-	65,0
Volume (cm ³)	-	-	394,2	385,0	-	374,2
Indice des vides (e _t)	-	-	0,353	0,315	-	0,278
Taux de consolidation	-	-	1,7%	-2,1%	-	0,7%
	Teneur en eau			Teneur en eau		
Tare (g)	155,9			354,2		
Échantillon gelé (g)	868,9			864,5		
Tare + échantillon séché (g)	942,6			1144,8		
Masse de sol (g)	786,7			790,6		
Masse d'eau (g)	82,2			73,9		
Teneur en eau	10,4%			9,3%		

Tableau 66 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur TAS_F1_310_323.

TAS_F1_310_323				
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur till			
Date de début	21-janv-10			
Date de fin	27-janv-10			
Durée (h)	140,3			
Contraintes (kPa)	100, 150 et 200			
Avant l'essai				
Poids gelé (g)	746,1			
Poids CBR (g)	7370,1			
Volume (cm ³)	379,6			
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			
Indice des vides (e ₀)	0,693			
Hauteur (mm)	130,63			
	130,61			
	130,56			
	130,54			
	130,39			
Moyenne (mm)	130,55			
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	
	Φ ₁	60,43	61,40	61,76
	Φ ₂	60,97	61,52	61,40
	Φ ₃	61,17	61,53	61,25
	60,86	61,48	61,47	
Moyenne (mm)	61,27			
Après l'essai				
Contrainte (kPa)	100	150	200	
Hauteur (mm)	102,1	101,2	100,2	
Diamètre (mm)	65,0	65,0	65,0	
Volume (cm ³)	338,8	335,8	332,5	
Indice des vides (e _r)	0,511	0,498	0,483	
Taux de consolidation	10,7%	11,5%	12,4%	
Teneur en eau				
Tare (g)	126,2			
Échantillon gelé (g)	746,1			
Tare + échantillon séché (g)	731,5			
Masse de sol (g)	605,3			
Masse d'eau (g)	140,8			
Teneur en eau	23,3%			
Commentaires				
Les graviers sont fins à moyens et il ne semble pas y avoir de lentilles, seulement de la glace interstitielle. Température imposée à +2°C sur la tête et 0°C sur la base afin de dégeler par le haut sur une période de 24 heures.				



Échantillon prélevé le 30 juin 2009
Aéroport de Tasiujaq



Échantillon avant et après essai consolidation
au dégel

Tableau 67 : Données de l'essai de consolidation réalisé sur TAS_F3_321_333.

TAS_F3_321_333				
Type d'essai	Essai de consolidation au dégel sur AS			
Date de début	27-janv-10			
Date de fin	02-févr-10			
Durée (h)	143,0			
Contraintes (kPa)	100, 150 et 200			
Avant l'essai				
Poids gelé (g)	652,6			
Poids CBR (g)	7315,0			
Volume (cm ³)	350,4			
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			
Indice des vides (e ₀)	0,820			
Hauteur (mm)	126,60			
	126,09			
	126,42			
	127,00			
Moyenne (mm)	126,64			
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	
	ϕ_1	59,39	60,14	60,30
	ϕ_2	59,19	59,99	60,31
	ϕ_3	59,70	60,15	60,22
		59,43	60,09	60,28
Moyenne (mm)	59,93			
Après l'essai				
Contrainte (kPa)	100	150	200	
Hauteur (mm)	93,0	91,7	90,4	
Diamètre (mm)	65,0	65,0	65,0	
Volume (cm ³)	308,6	304,3	300,0	
Indice des vides (e)	0,603	0,581	0,558	
Taux de consolidation	11,9%	13,2%	14,4%	
Teneur en eau				
Tare (g)	126,3			
Échantillon gelé (g)	652,6			
Tare + échantillon séché (g)	646,1			
Masse de sol (g)	519,8			
Masse d'eau (g)	132,8			
Teneur en eau	25,5%			
Commentaires				
<p>On peut observer sur cet échantillon des lentilles ou d'anciennes lentilles de glace très nombreuses. Il y a des traces de graviers fins à grossiers dans cette carotte. Température imposée à +3°C sur la tête et 0°C sur la base afin de dégeler par le haut sur une période de 24 heures. **Lors de tous les essais de consolidation, il y avait drainage par le haut et le bas et l'échantillon était saturé en eau lors du dégel.</p>				



Échantillon prélevé le 8 juillet 2009
Aéroport de Tasiujaq



Échantillon avant et après essai consolidation
au dégel

Tableau 68: Données de l'essai de consolidation réalisé sur TAS_F1_643_658, TAS_F2_252_261 et TAS_F2_522_533.

