

Adapter la conception et développer des outils de gestion intégrés pour soutenir l'adaptation aux changements climatiques des infrastructures de transport en zone de pergélisol du Ministère des Transports du Québec

CC19.1

Rapport final

Emmanuel L'Hérault, Guy Doré, Xiangbing Kong, Heather Brooks, Maria Fernanda Baron Hernandez, Chantal Lemieux et Michel Allard

Groupe de recherche en ingénierie des chaussées et le Centre d'études nordiques,
Université Laval



Rapport produit pour le compte du
Ministère des Transports du Québec

Ce projet a bénéficié d'un soutien financier du gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

Décembre 2023

AVANT-PROPOS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Transports du Québec (MTQ) 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 (ARK) pour avoir facilité les travaux par l'accès aux installations aéroportuaires et la collaboration du personnel.

Ce rapport a été mandaté par le Bureau de la coordination du Nord-du-Québec (BCNQ) du MTQ et a bénéficié d'un soutien financier du gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

Le contenu du présent rapport n'engage en rien la responsabilité du MTQ.

Auteurs :

Emmanuel L'Hérault, professionnel de recherche, Département de génie civil et Centre d'études nordiques (CEN), Université Laval

Guy Doré, professeur-chercheur, Département de génie civil, Université Laval

Xiangbing Kong, étudiant au doctorat, Département de génie civil, Université Laval

Heather Brooks, étudiante au doctorat, Département de génie civil, Université Laval

Maria Fernanda Baron Hernandez, étudiante à la maîtrise, Département de génie civil, Université Laval

Chantal Lemieux, professionnelle de recherche, Département de génie civil

Michel Allard, professeur-chercheur, Département de géographie, Université Laval

Citation recommandée :

L'Hérault E., Doré G., Kong X., Brooks H., Baron Hernandez M. F., Lemieux C. et Allard M. (2021). Adapter la conception et développer des outils de gestion intégrés pour soutenir l'adaptation aux changements climatiques des infrastructures de transport du Ministère des Transports du Québec en région de pergélisol au Nunavik (CC19.1). Rapport final réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Département de génie civil et de génie des eaux et Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 448 p.

Collaborateurs de l'Université Laval

Luc Cournoyer, professionnel de recherche, CEN, Université Laval

Simon Dumais, stagiaire postdoctoral, Département de génie civil, Université Laval

Étienne Godin, professionnel de recherche, CEN, Université Laval

Denis Sarrazin, professionnel de recherche, CEN, Université Laval

Principaux collaborateurs du MTQ et de l'Administration régionale Kativik (ARK)

Anick Guimond, coordonnatrice du projet de recherche, Direction générale de la gestion des actifs routiers et de l'innovation, DGGARI, MTQ

Simon Carpentier, chargé d'activités, Direction générale des projets et de l'exploitation aéroportuaires (DGPEA), MTQ

Jean Verreault, Direction des chaussées (DCH), MTQ

Maude Boucher, Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG), MTQ

Bruno Paquet-Bouchard, Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG), MTQ

Ian Darling, Kativik Transport, ARK

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	2
TABLE DES MATIÈRES	3
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	8
LISTE DES TABLEAUX.....	22
LEXIQUE.....	26
INTRODUCTION ET CONTEXTE DU PROJET DE RECHERCHE	29
1 VOLET 1 : BILAN DE PERFORMANCE DES STRATÉGIES D’ADAPTATION MISES EN PLACE POUR LES INFRASTRUCTURES AÉROPORTUAIRES ET ROUTIÈRES DU MTQ EN ZONE DE PERGÉLISOL	32
1.1 MISE EN CONTEXTE DES TRAVAUX DE RECHERCHE EN ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES COMPLÉTÉS SUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ EN RÉGION DE PERGÉLISOL AU NUNAVIK	33
1.2 OBJECTIFS.....	36
1.3 SITES D’INFRASTRUCTURES AÉROPORTUAIRES À L’ÉTUDE AU NUNAVIK.....	36
1.4 SURVOL DES TECHNIQUES DE MITIGATION CONTRE LE DÉGEL DU PERGÉLISOL	39
1.4.1 <i>Méthodes visant l’augmentation de l’extraction de chaleur</i>	<i>40</i>
1.4.1.1 Le remblai à pente adoucie.....	40
1.4.1.2 Le remblai à convection d’air	41
1.4.1.3 Le drain thermique (drain de chaleur)	42
1.4.2 <i>Méthode de réduction de l’induction de chaleur sous l’infrastructure</i>	<i>43</i>
1.5 MÉTHODOLOGIES.....	45
1.5.1 <i>Bilan de performance des mesures/techniques d’adaptation mises en place aux infrastructures aéroportuaires du Ministère en région de pergélisol.....</i>	<i>45</i>
1.5.1.1 Évaluation de la performance thermique	45
1.5.1.2 Évaluation de la performance mécanique	48
1.5.1.3 Évaluation de l’efficacité des mesures/techniques d’adaptation à limiter l’influence des facteurs environnementaux dans la dégradation thermique du pergélisol	51
1.6 PERFORMANCE DES STRATÉGIES D’ADAPTATION MISE EN PLACE AUX SITES PRINCIPAUX	56
1.6.1 <i>La piste d’atterrissage de Puvirnituk.....</i>	<i>56</i>
1.6.1.1 Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	56
1.6.1.2 Description de la stratégie d’adaptation mise en place.....	58
1.6.1.3 Coûts des travaux de mise en place et d’entretien.....	58
1.6.1.4 Instrumentation pour le suivi de performance de la stratégie d’adaptation.....	62
1.6.1.5 Évaluation de la performance de la stratégie d’adaptation pour la piste d’atterrissage de Puvirnituk pour la période 2009-2020	67
1.6.1.5.1 Performance thermique.....	67
1.6.1.5.2 Performance mécanique.....	76
1.6.1.5.3 Efficacité des mesures/techniques d’adaptations à limiter l’influence des facteurs environnementaux dans la dégradation thermique du pergélisol.....	83
1.6.1.6 Discussion et conclusion	91
1.6.2 <i>La route d’accès à l’aéroport de Salluit.....</i>	<i>95</i>
1.6.2.1 Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	95
1.6.2.2 Stratégie d’adaptation mise en place	97
1.6.2.3 Coûts des travaux de mise en place et d’entretien.....	100
1.6.2.4 Instrumentation pour le suivi de performance de la stratégie d’adaptation.....	101
1.6.2.5 Évaluation de la performance du remblai de la route d’accès à l’aéroport de Salluit pour la période 2013-2020.....	109
1.6.2.5.1 Performance thermique générale.....	109
1.6.2.5.2 Performance du drain thermique	120
1.6.2.5.3 Performance mécanique.....	125
1.6.2.5.4 Efficacité des mesures/techniques d’adaptations à limiter l’influence des facteurs environnementaux dans la dégradation thermique du pergélisol.....	135
1.6.2.5.4.1 Conditions d’enneigement	135

1.6.2.5.4.2	Performance du réseau de drainage	139
1.6.2.6	Discussion et conclusion	145
1.6.3	<i>La piste d'atterrissage de Salluit</i>	152
1.6.3.1	Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	152
1.6.3.2	Stratégie d'adaptation mise en place	154
1.6.3.3	Coûts des travaux de mise en place et d'entretien	156
1.6.3.4	Instrumentation pour le suivi de performance de la stratégie d'adaptation	156
1.6.3.5	Évaluation de la performance thermique et mécanique de la piste d'atterrissage de Salluit pour la période 2012-2019	160
1.6.3.5.1	Performance thermique	160
1.6.3.5.2	Performance mécanique	164
1.6.3.5.3	Efficacité des mesures/techniques d'adaptations à limiter l'influence des facteurs environnementaux dans la dégradation thermique du pergélisol	166
1.6.3.5.3.1	Conditions d'enneigement et de drainage	166
1.6.3.6	Discussion et conclusion	171
1.6.4	<i>La piste d'atterrissage de Tasiujaq</i>	174
1.6.4.1	Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	174
1.6.4.2	Stratégie d'adaptation mise en place	176
1.6.4.3	Coûts des travaux de mise en place et d'entretien	179
1.6.4.4	Instrumentation pour le suivi de performance de la stratégie d'adaptation	180
1.6.4.5	Évaluation de la performance pour la période 2018-2020	187
1.6.4.5.1	Performance thermique	187
1.6.4.5.2	Performance mécanique	196
1.6.4.5.3	Efficacité des mesures/techniques d'adaptations à limiter l'influence des facteurs environnementaux dans la dégradation thermique du pergélisol	198
1.6.4.6	Discussion et conclusion	201
1.6.5	<i>La piste d'atterrissage de Quaqaq</i>	204
1.6.5.1	Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	204
1.6.5.2	Stratégie d'adaptation mise en place	207
1.6.5.3	Coûts des travaux de mise en place et d'entretien	210
1.6.5.4	Instrumentation pour le suivi de performance de la stratégie d'adaptation	210
1.6.5.5	Évaluation de la performance thermique et mécanique du remblai de la piste d'atterrissage de Quaqaq pour la période 2013-2020	213
1.6.5.5.1	Performance thermique	213
1.6.5.5.2	Performance mécanique	220
1.6.5.5.3	Efficacité des mesures/techniques d'adaptations à limiter l'influence des facteurs environnementaux dans la dégradation thermique du pergélisol	222
1.6.5.6	Discussion et conclusion	224
1.6.6	<i>La piste d'atterrissage de Kangirsuk</i>	226
1.6.6.1	Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	226
1.6.6.2	Description de la stratégie d'adaptation mise en place	228
1.6.6.3	Coûts des travaux de mise en place et d'entretien	231
1.6.6.4	Instrumentation pour le suivi de performance de la stratégie d'adaptation	231
1.6.6.5	Évaluation de la performance de la stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Kangirsuk pour la période 2016-2020	233
1.6.6.6	Discussion et conclusion	234
1.7	PERFORMANCE DES STRATÉGIES D'ADAPTATION MISE EN PLACE AUX SITES SECONDAIRES	235
1.7.1	<i>La route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik</i>	235
1.7.1.1	Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	235
1.7.1.2	Stratégie d'adaptation mise en place	237
1.7.1.3	Coûts des travaux de mise en place et d'entretien	239
1.7.1.4	Évaluation de la performance pour la période 2013-2020	240
1.7.2	<i>La route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujuaq</i>	245
1.7.2.1	Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	245
1.7.2.2	Stratégie d'adaptation mise en place	246
1.7.2.3	Coûts des travaux de mise en place et d'entretien	248
1.7.2.4	Instrumentation pour le suivi de performance de la stratégie d'adaptation	248
1.7.2.5	Évaluation de la performance pour la période 2016-2019	250

1.7.3	<i>La route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq</i>	255
1.7.3.1	Mise en contexte, problématiques et enjeux liés au dégel du pergélisol	255
1.7.3.2	Stratégie d'adaptation mise en place	260
1.7.3.3	Coûts des travaux de mise en place et d'entretien	262
1.7.3.4	Évaluation de la performance pour la période 2018-2021	262
1.8	ANALYSES COÛTS-BÉNÉFICES-EFFICACITÉ DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATION	269
1.8.1	<i>Description de l'approche conceptuelle utilisée</i>	269
1.8.2	<i>Analyse des informations disponibles dans la littérature</i>	269
1.8.3	<i>Analyses des volumes de matériaux et du nombre d'interventions requis pour l'entretien de pistes choisies au Nunavik</i>	272
1.8.4	<i>Méthodologie proposée par Ficheur (2011)</i>	276
1.8.4.1	Coût de construction de l'adaptation (CC)	276
1.8.4.2	Entretien annuel de la piste sans adaptation (EA)	276
1.8.4.3	Entretien réduit de la piste suite à la mise en place de l'adaptation (EA _R)	278
1.8.5	<i>Exemple d'application de la méthode d'analyse coût-bénéfice proposée</i>	281
1.8.6	<i>Discussion et conclusion</i>	286
1.9	DISCUSSION GÉNÉRALE PORTANT SUR LE VOLET 1	287
1.9.1	<i>Efficacité des systèmes convectifs (remblai à convection et drain thermique)</i>	287
1.9.1.1	Recommandations générales pour les systèmes convectifs (remblai à convection et drain thermique)	290
1.9.2	<i>Efficacité des remblais à pente adoucie</i>	293
1.9.2.1	Recommandations générales pour les remblais à pente adoucie	295
1.9.3	<i>Efficacité des fossés de drainage, imperméabilisation de remblai et ponceaux</i>	298
1.9.3.1	Recommandations générales pour les réseaux de drainage	300
1.9.4	<i>Efficacité des clôtures adaptées</i>	301
1.9.4.1	Principales problématiques observées pour les sections de clôtures adaptées	307
1.9.4.2	Recommandations pour les poteaux de type « Russe »	310
1.9.4.3	Recommandations pour les poteaux de type « Yukon »	312
1.10	CONCLUSION	313

2 VOLET 2 : ÉTABLIR DES CRITÈRES DE CONCEPTION POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN ZONE DE PERGÉLISOL 318

2.1	MISE EN CONTEXTE	319
2.2	OBJECTIFS	322
2.3	MÉTHODOLOGIE	322
2.3.1	<i>Stratégie d'adaptation</i>	323
2.3.2	<i>Stabilisation thermique</i>	324
2.3.2.1	Développement des outils	328
2.3.3	<i>Approche de stabilisation thermique par correction de la température à l'interface (CTI)</i>	330
2.3.3.1	Technique de la pente douce	331
2.3.3.2	Technique de la surface à albédo élevé	332
2.3.4	<i>Approche de stabilisation thermique par calcul du bilan de chaleur à l'interface</i>	333
2.3.5	<i>Approche de stabilisation par calcul de la capacité d'extraction de chaleur</i>	335
2.3.5.1	Technique du remblai à convection d'air (ACE) pleine largeur ou sur les pentes latérales	335
2.3.5.2	Technique du drain thermique installé dans l'épaulement du remblai	337
2.4	VALIDATION DES APPROCHES DE STABILISATION THERMIQUE	339
2.4.1	<i>Cas de Tasiujaq: pente douce, remblai à convection d'air et drain thermique</i>	340
2.4.1.1	Analyse de stabilisation thermique - Approche de correction de la température à l'interface (CTI) pour la pente douce	343
2.4.1.2	Analyse de stabilisation thermique - Approche du bilan thermique pour le remblai à convection d'air et le drain thermique	343
2.4.1.2.1	Section remblai à convection d'air (ACE) sur les pentes latérales	347
2.4.1.2.2	Section avec drain thermique dans l'épaulement	348
2.4.1.3	Sommaire - Tasiujaq	349
2.4.2	<i>Puvirnituaq: remblai à convection d'air</i>	350
2.4.2.1	Analyse de stabilisation thermique - Approche du bilan thermique pour le remblai à convection d'air	350

2.4.2.2	Sommaire – Puvirnituaq	352
2.4.3	<i>Salluit : drain thermique</i>	353
2.4.3.1	Analyse de stabilisation thermique - Approche du bilan thermique pour le drain thermique	353
2.4.3.2	Sommaire - Salluit.....	356
2.5	APPLICATION DES MÉTHODES.....	356
2.5.1	<i>Le cas de la route de Tasiujaq</i>	356
2.5.2	<i>Le cas de la route d’Akulivik</i>	362
2.5.3	<i>Le cas de la piste d’atterrissage de Kangirsuk</i>	366
2.6	ANALYSE DE LA PERFORMANCE À LONG TERME DES MESURES D’ADAPTATION MISES EN PLACE AUX INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU NUNAVIK EN FONCTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	371
2.6.1	<i>Les pentes douces de la piste d’atterrissage de Tasiujaq</i>	373
2.6.2	<i>Remblai à convection installé dans l’épaulement de la piste d’atterrissage de Puvirnituaq</i>	374
2.6.3	<i>Drains thermiques installés le long de la route d’accès à l’aéroport de Salluit</i>	376
2.7	DISCUSSION ET CONCLUSION PORTANT SUR LE VOLET 2	378
3	VOLET 3 : DÉVELOPPEMENT D’UNE MÉTHODE QUANTITATIVE D’ÉVALUATION DU RISQUE POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN ZONE DE PERGÉLISOL	381
3.1	MISE EN CONTEXTE.....	382
3.2	OBJECTIFS.....	382
3.3	DÉFINITIONS ET DESCRIPTIONS DES CONCEPTS EN ÉVALUATION DU RISQUE	383
3.3.1	<i>Les dangers versus les aléas naturels</i>	383
3.3.2	<i>La vulnérabilité</i>	383
3.3.3	<i>Les conséquences</i>	385
3.3.4	<i>Le risque</i>	385
3.4	PROCÉDURE GÉNÉRALE EN GESTION DES RISQUES.....	386
3.4.1	<i>Étapes 1 et 2 : Identifications et description des types de danger susceptibles d’affecter les remblais sur pergélisol au Nunavik</i>	389
3.4.2	<i>Étape 3 : Estimation du risque</i>	391
3.4.2.1	Procédure d’estimation quantitative du risque développée dans le cadre du programme Arquluk	391
3.4.2.2	Nouvelle procédure adaptée au contexte des infrastructures du MTQ au Nunavik.....	393
3.4.2.3	Étape 3.1 : Évaluation des aléas.....	396
3.4.2.3.1	Tassement au dégel	396
3.4.2.3.1.1	Estimation de la profondeur de dégel	396
3.4.2.3.1.2	Détermination du coefficient de tassement au dégel	397
3.4.2.3.1.3	Évaluation du tassement au dégel.....	399
3.4.2.3.2	Tassement différentiel au dégel.....	402
3.4.2.3.3	Effondrement.....	405
3.4.2.3.4	Considération des changements climatiques dans l’évaluation des aléas.....	406
3.4.2.4	Étape 3.2 : Évaluation des conséquences	410
3.4.2.4.1	Conséquences directes	411
3.4.2.4.2	Conséquences indirectes	411
3.4.2.5	Classification du risque	414
3.4.3	<i>Étape 4 : Évaluation du risque</i>	415
3.4.4	<i>Étape 5 : Traitement du risque</i>	415
3.4.4.1	Augmenter la résilience de l’infrastructure exposée	415
3.4.4.2	Relocaliser l’infrastructure.....	416
3.4.5	<i>Étape 6 : Suivi et réévaluation du risque</i>	416
3.5	DISCUSSION ET CONCLUSION	417
4	VOLET 4 : DÉVELOPPEMENT D’OUTILS DE GESTION INTÉGRÉS POUR SOUTENIR LA CONCEPTION, L’ENTRETIEN, LE SUIVI ET LA GESTION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ EN ZONE DE PERGÉLISOL DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	420
4.1	MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	421
4.1.1	<i>Base de données géospatiales et plateforme de visualisation</i>	421
4.1.1.1	Introduction	421

4.1.1.2	Conception de la géodatabase.....	422
4.1.1.3	Présentation des éléments structurels d'une géodatabase.....	422
4.1.1.4	Description et organisation des données contenues dans la base de données du MTQ.....	424
4.1.1.5	Schéma de la structure générale de la base de données du projet CC19.1 et son arrimage avec les bases de données existantes du CEN.....	424
4.1.1.6	Plate-forme de visualisation	425
4.1.2	<i>Rapport synthèse : Suivi et analyse des infrastructures de transport du Ministère sensibles au dégel du pergélisol dans un contexte de CC au Nunavik.....</i>	427
4.1.3	<i>Protocole : Suivi et entretien des infrastructures et des équipements mis en œuvre pour adapter les infrastructures de transport du MTQ en région de pergélisol au Nunavik.....</i>	427
4.1.4	<i>L'outil numérique d'évaluation et de gestion quantitative des risques adapté au contexte des infrastructures linéaires de transport du Nunavik en zone de pergélisol</i>	428
5	CONCLUSION GÉNÉRALE	429
6	RÉFÉRENCES	434
7	ANNEXE A.....	440
8	ANNEXE B.....	446

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Localisation des sites principaux et secondaires d’infrastructures de transport du MTQ adaptées aux CC qui sont à l’étude.....	37
Figure 2 : Différentes techniques de mitigation contre la dégradation du pergélisol et qui composent les différentes stratégies d’adaptations mises en place aux infrastructures linéaires de transport du Ministère au Nunavik. 1) remblai à pente adoucie, 2-A) remblai à convection, 2-B) drain thermique, 3) surface à albédo élevé, 4-A) rehaussement du remblai, 4-B) isolation, 5-A) éloignement des fossés de drainage et 5-B) imperméabilisation des pieds de remblai ou de certaines composantes du réseau de drainage (fossés, ponceaux, etc.).....	39
Figure 3 : Exemple d’intégration de plusieurs techniques de mitigation contre le dégel du pergélisol le long de la route d’accès à l’aéroport de Salluit et qui forment une stratégie d’adaptation.	40
Figure 4 : Adoucissement des pentes de talus le long A) de la piste d’atterrissage de Tasiujaq, B) de la route d’accès à l’aéroport d’Ivujivik et C) de la route d’accès à l’aéroport de Salluit, Nunavik.	41
Figure 5 : Remblais à convection d’air installés A) dans l’épaulement de la piste d’atterrissage de Puvirniq, B) dans un épaulement et C) en couche pleine largeur dans un remblai routier au site expérimental de Beaver Creek au Yukon.	42
Figure 6 : A) Principe de fonctionnement du drain thermique (tirée de Gaumont, 2014). Installation d’un drain thermique dans les remblais B) de la piste d’atterrissage de Tasiujaq et C) de la route d’accès à l’aéroport de Salluit.	43
Figure 7 : A) Site expérimental pour l’essai de différentes surfaces à albédo élevé, route d’accès à l’aéroport de Salluit (tirée de Richard, 2018). Section de la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq B) avant et C) après le retrait du pavage et le rehaussement du remblai.	44
Figure 8 : Schématisation des principales zones d’une infrastructure.	45
Figure 9: A) Exemple de variation de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période 2009-2017 mesurée par le câble à thermistances PUV-F2 positionné sous la berme convective installée en 2010 le long d’une section de la piste d’atterrissage de Puvirniq. B) Variation de l’épaisseur de la couche active identifiée sur un relevé GPR transversal à la route d’accès de Kangiqsualujuaq. La forme du réflecteur identifié comme étant la base de la couche active (ligne rouge pointillée) suggère une dégradation thermique du pergélisol en pied de remblai (Tirée de L’Hérault <i>et al.</i> , 2014).	47
Figure 10 : Schéma des patrons caractéristiques des déplacements mesurés par les inclinomètres verticaux (ligne bleue foncée) : A) rupture le long d’un plan ou une zone de cisaillement, B) mouvement de compression induit par la consolidation du sol sous contrainte importante et C) déplacement par fluage.	50
Figure 11 : Exemple, pour la piste de Puvirniq, du potentiel d’évaluation de la performance mécanique d’un remblai par le traitement de données LIDAR). La soustraction des deux modèles numériques d’élévation générés à partir des données LIDAR de 2010 (coin supérieur gauche) et de 2016 (coin supérieur droit) permet d’obtenir une carte des différences d’élévation relative pixel par pixel (image du bas). Sur cette carte, les zones de soulèvement sont présentées dans des teintes bleutées et les tassements dans des teintes rougeâtres.....	50
Figure 12 : Caméra automatisée modèle SOLAR de la compagnie SPYPOINT Inc. (source : /www.spypoint.com). B) Installation type d’une caméra automatisée en marge d’une piste d’atterrissage utilisant un trépied fixé au sol par des clous et des roches.	52
Figure 13 : A) Configuration d’un site de suivi de l’enneigement à l’aide d’une caméra automatisée montée sur trépied et repères gradués, piste d’atterrissage de Tasiujaq. B) Exemple d’une photographie prise par la caméra automatisée. C) Répartition des thermistances en surface pour la validation des températures en fonction des conditions de surface.	53
Figure 14 : A) Configuration d’un site pour le suivi des conditions de drainage le long d’un remblai à l’aide d’une caméra automatisée fixée sur un hauban de poteau électrique, route d’accès à l’aéroport de Salluit. B) Exemple d’une photographie prise par la caméra automatisée.	54
Figure 15 : A) Réalisation d’un relevé type des épaisseurs de neige à l’aide d’un ruban à mesurer et une tige graduée. B) Excavation du couvert de neige jusqu’au sol naturel et C) échantillonnage pour mesure de densité de la neige. D)	

Détermination de la densité de la neige par mesure de la masse volumique. E) Profil d'épaisseurs de neige mesurées à l'hiver 2019 le long d'un axe transversal à la piste de Puvirnituk.	55
Figure 16 : A) Dépression majeure relevée en bordure de piste d'atterrissage de Puvirnituk sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m. B) Écoulement d'eau sous la piste vis-à-vis le centre de la dépression majeure côté est. C) Accumulation de neige importante en bordure de piste sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m. 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 MMASW-01 (modifiée de Karray <i>et al.</i> , 2009).	57
Figure 17: A) Aperçu générale de la stratégie d'adaptation proposée pour la piste de Puvirnituk (modifiée de L'Hérault <i>et al.</i> , 2012). Vues en plan tirées des plans originaux tel que construit (no. PA-7202-154-05-1305-1) du remblai à convection avec nouveau fossé de drainage côté amont (B) et du remblai à convection avec contrepoids côté aval (C).	60
Figure 18 : Coupes des remblais à convection côté amont (A) et aval (B) de la piste d'atterrissage de Puvirnituk tirées des plans originaux tel que construit (no. PA-7202-154-05-1305-1). Aperçu des remblais à convection côté amont (C) et aval (D) une fois leur mise en place.	61
Figure 19 : Instrumentation existante et celle installée à l'automne 2018 et à l'été 2019 pour évaluer la performance des techniques d'adaptation mises en place dans la section vulnérable de la piste d'atterrissage de Puvirnituk.	64
Figure 20 : Disposition de l'instrumentation installée en 2009 et complémentée en 2019 pour le suivi de la performance des remblais à convection (ACE) de Puvirnituk coté amont (A) et côté aval (B).	65
Figure 21 : Variation de la température journalière de l'air (TMJA) et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) à Puvirnituk pour la période 2008-2020. Les moyennes journalières et annuelles ont été calculées à partir des températures de l'air horaires mesurées à la station de référence PUV-FOR1A.	69
Figure 22 : Variation journalière de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps A) sous le remblai convectif côté amont (câble à thermistances PUV-F5) et B) sous la berme convective côté aval (câble à thermistances PUV-F2). Période de juillet 2009 à octobre 2019, piste d'atterrissage de Puvirnituk.	70
Figure 23 : Températures maximales, minimales et moyennes A) à l'interface remblai convectif/sol naturel et B) à 6.5 m de profondeur mesurées par le câble à thermistances PUV-F5 pour la période 2010-2017, piste d'atterrissage de Puvirnituk.	71
Figure 24 : Températures maximales, minimales et moyennes A) à l'interface remblai convectif/sol naturel et B) à 15 m de profondeur mesurées par le câble à thermistances PUV-F2 pour la période 2010-2017, piste d'atterrissage de Puvirnituk.	72
Figure 25 : Interprétation des levés de géoradar transversaux à l'axe de la piste de Puvirnituk réalisés en septembre 2019 A) du côté amont et B) du côté aval. L'atténuation du réflecteur identifié comme étant le front de dégel suggère la présence d'eau en pied de remblai (zone encerclée jaune).	75
Figure 26 : Déplacements moyens annuels en fonction de la profondeur enregistrés par l'inclinomètre vertical situé à proximité du câble PUV-F2 (côté aval de la piste) pour la période 2009-2019. L'axe X-X' est transversal et l'axe Y-Y' longitudinal à la piste de Puvirnituk.	79
Figure 27 : Évolution des déplacements moyens mensuels cumulatifs mesurés au cours de la période 2009 à 2019 pour quatre différentes profondeurs, piste d'atterrissage de Puvirnituk. A) axe X- X+ et B) axe Y- Y+.	80
Figure 28 : A) Différence d'élévation entre le nuage de point des données LIDAR de 2010 par rapport à celui de 2016. Les zones en teintes de bleue et verte correspondent à des tassements tandis que les zones en teintes de jaune et rouge correspondent à un soulèvement de la surface. Les différences non significatives sont présentées en teinte de gris (± 0.05 m). Photos de la berme convective en B) 2010 et C) en 2019. Photos de la route de contournement située légèrement en aval de la berme convective D) en 2010 et E) en 2015.	81
Figure 29 : A) Accumulation sur la berme convective de gravier soufflé par les opérations de déneigement et B) érosion en haut de talus du gravier sous l'effet du ruissellement.	82
Figure 30 : Petites fissures longitudinales observée à l'été 2019 au-dessus des systèmes de ventilations au pied A) du remblai convectif côté amont et B) de la berme convective côté aval.	82
Figure 31 : A) Conditions d'enneigement en marge du talus aval de la piste d'atterrissage de Puvirnituk en date du 22 mars 2017 (Photo : Denis Sarrazin). B) Aperçu du même secteur en été.	84