	TAS_F1_643_658			TAS_F2_252_261			TAS_F2_522_533		
Type d'essai	consolidation			consolidation			consolidation		
Date de début	22-sept-11			11-oct-11					
Date de fin				13-oct-11					
Durée (h)									
Contraintes (kPa)	100-200			100-200			100-200		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	877,0			466,5			612,5		
Poids CBR (g)	12568,7			12028,2			12174,3		
Volume (cm ³)	428,0			257,9			319,2		
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			2,7			2,7		
Indice des vides (e ₀)	0,528			0,896			0,640		
Hauteur (mm)	149,00			91,59			113,74		
	148,80			91,12			116,28		
	148,00			91,33			112,70		
	148,00			91,05			115,74		
	148,00			90,55			115,90		
Moyenne (mm)	148,36			91,13			114,87		
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas
φ ₁	61,13	59,07	60,62	61,29	60,46	59,98	59,37	59,47	60,20
φ ₂	59,99	59,84	61,61	59,32	60,14	59,30	59,38	58,84	58,74
φ ₃	61,03	59,72	62,42	60,30	59,74	59,74	58,41	60,71	60,21
	60,72	59,54	61,55	60,30	60,11	59,67	59,05	59,67	59,72
Moyenne (mm)	60,60			60,03			59,48		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	100	150	200	100	150	200	100	150	200
Hauteur (mm)	121,03	-	118,11	61,96	-	59,89	91,20	-	90,39
Diamètre (mm)	65,0	-	65,0	65,0	-	65,0	65,0	-	65,0
Volume (cm ³)	401,6	-	391,9	205,6	-	198,7	302,6	-	299,9
Indice des vides (e _f)	0,434	-	0,400	0,511	-	0,461	0,555	-	0,541
Taux de consolidation	6,2%	-	8,4%	20,3%	-	22,9%	5,2%	-	6,0%
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Tare (g)	122,8			197,4			155,8		
Échantillon gelé (g)	877,0			466,5			612,5		
Tare + échantillon séché (g)	878,9			564,7			681,4		
Masse de sol (g)	756,1			367,3			525,6		
Masse d'eau (g)	120,9			99,2			86,9		
Teneur en eau	16,0%			27,0%			16,5%		

Tableau 69: Données de l'essai de consolidation réalisé sur TAS_F2_1675_1690, TAS_F2_1697_1706 et TAS_F3_375_385.

	TAS_F2_1675_1690			TAS_F2_1697_1706			TAS_F3_375_385		
Type d'essai	consolidation			consolidation			consolidation		
Date de début							02-sept-11		
Date de fin									
Durée (h)									
Contraintes (kPa)	100			100-200			100-200		
	Avant l'essai			Avant l'essai			Avant l'essai		
Poids gelé (g)	735,5			464,9			524,4		
Poids CBR (g)	12343,0			12113,5			12175,3		
Volume (cm ³)	424,3			248,1			287,3		
Densité des grains (g/cm ³)	2,7			2,7			2,7		
Indice des vides (e ₀)	1,091			0,861			0,824		
Hauteur (mm)	146,00			85,62			102,87		
	145,00			85,48			102,99		
	145,00			85,52			102,50		
	146,00			86,62			103,58		
	145,00			85,36			102,50		
Moyenne (mm)	145,40			85,72			102,89		
Diamètre (mm)	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas	Haut	Centre	Bas
φ ₁	60,47	61,66	61,33	60,06	60,64	61,44	58,64	59,40	59,60
φ ₂	60,24	61,90	61,40	59,22	60,93	61,72	59,59	58,90	61,40
φ ₃	59,73	61,16	60,68	59,10	61,61	61,63	60,38	58,49	60,21
	60,15	61,57	61,14	59,46	61,06	61,60	59,54	58,93	60,40
Moyenne (mm)	60,95			60,71			59,62		
	Après l'essai			Après l'essai			Après l'essai		
Contrainte (kPa)	100	150	200	100	150	200	100	150	200
Hauteur (mm)	98,81	-	-	66,52	-	65,16	83,45	-	82,21
Diamètre (mm)	65,0	-	-	65,0	-	65,0	65,0	-	65,0
Volume (cm ³)	327,9	-	-	220,7	-	216,2	276,9	-	272,8
Indice des vides (e _f)	0,616	-	-	0,656	-	0,622	0,758	-	0,732
Taux de consolidation	22,7%	-	-	11,0%	-	12,8%	3,6%	-	5,0%
	Teneur en eau			Teneur en eau			Teneur en eau		
Tare (g)	156			122,8			154,1		
Échantillon gelé (g)	735,5			464,9			524,4		
Tare + échantillon séché (g)	703,9			482,8			579,4		
Masse de sol (g)	547,9			360,0			425,3		
Masse d'eau (g)	187,6			104,9			99,1		
Teneur en eau	34,2%			29,1%			23,3%		