- Figure 32 : Suivi photographique des conditions d'enneigement en marge de la piste d'atterrissage de Puvirnituk côté amont pour l'hiver 2018-2019, caméra automatisée PuvCam-4. Conditions d'enneigement au cours de l'hiver 2018-2019 au A) 24 octobre, B) 14 novembre, C) 28 novembre, D) 22 décembre, E) 5 janvier et F) 11 janvier. À noter que la date apparaissant sur l'image F est erronée en raison du dérèglement de l'horloge interne de la caméra..... 85
- Figure 33 : Suivi photographique des conditions d'enneigement en marge de la piste d'atterrissage de Puvirnituk côté aval pour l'hiver 2018-2019, caméra automatisée PuvCam-1. Conditions d'enneigement au cours de l'hiver 2018-2019 au A) 24 octobre, B) 14 novembre, C) 29 novembre, D) 24 décembre, E) 6 janvier et F) 3 avril. À noter que les dates apparaissant sur les images C à F inclusivement sont erronées en raison du dérèglement de l'horloge interne de la caméra..... 86
- Figure 34 : Suivi photographique des conditions d'enneigement en marge de la piste d'atterrissage de Puvirnituk côté aval pour l'hiver 2018-2019, caméra automatisée PuvCam-2. Conditions d'enneigement au cours de l'hiver 2018-2019 au A) 24 octobre, B) 14 novembre, C) 29 novembre, D) 24 décembre, E) 8 janvier et F) 3 avril. À noter que les dates apparaissant sur les images C à F inclusivement sont erronées en raison du dérèglement de l'horloge interne de la caméra..... 87
- Figure 35 : Évolution de l'épaisseur du couvert de neige au cours de l'hiver 2018-2019 mesurées par des sondes à neige aux emplacements des stations PUV-F2 et PUV-F5, piste d'atterrissage de Puvirnituk, Nunavik..... 88
- Figure 36 : Conditions d'enneigement en date du 12 février 2020 A) côté amont et B) aval, piste d'atterrissage de Puvirnituk. (source : BCNQ, 2020) 88
- Figure 37 : Relevés des épaisseurs de neige réalisés à la fin de l'hiver 2020 du côté amont et du côté aval de la section adaptée de la piste d'atterrissage de Puvirnituk. À noter que pour estimer l'épaisseur maximal du couvert de neige à l'hiver 2019, un facteur de correction de 0.75 m doit être appliqué uniformément sur l'ensemble des mesures. 89
- Figure 38 : Accumulation d'eau importante en pied de remblai côté amont (ouest) survenue au printemps 2019 entre B) le 15 et C) le 16 mai, puis D) rapidement drainé par le fossé de drainage excavé dans le roc, piste d'atterrissage de Puvirnituk. 90
- Figure 39 : A) Modifications anticipées de la position du front de dégel en réponse à la translation des zones d'accumulation de neige post adaptation de la piste d'atterrissage de Puvirnituk. Fissures visibles dans le MG-20b qui recouvre les systèmes de ventilation situés en bas de talus B) du côté amont et C) du côté aval..... 94
- Figure 40 : A) Tassements affectant la route d'accès à l'aéroport de Salluit (no. 1 et 3) et la route qui mène au développement domiciliaire de Salluit-2 (no.2). Ces tassements sont localisés préférentiellement au passage des chenaux humides sous les remblais. 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) Rupture du mollisol en bordure de la route d'accès au chaînage 0+960 m côté ouest. (Modifiée de L'Hérault *et al.*, 2012)..... 96
- Figure 41 : Conditions d'enneigement le long de la route de Salluit avant la mise en place de la stratégie d'adaptation (mai 2011)..... 97
- Figure 42 : Aperçu des travaux d'adaptation réalisés en 2012 le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit (tiré des plans « tel que construit » no. CH-7202-154-06-1384, page 6 et 7, Genivar, 2015)..... 98
- Figure 43 : Vue en coupe de la route d'accès à l'aéroport de Salluit avec pente douce (côté amont) et drain thermique (côté aval) tirée A) des plans de construction et B) des plans tel que construit. C.1, C.2 et C.3) Étapes d'installations du drain thermique avec cheminées de ventilation. D) Aperçu de l'infrastructure une fois les travaux complétés. E) Exemple d'une berme de déviation installée en 2016 dans le fossé de drainage à l'entrée d'un ponceau côté amont..... 99
- Figure 44 : Instrumentation déjà existante, celle nouvellement installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques de mitigation implémentées le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. 105
- Figure 45 : Schéma d'installation des nouvelles thermistances pour évaluer la capacité convective du drain thermique pour trois sections le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. Deux vis-à-vis des cheminées (Chainage 1+485 m et 1+612 m) et une à une certaine distance des cheminées (chaînage 1+500 m). Pour chacune des sections, les thermistances sont branchées à un système d'acquisition autonome. 106
- Figure 46 : A) Excavation du talus de remblai côté aval à l'été 2018 dans le secteur de la route d'accès à l'aéroport de Salluit en vue de l'instrumentation d'une section du remblai avec des thermistances (chaînage 1+485 m). B) Thermistances

installées dans les différentes sections du drain et du remblai juste avant de remblayer l'excavation. C) Tranché d'une quinzaine de mètres de longueur réalisée dans l'accotement, entre le chaînage 1+485 m et 1+500 m, pour acheminer les câbles à thermistances au système d'acquisition de données. D) Système d'acquisition de données compact. E) Vue d'ensemble de la section du remblai de la route instrumentée au chaînage 1+500 m. 107

- Figure 47 : Variation de la température journalière de l'air (TMJA) et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) à Salluit pour la période 2008-2019. Les moyennes journalières et annuelles ont été calculées à partir des températures de l'air horaires mesurées à la station météorologique SILA située dans Salluit-2. 113
- Figure 48 : Interprétation des levés de géoradar transversaux à l'axe de la route d'accès à l'aéroport de Salluit réalisés en septembre 2019 aux chaînages A) 1+620 m et B) 1+720 m. 114
- Figure 49 : Positions du front de dégel sous la surface du sol déterminées à partir des lectures de températures du sol mesurées aux câbles à thermistances de la section A (chaînage 1+620), route d'accès à l'aéroport de Salluit. 115
- Figure 50 : Positions du front de dégel sous la surface du sol déterminées à partir des lectures de températures du sol mesurées aux câbles à thermistances de la section B (chaînage 1+720), route d'accès à l'aéroport de Salluit. 116
- Figure 51 : Distribution spatiale des moyennes mensuelles des températures dans le remblai et le sol sous-jacent pour la section A (2012-2019) et la section B (2012-2017). 117
- Figure 52 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales pour la section A (chaînage 1+620) et la section B (chaînage 1+720), route d'accès à l'aéroport de Salluit. 118
- Figure 53 : Profils des températures moyennes pour la période 2013-2018 (section A) et 2013-2016 (section B). À noter que pour le câble A6 de la station A, les thermistances aux profondeurs -2.5 m, -2.75 m, -3 m, -4 m et -5 m présentent des anomalies et ont donc été exclues de l'analyse. 119
- Figure 54 : A) Sens théorique de la circulation de l'air à l'intérieur du système à convection (drain thermique avec cheminées de ventilation) installé dans le remblai de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. La direction théorique de la circulation de l'air dans le système est indiquée par le sens des flèches et la couleur indique le gradient thermique anticipée (bleu ≈ température extérieure froide et rouge ≈ température du sol sous le drain plus chaude). B) Gradient thermique théorique en hiver entre les différentes composantes du système convectif soit la température de l'air : à l'extérieur, dans la cheminée d'entrée, dans le TTOG à la base du remblai, dans le drain, dans le TTOG en haut de remblai et dans la cheminée de sortie. 122
- Figure 55 : Températures moyennes mensuelles entre les mois de septembre 2018 à août 2019 pour les différentes composantes du système convectif. Sections du drain thermique instrumentées aux chaînages A) 1+485 m et B) 1+612 m. 123
- Figure 56 : Profils verticaux des températures moyennes mensuelles (septembre 2018 à août 2019) entre la température de l'air, la température de surface (Surf.MT) et les thermistances dans le remblai situées au-dessus, à l'intérieur et sous le drain thermique pour les sections instrumentées aux chaînages A) 1+485 m et B) 1+612 m. 124
- Figure 57 : Dépressions dans le fossé et fissures longitudinales dans le talus à pente adoucie telles qu'observée en A) 2014 et B) 2016. Aperçu du même secteur en 2018, quelques années après l'intervention visant à combler les dépressions et segmenter le drainage à l'aide de bermes. Malgré les quelques dépressions qui sont réapparues, la situation demeure stable. 128
- Figure 58 : Relevé des défauts observés le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, septembre 2019. 129
- Figure 59 : Évolution de fissures situées dans l'accotement du côté aval entre les chaînages 1+580 m et 1+600 m, route d'accès à l'aéroport de Salluit. A) 30 juillet 2014, B) 25 août 2016, C) 26 août 2018, D) 16 septembre 2019 et E) 10 octobre 2020. 130
- Figure 60 : Évolution de fissures situées dans l'accotement du côté aval entre les chaînages 1+630 m et 1+660 m, route d'accès à l'aéroport de Salluit. A) 26 août 2018, B) 17 septembre 2019 et C) 10 octobre 2020. 131
- Figure 61 : Déplacements cumulatifs mesurés annuellement à la fin de l'été aux inclinomètres verticaux installés en pied de remblai le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit aux chaînages 1+620 m, 1+660 m et 1+720 m. À noter que pour les inclinomètres aux chaînages 1+620 m et 1+660 m, il n'a pas été possible de relever les déformations à l'été 2019 en raison d'une déformation trop importante du tubage de l'inclinomètre. 132

Figure 62 : Déplacements cumulatifs par profondeur mesurés annuellement à la fin de l'été aux inclinomètres verticaux installés en pied de remblai le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit aux chaînages 1+620 m, 1+660 m et 1+720 m.....	133
Figure 63 : Déplacement relatif pour la période de 2012 à 2015 par rapport à la position des extrémités des inclinomètres horizontaux côté aval installés aux chaînages 1+720 m et 1+200 m le long de route d'accès à l'aéroport de Salluit (modifié de Périer <i>et al.</i> 2016).....	134
Figure 64 : A) Conditions d'enneigement le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit en date du 9 mai 2019 A) SalCam-3, B) SalCam-4 et C) SalCam-2. D) Conditions d'enneigement le long de la route du côté amont (pente douce) observées à la fin de l'hiver 2019-2020.	136
Figure 65 : Suivi photographique des conditions d'enneigement en marge de la route d'accès à l'aéroport de Salluit côté aval (drain thermique) pour l'hiver 2019-2020, caméra automatisée SalCam-4. Conditions d'enneigement au cours de l'hiver 2019-2020 au A) 23 novembre, B) 26 décembre, C) 25 janvier, D) 26 Février, E) 26 avril et F) 26 mai.	137
Figure 66 : Relation entre épaisseur de neige en marge de l'infrastructure et la distance du pied de remblai (Source : Geneviève Trudel, février 2020). Photos B) d'une cheminée d'entrée d'air du système à convection et C) d'un ponceau double bouchés par de la neige (Source : Yves Pilotte, février 2020).	138
Figure 67 : Section de la route d'accès à l'aéroport de Salluit présentant des problèmes de drainage. A), B), C) et D) Accumulations d'eau côté amont associées à un mauvais drainage. E) Écoulement d'eau en pied de remblai côté aval (Modifiée de L'Hérault et Allard, 2016).....	141
Figure 68 : A et B) Reprofilage par comblement du fossé côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. C) Aperçu final du profil du fossé dans lequel l'écoulement est désormais rectiligne et fluant (Tirée de L'Hérault et Allard, 2016).	142
Figure 69 : Conditions du fossé de drainage sur le côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit avant (A et C) et après (B et D) les travaux correctifs de 2016 qui consistaient à reprofiler le fossé et mettre en place des bermes de déviation (Tirée de L'Hérault et Allard, 2016).	143
Figure 70 : A) Exposition d'un pergélisol riche en glace et développement d'une niche de thermo-érosion lors de l'excavation du terrain naturel à l'été 2012 au cours de la mise en place fossé de drainage côté amont, chaînage 1+380 m, route d'accès à l'aéroport de Salluit. B) Dépressions accompagnées d'accumulation d'eau observées à l'été 2019 entre les chaînages 1+380 m et 1+460 m.....	144
Figure 71 : A) Géométrie du dispositif d'optimisation du positionnement du drain (tirée de Châtaigner, 2008). B) Configuration prévue (ligne noire pointillée) et actuelle (ligne rouge pointillée) du drain thermique et des composantes du systèmes de ventilation installés le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.	148
Figure 72 : A) Schématisation de la section sous l'accotement sujette à la cryoreptation qui entraîne l'étalement des accotements (tirée de Brooks, 2019). B) Mécanismes de déformations associés à la cryoreptation avec ou sans gélifluxion et leurs impacts sur un tubage flexible (tirée de Harris, 2017).....	151
Figure 73 : A) Till riche en glace avec structure lenticulaire entre 1,97 et 2,25 m de profondeur, forage SAL-F3. B) Plafond du pergélisol riche en glace entre 1,92 m à 2,12 m, forage SAL-F5. C) Accumulations d'eau côté est, chaînage 2+510 m. D) Dépression importante sur le côté est de la piste au niveau des deux ponceaux superposés situés au chaînage 2+030 m. (modifiée de L'Hérault <i>et al.</i> , 2012).....	153
Figure 74 : A) Stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Salluit telle que proposée dans L'Hérault et al. (2012). B) et C) Élargissement du remblai, pente adoucie tronquée et prolongation des ponceaux entre les chaînages 1+920 et 2+120 m (Plan tel que construit no : PA-7202-154-04-1164-1). D) Adoucissement des pentes du talus adjacent à l'agrandissement de l'aire de trafic, rechargement et prolongation du fossé de drainage vers le sud (Plan tel que construit no : PA-7202-154-04-1164-1).....	155
Figure 75 : Instrumentation existante et celle installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques d'adaptation mises en place à l'aéroport de Salluit.	158
Figure 76 : Localisation des caméras automatisées installées à l'été 2018 le long de la piste d'atterrissage de Salluit. A) Emplacement de la caméra SalCam-6 et sa perspective. B) Emplacement de la caméra SalCam-7 et sa perspective.	159

- Figure 77 : Variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps sous le remblai à pente douce tronquée (câble à thermistances SAL-F3) pour la période d’octobre 2012 à octobre 2020, piste d’atterrissage de Salluit. 162
- Figure 78 : Profils thermiques annuels moyens mesurés aux câbles A) HT-172 situé au centre-piste et B) SAL-F3 positionné sous le talus de la pente douce tronquée, piste d’atterrissage de Salluit, Nunavik. 163
- Figure 79 : A) Différence d’élévation entre le nuage de point des données LIDAR de 2010 par rapport à celui de 2016. Les teintes de bleu à vert correspondent à un tassement, les teintes de jaune à rouge correspondent à un soulèvement et le gris indique un mouvement non significatif (± 0.05 m). Les secteurs délimités par un trait tireté noir sont identifiés comme des zones présentant des tassements considérables. Tassements cumulatifs (B) et annuels (C) mesurés aux plaques de tassements installées dans les accotements. 165
- Figure 80 : A) Faibles accumulations de neige observées lors d’une visite à la fin de l’hiver 2019 à l’emplacement des pentes douces mises en place entre les chaînages 2+340 à 2+640 m. B) Importantes accumulations de neige toujours présentes dans le creux topographique en marge de la section de la pente douce tronquée entre les chaînages 1+920 à 2+140 m, piste d’atterrissage de Salluit. 167
- Figure 81 : Évolution des conditions d’enneigement entre les mois de novembre 2019 à avril 2020 (images A à G) et de drainage entre les mois de mai et juillet 2020 (images H à L), caméra SalCam-7, piste d’atterrissage de Salluit. 168
- Figure 82 : Accumulation d’eau à la fin de la période de dégel (16 juin, 2015) pour la section de la pente douce tronquée située au sud du chemin d’accès à l’anémomètre, chaînage 1+940 à 2+000 m, piste d’atterrissage de Salluit. 169
- Figure 83 : Évolution des conditions d’enneigement entre les mois de novembre 2019 à avril 2020 (images A à G) et de drainage entre les mois de mai et juillet 2020 (images H à L), caméra SalCam-6, piste d’atterrissage de Salluit. 170
- Figure 84 : Nombreuses fissures observées dans la section aval du fossé de décharge côté piste entre les chaînages 2+300 et 2+400 m (Source : MTQ, 2019). 171
- Figure 85 : A) et B) Importantes dépressions avec fissures longitudinales telles qu’observées en 2004 sur le côté est de la piste d’atterrissage de Tasiujaq entre les chaînages 5+100 et 5+140 m (Tirée de Allard et al., 2007). C) Accumulation d’eau au pied du remblai côté est au mois de juillet 2009 (Tirée de L’Hérault *et al.*, 2012). D) Dépression majeure sur le côté ouest observée à l’automne 2018 durant les travaux d’adaptations. E) Levé topographique réalisé à l’été 2018 par l’entrepreneur responsable des travaux d’adaptation et montrant les principales dépressions (teintes blanchâtres à violacées sur la figure) toujours présentes entre les chaînages 5+060 m et 5+300 m. 175
- Figure 86 : A) Schéma des quatre sections des planches d’essai de Tasiujaq et B) leurs régimes thermiques mesurés en fonction de la profondeur et du temps (Tirée de Ficheur et Doré, 2011). 177
- Figure 87 : A) Stratégie d’adaptation proposée qui consiste à adoucir les pentes sur l’entièreté de l’infrastructure (zone verte) (modifiée de L’Hérault et al., 2012). B) Position du front de dégel avant la mise en place de la stratégie d’adaptation et celle anticipée en réponse à l’adoucissement des talus. C) Stratégie d’adaptation finale mise en place à l’été et l’automne 2018. À noter que l’adoucissement des talus a été réalisé sur un peu plus de la moitié de la périphérie de la piste, soit tout le côté est (côté aérogare) et une section du côté ouest comprise entre l’extrémité sud de la piste et l’ancien méandre. Photo de la pente du talus de la piste D) avant et E) après son adoucissement. 178
- Figure 88 : A) Schéma de localisation des câbles de capteurs de températures installés en septembre 2014 pour un projet de recherche visant à documenter l’effet thermique de l’enneigement sur le pergélisol à la piste d’atterrissage de Tasiujaq (modifiée de Lanouette, 2021). B) Répartition des capteurs de températures le long des câbles TAC-1 (horizontal), TAC-2 (vertical) et TAC-3 (vertical) (modifiée de Lanouette, 2021). Aperçu du site C) avant et D) après l’adoucissement des talus du remblai complété à l’automne 2018. 182
- Figure 89 : Configurations des nouveaux câbles à thermistances installés à la piste d’atterrissage de Tasiujaq en 2018 pour évaluer la performance thermique des remblais à pentes adoucies et documenter l’influence des conditions de surface (type de surface, conditions d’enneigement et de drainage) sur le bilan thermique en surface pour différentes sections de l’infrastructure (accotement, talus, pied de talus et milieu naturel). 183
- Figure 90 : A) Puits de forage TAS-F1 avant le début des travaux d’adaptation à la piste d’atterrissage de Tasiujaq. B) Installation des câbles à thermistances et repères gradués une fois l’adoucissement des pentes de talus complété en 2018. C) Branchement des câbles à l’intérieur d’un tuyau ABS contenant le nouveau système d’acquisition. D)

Finalisation de l'installation des câbles à thermistances en surface (câble horizontal). E) Aperçu final du site TAS-F2 une fois les travaux d'adaptation et d'instrumentation complétés.	184
Figure 91 : Localisation de l'instrumentation existante et celle nouvellement installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques de mitigation implémentées pour la piste d'atterrissage de Tasiujaq.	185
Figure 92 : Variation de la température journalière de l'air (TMJA) et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) à Tasiujaq pour la période 2008-2021. Les moyennes journalières et annuelles ont été calculées à partir des températures de l'air horaires mesurées à la station de référence HT-304.	190
Figure 93. Profondeurs maximales du front de dégel (épaisseurs de la couche active) en fonction du temps pour la période de 2007 à 2021 aux différents sites de suivi thermique de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.	191
Figure 94 : Variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps sous le centre-piste (HT-180 et HT-181), en milieu naturel (Tas-F2) et en pied de remblai (Tas-F3) pour la période de septembre 2018 à août 2021, piste d'atterrissage de Tasiujaq.	192
Figure 95 : Variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la planche d'essai de la pente douce 1V :8H (section B) et les nouvelles pentes douces (1V :6H) (section A, Tas-F1 et Tas-F2) pour la période de septembre 2018 à août 2021, piste d'atterrissage de Tasiujaq.	193
Figure 96 : Profils thermiques moyens annuels pour la période d'octobre 2018 à octobre 2021 pour les câbles à thermistances de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.	194
Figure 97 : Température moyenne de surface en été, en hiver et sur une base annuelle pour la période de septembre 2018 à octobre 2021 pour deux sections de pente douce instrumentées (Tas-F1 et Tas-F4). Les capteurs sont positionnés à quelques centimètres sous la surface le long d'un transect allant de l'accotement jusqu'à 8 m du pied de remblai.	195
Figure 98 : Patron de déformation de la surface de roulement de la piste d'atterrissage de Tasiujaq généré à partir du levé topographique réalisé par l'entrepreneur à l'été 2018 et aperçus généraux des talus à pente adoucie et surface de roulement quelques années après les travaux d'adaptation de la piste (2021).	197
Figure 99 : Aperçus des conditions de neige au mois de mai 2019 et 2020 le long de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.	200
Figure 100 : Patron de distribution de la couverture de neige résiduelle observé à la fin de l'hiver 2019, piste d'atterrissage de Tasiujaq.	201
Figure 101 : A et B) Relation empirique pour estimer les épaisseurs de neige en fonction de la topographie du site développée par Tabler (1975). C) Relation empirique entre l'angle des pentes douces et leurs capacités à refroidir les températures à l'interface base du remblai/sol naturel (CTI) (tirée de Lanouette, 2021). D) Différence de température entre l'air et la surface du sol en fonction de la hauteur de neige accumulée (tirée de Lanouette, 2021). Cette relation suggère une épaisseur de neige critique évaluée à 40 cm pour la piste d'atterrissage de Tasiujaq. E) Schématisation de la réduction de cette zone d'épaisseur de neige critique en fonction de différentes valeurs de pente pour les talus.	203
Figure 102 : A) Cartographie des dépôts de surface et B) coupe stratigraphique synthèse, piste d'atterrissage de Quaqtq (Tirée de L'Hérault <i>et al.</i> , 2012).	206
Figure 103 : Vue aérienne datant de 2010 où une légère dépression est apparue autour de 2005 et a continué d'évoluer jusqu'en 2011 pour affecter toute la largeur de la piste de Quaqtq. La superficie du secteur affecté est délimitée approximativement par la ligne pointillée rouge. La présence d'eau de part et d'autre du remblai et la morphologie linéaire de la dépression suggèrent une dégradation thermique du pergélisol causée par un écoulement d'eau très localisé.	207
Figure 104 : A) Aperçu générale de la stratégie d'adaptation proposée pour la piste d'atterrissage de Quaqtq. Vues en plan tirées des plans originaux tel que construit (no. :PA-7202-154-04-1162) du remblai à pente adoucie avec section munie d'une géomembrane, du nouveau fossé de drainage côté est et du fossé de décharge avec digue extrémité sud.	208
Figure 105 : A) Coupe type tirée des plans tel que construit illustrant la mesure d'atténuation contre le dégel du pergélisol (pente douce avec géomembrane) mise en place du côté est entre les chaînages 1+260 m et 1+340 m, piste d'atterrissage de Quaqtq. Sections transversales tirées des plans tel que construit aux chaînages B) 1+300 m et C) 1+760 m. (Plan no. :PA-7202-154-04-1162).	209
Figure 106 : Instrumentation existante et celle installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques d'adaptation mises en place à l'aéroport de Quaqtq.	212

Figure 107 : Variation de la température journalière de l'air (TMJA) et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) à Quaqtq pour la période 2008-2020. Les moyennes journalières et annuelles ont été calculées à partir des températures de l'air horaires mesurées à la station de référence HT-156.	215
Figure 108 : Vue en plan transversal de la configuration des câbles à thermistances A) HT-178 et QUA-2015-F1 et B) HT-175 et QUA-2015-F2, piste d'atterrissage de Quaqtq.	216
Figure 109 : Variation journalière de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps A) au centre-piste de la piste (HT-178) et B) dans la pente douce (QUA-2015-F1 et C) au centre-piste de la piste (HT-175) et D) dans la pente douce (QUA-2015-F2), octobre 2010 à octobre 2020, piste d'atterrissage de Quaqtq.	217
Figure 110 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales au chaînage 1+295 m pour la période 2017-2020 au niveau A) de la pente douce et B) du centre-piste.	218
Figure 111 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales au chaînage 1+630 m pour la période 2017-2020 au niveau A) de la pente douce et B) du centre-piste.	219
Figure 112 : Emplacements des plaques de tassements, anciennes dépressions et fissures localisées pour la période (2004-2012) sur fond topographique généré à partir des données LIDAR de 2016, piste d'atterrissage de Quaqtq. A) Nouvelle dépression réapparue sensiblement au même endroit que l'ancienne dépression QUA-Dp-2. Fissures longitudinales en haut de talus aux environs des chaînages B) 1+600 m et C) 1+660 m. Les photos A, B et C ont été prises à l'été 2019.	221
Figure 113 : A) Désobstruction du fossé de décharge au printemps 2019. Suivi photographique des conditions de drainage au printemps 2020 assuré par la caméra automatisée QuaCam-1, piste d'atterrissage de Quaqtq.	223
Figure 114 : Accumulations d'eau qui persistent dans les fossés au courant de l'été entre les chaînages 1+600 m et 1+830 m. A) Vue vers le nord et B) vue vers le sud.	224
Figure 115 : A) Cartographie des dépôts de surface et B) coupe stratigraphique synthèse, piste d'atterrissage de Kangirsuk (Tirée de L'Hérault <i>et al.</i> , 2012).	227
Figure 116: Problème de drainage et signes de dégradation tels qu'observés en juin 2009 le long de piste de Kangirsuk (tirée de L'Hérault <i>et al.</i> , 2012).	228
Figure 117 : A) Aperçu générale de la stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Kangirsuk tirés des plans originaux tel que construit (no. :PA-7202-154-10-1267). Vues en plan pour une section de nivellement de la piste et reprofilage de fossé B) sans et C) avec une membrane géocomposite. D) Vue aérienne de la piste de Kangirsuk une fois les travaux d'adaptation complétés.	230
Figure 118 : Instrumentation existante et celle installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques d'adaptation mises en place à l'aéroport de Quaqtq.	232
Figure 119 : A) Quelques fissures présentent sur les talus du remblai à une dizaine de mètres au sud de la berme côté est. B) Absence d'accumulation d'eau au fond des fossés qui témoigne de leur bonne efficacité à drainer l'infrastructure.	233
Figure 120 : Évidences de dégradation du pergélisol et défauts observés à partir des photos aériennes prise en 2010, route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.	236
Figure 121 : Profils topographiques existants relevés au centre de la route avant les travaux d'adaptation pour les deux secteurs présentant des déformations importantes. A) Secteur entre les chaînages 1+320 et 1+420 m et B) secteur entre les chaînages 1+020 et 1+120 m.	237
Figure 122 : A) Aperçu générale de la stratégie d'adaptation mise en place le long de la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik. B) Coupes types tirées des plans originaux tel que construit (no. CH-7202-154-04-1163) du remblai à pente douce et des fossés de drainage.	238
Figure 123 : État des lieux durant la mise en place des mesures d'adaptation et deux ans après (2015), secteur 1, route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.	241
Figure 124 : État des lieux durant la mise en place des mesures d'adaptation, deux ans après (2015) et 6 ans après (2019), secteur 2, route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.	242
Figure 125 : Conditions d'enneigement à la fin de l'hiver 2016 (13 mai 2016) du côté nord (droit) et du côté sud (gauche) de la route pour le secteur 1 (photos A et B) et le secteur 2 (photos C et D).	243

Figure 126 : Conditions de drainage dans le secteur 2 telles qu’observées le 20 juillet 2019. A) vue d’ensemble du côté droit (nord), B) fossé de drainage du côté droit (nord) et C) fossé de drainage du côté gauche (sud), route d’accès à l’aéroport d’Ivujivik.....	244
Figure 127 : A) Stratégie d’adaptation telle que proposée par L’Héroult et al. (2014) et B) vue en plan tirée des plans tel que construit no. :CH-7204-154-15-0002(TC), route d’accès à l’aéroport de Kangiqsualujjuaq. À noter que sur le plan tel que construit, les pentes douces n’apparaissent pas entre les chaînages 0+680 m et 1+000 m, mais ont bel et bien été mises en place.	247
Figure 128 : A) Localisation des caméras automatisées installées à l’été 2018 le long de la route d’accès à l’aéroport de Kangiqsualujjuaq. B) Vue d’ensemble du site de la caméra GrCam-1 et C) la prise de vue. D) Vue d’ensemble du site de la caméra GrCam-2 et E) la prise de vue.	249
Figure 129 : Déformations affectant les sections de la route toujours pavées entre les chaînages 0+680 et 0+920 m telles qu’observées lors d’une visite sur le terrain effectuée à l’été 2019, route d’accès à l’aéroport de Kangiqsualujjuaq.	252
Figure 130 : État des fossés latéraux localisés à une distance des pieds de remblai du côté droit (nord-est) et gauche (sud-ouest) un an après (2017) et trois ans après (2019) leur mise en place.	252
Figure 131 : Aperçu des déficiences le long de la route d’accès à l’aéroport de Kangiqsualujjuaq associées au réseau de drainage et recensées lors de la visite sur le terrain effectuée à la mi-juillet 2019.	253
Figure 132 : Évolution des conditions d’enneigement entre les mois d’octobre 2018 à avril 2019 (images A à G) et de drainage entre les mois de mai et septembre 2019 (images H à L), caméra GrCam-1, route d’accès à l’aéroport de Kangiqsualujjuaq.	254
Figure 133 : A) Aperçu général de la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq. B), C) et D) Tassements différentiels et déformation subséquente de la surface pavée. E) Coin de glace qui traverse sous le remblai de la route. F) Fissures longitudinales qui suggèrent une fatigue de la chaussée par tassement. G) Accumulation d’eau aux abords d’un ponceau. H) Série de dépressions de grande amplitude. I) Dépressions linéaires dont le patron géométrique semble attribuable à la présence d’un réseau de coins de glace (Tirée de L’Héroult <i>et al.</i> , 2015).	258
Figure 134 : Planche synthèse présentant la répartition des dépôts de surface, les interprétions stratigraphiques et propriétés cryologiques du pergélisol le long de la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq (Tirée de L’Héroult et al., 2015).	259
Figure 135 : Aperçu général de la stratégie d’adaptation mise en place le long de la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq par secteur d’interventions accompagné de coupes types des remblais à pente douce et des fossés de drainage tirées des plans produits pour soumission et construction (plan no. CH-7204-154-10-0071).	261
Figure 136 : Aperçus généraux de l’état du remblai de la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq, juillet-septembre 2019. A) Secteur 4. B) Secteur 2. C) à F) Secteur 1.	265
Figure 137 : Aperçus des conditions de neige au mois de mai 2019 le long de la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq. A) Secteurs 3 et 4. C, B et D) Secteur 2. E) et F) secteur 1.	266
Figure 138 : Aperçus au sol des conditions de neige au mois de mai 2019 le long de la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq. A) Secteurs 2. B) et C) Secteur 1 chaînage 1+500 m. D) Secteur 1 chaînage 1+200 m. E) Secteur 1 chaînage 0+700 m.	267
Figure 139 : Conditions de drainage le long de la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq, juillet-septembre 2019. Fossés (A et D) et embouchures ponceau côté amont (B et E) et aval (C et F).	268
Figure 140 : Schéma conceptuel de l’analyse coûts-bénéfices-efficacité.....	269
Figure 141 : Analyse économique des méthodes d’adaptation du site expérimental de Beaver Creek basée sur le coût de construction et sur l’entretien estimé à partir de l’efficacité thermique des méthodes (Malenfant-Lepage, 2016) ..	271
Figure 142 : Évolution des coûts totaux annuels pour les différentes techniques en fonction du tassement annuel pour une largeur affectée de 14 m	272
Figure 143 : Quantité moyenne annuelle de gravier utilisé depuis la construction pour les infrastructures non vulnérables (vert) et vulnérables (rouge) au dégel du pergélisol.	274
Figure 144 : Nombre d’interventions effectuées depuis la construction pour les infrastructures non vulnérables (vert) et vulnérables (rouge) au dégel du pergélisol.	275

Figure 145 : Données de tassement et de superficie affectées collectées par le Ministère sur les infrastructures de transport du Nunavik (exemple de la piste de Tasiujaq).....	277
Figure 146 : Gradients thermiques mesurés sous les différentes sections du site expérimental de Tasiujaq.....	279
Figure 147 : Bilan thermique calculé pour les sections expérimentales de Beaver Creek, Yukon, pour les années 2009 à 2011.	280
Figure 148 : Tassements observés sur la piste de Salluit : a) cartographie basée sur les relevés LIDAR, b) tassements cumulatifs observés sur les plaques de tassement, c) taux de tassement annuel observé sur les plaques de tassement.	282
Figure 149 : Analyse coût-bénéfice de l'utilisation d'un remblai à convection pour stabiliser la dépression « P1 » de la piste d'atterrissage de Salluit.....	283
Figure 150 : Analyse coût-bénéfice de l'utilisation d'un drain thermique pour stabiliser la dépression « P1 » de la piste d'atterrissage de Salluit.....	284
Figure 151 : Analyse coût-bénéfice de l'utilisation d'une pente douce pour stabiliser la dépression « P4 » de la piste d'atterrissage de Salluit.....	285
Figure 152 : A) Impact de la hauteur entre les cheminées et B) de l'épaisseur du drain thermique sur la capacité d'extraction de la chaleur dans les remblais (tirées de Châtaigner, 2008). C) Configuration actuelle du drain thermique installé le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit et D) corrections proposées pour améliorer la performance des drains thermiques lors d'éventuelles implémentations. E) Modifications spécifiques au drain thermique de Salluit qui pourraient considérablement améliorer sa performance.....	291
Figure 153 : A) Diminution du potentiel d'extraction de la chaleur dans un remblai à convection de type fermé en fonction de la longueur. B) Couche protectrice (<i>soil layer and geotextile</i> : NMS) pour prévenir le calfeutrage des remblais convectif et C) bénéfiques thermiques modélisés d'un tel ajout (<i>CCR reinforced with NMS</i>) (tirées de Liu <i>et al</i> , 2021).....	292
Figure 154 : L'accumulation de neige au sommet d'un remblai est sensiblement proportionnelle à la hauteur de la zone de Eddy qui est fonction de la pente des talus (tirée de Tabler, 2003).....	296
Figure 155 : Différentes configurations de l'utilisation de la matière organique dans la conception des pentes douces. A) Configuration standard sans recouvrement des talus telle qu'utilisée pour les pentes douces de la piste d'atterrissage de Tasiujaq et B) configuration avec prélèvement et recouvrement superficiel des talus telle qu'utilisée pour la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.....	297
Figure 156 : Sections de clôture fortement endommagées par l'action du soulèvement gélival sur les fondations, Aéroport d'Aupaluk (source : MTQ, 2011-2012, devis 7202-13-3505).....	302
Figure 157 : Conception pour les sections de clôtures standards tirée des plans tel que construit no. PA-7202-154-11, aéroport d'Aupaluk.....	303
Figure 158 : Vue en plan des deux différents types de poteaux A) « Russe » et B) « Yukon » qui sont désormais utilisés dans la conception des nouvelles clôtures aux aéroports et qui doivent traverser des zones de fort soulèvement gélival (schémas tirés des plans tel que construit no. PA-7204-154-95-1731, aéroport de Kangirsuk).	304
Figure 159 : A) Aperçu général des sections de clôtures adaptées mises en place autour de la piste d'atterrissage d'Inukjuak et B) utilisant les deux types de poteaux « Russe » et « Yukon ».....	305
Figure 160 : Modèles de poteaux de type « Yukon » avec fixation des empattements A) fixe (aéroport d'Inukjuak) ou B) amovible qui permet l'ajustement de l'angle des pattes pour bien les appuyer à la topographie du terrain (aéroport de Kangirsuk).....	306
Figure 161 : Soulèvement au gel des poteaux de type « Russe » aux aéroports A) d'Aupaluk et B) d'Inukjuak.....	308
Figure 162 : Type de défauts qui affectent fréquemment les poteaux de type « Yukon ». A) empattements mal appuyés au sol (aéroport d'Inukjuak), B) fixations amovibles des empattements trop inclinés (aéroport de Kangirsuk) et C) empattements perpendiculaires qui reposent directement sur les empattements parallèles à la clôture.....	308
Figure 163 : Zone de transition entre les poteaux de type « Russe » et de type « Yukon » présentant des déformations importantes aux aéroports A) de Kangirsuk, B) d'Aupaluk et C) Inukjuak.	309
Figure 164 : Alternative proposée aux poteaux de type « russe » et qui porte pour le moment l'appellation de poteau de type « Nunavik ».....	311

Figure 165 : Différentes techniques de mitigation disponibles contre la dégradation du pergélisol qui sont actuellement utilisées ou qui seraient potentiellement utilisables afin d'optimiser les stratégies d'adaptations déjà en place ou celles qui seront développées dans le futur pour adapter les infrastructures de transport du MTQ au Nunavik en considérant les changements climatiques.	317
Figure 166 : Exemple de combinaison de plusieurs techniques de mitigation contre la dégradation du pergélisol afin d'optimiser l'adaptation d'une infrastructure de transport construite sur pergélisol sensible au dégel. Dans cet exemple, l'utilisation combinée des pentes douces (meilleure extraction de la chaleur en hiver), d'un couvert végétal pour les talus et d'une surface à albédo élevée pour la surface de roulement (Réduction de l'absorption de la chaleur en été), d'une barrière d'infiltration et d'un fossé de drainage à faible impact (réduction de l'advection de chaleur par l'eau) et de renforts mécaniques (amélioration des capacités mécanique du remblai), assurerait certainement une performance thermique/mécanique optimale de l'infrastructure.	317
Figure 167 : Différentes techniques de mitigation contre la dégradation du pergélisol et qui composent les différentes stratégies d'adaptations mises en place aux infrastructures du MTQ au Nunavik.	321
Figure 168 : Démarche de conception des infrastructures de transport au Nunavik.....	323
Figure 169 : Illustration des trois familles de stratégies d'adaptation applicable aux infrastructures de transport du Nunavik.	324
Figure 170: Principe de l'approche de conception thermique adaptée proposée.....	326
Figure 171 : Choix de la méthode de conception	329
Figure 172: Marge de sécurité (SM) en fonction de l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT), pour un remblai conventionnel. (Kong, 2019).....	330
Figure 173: Abaque de conception pour la technique de remblai à pente douce, pour la stabilisation thermique du sol sous le centre de la pente, selon l'approche de correction de la température à l'interface (CTI) (traduite de Lanouette 2020).	331
Figure 174: Albédo requis pour stabiliser le pergélisol en fonction de l'épaisseur du remblai (H) et de la CTI requise (Richard 2018).....	332
Figure 175: Marge de sécurité (SM) en fonction de l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT) et de l'épaisseur du remblai (H) pour l'albédo d'une surface (tirée de Kong, 2019).....	333
Figure 176: Bilan thermique à travers l'interface remblai/sol, sous le centre du remblai, en fonction de l'épaisseur (H) du remblai et du gradient thermique. (Kong, 2019).....	334
Figure 177: Bilan thermique à travers l'interface remblai/sol, sous la pente du remblai, en fonction de l'épaisseur (H) du remblai et du gradient thermique. (Kong, 2019).....	334
Figure 178: Capacité d'extraction de chaleur (Heat extraction capacity) de l'ACE pleine largeur à l'interface remblai-sol en fonction de l'épaisseur du remblai (Embankment thickness) et de la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol. (Kong, 2019)	336
Figure 179: Capacité d'extraction de chaleur (Heat extraction capacity) de l'ACE dans la pente latérale à l'interface remblai-sol en fonction de l'épaisseur du remblai (Embankment thickness) et de la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol. (Kong, 2019).	336
Figure 180: Capacité d'extraction (Heat extraction) de chaleur du drain thermique à l'interface remblai-sol en fonction de l'épaisseur du remblai (Embankment thickness), de la longueur du drain thermique (L) et de la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol (Tirée de Kong, 2019).....	338
Figure 181. Évolution des températures à l'interface remblai/sol naturel par rapport à la température du pergélisol pour la section (r) Référence, (a) Pente douce, (b) ACE et (c) Drain thermique.....	341
Figure 182: Différence entre la température à l'interface remblai/sol naturel et la température du pergélisol (ΔT) pour la période de suivi. Sections (r) Référence, (a) Pente douce, (b) ACE et (c) Drain thermique.	342
Figure 183. Résultats d'interpolation du bilan thermique à l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai H = 3,84 m et du gradient thermique (modifiée de Kong, 2019).	344

Figure 184. Résultats d'interpolation du bilan thermique à l'interface remblai/sol en fonction de l'épaisseur du remblai des différentes sections (H=3.84 m, H=5.16 m, H=4.26 m) et du gradient thermique (modifié de Kong, 2019).	345
Figure 185: Correction en fonction de la hauteur du remblai de la section ACE.....	346
Figure 186: Correction en fonction de la hauteur du remblai de la section drain thermique.....	346
Figure 187: Extrapolation de la courbe de capacité d'extraction de chaleur de l'épaulement ACE à travers l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai et de la différence de température $\Delta T = -14.03$ °C (modifié de Kong, 2019).....	347
Figure 188. Capacité d'extraction de chaleur du drain thermique à l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai, de la longueur du drain thermique (L=9 m) et de la différence de température $\Delta T = -14,3^{\circ}\text{C}$; $\Delta T = -14,03^{\circ}\text{C}$; $\Delta T = -13,3^{\circ}\text{C}$ (modifiée de Kong, 2019).....	349
Figure 189. Relation de la température à l'interface remblai/sol naturel (modélisée) par rapport à la température du pergélisol, pour l'infrastructure de Puvirnituq avant adaptation.....	350
Figure 190. Résultats d'extrapolation du bilan thermique à l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai H = 8 m et du gradient thermique (modifié de Kong, 2019).	351
Figure 191. Capacité d'extraction de chaleur du ACE dans l'épaulement à travers l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai et la différence de température $\Delta T = -13,44$ °C (modifié de Kong, 2019).	351
Figure 192 : Relation de la température à l'interface remblai/sol naturel (modélisée par Kong (2019)) par rapport à la température du pergélisol pour le remblai avant l'adaptation.....	353
Figure 193 : Résultats interpolation du bilan thermique à l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai H=2,5 m et du gradient thermique (Modifiée de (Kong et al., 2019a)).....	354
Figure 194 : Extrapolation de ΔT pour l'analyse du drain thermique Salluit	355
Figure 195 : Hypothèse sur la distribution de l'épaisseur de neige accumulée sur le talus d'un remblai.....	356
Figure 196 : Corrélacion entre l'épaisseur de neige et la facteur n (Lanouette, 2020).....	357
Figure 197 : Localisation du site d'étude de la route de Tasiujaq.	358
Figure 198 : Modèle géométrique utilisé pour la simulation numérique.....	359
Figure 199 : localisation des points d'évaluation sous la toute de Tasiujaq.....	360
Figure 200 : température annuelle simulée pour l'interface sol-remblai sous le talus gauche (position 1)	360
Figure 201 : Localisation du site d'application de la méthode, route d'accès à l'aéroport d'Akulivik.....	362
Figure 202 : Localisation de la station de mesure AKU-F4.....	363
Figure 203 : Géométrie du modèle développé pour la simulation thermique du remblai de la route d'Akulivik.....	364
Figure 204 : localisation des points d'évaluation sous la route d'Akulivik.	365
Figure 205: température annuelle simulée pour l'interface sol-remblai sous le talus à la position 1	365
Figure 206 : Localisation du site d'application de la piste de Kangirsuk.....	367
Figure 207 : Températures moyennes hivernales, estivales et annuelles entre 2005 et 2016 à Kangirsuk.....	367
Figure 208 : Modèle géométrique utilisé pour la simulation des températures dans le remblai de la piste de Kangirsuk.	368
Figure 209 : Température moyenne à l'interface sol-remblai simulée sous le centre de la piste de Kangirsuk)	369
Figure 210 : Changements projetés dans le temps selon deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (scénario modéré RCP 4.5 et scénario élevé RCP 8.5) et calculés à partir d'un ensemble de simulations climatiques globales (CMIP5) (source : Ouranos, https://portclim.ouranos.ca/#/regions/17).	371
Figure 211 : Sélection des scénarios climatiques proposés par une sous-sélection du groupe CMIP 5 Analyse de réchauffement climatique utilisant différents modèles climatiques et deux hypothèses d'émissions pour A) la piste d'atterrissage de Tasiujaq, B) la piste d'atterrissage de Puvirnituq et C) la route d'accès à l'aéroport de Salluit.	372
Figure 212 : Températures moyennes annuelles de l'air pour la période 1950-2100 projetées par le scénario climatique INM-CM4-rcp85, communauté de Tasiujaq, Nunavik.	373

Figure 213 : Évolution de la marge de sécurité en fonction du temps selon le scénario climatiques INM-CM4-rcp85 pour les pentes douces mises en place le long de la piste d’atterrissage de Tasiujaq.....	374
Figure 214 : Températures moyennes hivernales de l’air pour la période 1950-2100 projetées par le scénario climatique IPSL-CM5A-LR-rcp85, communauté de Puvirnituk, Nunavik.....	375
Figure 215 : Évolution de la capacité d’extraction de chaleur des remblais à convection installés dans l’épaulement de la piste d’atterrissage de Puvirnituk pour des hauteurs de remblai de 8,0 et 4,5 m et selon le scénario climatique IPSL-CM5A-LR-rcp85.....	376
Figure 216 : Températures moyennes hivernales de l’air pour la période 1950-2100 projetées par le scénario climatique NorESM1-M-rcp85, communauté de Salluit, Nunavik.	377
Figure 217 : Évolution de la capacité d’extraction de chaleur du drain thermique installé dans l’épaulement de la route de Salluit pour des hauteurs de remblai de 2,6 et 3,5 m et selon le scénario climatique NorESM1-M-rcp85.	378
Figure 218 : Schéma conceptuel illustrant l’interaction entre aléa, vulnérabilités des éléments exposés et conséquences, fondement de l’analyse de risque.	386
Figure 219 : Procédure générale en gestion des risques (adapté de Sécurité publique Canada, 2011).	387
Figure 220 : Exemple de matrice de classification des risques mettant en relation la probabilité d’occurrence d’un aléa et ses conséquences.	388
Figure 221 : A) Procédure générale de l’évaluation quantitative du risque telle que proposée par Brooks (2019). Procédure spécifique au sein des différentes composantes pour l’évaluation B) de l’aléa, C) des conséquences et D) en fonction des changements climatiques (<i>Climate Fragility analysis</i>). Les variables d’entrées sont représentées en orange, les traitements statistiques en gris, les calculs techniques en vert et les sorties en bleu (tirées de Brooks, 2019).....	392
Figure 222 : Procédure d’analyse quantitative des aléas A) tel que développée par Brooks (2019) et B) après son adaptation au contexte du Nunavik.....	394
Figure 223 : Interface utilisateur du programme « Arquluk-RISK » (SS - Single Site) : A) version originale et B) version adaptée dans le cadre du présent projet.	395
Figure 224 : A) Changement de volume d’un sol par tassement au dégel en fonction des contraintes appliquées (Tirée de Andersland et Ladanyi, 2004). σ_0 = contrainte effective exercée par le sol sus-jacent. Δp = contrainte effective exercée par la surcharge.....	398
Figure 225 : Procédure de calcul pour l’évaluation de l’aléa de type tassement au dégel (modifié de Brooks, 2019). Les paramètres d’entrées apparaissent en orange, le tirage aléatoire des valeurs de certains paramètres d’entrée lors d’une simulation de Monte Carlo en gris, les calculs intermédiaires et d’ingénieries en bleue et vert respectivement et la compilation statistique des résultats pour l’ensemble des simulations en bleu sarcelle.....	400
Figure 226 : Schématisation de l’évaluation du tassement total au dégel dans un contexte stratigraphique multicouche en fonction de l’épaisseur de la couche active actuelle (ALD), la pénétration du front de dégel (dthaw) et en faisant la sommation des produits entre les épaisseurs des différentes couches de sol qui seront dégelées (h_i) et leurs valeurs de tassements respectives (ethawi).	401
Figure 227 : Sélection des valeurs aléatoires pour les différents paramètres d’entrée au sein A) d’une même simulation de Monte Carlo et B) pour plusieurs simulation 1 à j ($j=20\ 000$) (tirée de Brooks, 2019).	401
Figure 228 : Représentation graphique des résultats obtenus lors de l’évaluation de l’aléa de type tassement au dégel telle que proposée par l’outils d’analyse quantitative du risque.	402
Figure 229 : Schématisation de l’évaluation de l’aléa de type tassement différentiel par l’entremise de la création d’un profil de sol automatique avec coins de glace effectuée par l’outils d’analyse quantitative du risque développé par Brooks (2019).	404
Figure 230 : Tolérance limite de déformation de la surface selon le critère de déformation « Boeing » (Boeing Runway Roughness Criteria) (source : Boeing, 2012).	404
Figure 231 : Seuil d’adhérence de 30% pour les pneus avant et arrière d’un véhicule en fonction de l’amplitude et la longueur d’onde des déformations et la vitesse de circulation (modifiée de Fradette, 2005).	404
Figure 232 : A) Schéma illustrant le contexte de formation d’un vide au sein d’un remblai provoqué par la fonte complète d’un coin de glace. B) Modèle à échelle réduite utilisé en laboratoire pour établir la relation entre la probabilité d’occurrence	

d'un effondrement et le ratio BR déterminé par le rapport entre la largeur des coins et le diamètre moyen des particules qui composent le remblai (D_{50}). C) Probabilité d'occurrence d'un effondrement advenant une fonte complète d'un coin de glace sous un remblai en fonction du ratio BR. La régression logarithmique établie entre les observations et la probabilité d'occurrence est illustrée par la ligne bleue pointillée et accompagnée de son équation. (Tirées de Brooks *et al.*, 2020) 406

Figure 233 : Variation des températures annuelles moyennes de l'air pour la région de Puvirnituk pour une simulation issue de l'ensemble du CMIP5 accompagnée des moyennes et écart-types pour chacun des paramètres climatiques nécessaires à l'analyse de l'aléa. 408

Figure 234 : Sommaire des résultats obtenus pour l'analyse de l'aléa de type tassement au dégel pour quatre différentes périodes climatiques sélectionnés au sein d'une même simulation climatique de l'ensemble CMIP5 (Simulation IPSL-CM5A-LR-rcp85). 408

Figure 235 : Variations des températures annuelles moyennes de l'air pour la région de Puvirnituk pour 4 simulations issues de l'ensemble du CMIP5 accompagnées des moyennes et écart-types pour chacun des paramètres climatiques pour la période climatique 2041-2070. 409

Figure 236 : Sommaire des résultats obtenus pour l'analyse de l'aléa de type tassement au dégel pour la période 2041-2070 pour chacune des simulations climatiques considérées dans l'analyse. Seulement les paramètres climatiques diffèrent entre les différentes analyses. 409

Figure 237 : Aperçu du volet d'analyse quantitative des conséquences directes et indirectes avec les différents paramètres d'entrée nécessaires à l'évaluation des conséquences total pour un aléa donné. 410

Figure 238 : Exemple de matrice de classification des risques mettant en relation la probabilité d'occurrence d'un aléa et ses conséquences. 414

Figure 239 : A) Types de classes d'entités en fonction de leur géométrie vectorielle (un point, une ligne ou un polygone). B) Exemple d'une table attributaire utiliser pour les classes d'entités et qui permet de stocker les informations sur la géométrie vectorielle (table du haut) et d'une table attributaire mise en relation à l'aide d'un champ commun et une classe de relation (sources : ArcGIS). 423

Figure 240 : Représentation géographique d'un phénomène réel utilisant un jeu de données matricielles. A) Type d'occupations du sol (données discrètes) et B) modèle numérique d'altitude (données continues) (sources : ArcGIS). 423

Figure 241 : Présentations des trois bases de données et le type d'information qu'elles contiennent. 424

Figure 242 : Aperçu de la plate-forme web qui permet de visualiser les différentes informations géospatiales, géotechniques et thermiques, disponibles par site et contenues dans les différentes bases de données du CEN. 426

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Infrastructures de transport du MTQ à l'étude qui ont fait l'objet de travaux d'adaptation aux changements climatiques entre 2010 et 2018.....	38
Tableau 2 : Sources de données disponibles ou potentielles qui seront utilisées dans l'évaluation de la performance mécanique des techniques d'atténuation du dégel du pergélisol aux sites à l'étude.....	49
Tableau 3 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la piste de Puvirnituaq (modifié de Gaumond et Doré, 2013).....	59
Tableau 4 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans le secteur de la piste de Puvirnituaq qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.	66
Tableau 5 : : Caractéristiques techniques des sondes à neige installées aux stations PUV-F2 (A) et PUV-F5 (B) en octobre 2018, piste d'atterrissage de Puvirnituaq.....	66
Tableau 6 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées sur le site de la piste de Puvirnituaq en octobre 2018.....	66
Tableau 7 : Variables climatiques pour la période 2008-2020 calculées à partir des températures journalières de l'air (TMJA) mesurées à la station de référence PUV-FOR1A, piste d'atterrissage de Puvirnituaq.....	69
Tableau 8 : Profondeurs maximales atteintes par le front de dégel au cours de la période 2009-2019 à l'emplacement des câbles à thermistances PUV-F5 et PUV-F2, piste d'atterrissage de Puvirnituaq.....	73
Tableau 9 : Variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps sous la berme convective A) à l'emplacement du câble à thermistances F et B) du câble à thermistances G pour la période de juillet 2009 à octobre 2019, piste d'atterrissage de Puvirnituaq. Tableau des profondeurs maximales atteintes par le front de dégel.....	74
Tableau 10 : Mesures de densité de la neige réalisées à l'hiver 2018-2019 dans un puits d'observation situé à proximité de la station PUV-F2, côté aval, piste d'atterrissage de Puvirnituaq.....	90
Tableau 11 : Coûts des travaux des mesures d'adaptation, route d'accès à l'aéroport de Salluit (modifié de Périer <i>et al.</i> , 2016).	100
Tableau 12 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans le secteur de la route d'accès à l'aéroport de Salluit qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.	108
Tableau 13 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées en août 2018 le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.....	108
Tableau 14 : Variables climatiques pour la période 2008-2019 calculées à partir des températures journalières de l'air (TMJA) mesurées à la station météorologique SILA, Salluit-2.....	113
Tableau 15 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Salluit.	156
Tableau 16 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans le secteur de la route d'accès à l'aéroport de Salluit qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.	159
Tableau 17 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées en septembre 2018 le long de la piste d'atterrissage de Salluit.....	159
Tableau 18 : Profondeurs maximales atteintes par le front de dégel au cours de la période 2012-2020 sous la pente douce tronquée, câble SAL-F3, piste d'atterrissage de Salluit.....	162
Tableau 19 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Tasiujaq.	179
Tableau 20 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans l'enceinte de l'aéroport de Tasiujaq qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.....	186

Tableau 21 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées en août 2018 le long de la piste d’atterrissage de Tasiujaq.....	186
Tableau 22 : Variables climatiques pour la période 2008-2021 calculées à partir des températures journalières de l’air (TMJA) mesurées à la station de référence HT-304, piste d’atterrissage de Tasiujaq.....	190
Tableau 23 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d’adaptation pour la piste d’atterrissage de Quaqtq.....	210
Tableau 24 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans l’enceinte de l’aéroport de Quaqtq qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.....	212
Tableau 25 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées en août 2018 le long de la piste d’atterrissage de Quaqtq.....	212
Tableau 26 : Variables climatiques pour la période 2008-2020 calculées à partir des températures journalières de l’air (TMJA) mesurées à la station de référence HT-156, piste d’atterrissage de Quaqtq.....	215
Tableau 27 : Profondeurs maximales atteintes par le front de dégel au cours de la période 2008-2020 au centre-piste (HT-175 et HT-178) et sous les pentes douces (QUA-2015-F1 et QUA-2015-F2), piste d’atterrissage de Quaqtq.....	216
Tableau 28 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d’adaptation pour la piste d’atterrissage de Kangirsuk.....	231
Tableau 29 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans l’enceinte de l’aéroport de Kangirsuk utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.....	232
Tableau 30 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d’adaptation pour la route d’accès à l’aéroport d’Ivujivik.....	239
Tableau 31 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d’adaptation pour la route d’accès à l’aéroport de Kangiqsualujjuaq.....	248
Tableau 32 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d’adaptation pour la route d’accès à l’aéroport de Tasiujaq.....	262
Tableau 33 : Coûts de mise en place des méthodes d’adaptation mises en place au site de Beaver Creek et estimation des coûts d’entretien à long-terme en considérant le bilan thermique (Malenfant-Lepage, 2016).....	271
Tableau 34 : Coûts de construction pour une section de 50 m et hypothèses sur la durée de vie des systèmes de protection utilisés par Ficheur (2011).....	272
Tableau 35 : Quantités approximatives de gravier produit, restant et utilisé pour chaque piste durant la période d’entretien, de l’année de construction (1984-1991) à 2019.....	274
Tableau 36 : Nombre d’interventions (apport en gravier, rechargement, rapiécage) effectuées pour chacune des infrastructures durant la période d’entretien, de l’année de construction (1984-1991) à 2019.....	275
Tableau 37 : Compilation des coûts unitaires de construction de techniques d’adaptation pour différents sites expérimentaux et sites d’application de ces techniques.....	276
Tableau 38 : Performance estimée de différents systèmes d’adaptation pour quelques sites expérimentaux et projets d’adaptation.....	281
Tableau 39 : Sommaire des coûts selon le type de poteaux de clôture utilisés et leurs coûts unitaires moyens. Les coûts unitaires pour chacun des types de poteaux proviennent des bordereaux de paiements disponibles.....	306
Tableau 40 : Particularités générales en lien avec le contexte d’application de différentes infrastructures au Nunavik et au Nunavut à partir desquelles les expériences accumulées par le passé permettront de développer différents outils servant à orienter la conception, la construction, l’exploitation, l’entretien et le suivi des infrastructures construites sur pergélisol.....	321
Tableau 41: Sommaire des données requises pour l’analyse thermique et sources possibles d’information.....	327
Tableau 42: Synthèse de solutions possibles en fonction de l’instabilité.....	328
Tableau 43: Sites de validation des abaques développés par modélisation.....	329
Tableau 44: Équations de régression entre le bilan thermique à l’interface remblai/sol, l’épaisseur du remblai et le gradient thermique. (modifié de Kong, 2019).....	335

Tableau 45: Relations entre la capacité d'extraction de chaleur à l'interface remblai-sol (HEC), la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol et l'épaisseur du remblai (H) (traduit de Kong, 2019).....	337
Tableau 46 : Relations entre la capacité d'extraction de chaleur du train thermique (HEC), la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol, la longueur du drain thermique (L) et l'épaisseur du remblai (H) (traduit de Kong, 2019).	339
Tableau 47: Liste des infrastructures servant à la validation et à l'application des abaques de conception.	340
Tableau 48. Facteur de correction de la conductivité thermique à Tasiujaq	344
Tableau 49. Hauteurs du remblai des sections à Tasiujaq.....	345
Tableau 50. Valeurs corrigées du bilan et du gradient thermique en fonction des hauteurs de remblai des sections à Tasiujaq.	347
Tableau 51. Bilan thermique corrigé pour la section ACE	347
Tableau 52. Résumé des résultats de la validation de l'abaque pour la section ACE à Tasiujaq.....	348
Tableau 53. Bilan thermique corrigé section drain thermique.....	348
Tableau 54. Résumé des résultats de la validation de l'abaque pour la section ACE à Puvirnituk	352
Tableau 55 : Facteur de correction bilan thermique Salluit	354
Tableau 56 : Hauteurs du remblai section A6 et B6	355
Tableau 57 : Résumé des résultats de la validation de l'abaque pour la section drain thermique à Salluit	355
Tableau 58 : Données climatiques enregistrées à la station de Tasiujaq.	358
Tableau 59 : Comparaison entre les indices de gel et de dégel mesurés et les indices simulés.	359
Tableau 60 : Facteurs n pour différentes conditions aux limites supérieures du modèle.....	359
Tableau 61 : Stratigraphie et propriétés thermiques des sols pour le site de Tasiujaq (L'Hérault et al., 2012).....	359
Tableau 62 : Compilation des données disponibles pour les conditions de la route de Tasiujaq et résultats des calculs	361
Tableau 63 : Bilans de thermiques calculés à partir des équations de régression pour trois positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai.	361
Tableau 64 : Comparaison de l'indice d'air mesuré et de l'indice d'air simulé pour le site de la route d'Akulivik.....	364
Tableau 65 : Stratigraphie et propriétés physiques et thermiques utilisées pour les simulations thermiques pour la route d'Akulivik (L'Hérault et al., (2012)	364
Tableau 66 : Compilation des données disponibles pour les conditions de la route d'Akulivik et résultats des calculs.....	365
Tableau 67 : Bilans de thermiques calculés à partir des équations de régression pour trois positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai.	366
Tableau 68 : Données disponibles pour les câbles HT-1 et F2.....	367
Tableau 69 : Facteurs n pour les différentes conditions limites supérieures du modèle.....	368
Tableau 70 : Propriétés thermiques et physiques des sols.....	368
Tableau 71 : Compilation des données disponibles pour les conditions de la piste de Kangirsuk et résultats des calculs.....	369
Tableau 72 : Bilans de thermiques calculés à partir des équations de régression pour trois positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai.	369
Tableau 73 : Températures moyennes annuelles de l'air en 2020, 2030, 2040 et 2050 estimées à partir des projections climatiques (scénario INM-CM4-rcp85) et marge de sécurité requise pour les pentes douces, piste d'atterrissage de Tasiujaq, Nunavik.....	374
Tableau 74 : Températures moyennes de l'air en hiver (TMH) en 2020, 2030, 2040 et 2050 estimées à partir des projections climatiques (scénario IPSL-CM5A-LR-rcp85) et capacité d'extraction de chaleur des remblais à convection en fonction du temps, piste d'atterrissage de Puvirnituk, Nunavik.	376

Tableau 75 : Températures moyennes de l'air en hiver (TMH) en 2020, 2030, 2040 et 2050 estimées à partir des projections climatiques (scénario NorESM1-M-rcp85) et capacité d'extraction de chaleur du drain thermique en fonction du temps, route d'accès à l'aéroport de Salluit, Nunavik.....	378
Tableau 76 : Facteurs permettant de définir la sévérité d'un aléa, la vulnérabilité d'un milieu ou d'un élément exposés, leurs résiliences et les conséquences potentielles suite à l'occurrence d'un aléa en particulier.	386
Tableau 77 : Évaluation sommaire des dangers susceptibles d'affecter la stabilité des remblais aux sites d'infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik.	390
Tableau 78 : Pondération des conséquences directes liées aux coûts liés à l'entretien intensif ou à la réhabilitation en fonction des types d'aléa.	411
Tableau 79 : Pondération des conséquences indirectes liées aux facteurs humains (Fh).....	413
Tableau 80 : Exemple de classification des pistes d'atterrissages selon leur importance, leur fonction, le type d'appareil et leur tolérance aux déformations.	413
Tableau 81 : Pondération des conséquences indirectes liées aux facteurs socioéconomiques (Fs).	413
Tableau 82 : Facteur amplificateur en fonction des conséquences indirectes associées aux facteurs socioéconomiques susceptibles d'affecter d'autres communautés.	413

LEXIQUE

Base du pergélisol ou plancher du pergélisol : Limite inférieure du pergélisol au-dessus de laquelle les températures se maintiennent en bas de 0 °C et au-dessous de laquelle les températures demeurent supérieures à 0 °C.

Câble à thermistances : Câble munit d'un ou plusieurs capteurs (thermistances) dont les propriétés électriques (résistance électrique) sont fonction de la température, ce qui permet de mesurer précisément la température à des profondeurs spécifiques selon la disposition dans un substrat choisi.

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 de l'eau au niveau du pergélisol permet la croissance du coin de glace.

Congère : Amas de neige entassée par le vent.

Consolidation due au dégel : Compression du sol résultant du dégel du pergélisol et du drainage consécutif de l'eau interstitielle.

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

Cryofaciès : Assemblage de cryostructures. Composition et structure du pergélisol constitué de sédiments et de glace.

Cryoreptation : Mouvement lent des particules superficielles du sol vers le bas des versants provoqué par une succession de cycles de soulèvement et de retombée des agrégats du sol lors de la formation et la fonte de lentilles de glace dans la couche active.

Cryostratigraphie : Succession verticale d'une séquence de cryofaciès.

Cryostructure : Patrons géométriques créés par l'assemblage tridimensionnel de glace et sédiments dans le pergélisol.

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

Cryoturbation : Phénomène géomorphologique affectant les couches superficielles du sol soumises à des alternances de gel et de dégel. L'alternance de l'état de l'eau de la phase solide (cycle de gel) à la phase liquide (cycle de dégel) entraîne le déplacement des matériaux du sol. Ces déplacements sont à l'origine de la formation de sols dits structurés, caractérisés par un tri des particules selon leur taille.

Dégradation du pergélisol : Réchauffement d'une partie ou l'ensemble du pergélisol allant jusqu'à son dégel partiel ou complet. La dégradation du pergélisol peut résulter de l'effet distinct ou combiné de facteurs d'ordre climatique, hydrologique, environnemental ou anthropique.

Degré-jour : Degré d'écart entre la température moyenne d'une journée et une température de référence donnée. Les degrés-jours de gel et les degrés-jours de dégel sont calculés par rapport à 0 °C.

Épaisseur du pergélisol : Distance verticale entre le plafond du pergélisol et la base du pergélisol.

Érosion thermique : Érosion d'un pergélisol à haute teneur en glace par l'action thermique et mécanique combinées de l'eau courante.

Facteur n : 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.

Fente de contraction thermique : Fissure de traction résultant de contraintes thermiques qui s'exercent dans sol.

Front de dégel : Limite mouvante entre le sol dégelé et le sol gelé. Utilisé pour parler du dégel annuel du sol.

Front de gel : Limite mouvante entre le sol gelé (ou le sol partiellement gelé) et le sol non gelé. Utilisé pour parler du regel annuel du sol.

Gélif (Susceptibilité au gel) : 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. Se dit aussi pour du roc qui se fracture facilement sous l'action du gel et du dégel.

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 géelifluxion sur les versants.

Glace interstitielle : Glace contenue dans les pores du sol ou le roc.

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 forment un réseau tridimensionnel, rectangulaire ou carré.

Indice de dégel (Ti) : Nombre cumulatif de degrés-jours au-dessus de 0 °C pour une période donnée.

Indice de gel (Fi) : Nombre cumulatif de degrés-jours au-dessous de 0 °C pour une période donnée.

Lentille de glace : Type de glace de ségrégation formant une lentille surtout horizontale et de dimensions variables dans le sol ou le roc.

Mare de thermokarst : Mare occupant une dépression fermée qui s'est formée à la suite d'un tassement du sol causé par la fonte de la glace de sol.

Ostioles à bourrelets : Petites buttes ou flaques de terre fraîche formées par l'action du gel. Elles correspondent à des remontées de boue qui se produisent par le biais du soulèvement gélival et de la cryoturbation. Elles se forment habituellement dans des sédiments à grain fin reposant sur du pergélisol.

Pente latérale: Réfère au talus du remblai.

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

Période zéro : Période au cours de laquelle la température demeure près du point de congélation lors du regel annuel (et parfois au cours du dégel) de la couche active.

Plafond du pergélisol : Limite supérieure du pergélisol, typiquement riche en glace.

Profondeur de dégel : Distance entre la surface du sol et le front de dégel à un moment donné durant la période de dégel annuel.

Relèvement isostatique : Remontée graduelle, suite à la déglaciation, des masses terrestres antérieurement déprimées sous le poids des glaciers.

Soulèvement dû au gel ou Soulèvement gélival : Soulèvement vertical ou déplacement latéral de la surface du sol (ou d'objets se trouvant sur ou dans le sol) causé par la formation de glace dans le sol.

Système d'acquisition de données : Dispositif électronique composé de circuits imprimés et de logiciels qui permet une acquisition et un enregistrement automatisés de mesures (analogiques ou numériques) provenant de différents capteurs (ex. thermistances).

Profil thermique : Terme général désignant la distribution de la température en fonction de la profondeur dans le sol. Nous parlons généralement des températures de surface à partir de la surface du sol, dans la couche active et au niveau du plafond du pergélisol et de températures en profondeur dans le pergélisol.

Régime thermique : Changements dans le profil thermique en fonction des fluctuations journalières, saisonnières et annuelles de la température en surface du terrain.

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.

Talus: Section en pente joignant le haut du remblai au sol naturel.

Tassement dû au dégel : Abaissement de la surface du sol et compression du sol dus à la consolidation résultant du dégel.

Tassements différentiels : Tassements inégaux du sol dû à la variabilité spatiale de ses propriétés.

Teneur en eau : Quantité d'eau pondérale ou volumétrique contenue dans un sol.

Teneur en glace : Quantité de glace pondérale ou volumétrique contenue dans un sol.

Teneur en eau volumétrique ou gravimétrique : Rapport entre le volume ou la masse d'eau contenue dans un sol et le volume ou la masse de la fraction solide.

Thermokarst : Processus aboutissant au dégel du pergélisol (dégradation du pergélisol) et à la formation d'une topographie irrégulière caractérisée par des dépressions et des affaissements de terrain dus à la perte de volume causée par la fonte de la glace. Ce dégel peut être généralisé 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'eau sur ou à l'intérieur d'un sol gelé.

INTRODUCTION ET CONTEXTE DU PROJET DE RECHERCHE

Les infrastructures routières et aéroportuaires du Ministère des Transports du Québec (MTQ) au Nunavik, construites entre 1985 et 1992, jouent un rôle vital dans la subsistance, le développement socio-économique et la qualité de vie des communautés isolées du Nord québécois. La construction des routes d'accès et des pistes d'atterrissage sur pergélisol a entraîné des modifications aux conditions initiales du milieu naturel. La conception et les méthodes d'entretien préconisées pour ces infrastructures ont notamment engendré des modifications aux conditions de drainage naturel du terrain et d'enneigement. Ces changements ont eu pour effet de modifier le régime thermique du pergélisol en favorisant, par exemple, l'accumulation de chaleur en marge des remblais principalement causée par des accumulations d'eau et de neige. Ces changements de conditions thermiques et mécaniques du pergélisol engendrent parfois une succession de processus rétroactifs positifs conduisant à une dégradation accélérée du pergélisol sous les infrastructures. À cette interaction dynamique entre les infrastructures et le pergélisol s'ajoutent les changements climatiques (CC), facteur de premier plan qui accélère le dégel du pergélisol et qui s'additionne aux effets combinés découlant de ces processus naturels et anthropiques.

Depuis le début des années 2000, les CC observés se sont traduits par un réchauffement important du pergélisol au Nunavik entraînant ainsi son dégel, donc le tassement des sols riches en glace sous certaines infrastructures de transport du Ministère provoquant des dégradations importantes, tels des tassements différentiels, des fissures de tension longitudinales, des soulèvements de clôtures, etc. Lors de la conception, l'idée préconisée que le pergélisol constitue une fondation généralement stable à long terme, a eu comme effet indirect de contribuer à endommager prématurément certains ouvrages. La vitesse et l'amplitude des dégradations dépendent certes du rythme et de l'ampleur des CC, mais également de la sensibilité locale au dégel du pergélisol, elle-même tributaire principalement de la teneur en glace des dépôts meubles gelés, de la nature des sols, des concepts d'ingénierie appliqués lors de la construction, des méthodes d'entretien utilisées ainsi que des variations de la température de l'air et des précipitations (liquide et solide).

Entre 2003 et 2021, les connaissances développées dans le cadre des projets de recherche en impact et en adaptation aux CC pour les infrastructures du MTQ en région de pergélisol mandatés principalement par le MTQ, combinées à celles recueillies par le Ministère dans le cadre de ses opérations et suivis, ont significativement contribué à la révision des critères de conception, mais également à adapter la conception et la construction des infrastructures routières et aéroportuaires du Ministère face aux CC lors de travaux de réhabilitation. Depuis 2009, les projets d'adaptation des infrastructures ont pris en compte les caractéristiques et les risques réels ou anticipés (nature et intensité des risques naturels et climatiques, impacts environnementaux, etc.) ainsi que le contexte d'efficacité des mesures d'adaptation documentées à l'échelle expérimentale et par la suite des travaux d'adaptation réalisés à grande échelle, et ce, en fonction des projections de CC les plus récentes et les plus fiables. Ainsi, au fil des années, une expertise de pointe a été développée plaçant le MTQ à l'avant-garde et le positionnant comme chef de file de la pratique nord-américaine dans la recherche, l'innovation technologique, l'élaboration et la mise en place de mesures d'adaptation aux CC à grande échelle pour les infrastructures et réseaux de transport en région de pergélisol. Le savoir développé et celui toujours en développement permettent au Ministère d'intervenir en mode préventif plutôt que réactif maximisant ainsi la résilience des systèmes de transport.

Dans une perspective de CC, le maintien de la pérennité et de la sécurité des infrastructures de transport dans les communautés nordiques éloignées et isolées représente un défi de taille. Ces infrastructures nécessitent une conception et une gestion adaptées aux conditions environnantes et aux changements climatiques afin d'assurer leur résilience et maximiser les investissements. Pour ce faire, il est nécessaire de poursuivre les travaux de recherche en vue d'améliorer la compréhension des interactions entre les conditions du géosystème pergélisol, les infrastructures qui ont fait l'objet de travaux d'adaptation et les conditions environnementales et climatiques passées, actuelles et futures. Cette meilleure compréhension permettra de fournir au Ministère les connaissances

requis pour réviser et préciser les critères/normes de conception, améliorer la gestion de risques ainsi que l'analyse coûts-bénéfice-efficacité maximisant ainsi davantage les interventions lors de la construction et de l'entretien des ouvrages construites sur pergélisol sensible au dégel.

Depuis 2010, la mise en œuvre des stratégies d'adaptation aux changements climatiques spécifiques à chaque ouvrage a permis l'application grande échelle de nombreuses techniques de protection du pergélisol et mesures d'adaptation pour assurer la résilience des infrastructures de transport du MTQ. L'installation d'instrumentation à des endroits stratégiques et l'utilisation de nouvelles technologies innovatrices pour assurer le suivi du comportement thermique et mécanique du pergélisol ainsi que de plusieurs techniques d'adaptations mises à l'essai au Nunavik, en font un laboratoire unique au niveau international pour analyser et comprendre la performance de ces techniques, améliorer la gestion de risques et soutenir le développement d'outils d'aide à la décision. Actuellement, le réseau d'infrastructures aéroportuaires du Ministère sensibles aux CC fait l'objet d'un suivi des conditions de pergélisol avec un historique de données s'échelonnant généralement sur plus de 16 années. Les connaissances acquises à ce jour combinées à celles à venir permettront d'évaluer précisément la performance globale des travaux d'adaptation réalisés et l'efficacité spécifique des mesures d'adaptation préconisées en fonction du contexte d'intervention étudié.

En raison de la grande portée de ce projet de recherche, les travaux qui ont été complétés sont regroupés à l'intérieur de quatre principaux volets soit :

Volet 1 : Bilan de performance des stratégies d'adaptation mises en place pour les infrastructures aéroportuaires et routières du MTQ en zone de pergélisol.

Volet 2 : Établir des critères de conception pour les infrastructures de transport en zone de pergélisol.

Volet 3 : Développement d'une méthode quantitative d'évaluation du risque pour les infrastructures de transport en zone de pergélisol.

Volet 4 : Développement d'outils de gestion intégrés pour soutenir la conception, l'entretien, le suivi et la gestion des infrastructures de transport du MTQ en zone de pergélisol dans un contexte de changements climatiques.

Le volet 1 dresse un bilan exhaustif de la performance à moyen et à long terme des mesures/techniques d'adaptation mises en place par le Ministère, en collaboration avec l'Université Laval, sur son réseau d'infrastructures aéroportuaires au Nunavik dans un contexte de changements climatiques (CC). La performance des mesures/techniques d'adaptation (techniques convectives, modifications de la géométrie de remblai, gestion du drainage) a été évaluée en considérant les caractéristiques spécifiques de chaque infrastructure (largeur, hauteur, géométrie, type de revêtement), de l'ensemble des caractéristiques du géosystème dans lequel elles s'inscrivent (propriétés géotechniques et géothermiques du pergélisol) ainsi que des conditions environnementales et climatiques locales existantes (variations climatiques récentes, drainage et enneigement). Les analyses réalisées ont permis de définir les contextes d'application appropriés pour chacune des techniques/mesures d'adaptation étudiées et de recommander des critères de conception adaptés aux CC. Ce volet comporte également une analyse coûts-bénéfices-efficacité des mesures/techniques d'adaptation produite sur la base du comportement observé des infrastructures (stabilité de l'ouvrage et nombre d'interventions en entretien) et les données disponibles quant aux coûts de construction et d'entretien disponibles. C'est également à l'intérieur de ce volet qu'un bilan de l'efficacité de l'instrumentation de suivi en place ainsi que l'évaluation de nouvelles technologies potentielles pour améliorer le suivi du géosystème, la gestion de risques des infrastructures et l'évaluation de la performance des stratégies d'adaptation mise en place a été réalisé.

Le volet 2 présente les critères de conception adaptés et les bonnes pratiques quant à la planification, la conception, la construction, l'exploitation et la gestion des infrastructures et de leur accès en zone de pergélisol. Ces critères de conception et bonnes pratiques ont été élaborés à partir de l'ensemble des données, analyses et conclusions issues des rapports de recherche antérieurs du MTQ en adaptation aux changements climatiques (CC) au Nunavik et de celles réalisées dans le cadre du volet 1. Ce volet de l'étude inclut également une analyse globale de la faisabilité, des coûts et des bénéfices relatifs pour différents concepts proposant des solutions d'adaptation telles que les techniques d'extraction de chaleur par convection d'air, les traitements de surface à albédo élevé, l'adoucissement des pentes de remblai avec ou sans système de drainage amélioré, etc.

Le volet 3 porte sur le développement d'une méthode quantitative d'évaluation du risque pour les infrastructures de transport en zone de pergélisol qui est adaptée spécifiquement au contexte du Nunavik. Cette méthode a été développée à partir des concepts et procédures proposés dans la littérature et utilise une approche d'évaluation quantitative du risque. La méthode proposée permet d'estimer un niveau de risque attribuable à l'occurrence d'un aléa et les conséquences potentielles de ce dernier sur l'infrastructure.

Le volet 4 fait un survol de différents outils d'aide à la décision et de transfert de connaissances qui ont été développés dans le cadre du projet afin de soutenir la planification et la réalisation des interventions (conception, adaptation, entretien, suivi, etc.). Les outils développés se résument à : une base de données géospatiales avec plate-forme de visualisation, un protocole pour le suivi et l'entretien des infrastructures et des équipements mis en place pour adapter les ouvrages aux changements climatiques, un rapport synthèse sur le suivi et analyse des infrastructures de transport du MTQ sensibles au dégel du pergélisol et un outil numérique et guide d'utilisation pour le processus de gestion quantitative des risques pour les infrastructures de transport en région de pergélisol. Ces outils visent spécifiquement à : consolider, archiver et améliorer l'accès aux données et aux connaissances développées sur les risques naturels (actuels et futurs) et leurs impacts sur les infrastructures; à améliorer le suivi et la démarche de gestion de risques pour les infrastructures vulnérables au dégel du pergélisol; à renforcer le développement de l'expertise en adaptation aux changements climatiques et la capacité d'intervention du Ministère; et à définir les bonnes pratiques en matière de suivi et d'entretien pour assurer la fonctionnalité des mesures d'adaptation des infrastructures linéaires de transport.

Malgré les grands volets de recherche distincts qui divisent le projet, une intégration systématique des connaissances développées dans chacun a été effectuée tout au long de sa réalisation. Cette intégration s'est avérée essentielle pour mener à bien les travaux d'analyses, car les résultats et conclusions issus d'un volet ont permis d'orienter et d'alimenter certaines réflexions abordées dans d'autres volets. À titre d'exemple, c'est à partir des bilans de performance des stratégies d'adaptation mises en place pour les infrastructures aéroportuaires et routières en région de pergélisol (volet 1) que les critères de conception pour les différentes techniques de mitigation ont été précisés (volet 2). C'est également à partir des résultats du volet 1 que la performance des stratégies d'adaptation mises en place a été intégrée dans l'analyse quantitative du risque à titre de facteur de résilience permettant de diminuer la vulnérabilité des infrastructures (volet 3).

1



VOLET 1 : BILAN DE PERFORMANCE DES STRATÉGIES D'ADAPTATION MISES EN PLACE POUR LES INFRASTRUCTURES AÉROPORTUAIRES ET ROUTIÈRES DU MTQ EN ZONE DE PERGÉLISOL

1.1 MISE EN CONTEXTE DES TRAVAUX DE RECHERCHE EN ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES COMPLÉTÉS SUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ EN RÉGION DE PERGÉLISOL AU NUNAVIK

Depuis le début des années 2000, dans le cadre de projets de recherche principalement initiés par le ministère des Transports du Québec (MTQ), des chercheurs de l'Université Laval ont réalisé une série d'importants travaux visant à caractériser les conditions de pergélisol, à documenter les impacts du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport du MTQ au Nunavik et à développer des stratégies d'adaptation pour contrer l'effet du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport en contexte de changements climatiques (Doré et Beaulac, 2007, Allard et al., 2007, L'Hérault et al., 2012, 2014 et 2015). Les connaissances développées ont grandement contribué à adapter la conception, l'entretien et la gestion des infrastructures routières et aéroportuaires en région de pergélisol selon les caractéristiques de chaque site et des plus récentes projections de changements climatiques.

Le projet de recherche intitulé « *Impact du dégel du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptations* » (Beaulac et Doré, 2005), consistait à faire l'état de la situation en identifiant les infrastructures de transport instables au Nunavik; ainsi qu'à identifier dans la littérature les techniques de protection ayant un potentiel d'application pour l'adaptation de ces infrastructures. Le remblai à convection d'air, le drain thermique et les surfaces réfléchissantes faisaient partie des techniques alors identifiées. De plus, ce projet a permis d'ébaucher un modèle numérique permettant de prévoir l'évolution du comportement d'un remblai selon divers scénarios climatiques après la mise en place d'une technique de mitigation du pergélisol.

Un second projet de recherche intitulé « *L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik: caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes* » (Allard et al., 2007), consistait à produire une description technique détaillée sur la façon dont les processus liés au réchauffement climatique et à la déstabilisation du régime thermique du pergélisol affectent les pistes d'atterrissage et les routes d'accès au Nunavik. Dans le cadre de ce projet, une caractérisation de la nature du terrain, de la stratigraphie et des propriétés du pergélisol ainsi que des conditions d'enneigement et de drainage a été produite pour chaque aéroport afin de poser un diagnostic sur les causes probables de la dégradation du pergélisol et orienter les stratégies d'adaptation et les travaux de réfection requis.

Suite au développement du concept des méthodes de protection par simulations numériques et par essais sur modèles de laboratoire (Beaulac, 2006), deux projets de recherche expérimentaux réalisés par l'Université Laval ont été mis de l'avant au Nunavik afin de tester des techniques de protection du pergélisol sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit et sur la piste d'atterrissage de l'aéroport de Tasiujaq. Le premier projet de recherche expérimental intitulé « *Expérimentation de méthodes de mitigation et des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport au Nunavik* », a été effectués sur des remblais en conditions réelles d'exploitation. Ce projet, réalisé sur la route d'accès à Salluit en 2006 (Voyer et Doré, 2010), a permis de documenter la mise en place et la performance de différentes techniques de protection du pergélisol à savoir : le remblai à convection avec drain thermique, le remblai à convection et les surfaces réfléchissantes. Dû à d'importants problèmes d'instrumentation et d'acquisition de données, et au fait que les systèmes de protection n'ont pas eu d'effet significatif sur les régimes thermiques des planches expérimentales, le suivi a été arrêté avant la fin du projet. À partir des données recueillies, il a été toutefois possible de tirer des leçons de cette expérience et suggérer deux principales hypothèses qui pourraient expliquer la faible performance des systèmes de protection testés. Ces hypothèses se résume à : 1) une hauteur insuffisante des systèmes en remblai ne permettant pas d'initier le mouvement convectif et 2) un possible écoulement d'eau sous la section avec drain thermique qui aurait neutralisé l'effet de refroidissement anticipé. Le deuxième projet de recherche expérimental aussi confié à l'Université Laval a permis de documenter la performance de trois techniques de mitigation pour freiner la dégradation du pergélisol sous la piste d'atterrissage de Tasiujaq (Ficheur, 2011), soit le remblai à convection d'air,

le remblai avec drain thermique et le remblai à pente adoucie. Les deux premières techniques favorisent l'extraction en hiver de la chaleur accumulée dans le remblai et dans le sol tout au long de l'été, afin de minimiser l'impact thermique de l'infrastructure. Malgré un problème d'accumulation d'eau au pied de la section de référence qui a considérablement réchauffé le profil thermique du sol et rendu le site inadéquat à des fins de comparaison, la performance des techniques a tout de même pu être démontrée. Parmi les différentes techniques testées, l'utilisation du remblai à pente adoucie s'est avérée particulièrement efficace à Tasiujaq où l'orientation de la piste, en conjonction avec celle des vents dominants hivernaux, favorise les accumulations de neige en pied de talus.

Dans le cadre d'un autre projet de recherche intitulé « *Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour les aéroports ainsi que quelques chemins d'accès d'Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituaq, Akulivik, Salluit, Quaqtuaq, Kangirsuk et Tasiujaq, Nunavik* » (L'Hérault *et al.*, 2012), chacun des sites instables a fait l'objet d'une analyse approfondie des conditions du pergélisol par une cartographie détaillée des dépôts de surface couplée avec une auscultation géotechnique par forages et des levés géophysiques (stratigraphie, types et épaisseur des dépôts et profondeur du roc). Les suivis thermiques aux sites aéroportuaires ont permis, combinés aux relevés annuels des défauts, de l'enneigement et du drainage réalisés par le personnel du MTQ, d'identifier les causes probables de la dégradation thermique du pergélisol. 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. Appuyés sur des données thermiques mesurées, sur des conditions de surface observées et des stratigraphies confirmées par forages, les travaux de modélisation numérique ont permis d'évaluer, selon les scénarios de changements climatiques, les changements à venir dans le pergélisol (augmentation des températures dans le sol, épaissement de la couche active, formation de taliks, etc.) et les tassements à anticiper suite au dégel du pergélisol. Une des conclusions de ce projet est que la situation thermique précaire des pieds de remblai, engendrée par la modification des facteurs environnementaux locaux tels que l'enneigement et le mauvais drainage, modifie le milieu et favorise ainsi une rétroaction positive à l'origine même de la majorité des signes de dégradation recensés le long des pistes et des chemins d'accès, tels que le basculement des épaulements et l'apparition de dépressions et de fissures longitudinales dans les accotements. Pour contrer ces dégradations attribuables aux accumulations de neige en marge des remblais, l'utilisation de remblais à pente adoucie (1V : 6H) ou remblais convectifs avec drains thermiques (Ficheur et Doré, 2011) s'est avérée très efficace. Pour cette raison, les stratégies d'adaptation qui ont été développées en concertation avec le personnel du MTQ dans le cadre de ce projet proposaient l'une ou l'autre de ces techniques d'atténuation couplées avec une optimisation des fossés de drainage afin de drainer plus efficacement l'eau en marge de l'infrastructure.

En 2010, la piste de Puvirnituaq fut la première à faire l'objet de la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation afin de stabiliser thermiquement et mécaniquement une section de la piste d'atterrissage. Cette mise en œuvre fut accompagnée d'un projet de suivi intitulé : « *Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituaq* » (G-Gaumont et Doré, 2013). Le mandat de recherche, confié par le MTQ à l'Université Laval, consistait à documenter et effectuer le suivi de performance d'un épais remblai et d'une berme à convection ainsi que d'un système de drainage mis en place lors des travaux d'adaptation pour régler les problèmes de tassements et d'instabilité d'une section de la piste construite sur un sol argileux riche en glace.

Un deuxième projet à échelle réelle visant la stabilisation de la route d'accès à Salluit a été réalisée en 2012. Un drain thermique, des pentes douces ainsi qu'un système de drainage adapté ont été installés dans les secteurs jugés critiques. Le projet de suivi intitulé : « *Suivi du comportement thermique et mécanique de la route d'accès de Salluit et expérimentation d'une méthode de détection de la dégradation du pergélisol le long des structures linéaires* » (Périer *et al.*, 2016), terminé en mars 2016, portait sur le suivi thermique et mécanique de la route

d'accès à l'aéroport suite aux travaux d'adaptation. Cette étude évalue également le potentiel d'une nouvelle méthode de suivi thermique utilisant un câble à fibre optique donnant les températures en tous points le long d'infrastructures linéaires.

Récemment, d'autres infrastructures de transport du MTQ au Nunavik qui présentaient des signes de dégradations liées au dégel du pergélisol ont fait l'objet d'implémentation de stratégies d'adaptation aux changements climatiques, notamment pour corriger le drainage. Par exemple, ce fut le cas pour les pistes d'atterrissage de Salluit (2012), de Quaqtac (2013) et de Kangirsuk (2016); ainsi que pour les routes d'accès aux aéroports de Salluit (2016) et de Kangiqsualujjuaq (2016). Suite au projet d'étude « *Route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq : Développement des connaissances sur les propriétés du pergélisol et identification de solutions d'adaptation dans un contexte de changements climatiques* » (L'Hérault et al., 2015), des adaptations de la route et de la piste d'atterrissage de Tasiujaq ont été effectuées à l'été 2018 afin d'améliorer le drainage et réduire l'accumulation de neige en pied de remblai (pente douce). Il est de même pour la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq qui a été remise à neuf en 2016 en tenant compte des recommandations du rapport « *Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour la route d'accès et l'aéroport de Kangiqsualujjuaq, Nunavik* ». (L'Hérault et al., 2014).

Afin d'évaluer la performance des méthodes d'adaptation mise en place en plusieurs endroits et aussi celles qui sont à venir, un suivi thermique, mécanique et environnemental (enneigement et drainage) est essentiel. Ce suivi en continu et sur le long terme permettra d'évaluer la performance des stratégies mises en place en considérant d'une part la performance technique des concepts d'adaptation installés et, d'autre part, les fluctuations climatiques saisonnières et interannuelles récentes. Le suivi thermique annuel effectué par le CEN depuis 2002, qui se trouve désormais au cœur d'un projet de recherche intitulé : « *Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik dans le contexte des changements climatiques* », fournira une base de données essentielle à la réalisation du présent projet de recherche. Il importe de valider les tendances observées durant les premières années de suivi en éliminant les perturbations créées par la construction et l'effet d'inertie des systèmes à réagir aux améliorations effectuées. De plus, il est nécessaire d'évaluer comment les conditions climatiques plus ou moins favorables et la modification des propriétés thermiques du pergélisol ont pu influencer la performance des mesures adoptées (par exemple, le regel du pergélisol augmente graduellement sa teneur en glace et modifie sa conductivité thermique, ce qui aura un effet dans le futur).

1.2 OBJECTIFS

L'objectif général de ce volet du projet de recherche portant sur le bilan de performance des stratégies d'adaptation mises en place pour les infrastructures aéroportuaires et routières du MTQ en région de pergélisol consiste à réaliser un bilan de performance des stratégies et mesures spécifiques d'adaptation à grande échelle (non expérimentales) mises en place pour les infrastructures aéroportuaires et routières du Ministère au Nunavik qui sont construites sur pergélisol sensible au dégel.

Plus précisément, les objectifs spécifiques suivants seront réalisés :

- Documenter l'efficacité des mesures/techniques d'adaptation mises en place ;
- Documenter les facteurs (environnementaux, climatiques, anthropiques, etc.) limitant et favorisant la performance des mesures/techniques d'adaptation mises en place et les améliorations technologiques ou autres à apporter pour maximiser leur efficacité ;
- Documenter les impacts thermiques et mécaniques des mesures/techniques d'adaptation (système convectif, géométrie, drainage, etc.) sur le géosystème et l'infrastructure en fonction de la performance attendue, du climat et des activités de nature anthropique observées ;
- Documenter l'efficacité de l'instrumentation (thermistances, inclinomètres horizontaux et verticaux, DTS, etc.) installée pour effectuer le suivi de la performance des mesures/techniques d'adaptation mises en place et pour optimiser la gestion de risques.

1.3 SITES D'INFRASTRUCTURES AÉROPORTUAIRES À L'ÉTUDE AU NUNAVIK

Les sites sélectionnés pour la présente étude sont ceux ayant fait l'objet de travaux d'adaptation aux changements climatiques réalisés à grande échelle entre 2010 et 2018. La figure 1 présente la localisation des sites d'infrastructures à l'étude pour lesquels de l'information sur la nature et la date des travaux d'adaptation réalisés est présentée au tableau 1.

Dans le cadre du projet, le niveau d'analyse des sites d'infrastructures à l'étude se divise en deux catégories, soit les sites principaux et les sites secondaires. Ces deux catégories ont été établies selon : l'envergure et la nature des travaux d'adaptation réalisés, les spécificités du contexte d'application (conditions de pergélisol, caractéristiques de l'infrastructure, etc.), les vulnérabilités évaluées (instabilités du pergélisol, type et secteur d'infrastructure à risque, etc.) et la présence ou l'absence d'instrumentation de suivi.

Les sites principaux feront l'objet d'investigations sur le terrain plus exhaustives au cours desquelles des mesures in situ (épaisseurs de neige, niveau d'eau, écoulement, déformation, etc.) seront réalisés et de l'instrumentation supplémentaire installée afin d'approfondir les connaissances et renforcer le suivi de la performance des stratégies d'adaptation. Pour ce qui est des sites secondaires, les bilans de performance des stratégies d'adaptation seront appuyés par des données essentiellement qualitatives (surtout des observations visuelles sur le terrain) et quelques données quantitatives lorsque disponibles (ex. : données de tassements des plaques de tassements, mesures d'épaisseurs de neige et d'accumulations d'eau).

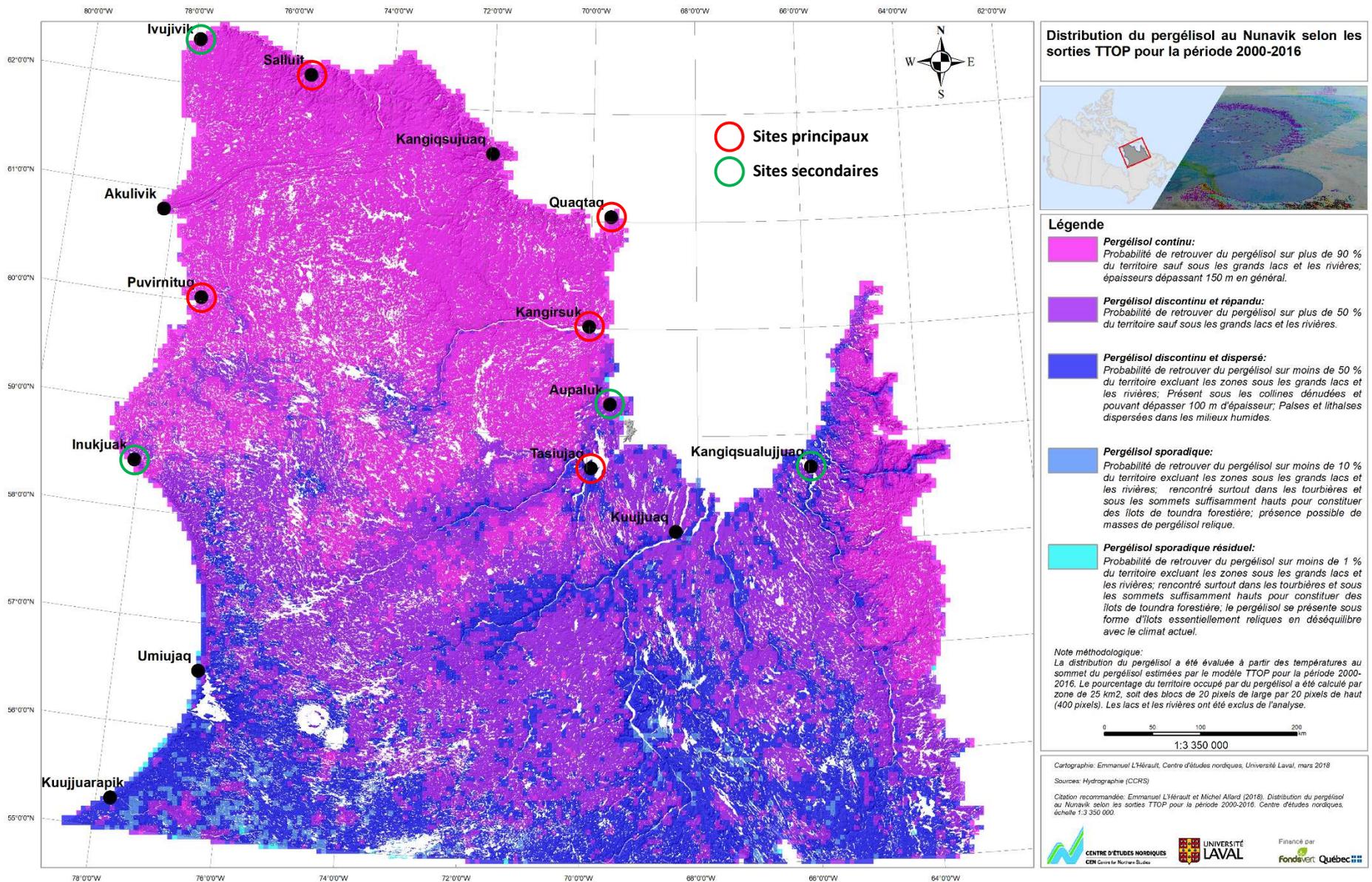
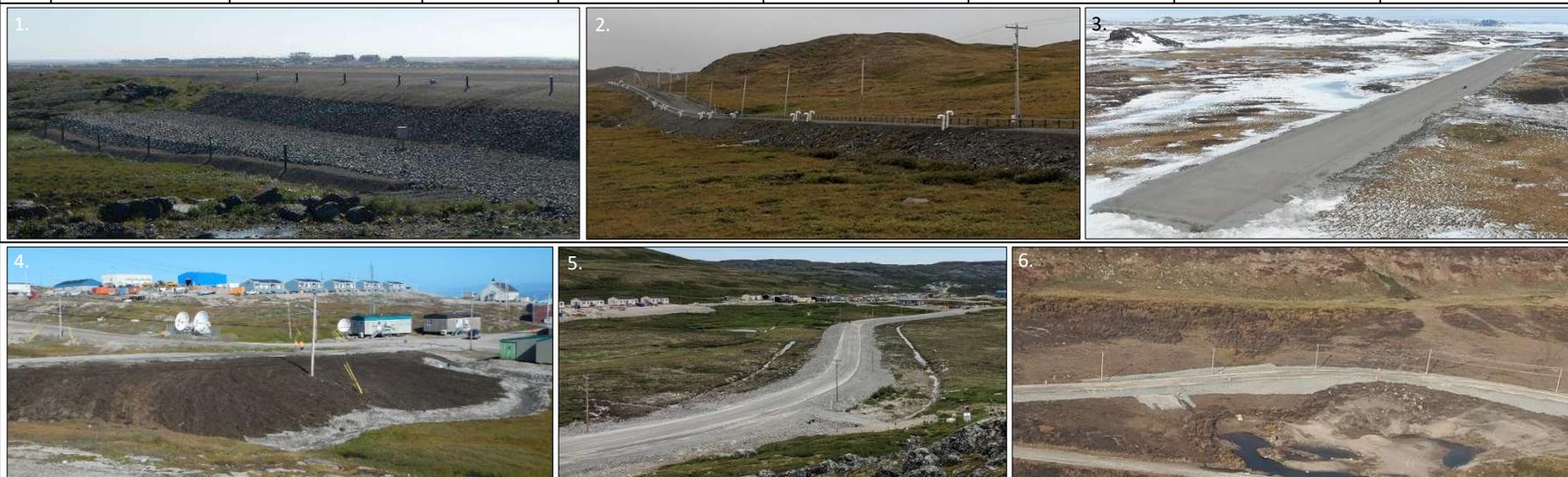


Figure 1: Localisation des sites principaux et secondaires d'infrastructures de transport du MTQ adaptées aux CC qui sont à l'étude.
(Carte de distribution du pergélisol au Nunavik tirée de L'Hérault et Allard, 2018).

Tableau 1 : Infrastructures de transport du MTQ à l'étude qui ont fait l'objet de travaux d'adaptation aux changements climatiques entre 2010 et 2018.

	Communautés	Type d'infrastructure	Date d'intervention	Types d'intervention				
				Modification du réseau de drainage	Stabilisation mécanique du remblai	Aménagement d'un remblai à pente adoucie	Aménagement d'un remblai convectif	Clôtures adaptées
sites principaux	Puvirnituq ⁽¹⁾	Piste d'atterrissage	2009 et 2010	x	Berne		X	
	Salluit ⁽²⁾	Route d'accès	2012 et 2016	X		X	X	
	Salluit	Piste d'atterrissage	2012 et 2016	X		X		X
	Quaqtaq	Piste d'atterrissage	2012	X		X		
	Kangirsuk	Piste d'atterrissage	2016 et 2017	X		X		X
	Tasiujaq ⁽³⁾	Piste d'atterrissage	2018	X		X		
sites secondaires	Ivujivik ⁽⁴⁾	Route d'accès	2013	X		X		
	Aupaluk	Piste d'atterrissage	2013					X
	Inukjuak	Piste d'atterrissage	2013					X
	Kangiqualujjuaq ⁽⁵⁾	Route d'accès	2016	X		X		
	Tasiujaq ⁽⁶⁾	Route d'accès	2018	X		X		



1.4 SURVOL DES TECHNIQUES DE MITIGATION CONTRE LE DÉGEL DU PERGÉLISOL

Développées essentiellement en Alaska et au Yukon dès le début des années 40, on dénombre actuellement plusieurs techniques de mitigation visant à limiter les problèmes causés par la dégradation thermique du pergélisol aux sites d'infrastructures linéaires de transport. Dans leurs travaux, Beaulac (2005) et Malenfant-Lepage (2016) font un survol assez complet des différentes techniques disponibles et de leurs principes de fonctionnement. Plus récemment, de nouvelles techniques ont été développées (ex. : drain thermique) et d'autres ont été améliorées par l'arrivée de nouveaux procédés (ex. : enrobé bitumineux clair). Quelques études ont été réalisées afin d'évaluer l'applicabilité de ces techniques à grande échelle et dans le contexte du Nunavik (Beaulac, 2005; Ficheur, 2011). C'est à partir des techniques les plus prometteuses identifiées (figure 2), que les stratégies d'adaptation pour les infrastructures de transports du Ministère en zone de pergélisol ont été élaborées (L'Hérault *et al.* 2012; 2013; 2015). Outre que pour le cas précis de Puvirnituk, les techniques de mitigation qui composent ces stratégies d'adaptation sont dites thermiques, c'est à-dire qu'elles agissent sur le régime thermique du pergélisol. Ces techniques reposent essentiellement sur deux principes fondamentaux soit : l'augmentation de l'extraction de chaleur et la réduction de l'induction de chaleur en surface ou sous l'infrastructure.

Le choix de la technique de mitigation à appliquer dépend d'une multitude de facteurs tels que : la température du pergélisol, les causes de dégradation, les caractéristiques de l'infrastructure, la disponibilité des matériaux et de la machinerie au site et du budget disponible. Les techniques de mitigation peuvent être combinées pour assurer une meilleure protection du pergélisol et constituer ainsi une stratégie d'adaptation adaptée et propre à l'infrastructure (L'Hérault *et al.*, 2012). Par exemple, le cas de la route d'accès à l'aéroport de Salluit est un bel exemple d'intégration de plusieurs techniques de mitigation contre le dégel du pergélisol pour former une stratégie d'adaptation (Figure 3). Pour ce cas spécifique, la stratégie d'adaptation fait appel : à l'utilisation d'un remblai à pente adoucie (1) et d'un drain thermique (2-B) pour stabiliser les accotements ; au retrait du pavage (3) et au rehaussement du remblai (4-A) pour stabiliser le centre-ligne ; et à l'éloignement des fossés (5-A) et à l'imperméabilisation des ponceaux (5-B) pour limiter les risques de thermo-érosion.

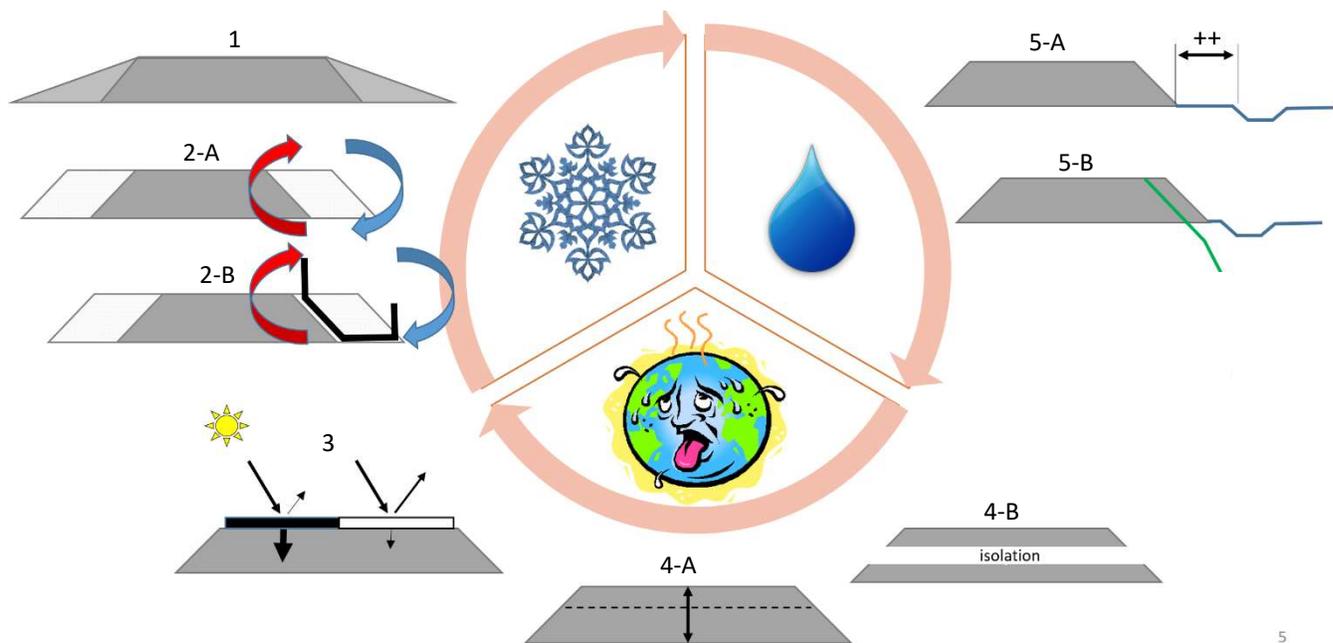


Figure 2 : Différentes techniques de mitigation contre la dégradation du pergélisol et qui composent les différentes stratégies d'adaptations mises en place aux infrastructures linéaires de transport du Ministère au Nunavik. 1) remblai à pente adoucie, 2-A) remblai à convection, 2-B) drain thermique, 3) surface à albédo élevé, 4-A) rehaussement du remblai, 4-B) isolation, 5-A) éloignement des fossés de drainage et 5-B) imperméabilisation des ponceaux ou de certaines composantes du réseau de drainage (fossés, ponceaux, etc.).



Figure 3 : Exemple d'intégration de plusieurs techniques de mitigation contre le dégel du pergélisol le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit et qui forment une stratégie d'adaptation.

1.4.1 MÉTHODES VISANT L'AUGMENTATION DE L'EXTRACTION DE CHALEUR

1.4.1.1 LE REMBLAI À PENTE ADOUCIE

En faisant obstacle au vent, les infrastructures linéaires de transport, telles que les routes et les pistes d'atterrissages, favorisent l'accumulation de neige le long des talus et des pieds de remblais. Par l'effet isolant en hiver de ces épaisses couches de neige, le pergélisol sous les accotements et au pied des remblais se réchauffe, voire dégel. Cette dégradation thermique du pergélisol entraîne fréquemment des problèmes de capacité portante du sol d'infrastructure sous les accotements qui se traduit par du fluage et des tassements.

L'utilisation des pentes adoucies a pour effet de minimiser les accumulations de neige en hiver qui se trouvent naturellement le long des talus en réduisant turbulence du côté « sous le vent » du remblai et en favorisant la mobilisation de la neige du côté « au vent » du remblai. En diminuant ces accumulations de neige, il est donc possible de maintenir une bonne extraction de la chaleur tout au long de l'hiver. L'utilisation de cette technique de mitigation permet de refroidir considérablement le bilan thermique du pergélisol sous les accotements et en pied de remblai. Des pentes de talus allant de 1V:4H à 1V:7H permettent d'avoir un effet significatif sur l'accumulation de neige et sur le bilan thermique des épaulements de remblais. Au Nunavik, cette technique de mitigation a été utilisée à plusieurs reprises autant pour adapter des sections problématiques de routes d'accès que de pistes d'atterrissages (Figure 4). Elle offre l'avantage d'être relativement simple à mettre en place, peu coûteuse et sans entretien.

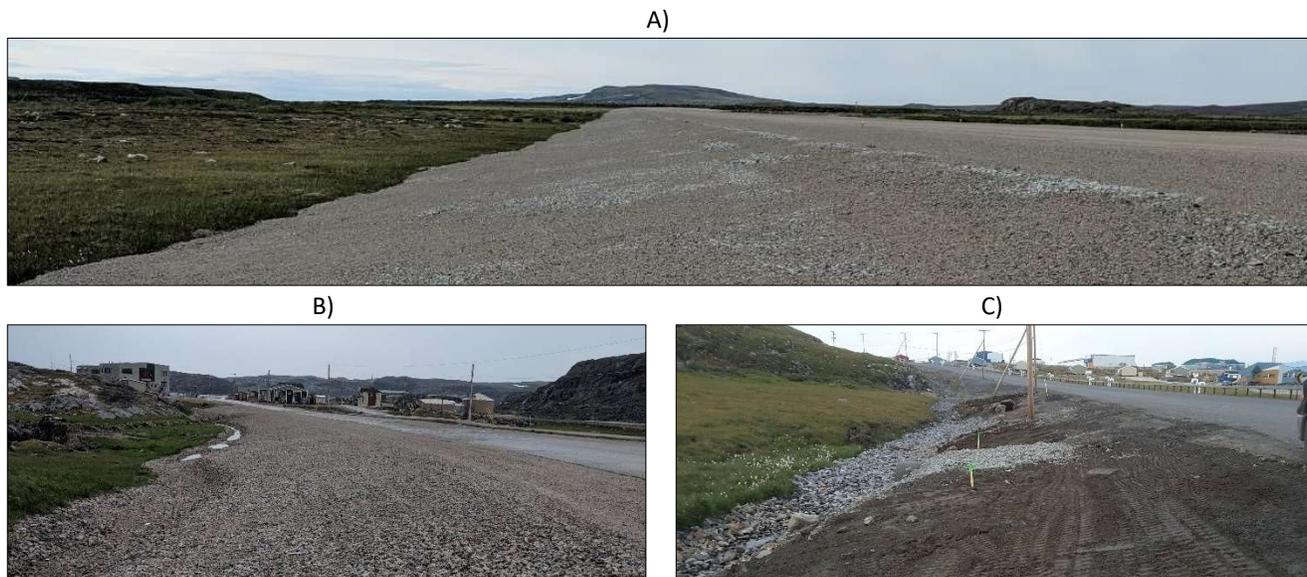


Figure 4 : Adoucissement des pentes de talus le long A) de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, B) de la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik et C) de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, Nunavik.

1.4.1.2 LE REMBLAI À CONVECTION D'AIR

La technique du remblai à convection d'air vise à extraire la chaleur des remblais par l'utilisation de la convection naturelle, un mécanisme de transfert de chaleur beaucoup plus efficace que la conduction. Cette convection naturelle peut se produire lors de l'utilisation d'un matériau à haute porosité avec une très grande perméabilité intrinsèque. Selon les distributions de température, différents mécanismes de transferts de chaleur par convection peuvent alors prendre place au sein d'un remblai. Par exemple, au cours de l'hiver, la température au sommet du remblai devient plus froide qu'à sa base ce qui favorise une stratification de densité instable de l'air dans les pores du remblai. L'air froid, ayant une masse volumique supérieure à l'air chaud, percole ainsi à la base du remblai tandis que l'air plus chaud migre vers la partie supérieure. Ces mouvements d'air forment ainsi des cellules de convection qui augmentent considérablement l'efficacité du transfert de chaleur entre la partie inférieure et la partie supérieure du remblai. En été, la présence d'une stratification de densité stable de l'air dans le remblai (air froid à la base et air chaud au sommet du remblai) inhibe la convection naturelle. Le système tombe alors en dormance, période au cours de laquelle les transferts de chaleur au sein du remblai se font essentiellement par conduction.

Le remblai à convection d'air requiert l'utilisation d'un matériau grossier dont le diamètre doit être uniforme et dont la teneur en fine doit être faible. La dimension des pierres et l'étalement granulométrique peuvent varier selon la conception du remblai, mais se situent généralement entre 7 et 300 mm pour assurer une porosité entre 35 % à 50 %. Cette porosité procure au remblai une importante perméabilité à l'air tout en réduisant la contrainte appliquée sur le sol d'infrastructure en raison de sa plus faible densité (généralement 30 % moins dense). Le remblai à convection peut être installé sur les talus (Figure 5A et B) ou en couche horizontale sur la pleine largeur des remblais (Figure 5C). L'efficacité de l'effet convectif est liée à l'épaisseur de la couche convective (Kong *et al.*, 2019). Plus l'épaisseur est grande, plus l'effet sera important. Un système à convection ouvert permet l'entrée de l'air froid à la base du système et l'évacuation de l'air chaud à son sommet. Un remblai à convection ouvert sera donc généralement muni de cheminées de ventilation à la base et au sommet, ce qui augmente significativement l'efficacité du système par rapport au remblai à convection fermé. Cette méthode s'avère intéressante puisqu'elle est simple et requiert peu d'entretien après sa construction.

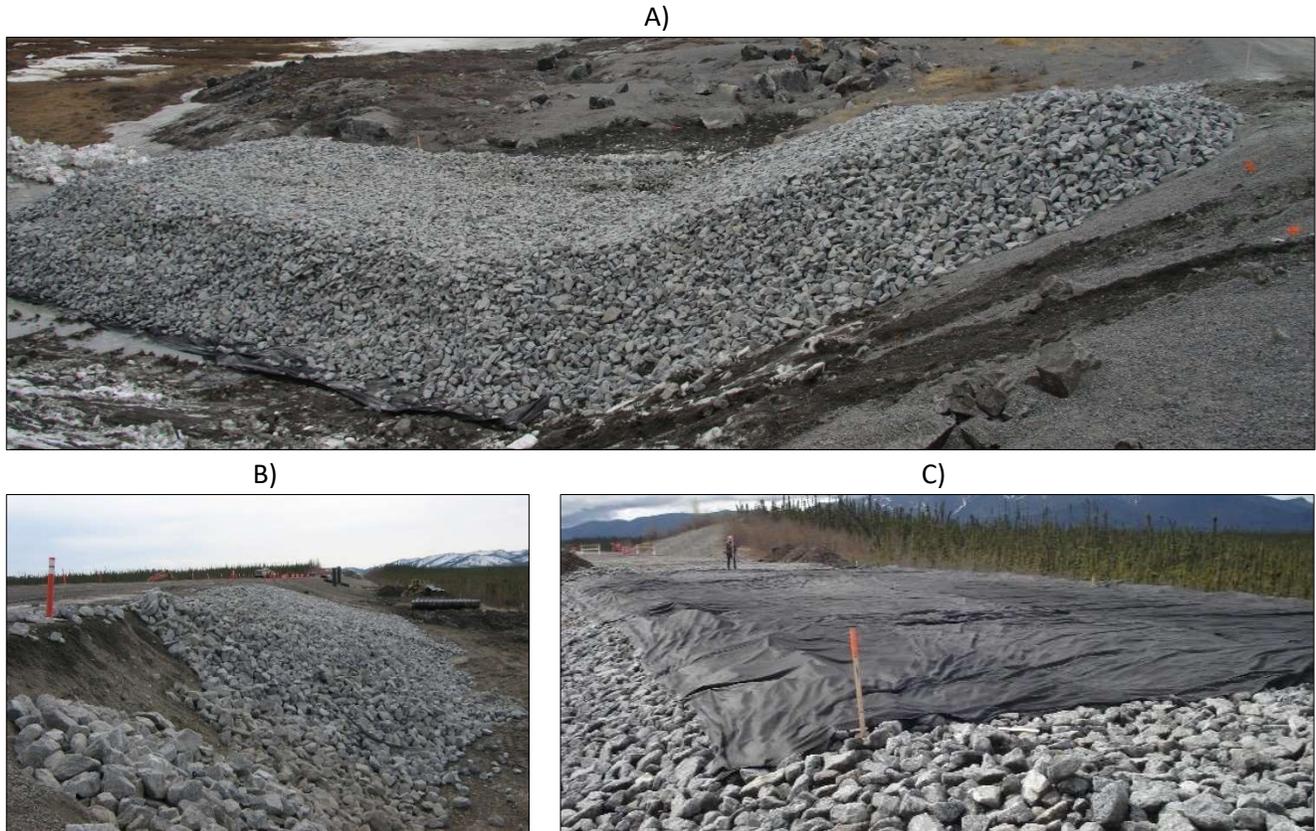


Figure 5 : Remblais à convection d'air installés A) dans l'épaulement de la piste d'atterrissage de Puvirnituk, B) dans un épaulement et C) en couche pleine largeur dans un remblai routier au site expérimental de Beaver Creek au Yukon.

1.4.1.3 LE DRAIN THERMIQUE (DRAIN DE CHALEUR)

Le drain de chaleur est une technique innovatrice développée par le *Groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval*. Il s'agit d'une méthode permettant l'extraction de chaleur dans les remblais pendant l'hiver en utilisant un principe de convection ouverte. Le drain de chaleur consiste en un géocomposite drainant à forte perméabilité d'une épaisseur d'environ 25 mm qui est placé dans l'épaulement du remblai. Le drain comporte une partie à faible pente (2 à 4%) placée au-dessus du contact avec le sol naturel et une partie à forte pente (100%) située à la limite de la portion sollicitée du remblai. L'air froid entre par la base du géocomposite à l'aide d'une cheminée placée en bas de pente. Par la suite, par transfert de la chaleur conductif entre le sol près du drain et l'air dans le drain, l'air froid se réchauffe progressivement dans la section du drain thermique à faible pente. Ce réchauffement initie alors un mouvement ascensionnel de l'air (convection) vers le sommet du remblai qui est ensuite évacué par une cheminée installée au sommet du système (Figure 6A).

Cette technique a été expérimentée sur deux sections d'essai, une section le long de la piste d'atterrissage de Tasiujaq (Figure 6B) et une le long de la route de Beaver Creek au Yukon, avant d'être déployée à grande échelle en 2012 le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit (Figure 6C).

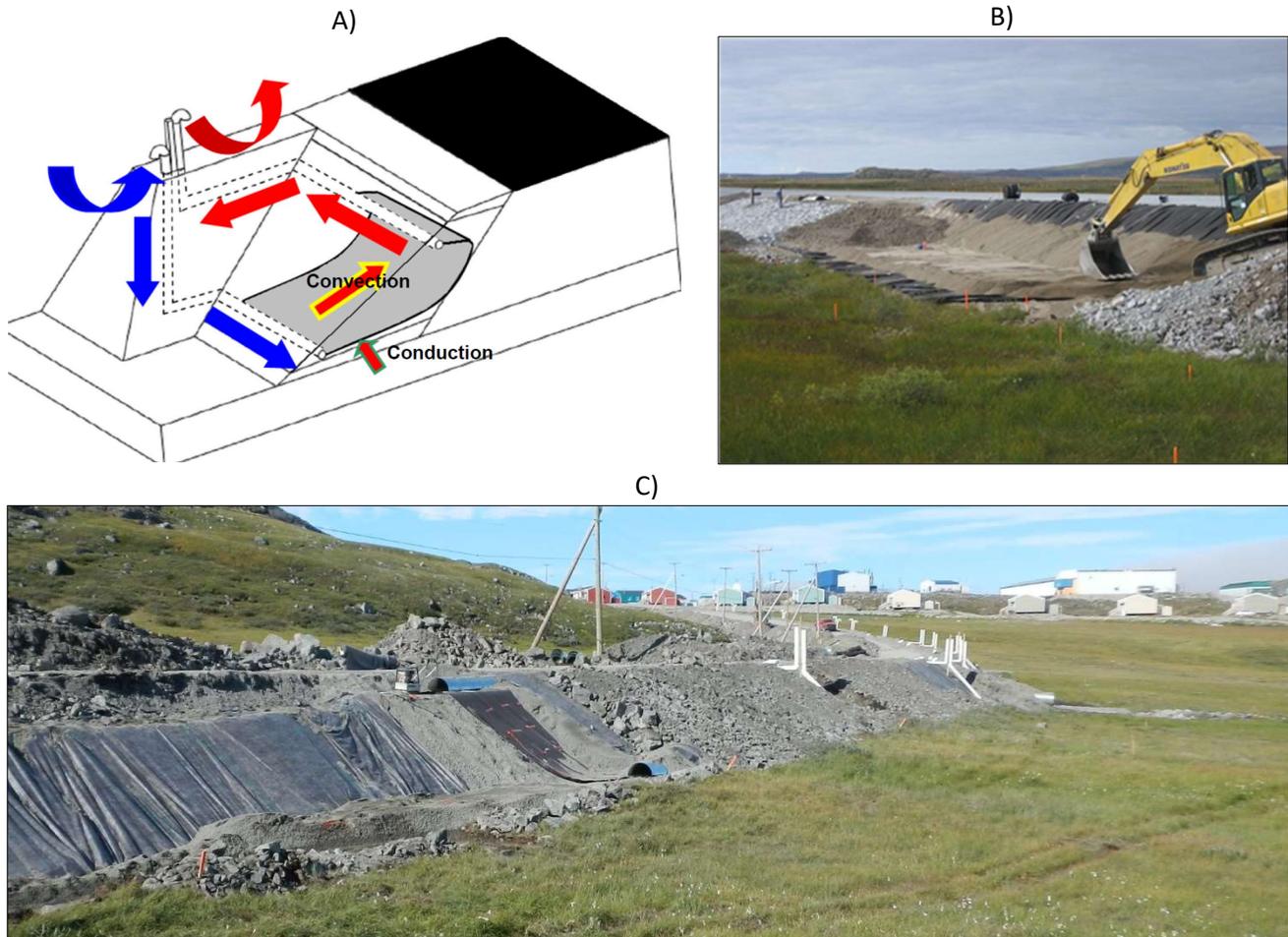


Figure 6 : A) Principe de fonctionnement du drain thermique (tirée de Gaumond, 2014). Installation d'un drain thermique dans les remblais B) de la piste d'atterrissage de Tasiujaq et C) de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.

1.4.2 MÉTHODE DE RÉDUCTION DE L'INDUCTION DE CHALEUR SOUS L'INFRASTRUCTURE

Les principales techniques visant à réduire l'induction de chaleur sous l'infrastructure sont : l'épaississement du remblai, l'utilisation d'isolation thermique et les revêtements à albédo élevé.

L'épaississement du remblai est la méthode la plus commune pour protéger le pergélisol contre un dégel éventuel. Il s'agit ici de la méthode qui a été préconisée dans la conception initiale des pistes d'atterrissage et des routes d'accès du Ministère au Nunavik. L'objectif de cette technique est d'ajouter suffisamment de matériau granulaire de telle sorte que la couche active demeure à l'intérieur du remblai. Le maintien de la couche active dans le remblai, qui possède alors des propriétés mécaniques stables, permet ainsi de limiter les mouvements de sols associés aux soulèvements gélivaux ou aux tassements au dégel. Similairement, l'utilisation de matière isolante permet également de limiter la pénétration de chaleur dans le sol durant l'été (Doré & Zubeck, 2009). Toutefois, contrairement à l'épaississement du remblai, l'utilisation d'isolant limite autant la pénétration de chaleur en été que son extraction en hiver. Par conséquent, son usage doit être soigneusement planifié afin de ne pas engendrer des problèmes supplémentaires.

Les revêtements à albédo élevé, quant à eux, visent à diminuer la quantité de chaleur absorbée par radiation solaire au cours de la saison estivale en augmentant la radiation réfléchie à la surface du remblai. Différentes techniques sont utilisées afin d'augmenter l'albédo des surfaces, notamment l'application de peinture blanche

(Esch, 1996), l'utilisation de granulats clairs (M-Lepage *et al.*, 2012) et l'utilisation d'un bitume clair (Doré, 2011). Au Nunavik, différents traitements de surface à albédo élevé ont été testés sur la route d'accès à l'aéroport de Salluit (Richard, 2018) (Figure 7A). Toutefois, malgré son potentiel élevé, aucune utilisation à grande échelle n'est en cours actuellement au Nunavik. Les solutions qui s'y rapprochent le plus et qui ont été utilisées dans l'adaptation récente des infrastructures du Ministère sont : la végétalisation des talus et le retrait du pavage. Pour ce qui est du retrait du pavage, il a été souvent combiné avec à un rehaussement du remblai, comme ce fut le cas lors des adaptations récentes des routes d'accès aux aéroports de Salluit, Kangiqsualujuaq et Tasiujaq (Figure 7B et C).

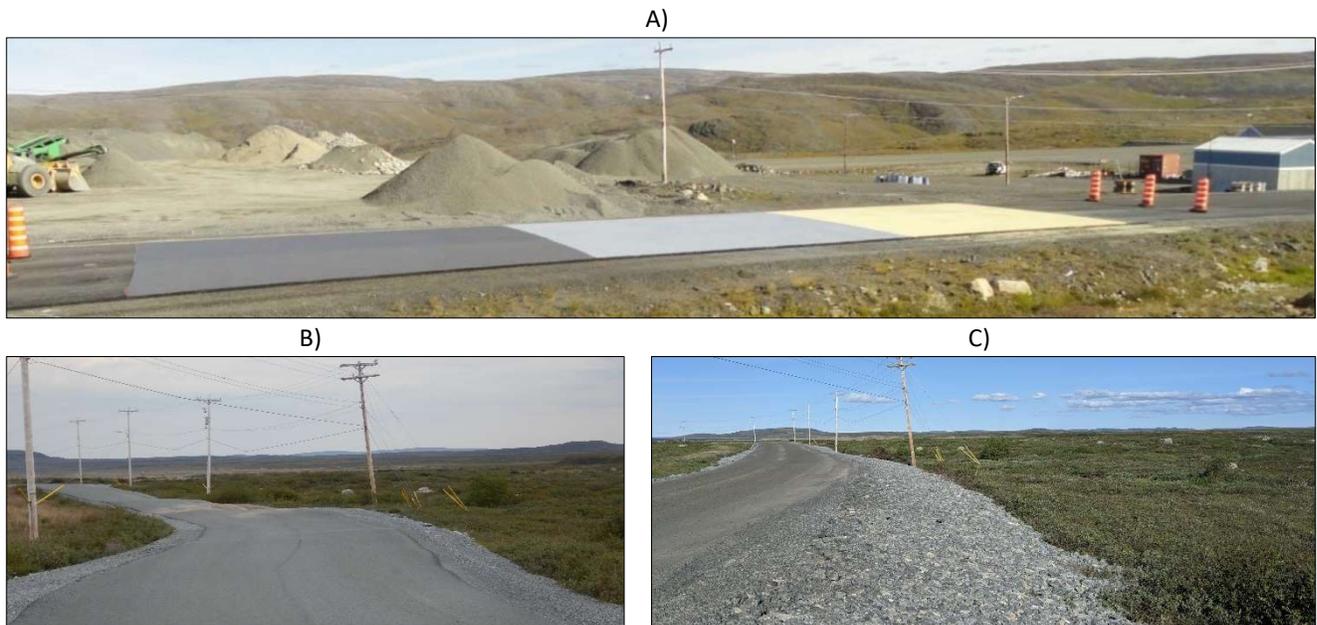


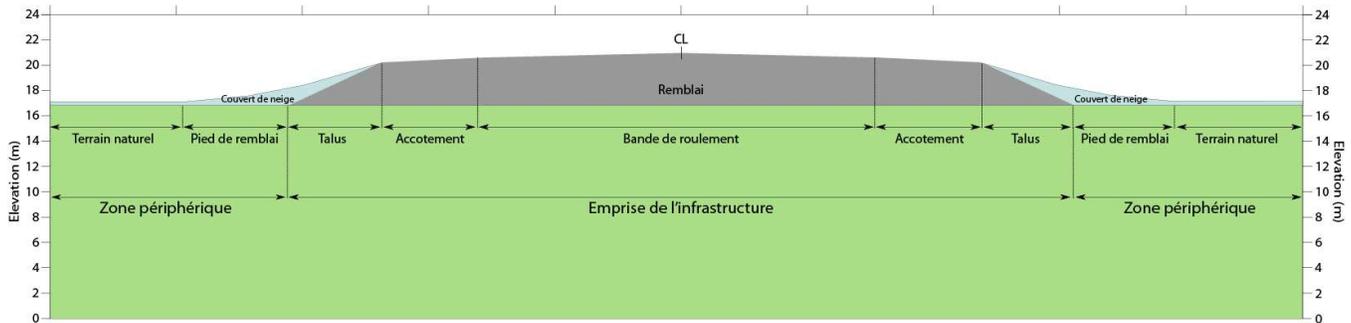
Figure 7 : A) Site expérimental pour l'essai de différentes surfaces à albédo élevé, route d'accès à l'aéroport de Salluit (tirée de Richard, 2018). Section de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq B) avant et C) après le retrait du pavage et le rehaussement du remblai.

1.5 MÉTHODOLOGIES

1.5.1 BILAN DE PERFORMANCE DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATION MISES EN PLACE AUX INFRASTRUCTURES AÉROPORTUAIRES DU MINISTÈRE EN RÉGION DE PERGÉLISOL

Dans le cadre du présent projet, le bilan de performance des mesures/techniques d'adaptation visant à prévenir la dégradation du pergélisol se basera sur les critères de performance suivants : 1) la capacité à atténuer ou arrêter la dégradation thermique du pergélisol, voire restaurer ses conditions thermiques initiales (performance thermique), 2) la capacité à stabiliser mécaniquement le pergélisol et l'infrastructure sus-jacente (performance mécanique) et 3) la capacité à limiter l'influence des facteurs contributifs à la dégradation thermique du pergélisol (enneigement et drainage).

L'évaluation de chacun de ces trois critères de performance sera réalisée de manière à couvrir le spectre d'une analyse spatio-temporelle, c'est-à-dire d'inclure la variation temporelle de la performance sur une base saisonnière et interannuelle ainsi que dans l'espace en considérant l'empreinte thermique élargie de l'infrastructure sur le système pergélisol en incluant la zone d'emprise de l'infrastructure (Bande de roulement, accotement et talus) et les zones périphériques (pied de remblai et terrain naturel) (Figure 8).



1.5.1.1 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE THERMIQUE

Le bilan de performance sera effectué à partir des données thermiques et mécaniques ainsi que des observations sur l'état des ouvrages recueillies périodiquement par l'équipe de recherche ainsi que le Ministère. Pour ce faire, une analyse exhaustive du comportement thermique des techniques d'atténuation mises en place pour limiter la dégradation du pergélisol sera réalisée aux sites principaux pour chacune des sections instrumentées. Ces analyses seront supportées par les données recueillies depuis plusieurs années sur l'évolution du régime thermique du pergélisol et du climat sur les sites à l'étude dans le projet de recherche intitulé « *Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et des risques pour les infrastructures du MTQ au Nunavik dans le contexte des changements climatiques* ». Ce suivi en continu et à long terme permettra d'évaluer la performance globale des stratégies mises en place en considérant la performance thermique des différentes techniques spécifiques d'atténuation utilisées en fonction de l'effet combiné des fluctuations climatiques saisonnières et interannuelles récentes et de l'évolution des conditions environnementales et leurs impacts sur le géosystème. En fait, ces données permettront de valider les tendances observées depuis leur mise en place en éliminant les perturbations thermiques engendrées par les travaux de construction et en considérant davantage l'inertie des systèmes à réagir aux améliorations effectuées. L'analyse des données sur la performance des techniques d'atténuation du dégel du pergélisol prendra aussi en compte l'évolution récente des températures de l'air, des précipitations et des températures dans le pergélisol en milieu naturel (non perturbé), enregistrées à proximité des sites étudiés. Cela permettra d'analyser, comparer et comprendre davantage la réaction thermique du sol en réponse à la mise en

place des techniques d'atténuation qui composent les stratégies d'adaptation (refroidissement ou réchauffement, aggradation ou dégradation du pergélisol, etc.).

Pour ce faire, une analyse exhaustive de l'évolution des paramètres climatiques mentionnés précédemment pour la période de suivi disponible pour chacun des sites sera réalisée. Ces paramètres climatiques seront déterminés sur une base annuelle (température moyenne annuelle de l'air, température moyenne mensuelle de l'air, minimum, maximum, etc.) et saisonnière (durées des saisons de gel et dégel, indices de gel et dégel, minimum et maximum, etc.). L'analyse de la variabilité climatique pour les périodes de suivi permettra d'établir les caractéristiques principales du climat récent. C'est en considérant cette variabilité climatique dans l'analyse de la performance thermique des techniques de mitigation qu'il sera possible de bien distinguer les apports bénéfiques ou néfastes du climat à ceux attribuables à la mise en place de la stratégie d'adaptation.

Pour la durée des périodes de suivi, les températures du sol mesurées par les câbles à thermistances installés dans certaines sections des remblais, en pied de remblai, dans les sections instrumentées des techniques d'atténuation contre le dégel du pergélisol et en terrain naturel seront analysées. Comme pour l'analyse climatique, celle du régime géothermique pour les différents sites se fera sur une base annuelle et saisonnière. Parmi les variables qui seront calculées, sans toutefois s'y limiter, nous retrouverons les températures du sol moyennes, les minimums et maximums annuels, mensuels et saisonniers, et ce, pour les différentes profondeurs de mesures disponibles. Le calcul des températures moyennes annuelles à l'interface remblai/sol et à la profondeur d'amplitude nulle permettra de déterminer le bilan thermique qui prévaut sous un remblai, à savoir s'il est négatif (favorable au maintien du pergélisol) ou positif (condition thermique instable favorable à la dégradation du pergélisol). Les températures à la surface du sol (remblai et milieu naturel) en fonction du type de surface (pavée, graveleuse ou végétale) et des conditions d'enneigement observées permettront de définir les facteurs-n appropriés qui seront utilisés ultérieurement dans les exercices de simulation. Les épaisseurs de la couche active seront également estimées à partir des profils de température mesurés par les câbles à thermistances.

En complément de l'analyse du suivi thermique des sols, la réalisation de levés géoradar (GPR) dans les sections transversales à l'axe des ouvrages permettra de dresser des sections illustrant la variation de l'épaisseur de la couche active en périphérie et sous l'infrastructure et d'identifier les zones saturées en eau afin d'évaluer l'efficacité des techniques de mitigation utilisées dans la reprise du pergélisol sous les accotements, et conséquemment, dans l'amélioration des conditions de drainage. L'utilisation de levés géoradar en milieu de pergélisol offre plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes géophysiques telles que la sismique réflexion ou la résistivité électrique, particulièrement lorsqu'une bonne connaissance des conditions et de la stratigraphie des sols est disponible. L'un des avantages du géoradar est de pouvoir offrir une appréciation assez réaliste de la structure des différentes couches du sol de par leurs différences en termes de propriétés diélectriques (permittivité et conductivité). Le géoradar dispose d'une résolution spatiale plus haute et demeure très sensible à des petits changements dans la conductivité électrique comparativement aux levés de conductivité électromagnétique (EM) ou de résistivité électrique. Par exemple, l'utilisation du GPR pour le positionnement de l'interface non gelée (couche active) et gelée (pergélisol) le long de profil transversal à l'infrastructure s'est avérée très efficace dans d'autres projets réalisés par le passé comme le témoigne l'exemple présenté à la figure 9B.

Ultimement, l'analyse des régimes thermiques des remblais et des sols sous-jacents, avant et suite à la mise en place des travaux d'adaptation aux CC, permettra de quantifier la réponse thermique post adaptation résultante des nouvelles caractéristiques de l'infrastructure (conditions de surface, géométrie, épaisseur et propriétés des matériaux ajoutés). La mise en relation des différences thermiques entre les câbles positionnés dans le centre-ligne d'un remblai, dans les talus ou en pied de remblai ainsi qu'en milieu naturel permettra également de renforcer la compréhension des impacts thermiques induits par les opérations d'entretien, telles que le déneigement, et de mieux définir les dimensions de l'empreinte thermique d'une infrastructure dans son milieu.

Le suivi du climat et des températures du sol sous les infrastructures adaptées, qui pour certains sites est supérieur à 9 ans, permettra également d'évaluer l'influence des variations du climat récent sur la performance des techniques d'atténuation du dégel du pergélisol mises en place. Pour chacune des techniques d'adaptation mise en place et pour lesquelles nous disposons d'un suivi thermique suffisamment long, la période d'efficacité optimale versus la période de latence pourra être mieux évaluée. Par exemple, les systèmes de remblais convectifs sont actifs seulement au cours des mois d'hiver et lorsque le gradient thermique est suffisamment élevé pour initier un mouvement d'air dans le système. Par conséquent, durant les mois d'été, le système entre en dormance, période caractérisée par des échanges de chaleur par convection très faibles, voire nuls. Les paramètres climatiques au cours de la période d'efficacité optimale pour lesquels la technique de mitigation ciblée semble la plus effective seront déterminés, ce qui permettra ultérieurement d'évaluer l'évolution de la performance en fonction des différents scénarios climatiques. Par exemple, dans un contexte de réchauffement des températures proposé par les scénarios de changements climatiques, les systèmes convectifs risquent de diminuer en efficacité en réponse à des hivers plus courts (raccourcissement de la période active) et davantage tempérés (baisse de l'intensité des mouvements convectifs en raison de gradients de température plus faibles). Dans ce même contexte climatique (saisons hivernales plus courtes et tempérées et saisons estivales plus longues et chaudes), l'utilisation d'isolant comme technique de mitigation, dont l'objectif est de freiner la transmission de la chaleur estivale dans le remblai, mais qui malheureusement limite également le refroidissement du sol en hiver, pourrait gagner en efficacité.

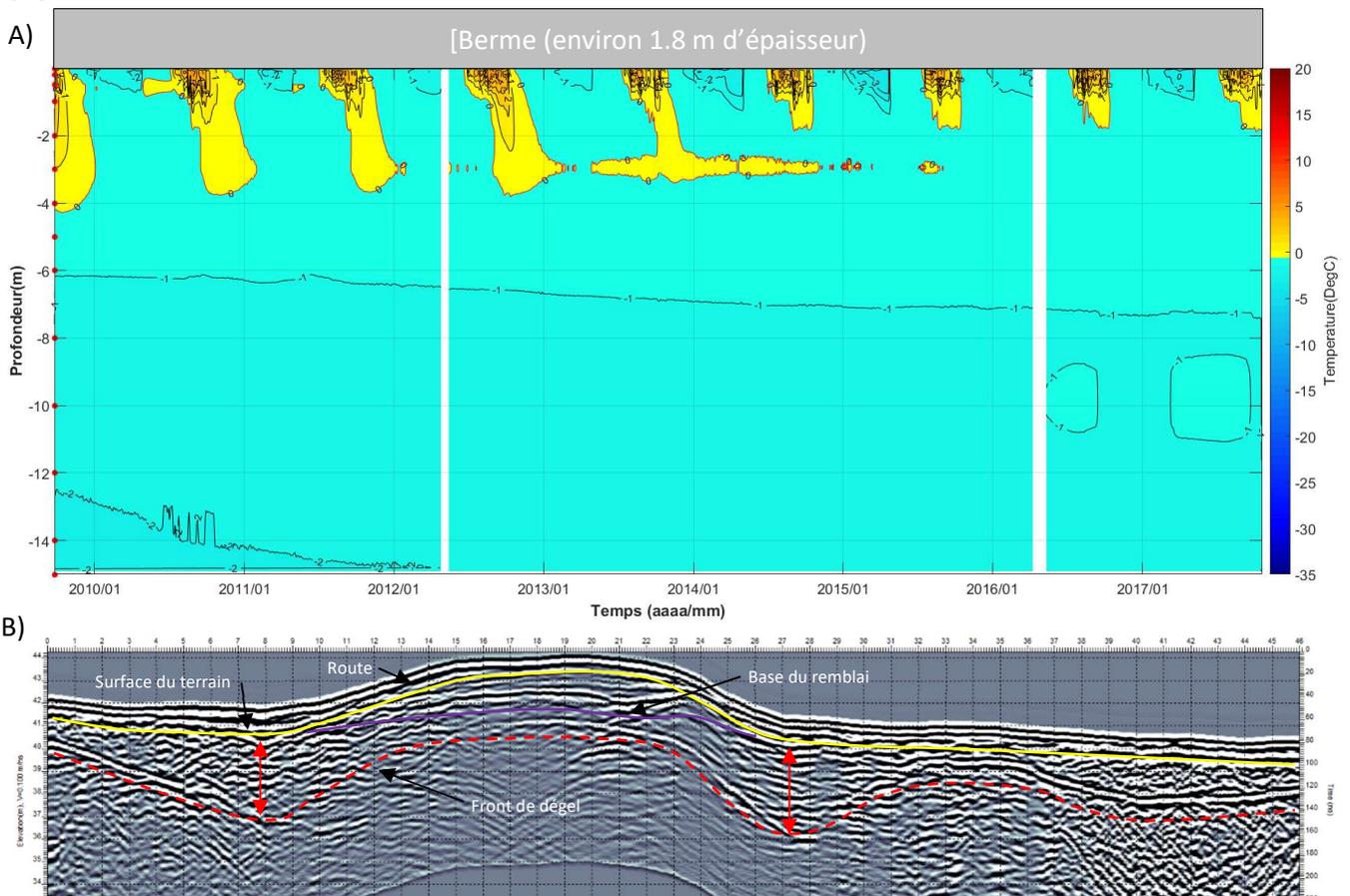


Figure 9: A) Exemple de variation de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la période 2009-2017 mesurée par le câble à thermistances PUV-F2 positionné sous la berme convective installée en 2010 le long d'une section de la piste d'atterrissage de Puvirniq. B) Variation de l'épaisseur de la couche active identifiée sur un relevé GPR transversal à la route d'accès de Kangiqsualujuaq. La forme du réflecteur identifié comme étant la base de la couche active (ligne rouge pointillée) suggère une dégradation thermique du pergélisol en pied de remblai (Tirée de L'Hérault *et al.*, 2014).

1.5.1.2 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE MÉCANIQUE

De manière générale, les sols gelés offrent un excellent support aux fondations en raison de la présence de glace dans les pores qui crée des liens entre les particules (Phukan et Andersland, 1978). La stabilité mécanique d'un sol pergélisolé dépendra des caractéristiques géotechniques (granulométrie et compacité) de ce dernier, de sa température et de la charge induite par l'infrastructure et les opérations d'exploitation (circulation des avions et véhicules de services). Lorsque le sol est gelé, sa résistance au cisaillement augmente grâce aux liaisons intergranulaires assurées par la glace interstitielle présente dans les vides (cimentation des grains). De manière générale, les valeurs de résistance des sols gelés atteignent leurs maximums à saturation, c'est-à-dire lorsque les vides sont complètement remplis de glace, pour ensuite diminuer lorsque le sol est sursaturé en glace (glace de ségrégation ou glace massive). Pour un site donné, le régime thermique du sol reflète un état d'équilibre transitoire entre les conditions intrinsèques du milieu et les conditions climatiques. Les températures du sol sont ainsi le résultat d'une interaction complexe entre une multitude de variables climatiques (température de l'air, radiation solaire), environnementales (type de surface, enneigement et drainage) et géologiques (propriétés thermiques des matériaux, flux géothermique). Cet état d'équilibre transitoire est certes fragile et peut basculer rapidement vers des conditions thermiques plus chaudes défavorables au maintien du pergélisol.

Parmi les éléments susceptibles de perturber l'équilibre thermique du pergélisol, l'implantation d'une infrastructure, en modifiant les conditions initiales des surfaces, des sols et de l'environnement, entraîne nécessairement une perturbation thermique et mécanique du pergélisol. En effet, un remblai est sujet à absorber une quantité substantielle de chaleur par rayonnement solaire, ce qui peut conduire à une dégradation thermique du pergélisol et provoquer des déformations dans le remblai, particulièrement si le remblai est de faible épaisseur ou sous les talus. Sous les talus, outre la diminution de l'épaisseur du remblai pour assurer une transition avec le terrain environnant, s'ajoute l'effet de la neige qui isole le sol durant l'hiver ce qui limite l'extraction de la chaleur et contribue à dégrader thermiquement le pergélisol. Cette accélération du dégel du pergélisol engendre des tassements au dégel dont l'ampleur est déterminée par le contenu en glace et par les caractéristiques du sol. Ces tassements engendrent des dépressions plus ou moins grandes ou profondes en surface qui favoriseront davantage l'accumulation d'eau en été et de neige en hiver. Une fois ce processus enclenché, le milieu se transforme rapidement, ce qui accentue tant l'ampleur que la vitesse de la dégradation thermique du pergélisol à venir (rétroaction positive). Au Nunavik, 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 de la majorité des déformations observées affectant les accotements et les talus de remblai (L'Héroult *et al.*, 2012). Pour cette raison, les stratégies d'adaptation proposées par ces auteurs misèrent sur l'utilisation de techniques de mitigation visant à freiner la dégradation thermique en marge et sous le talus des remblais et donc éviter toute progression vers le centre-piste et ainsi stabiliser mécaniquement l'ensemble de l'infrastructure.

Dans le but d'évaluer la performance mécanique des différentes techniques d'atténuation contre le dégel du pergélisol mises en place, les données sur les déformations observées et mesurées provenant des sources suivantes, sans s'y limiter, ont été analysées : les plaques de tassements, les inclinomètres verticaux ou horizontaux, les levés DGPS et les levés LIDAR aéroportés multidates (Tableau 2). En relation avec les conditions climatiques et géothermiques récentes, les résultats de ces analyses ont permis de déterminer : si l'infrastructure est stable mécaniquement, les zones de déformations s'il y a lieu, l'amplitude de ces déformations et les mécanismes en causes. Par exemple, outre l'amplitude et la direction des mouvements du profil de sol, les mesures d'inclinomètre permettent, en fonction de l'aspect des profils de déplacement, d'identifier les processus responsables des déformations (Figure 10). Quant aux données LIDAR, elles permettent, contrairement aux données des bornes de tassement et des inclinomètres, de donner une appréciation spatiale de l'étendue des zones de déformations couvrant l'ensemble de l'infrastructure et son milieu environnant (Figure 11). La

compilation et l’arrimage des données de déformations issues des différentes sources ont permis d’analyser et de valider le comportement mécanique des remblais. Pour les sites où la répartition des mesures de déformation le permettra, l’information recueillie sur les mouvements des remblais pourra être compilée le long de section transversale afin de les visualiser en plan. Ce type d’analyse bidimensionnelle du comportement mécanique permet d’approfondir la compréhension des processus de déformations des remblais, de quantifier leur évolution et de déterminer les causes de la dégradation. Par exemple, il est ainsi plus facile de distinguer les déformations de remblais causés par le fluage et ceux induits par le tassement et la consolidation du sol dégelé sous le remblai. Pour les sites où il persiste des incertitudes quant aux processus impliqués dans les déformations, les analyses bidimensionnelles combinées à des mesures du potentiel de ségrégation sur des échantillons de sol prélevés (Parent, en prep.), permettront de vérifier l’hypothèse qui suggère que dans certains cas, le mouvement des épaulements de talus serait attribuable à la cryoreptation et la gélifluxion sous les talus et non le tassement et la consolidation au dégel du pergélisol.

En plus des mesures de déformations disponibles, l’Université Laval a consulté les données issues des inspections visuelles et quantitatives réalisées par le MTQ qui comportent une évaluation de l’état des infrastructures en lien avec le dégel du pergélisol (localisation, superficie et profondeur des tassements, fissurations, etc.). De plus, l’équipe de recherche a procédé, lors des visites estivales réalisées dans le cadre du projet, au recensement des signes de dégradation. La compilation de ces observations et des données internes au MTQ a permis de dresser un portrait de l’état général de l’infrastructure et d’identifier les secteurs problématiques pour lesquels les déformations recensées présentent un risque, soit en raison du processus impliqué (rupture par cisaillement), de leur ampleur ou leur localisation (talus de remblai versus centre-ligne).

Tableau 2 : Sources de données disponibles ou potentielles qui seront utilisées dans l’évaluation de la performance mécanique des techniques d’atténuation du dégel du pergélisol aux sites à l’étude.

Sources	Nb. de dimensions	Résolution spatiale	Précision (z)	Paramètres mesurés
Plaques de tassement	Adimensionnel	n.a	Millimétrique	Déplacement vertical
DGPS	Adimensionnel	n.a	Millimétrique	Déplacement vertical
Inclinomètre vertical	Unidimensionnel (axe z)	n.a	Millimétrique	Déplacement latéral
Inclinomètre horizontal	Unidimensionnel (axe x ou y)	n.a	Millimétrique	Déplacement vertical
Lidar aéroporté	Bidimensionnel (axe x et y)	< 1 m	Décimétrique	Déplacement vertical Déplacement horizontal
Lidar terrestre	Bidimensionnel (axe x et y)	< 10 cm	Centimétrique	Déplacement vertical Déplacement horizontal
Photogrammétrie	Bidimensionnel (axe x et y)	< 25 cm	Centimétrique	Déplacement vertical Déplacement horizontal
InSAR	Bidimensionnel (axe x et y)	2-3 m	Millimétrique	Déplacement vertical Déplacement horizontal

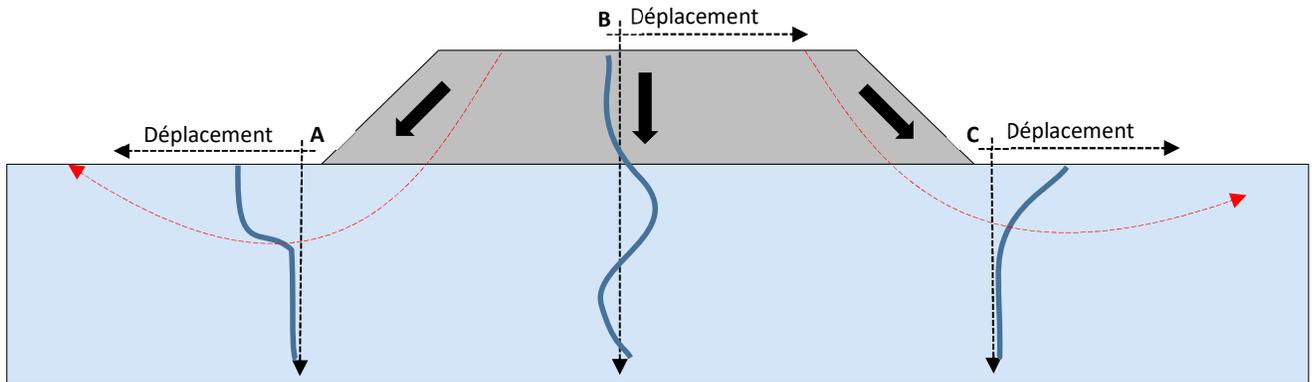


Figure 10 : Schéma des patrons caractéristiques des déplacements mesurés par les inclinomètres verticaux (ligne bleue foncée) : A) rupture le long d'un plan ou une zone de cisaillement, B) mouvement de compression induit par la consolidation du sol sous contrainte importante et C) déplacement par fluage.

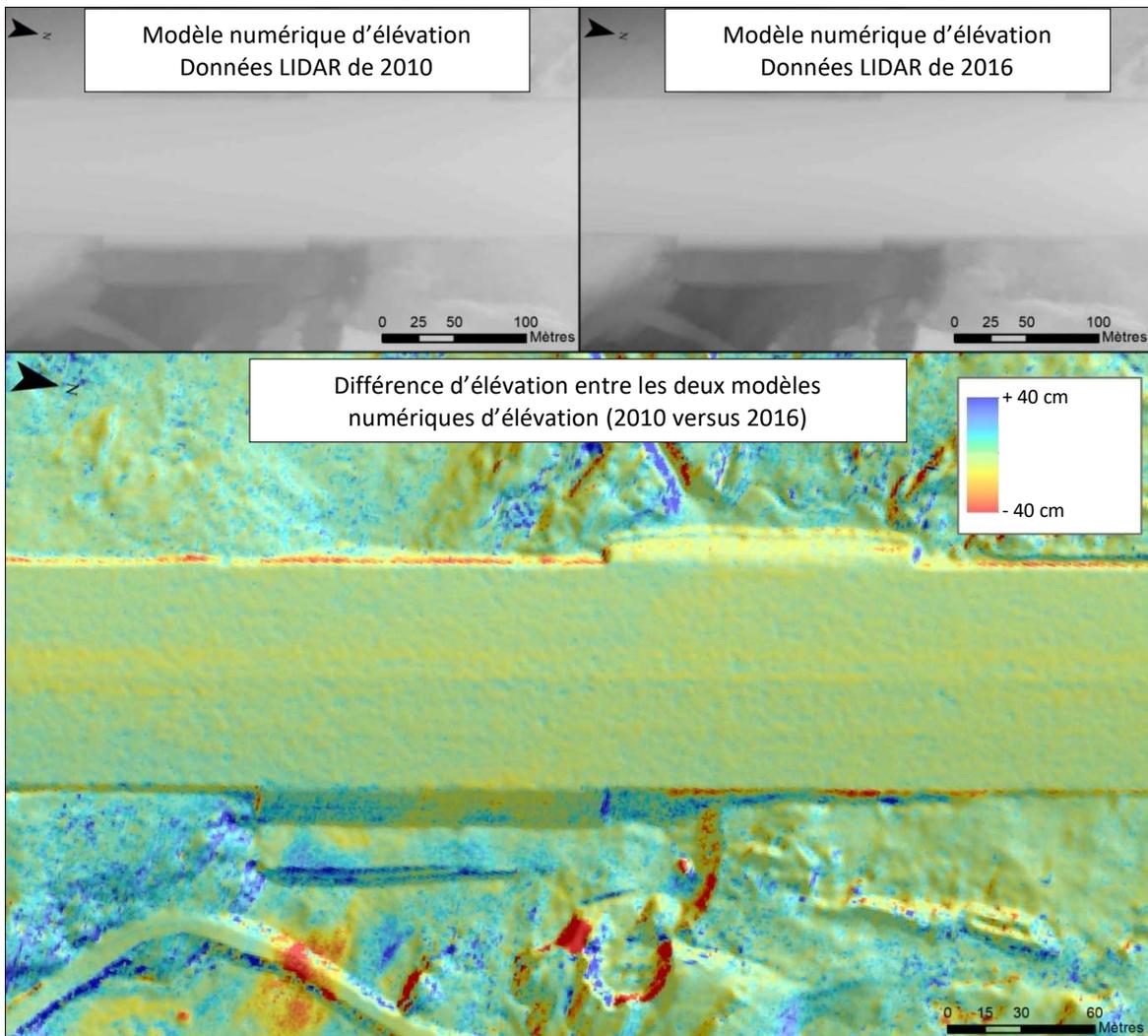


Figure 11 : Exemple, pour la piste de Puvirnitug, du potentiel d'évaluation de la performance mécanique d'un remblai par le traitement de données LIDAR). La soustraction des deux modèles numériques d'élévation générés à partir des données LIDAR de 2010 (coin supérieur gauche) et de 2016 (coin supérieur droit) permet d'obtenir une carte des différences d'élévation relative pixel par pixel (image du bas). Sur cette carte, les zones de soulèvement sont présentées dans des teintes bleutées et les tassements dans des teintes rougeâtres.

1.5.1.3 ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATION À LIMITER L'INFLUENCE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX DANS LA DÉGRADATION THERMIQUE DU PERGÉLISOL

Compte tenu de l'importance des facteurs environnementaux tels que l'enneigement et les accumulations d'eau dans la dégradation thermique du pergélisol et ultimement sur la stabilité thermique et mécanique des infrastructures (L'Hérault *et al.*, 2012), les mesures/techniques d'adaptation qui ont été développées et mises en place visaient principalement à diminuer l'effet isolant de la neige sur les accotements et à améliorer le drainage général des sites. Afin d'évaluer l'efficacité de ces mesures/techniques d'adaptations à limiter l'influence négative de ces facteurs environnementaux sur le régime thermique du pergélisol, il importe de bien documenter les conditions d'enneigement et de drainage aux endroits où les infrastructures ont été adaptées. Pour ce faire, l'Université Laval a consulté et compilé les données issues des inspections visuelles et mesures quantitatives effectuées par le MTQ portant sur les conditions de drainage (en milieu naturel, dans les fossés et ponceaux) et d'enneigement. À cette compilation s'ajoute les données issues des observations complémentaires réalisées dans des projets de recherche antérieurs (L'Hérault *et al.*, 2012, Gaumond et Doré, 2013, L'Hérault *et al.*, 2014, L'Hérault *et al.*, 2015 et Périer *et al.*, 2016) ainsi que celles qui obtenues dans le cadre du présent projet. Par exemple, une visite hivernale réalisée à l'hiver 2019 a permis de mesurer les épaisseurs et les densités de la neige en vue de documenter davantage les conditions d'enneigement pour certaines sections d'infrastructure adaptée.

Afin de compléter ces informations et d'assurer une meilleure compréhension de la dynamique d'enneigement et de drainage dans le temps en périphérie des infrastructures, plusieurs sites ont été équipés de caméras automatisées qui ont été téléchargées annuellement. Le modèle de caméra utilisé est la SOLAR de la compagnie SPYPOINT Inc. (Figure 12A). Offrant une résolution d'image supérieure (12 mégapixels) aux modèles comparables disponibles sur le marché, ces dernières ont la caractéristique d'avoir un panneau solaire intégré avec pile rechargeable et une source d'alimentation alternative composée de 6 batteries AA au lithium. Les caméras ont été programmées afin de prendre 4 photos par jour, entre 10h et 18h, soit toutes les deux heures. En raison de la variabilité des conditions d'ensoleillement et météorologiques, la prise de plusieurs photos par jour, à des heures différentes, augmentera les chances d'avoir au minimum une bonne photo quotidienne. Selon les caractéristiques de l'alimentation (panneau solaire + batteries au lithium) et la programmation actuelle (4 photos/jour), l'autonomie des caméras a été jugée suffisante pour assurer leurs fonctionnalités pour une période supérieure à 12 mois. Toutefois, advenant une insuffisance en énergie de l'alimentation actuelle, il sera toujours possible d'ajouter une troisième source d'alimentation indépendante qui consistera en une batterie 12 volts rechargeable avec panneau solaire. Les caméras positionnées en marge des pistes d'atterrissage ont été installées sur des trépieds en acier galvanisé fixés au sol par des clous de 10 pouces et par l'ajout de quelques roches (Figure 12B). Le type de trépied et le système de fixation choisis font en sorte que l'installation peut être considérée comme frangible. Advenant un impact, le trépied basculera et se couchera au sol sans offrir une grande résistance. Lors de l'installation des caméras, une attention particulière a été portée quant à la hauteur de ces dernières afin qu'elles n'excèdent pas celle du centre piste. Pour certains sites, des repères gradués frangibles ont été installés dans le talus de remblai, en pied de remblai et en milieu naturel dans un axe perpendiculaire à l'infrastructure (Figure 13A). Ces repères permettront de quantifier visuellement, à partir des photos prises par les caméras automatisées, l'épaisseur de neige journalière qui s'accumule le long de transects partant du haut de talus jusqu'à une dizaine de mètres du pied de remblai, en milieu naturel (Figure 13B). À partir de l'analyse de ces données, il sera possible de confirmer l'hypothèse proposée par L'Hérault *et al.*, (2012) qui suggère qu'en milieu ouvert (sans végétation), la redistribution de la neige par le vent favorise une accumulation rapide de neige en bordure de piste qui atteint son épaisseur maximale dès les premiers mois d'hiver. En complément, des thermistances individuelles ont été positionnées à une profondeur de 2 cm sous la surface du sol à la base de chacun des repères de neige et pour certaines sections critiques du remblai (accotement, haut de talus, milieu de talus et pied de talus) (Figure 13C). Ces thermistances, en mesurant les températures du sol près de la surface sous différentes conditions (type

de surface et conditions d'enneigement), permettront de préciser les valeurs des facteurs-n de gel et de dégel souvent requises lors de simulations numériques.

Les caméras automatisées installées aux abords des pistes et routes d'accès ont permis d'analyser l'efficacité des systèmes de drainage (Figure 14). Par exemple, la corrélation des niveaux d'eau estimés à partir des images et les régimes de températures de l'air et des précipitations, a permis d'évaluer l'efficacité des fossés et des ponceaux à drainer l'infrastructure et le terrain environnant lors de la fonte des neiges au printemps ou lors d'épisodes de précipitations au cours de la période estivale. En complément aux suivis photographiques, des relevés de neige ont été réalisés à l'hiver 2019 pour les sites principaux de Tasiujaq, Salluit et Puvirnituk où les accumulations de neige constituaient une source de perturbation thermique du pergélisol importante. Pour ces sites, des mesures d'épaisseur de neige le long de profils perpendiculaires à l'axe de l'infrastructure ont été réalisées à l'aide d'une tige graduée enfoncée manuellement à travers le couvert de neige. L'emplacement et la longueur des relevés de neige ont été déterminés de manière à couvrir les différentes zones type d'accumulations de neige le long de l'infrastructure, particulièrement aux emplacements où des techniques de mitigation ont été mises en place. Le début et la fin des relevés ont été déterminés afin de pouvoir bien évaluer le patron de distribution de la neige en fonction de la distance par rapport au centre-ligne de l'infrastructure, et ce, en prenant bien soin d'atteindre une distance suffisante pour déterminer l'épaisseur de neige en milieu naturel (Figure 15A). En complémentarité aux relevés des épaisseurs de neige, des puits d'observation ont été réalisés afin d'observer les différentes couches et structures de neige (Figure 15B et C) et procéder à des mesures de densité de la neige (Figure 15D). La figure 15E montre un aperçu d'un profil d'épaisseurs de neige en marge de la piste de Puvirnituk sur le côté est. Afin d'avoir une meilleure représentativité des épaisseurs de neige et des densités observées aux abords des infrastructures, une seconde campagne de relevés de neige devait se tenir à l'hiver 2020, mais en raison de la crise sanitaire de la COVID-19, a dû être annulée.

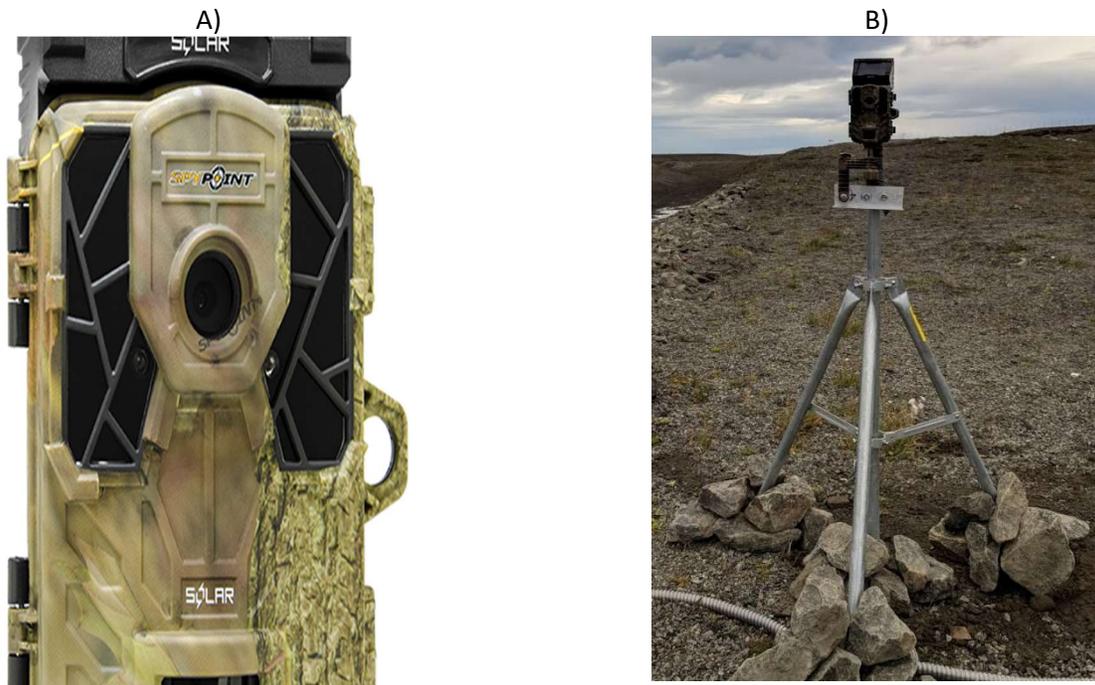


Figure 12 : Caméra automatisée modèle SOLAR de la compagnie SPYPOINT Inc. (source : /www.spypoint.com). B) Installation type d'une caméra automatisée en marge d'une piste d'atterrissage utilisant un trépied fixé au sol par des clous et des roches.

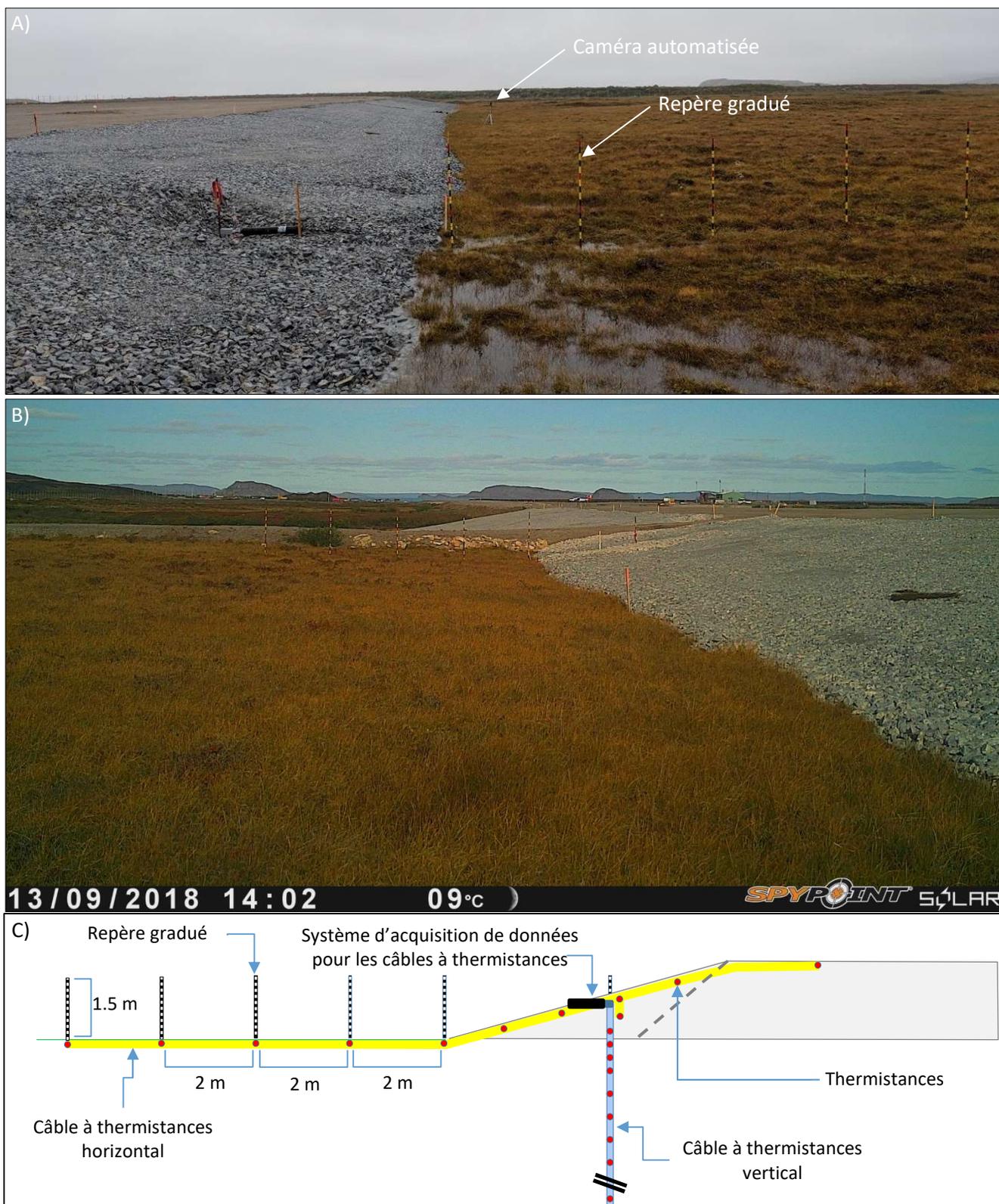


Figure 13 : A) Configuration d'un site de suivi de l'enneigement à l'aide d'une caméra automatisée montée sur trépied et repères gradués, piste d'atterrissage de Tasiujaq. B) Exemple d'une photographie prise par la caméra automatisée. C) Répartition des thermistances en surface pour la validation des températures en fonction des conditions de surface.



Figure 14 : A) Configuration d'un site pour le suivi des conditions de drainage le long d'un remblai à l'aide d'une caméra automatisée fixée sur un hauban de poteau électrique, route d'accès à l'aéroport de Salluit. B) Exemple d'une photographie prise par la caméra automatisée.

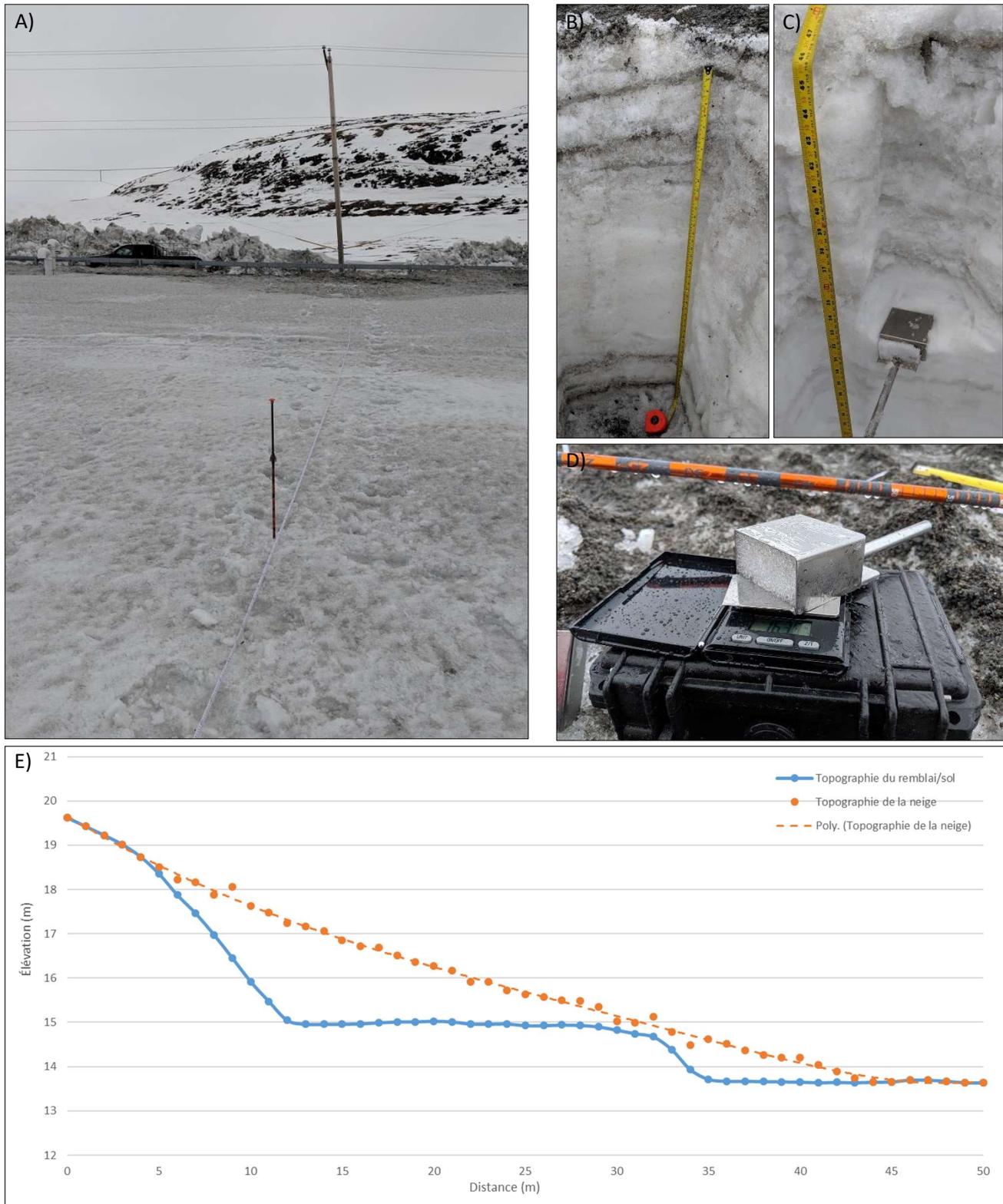


Figure 15 : A) Réalisation d'un relevé type des épaisseurs de neige à l'aide d'un ruban à mesurer et une tige graduée. B) Excavation du couvert de neige jusqu'au sol naturel et C) échantillonnage pour mesure de densité de la neige. D) Détermination de la densité de la neige par mesure de la masse volumique. E) Profil d'épaisseurs de neige mesurées à l'hiver 2019 le long d'un axe transversal à la piste de Puvirnituk.

1.6 PERFORMANCE DES STRATÉGIES D'ADAPTATION MISE EN PLACE AUX SITES PRINCIPAUX

1.6.1 LA PISTE D'ATTERRISSAGE DE PUVIRNITUQ

1.6.1.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

L'aéroport de Puvirnituk, achevé en 1990, se distingue des autres pistes construites par le ministère des Transports du Québec au Nunavik en raison de sa largeur (90 m) et de sa longueur initiale (1645 m) significativement plus élevées. Rallongée en 2009 de 385 m vers le nord et de 10 m vers le sud, la piste orientée selon un axe nord-nord-ouest sud-sud-est mesure désormais 2040 m, du chaînage 4+930 m au chaînage 6+970 m (Plan tel que construit no. PA-7202-154-05-1305, 2012-01-31).

La piste a été presque entièrement construite sur des affleurements rocheux (Allard *et al.*, 2007). Toutefois, la piste traverse une vallée comblée de dépôts meubles 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 que des signes de dégradations de l'infrastructure en lien avec la dégradation du pergélisol avaient été observés par Allard *et al.* (2007) et Doré et Beaulac (2007), dont une dépression majeure entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m (Figure 16A). La profondeur de cette dépression avait été estimée à environ 20 cm en 2004 par Doré et Beaulac (2007). Des mesures effectuées par le MTQ à l'été 2008 indiquaient que cette dépression mesurait alors environ 66 m de longueur, 20 m de largeur et 40 cm de profondeur.

Le drainage de cette vallée s'effectue naturellement de l'ouest vers l'est et le remblai de la piste, en l'absence de ponceau transversal, ne permet pas de drainer rapidement l'eau qui s'accumule sur le côté ouest de la piste, la forçant ainsi à s'infiltrer sous le remblai. Pour cette raison, vis-à-vis le centre de la dépression en pied de remblai côté est, une résurgence d'eau relativement importante, trouvant sa source du côté amont, perdurait tout au long de l'été jusqu'à tard dans l'automne (L'Hérault *et al.*, 2012) (Figure 16B). Le débit assez rapide de cet écoulement dans le sens de la pente (nord-ouest sud-est) avait été identifié par L'Hérault *et al.* (2012) comme l'un des facteurs contributifs à l'origine de la dégradation du pergélisol dans ce secteur. Ces derniers avaient également ciblé les importantes accumulations de neige en marge de l'infrastructure à ces endroits comme facteur déterminant dans la dégradation thermique du pergélisol (Figure 16C). D'après les relevés des épaisseurs de neige réalisés par le MTQ avant la mise en place de la stratégie d'adaptation, l'épaisseur de neige en pied de remblai, sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m, pouvait atteindre plus de 3 m d'épaisseur pour ensuite graduellement diminuer selon une pente de 1V :6H pour rejoindre des valeurs d'épaisseurs en milieu naturel comprises entre 0,25 et 0,5 m.

Les études géotechniques réalisées en 2008 par L'Hérault *et al.* (2012) ont déterminé que l'épaisseur des dépôts meubles, dans la petite vallée transversale côté est (forage PUV-F2), atteint plus de 15 mètres dont la partie superficielle consiste essentiellement en des silts argileux qui, en pied de remblai, sont partiellement dégelés jusqu'à environ 6 m de profondeur (Figure 16D). Lors des forages, les essais de pénétration standard effectués avaient indiqué une résistance des silts et argiles assez faible en pied de remblai, valeurs qui pourraient possiblement conduire, si la dégradation du pergélisol se poursuit, à une rupture du remblai. Des essais géotechniques supplémentaires ont été réalisés par Verreault et Doré (2010) et d'après les résultats, la résistance des silts et argiles ne serait pas aussi faible qu'initialement évaluée. Toutefois, les auteurs demeurent prudents quant aux résultats obtenus, car plusieurs essais ont été réalisés difficilement tandis que d'autres tout simplement écartés en raison de l'incohérence des résultats obtenus.

À partir de l'ensemble des observations et des problématiques identifiées, une stratégie d'adaptation aux CC a été développée en collaboration avec le Ministère pour assurer la résilience de cette infrastructure. À l'automne 2010, les travaux d'adaptation ont été complétés.

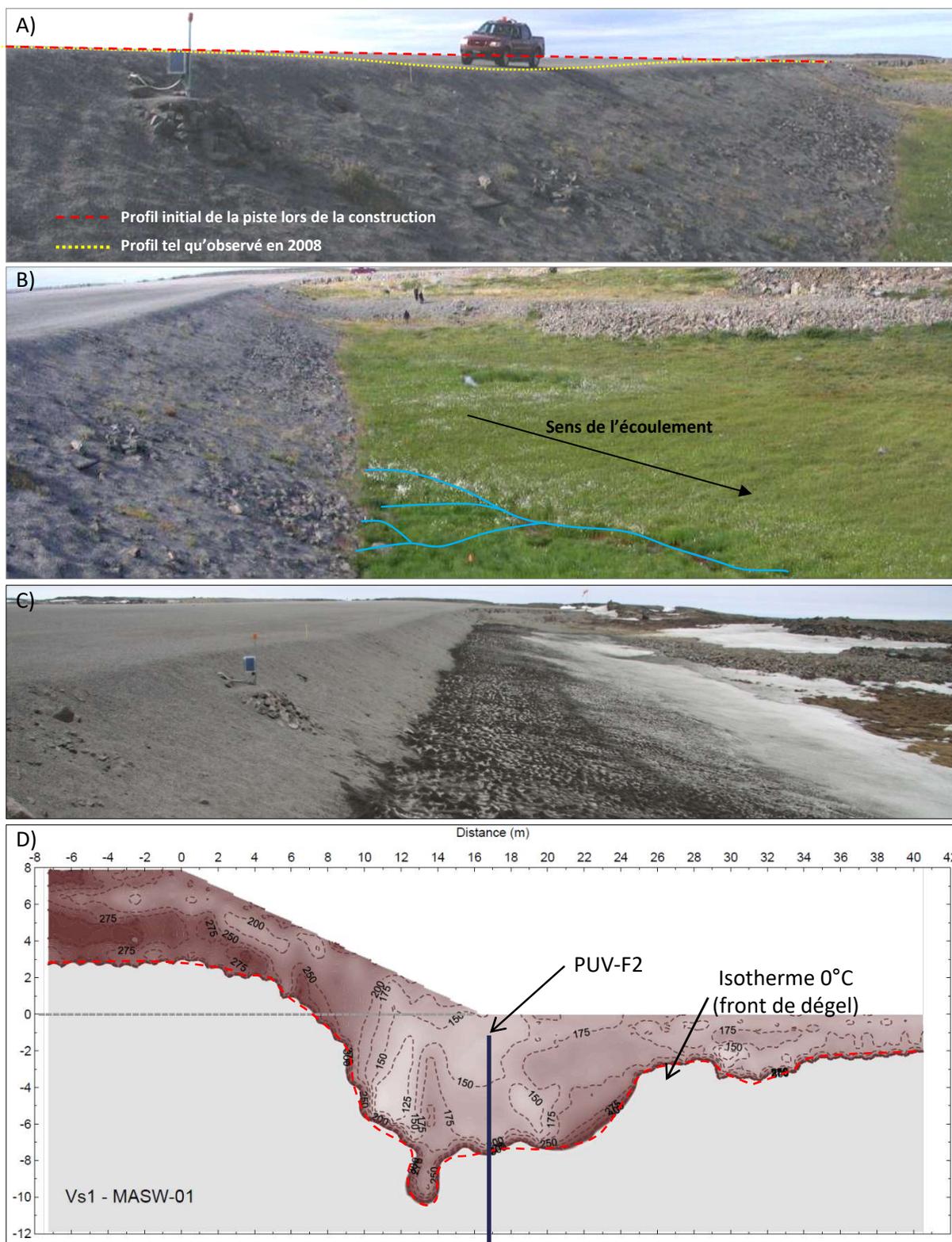


Figure 16 : A) Dépression majeure relevée en bordure de piste d'atterrissage de Puvirnituuq sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m. B) Écoulement d'eau sous la piste vis-à-vis le centre de la dépression majeure côté est. C) Accumulation de neige importante en bordure de piste sur le côté est entre les chaînages 6+190 m et 6+280 m. 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 MMASW-01 (modifiée de Karray *et al.*, 2009).

1.6.1.2 DESCRIPTION DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION MISE EN PLACE

La stratégie d'adaptation recommandée pour stabiliser thermiquement et mécaniquement une section de la piste d'atterrissage de Puvirnituk d'une longueur d'environ 150 mètres et le pergélisol sous-jacent consistait à : 1) diminuer le risque de dégradation thermique du pergélisol dû à l'écoulement d'eau sous la piste et aux accumulations de neige importantes sur les pentes et en pied de remblai, 2) stabiliser mécaniquement le remblai à l'aide d'une berme (contrepoids) placée au pied du talus et 3) assurer un suivi du comportement thermique et mécanique des mesures d'adaptation mises en place pour en évaluer la performance (L'Hérault *et al.*, 2012). Compte tenu du risque potentiel de rupture du remblai et la nécessité de rallonger la piste pour permettre notamment l'atterrissage d'un Boeing 737 de la compagnie Air inuit, la mise en place de la stratégie d'adaptation proposée a débuté dès l'automne 2009 et fut coordonnée avec les travaux de rallongement de la piste. Il est important de mentionner que ce n'est cependant qu'à l'été 2010 que la mise en place de la stratégie d'adaptation fut complètement finalisée avec l'installation des systèmes de ventilation.

Afin de répondre aux objectifs de stabilisation thermique et mécanique de la stratégie d'adaptation proposée, 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 thermique sur le pergélisol de l'écoulement d'eau sous la piste (Figure 17). Pour permettre cette déviation de l'écoulement d'eau vers le sud-ouest, 826 m³ de roc ont été dynamités du côté amont pour créer une tranchée dans le roc d'une largeur de 2 m et une longueur de 140 m (Figure 17A et B). Par la suite, afin de stabiliser thermiquement, voire restaurer le régime thermique du pergélisol en pied de remblai du côté amont et aval, des remblais convectifs ont été construits de chaque côté de la piste afin de permettre l'extraction de chaleur des remblais par la formation en hiver de cellules de convection dans les pores d'un matériau granulaire grossier (Figure 17B et C). Le concept de remblai à convection proposé a été développé en collaboration avec l'Université Laval et le MTQ et consiste en un remblai à convection traditionnel avec l'ajout d'un système de ventilation afin d'augmenter son efficacité (Figure 18A et B). L'ajout d'un système de ventilation favorise l'apport d'air de l'extérieur et permet de transformer le mouvement convectif, normalement en cellules fermées, en un mouvement convectif ouvert. Cette configuration permet de maximiser la convection d'air dans le remblai en hiver afin d'accroître la capacité d'extraction de chaleur du système. Du côté aval, la géométrie et le dimensionnement du remblai à convection d'air ont été déterminés de manière à assurer également une stabilité mécanique par l'ajout d'un contrepoids (berme) qui assure la stabilité globale du remblai (Figure 18B et D).

Afin de suivre l'efficacité des mesures d'adaptation aux CC mis en place, le projet de recherche intitulé : « *Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituk* » (G-Gaumond *et Doré*, 2013) consistait à documenter et effectuer le suivi de performance sur une période de 3 ans entre 2009 à 2012.

1.6.1.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts des travaux associés à la mise en place de la stratégie d'adaptation et à l'allongement de la piste de Puvirnituk se sont élevés à un total de 12,5 millions de dollars. Ces coûts sont détaillés dans neuf bordereaux différents qui permettent de regrouper les dépenses dans les catégories suivantes :

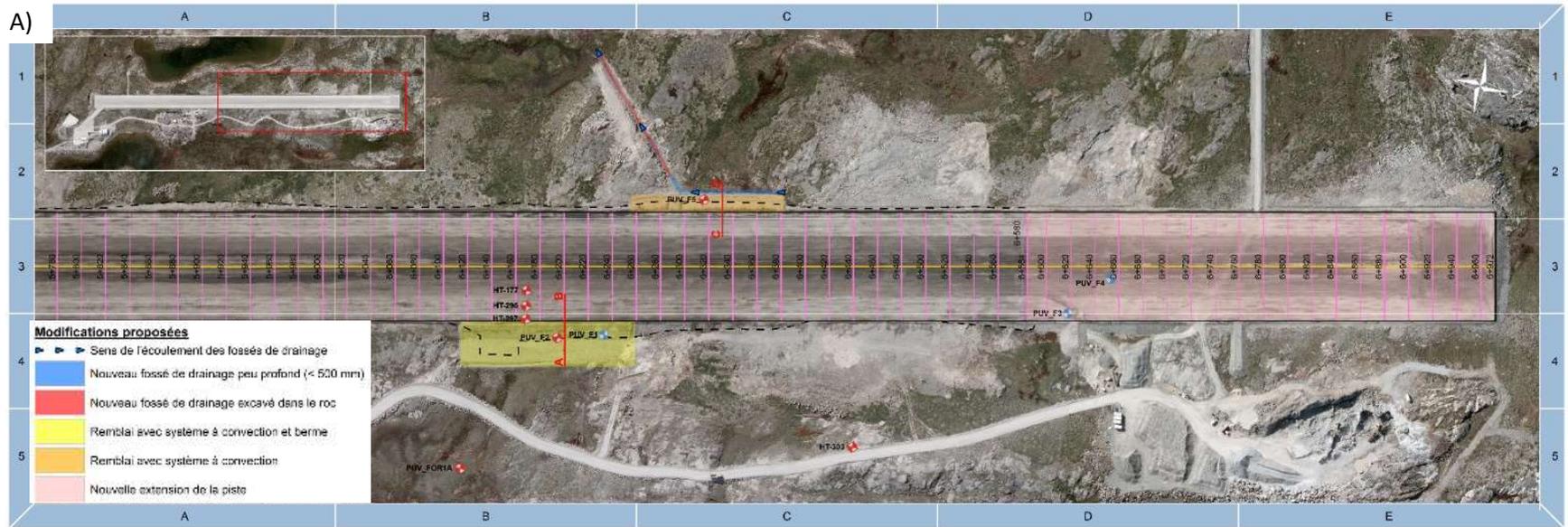
- 1) Organisation du chantier
- 2) Prolongement et rechargement de la piste et mises en réserve
- 3) Mesures d'atténuation du pergélisol
- 4) Déplacement des équipements de NAV Canada-partie génie civil
- 5) Clôtures et barrières de type treillis pour gibiers
- 6) Réfection du balisage et équipement divers-division électrique
- 7) Balisage temporaire du prolongement de la piste
- 8) Déplacement des équipements de NAV Canada-division électricité

9) Maintien de la circulation aérienne et signalisation.

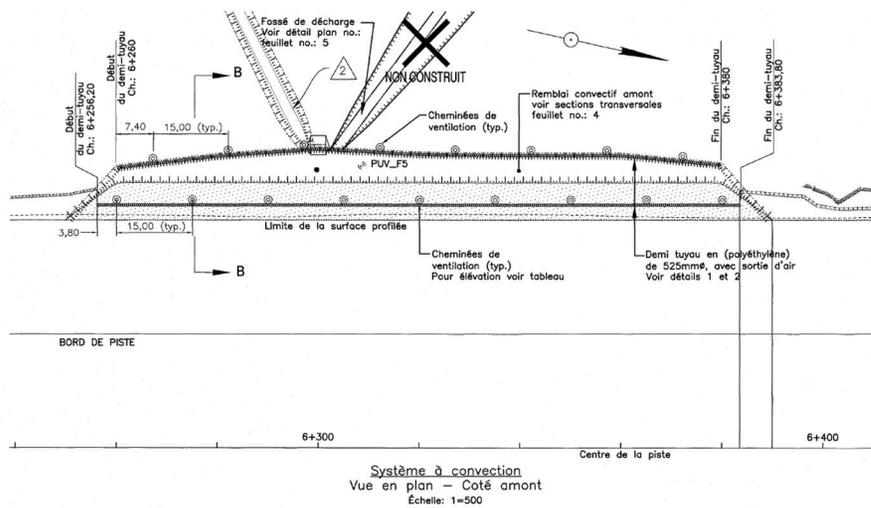
Les coûts liés aux mesures d'atténuation du dégel du pergélisol et de stabilisation mécanique sont regroupés dans le bordereau numéro 3. Dans ce bordereau, la ventilation des coûts par mesures permet une évaluation assez juste des coûts pour l'adaptation qui s'élève à un grand total de 846 368 \$ tel que présenté au tableau 3. À noter que le total des travaux exclut les coûts pour le déneigement, l'installation de l'instrumentation et les boîtiers d'acquisition de données. Les coûts d'entretien sont également écartés pour l'instant, car ces derniers sont actuellement non disponibles. Toutefois, ces coûts d'entretien ne devraient pas être très élevés, car il s'agit essentiellement de redresser les cheminées de ventilation et de remplacer les chapeaux endommagés au besoin. En rapportant les coûts totaux de construction des mesures d'adaptation par unité d'aire de piste d'atterrissage stabilisée (10 300 m²), les coûts engendrés par la stabilisation thermique et mécanique de la piste d'atterrissage de Puvirnituk sont estimés à environ 80-90 \$/m².

Tableau 3 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la piste de Puvirnituk (modifié de Gaumont et Doré, 2013)

Année	Mesures	Description	Coût (\$)
2009	Remblai à convection avec système de ventilation	Pierre calibre 150-300 mm, 50 % > 225 mm	555 520.00
		Granulats concassés MG 20b modifié	103 200.00
		Demi-tuyau polyéthylène ondulé 525 mm de diamètre	109 274.00
		Cheminées de ventilation	22 100.00
		Géotextile type III	14 000.00
		Autres	n.a
		Sous-total =	804 094.00
	Déviation du ruisseau	Déblai de 1 ^{ère} classe	41 310.00
		Fossé de décharge 2 ^e classe	964.00
		Autres	n.a
	Sous-total =	42 274.00	
	Total travaux adaptation =	846 368.00	
2009-2020	Entretien	MG 20b modifié (rechargement) (2010)	1 878 541.00
		MG 20b modifié (mise en réserve) (2010)	410 476.00
		Scarification et nivellement de la piste (2010)	67 635.00
		Nettoyage et reprofilage des fossés (2010)	19 080.00
		Total travaux d'entretien =	2 375 732.00
	Grand total =	3 222 100.00	



B)



C)

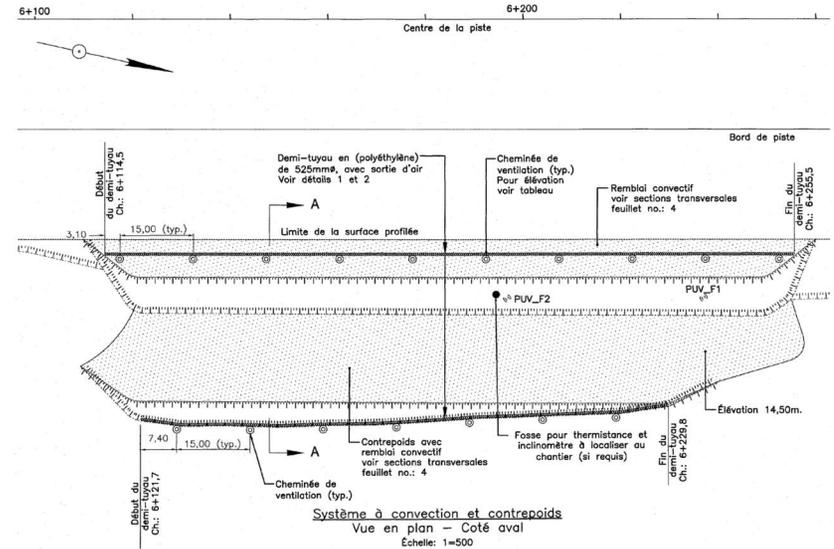


Figure 17: A) Aperçu générale de la stratégie d'adaptation proposée pour la piste de Puvirniq (modifiée de L'Hérault *et al.*, 2012). Vues en plan tirées des plans originaux tel que construit (no. PA-7202-154-05-1305-1) du remblai à convection avec nouveau fossé de drainage côté amont (B) et du remblai à convection avec contrepoids côté aval (C).

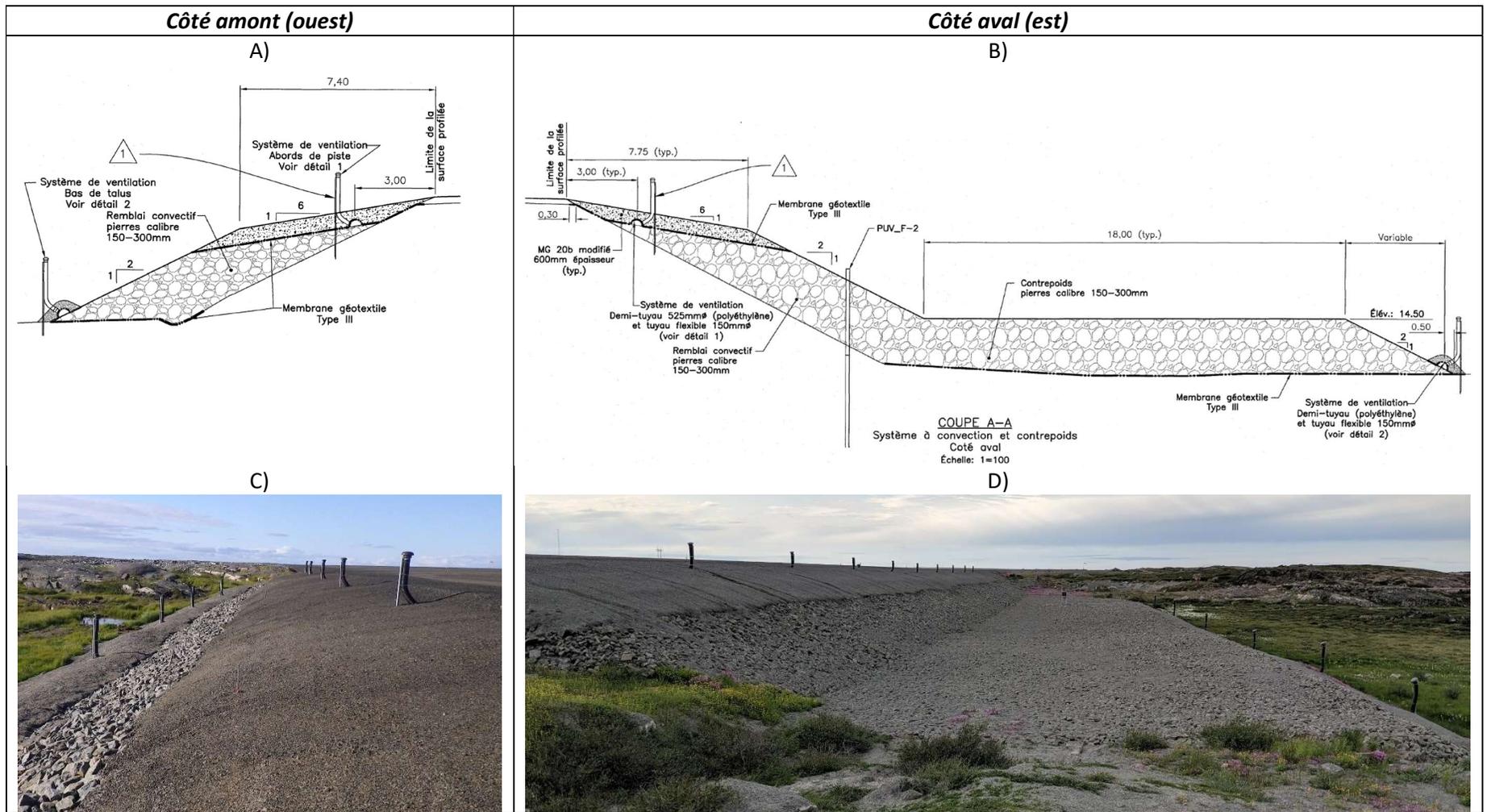


Figure 18 : Coupes des remblais à convection côté amont (A) et aval (B) de la piste d'atterrissage de Puvirniq tirées des plans originaux tel que construit (no. PA-7202-154-05-1305-1). Aperçu des remblais à convection côté amont (C) et aval (D) une fois leur mise en place.

1.6.1.4 INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DE PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION

L'instrumentation mise en place pour le suivi du régime thermique du pergélisol à long terme et de la température de l'air à Puvirnituk est composée de six câbles à thermistances automatisés et un câble à thermistances à lectures manuelles (Figure 19). Suite à la mise en place de la stratégie d'adaptation proposée en 2009, plusieurs câbles à thermistances ayant pour objectifs le suivi de performance du remblai convectif côté ouest et de la berme convective côté est ont également été rajoutés. La disposition de cette deuxième série de câbles à thermistances est spécifiée sur le plan placé en marge de la carte de localisation de l'instrumentation présentée à la figure 19. Le tableau 4 présente l'ensemble des caractéristiques techniques pour chacun des câbles à thermistances présents au site de l'aéroport de Puvirnituk. Fait à noter, les trois câbles installés dans le remblai lors de la construction de la piste en 1991 et automatisés en 2005 (HT-177, HT-296, HT-297) ne sont plus fonctionnels depuis le mois d'août 2009, car ils ont été endommagés lors de la réfection du balisage lumineux de la piste. Une réinstallation complète d'un ou deux câbles dans de nouveaux puits de forage serait pertinente afin d'assurer un suivi du régime thermique du pergélisol dans et sous le remblai en marge et au centre de la piste (voir localisations proposées à la figure 19). Également, en raison de la dégradation importante du terrain (accumulation d'eau et affaissements thermokastiques) dans le secteur de la station de référence en milieu naturel (PUV-FOR1a), il doit être envisagé de relocaliser ce câble dans un autre secteur. Cette relocalisation nécessiterait aussi la réalisation d'un nouveau puits de forages, idéalement plus profond (environ 10 à 20 m de profondeur), et une mise à niveau du système d'acquisition de données (voir localisation proposée à la figure 19).

Au mois de juillet 2019, quatre câbles à thermistances supplémentaires (2 verticaux et 2 horizontaux) branchés sur deux nouveaux systèmes d'acquisition de données (SAD) ont été installés. Il s'agit des câbles PUV-2019-F1A (câble vertical) et PUV-2019-F1B (câble horizontal) situés du côté est au chaînage 6+196 m et des câbles PUV-2019-F2A (câble vertical) et PUV-2019-F2B (câble horizontal) situés sur le côté ouest au chaînage 6+320 m. La localisation, le schéma de configuration et les spécifications techniques des thermistances pour ces nouveaux câbles sont présentés respectivement à la figure 19, à la figure 20 et au tableau 4. L'objectif des nouveaux câbles à thermistances verticaux, tous deux situés en pied de remblai, est de documenter le régime thermique actuel en marge de l'infrastructure où d'importantes accumulations de neige sont toujours en vigueur. Quant aux deux câbles horizontaux, ces derniers permettront de déterminer les différentes conditions limites à la surface et en marge de l'infrastructure afin de supporter les exercices de modélisation numérique à venir. Pour chacun des câbles horizontaux, quatre thermistances ont été réservées afin d'instrumenter deux paires de cheminées d'entrée et de sortie du côté est et du côté ouest du remblai à convection. L'objectif de ces thermistances est de vérifier, d'une part, que la circulation et l'extraction de la chaleur par le système de ventilation sont fonctionnelles et d'autre part, tenter de quantifier l'efficacité convective du système sur une base saisonnière, annuelle et interannuelle.

Afin de suivre l'évolution des tassements dans le remblai, deux plaques de tassements ont été installées au chaînage 6+180 m sur le côté est de la piste dans l'accotement en 2005. Toutefois, après les travaux d'agrandissement, ces dernières n'ont plus été retrouvées. Afin de continuer à suivre l'évolution des tassements, le BCNQ a installé de nouvelles plaques de tassement en 2011 pour remplacer celles perdues lors des travaux de rechargement tenus en 2009. Ces plaques sont installées dans l'accotement, de chaque côté du remblai, plus précisément au chaînage 6+180 m sur le côté est et au chaînage 6+300 m côté ouest (Figure 19). De plus, afin de suivre le comportement mécanique de la berme, un inclinomètre automatisé a été installé en pied de talus à la fin septembre 2009, vis-à-vis le centre de l'importante dépression. L'inclinomètre est composé de 32 segments de 0,5 m chacun, pour une longueur totale de 16 m. Il atteint une profondeur de 14 m, et les 2 m supérieurs sont installés dans la berme convective (Verreault *et al.* 2009). L'inclinomètre mesure les mouvements angulaires de chacun des joints mesurant 0,5 m à l'aide de trois accéléromètres de précision ($\pm 1,5$ mm) et les données sont enregistrées toutes les 30 minutes à l'aide d'un CR1000 de la compagnie Campbell Scientific. Pour la période de

suivi de 2009 à 2019, la série temporelle des mesures de déformations est marquée par plusieurs interruptions dans l'enregistrement des mesures inclinométriques. Ces interruptions seraient attribuables à une saturation de la mémoire du système d'acquisition de données (CR1000). Dans le cadre du projet, un module d'expansion de la mémoire a été ajouté au CR1000 afin d'assurer l'enregistrement en continu des données.

À l'automne 2018, deux sondes à neige modèle SR50A ont été ajoutées aux stations de mesure existantes (station PUV-F2 et PUV-F5) afin de suivre l'évolution des conditions d'enneigement sur les deux côtés du remblai (côté est et ouest) (Tableau 5). En complément, deux caméras ont été installées de chaque côté de la piste pour un total de quatre. Ces caméras assurent un suivi de la dynamique d'enneigement, mais aussi celle du drainage lors de la fonte printanière et d'épisodes de précipitations. Les images analysées permettront, entre autres, d'évaluer l'efficacité de la tranchée drainante à évacuer l'eau du côté amont et valider l'hypothèse de l'essorage du remblai convectif pour expliquer la persistance de l'écoulement d'eau à la base du remblai côté aval. Les emplacements des caméras sont présentés à la figure 19 et leurs spécifications techniques résumées au tableau 6.

Piste d'atterrissage de Puvirnituk

Cartographie: E. L'Hérault, 2019
Fond de carte: Orthomosaïque, Puvirnituk 2015



Légende

- ▲ Système d'acquisition de données
- ◆ Câble à thermistances automatisé
- ◆ Câble à thermistances à lecture manuelle
- ◆ Câble à thermistances automatisé (ajout 2019)
- Thermistances en surface, câble horizontal (ajout 2019)
- Caméra automatisée (ajout 2018)
- Inclinomètre vertical
- Plaque de tassement
- Ajouts à considérer
- Câble à thermistances

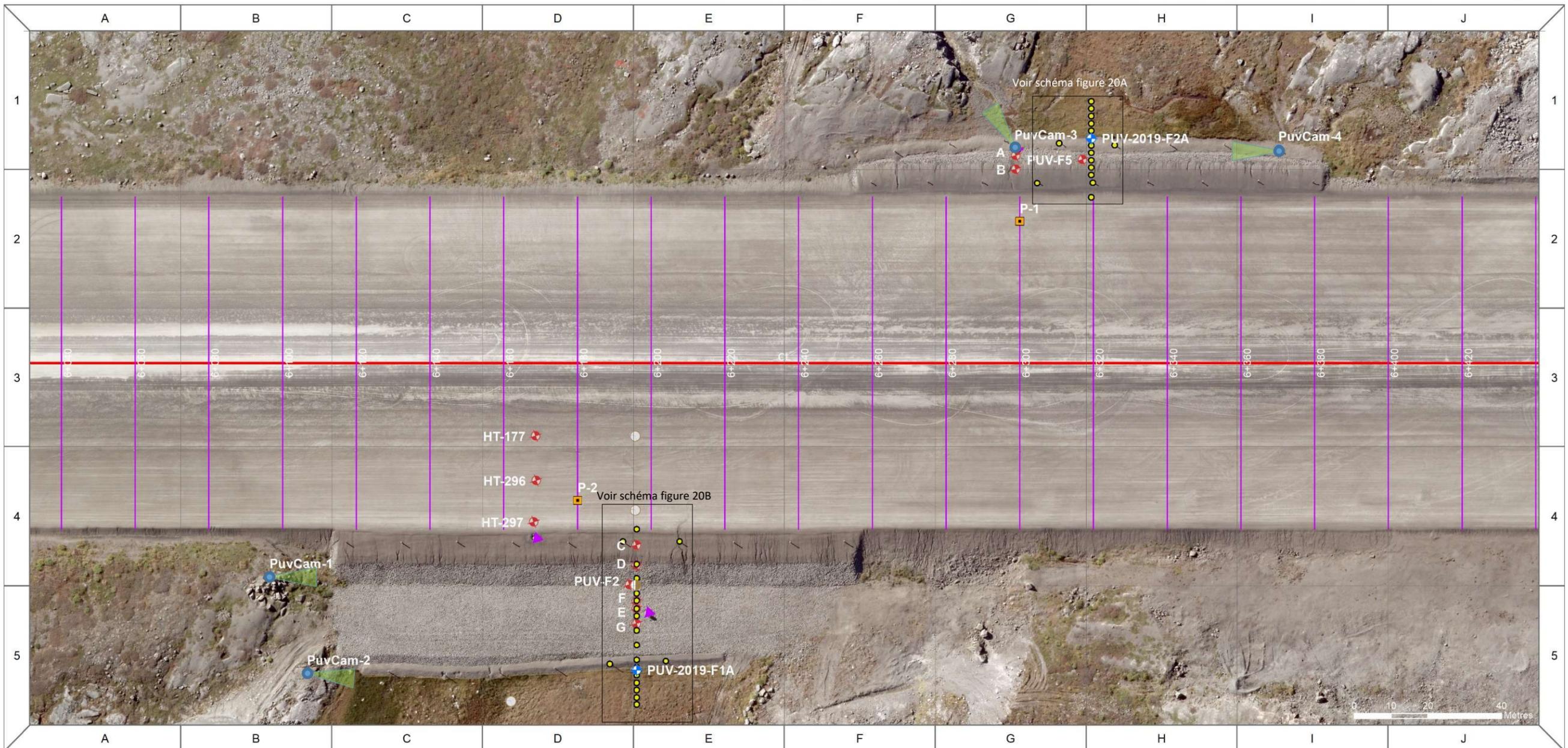


Figure 19 : Instrumentation existante et celle installée à l'automne 2018 et à l'été 2019 pour évaluer la performance des techniques d'adaptation mises en place dans la section vulnérable de la piste d'atterrissage de Puvirnituk.

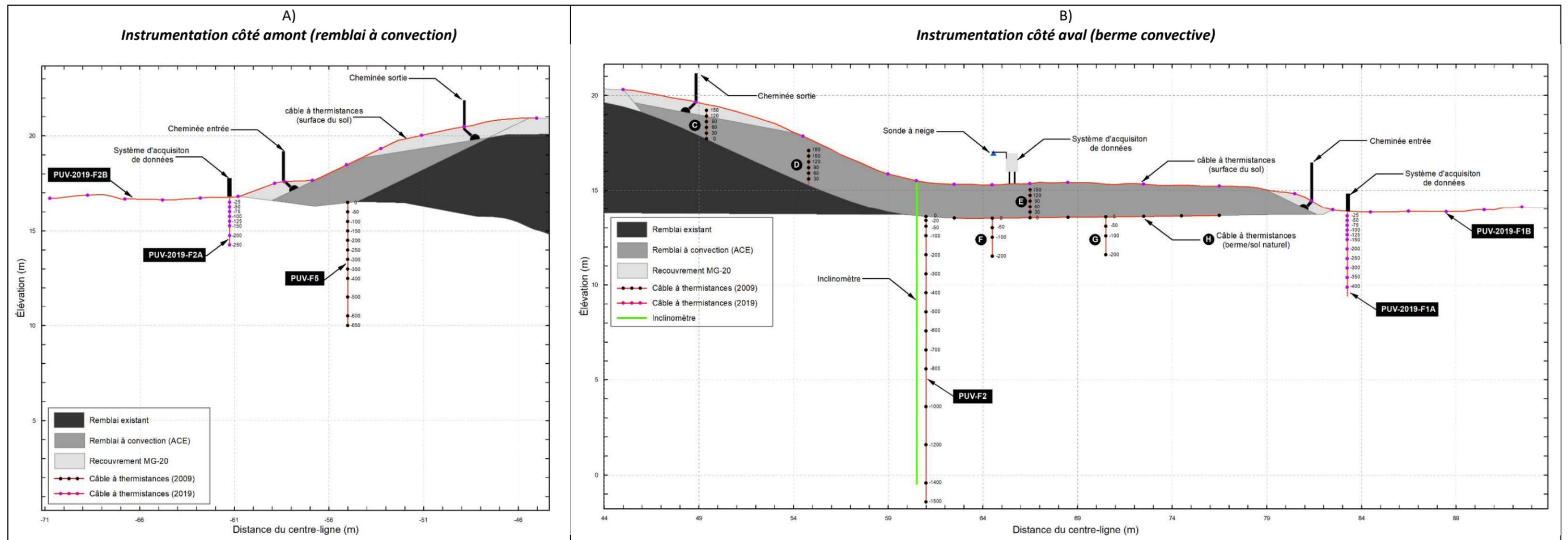


Figure 20 : Disposition de l'instrumentation installée en 2009 et complétée en 2019 pour le suivi de la performance des remblais à convection (ACE) de Puvirniq coté amont (A) et côté aval (B).

Tableau 4 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans le secteur de la piste de Puvirnituk qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.

No. forage	Localisation	Orientatio n	Longueur (m)	Nb. thermistances	Répartition des thermistances (m)	Zéro de référence	Mise en service	Type lecture/système	Paramètres mesurés	État
HT-303	Terrain naturel	Vertical	20.00	11	-1; -2; -3; -4; -6; -8; -10; -12; -15; -18; -20	Surface terrain	1991-06-24	manuelle	température du sol	Fonctionnel
HT-177	remblai	Vertical	9.10	5	-1.1; -4.1; -7.1; -8; -9.1	Surface du remblai	1991-10-06	automatisée/CR1000	température du sol	Non fonctionnel
HT-296	remblai	Vertical	8.00	11	-3.25; -3.5; -4; -4.5; -5; -5.5; -6; -6.5; -7; -7.5; -8	Surface du remblai	1991-10-06	automatisée/CR1000	température du sol	Non fonctionnel
HT-297	remblai	Vertical	10.00	11	-5.25; -5.5; -6; -6.5; -7; -7.5; -8; -8.5; -9; -9.5; -10	Surface du remblai	1991-10-07	automatisée/CR1000	température du sol	Non fonctionnel
PUV-FOR1a	Terrain naturel	Vertical	3.75	11	-0.05; -0.25; -0.5; -0.75; -1; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -3.75	Surface terrain	2005-07-03	automatisée/CR1000	température de l'air et du sol	Fonctionnel
PUV-F2	Pied de remblai	Vertical	15.00	15	0; -0.2; -0.5; -1; -2; -3; -4; -5; -6; -7; -8; -10; -12; -14; -15	Surface terrain	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
PUV-F5	Pied de remblai	Vertical	6.50	12	0; -0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -4; -5; -6; -6.5	Surface terrain	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
A	Remblai convectif	Vertical	1.50	6	0; 0.3; 0.6; 0.9; 1.2; 1.5	Surface terrain	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
B	Remblai convectif	Vertical	2.00	6	0; 0.3; 0.6; 0.9; 1.2; 1.5	Interface remblai convectif	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
C	Remblai convectif	Vertical	1.50	6	0; 0.3; 0.6; 0.9; 1.2; 1.5	Interface remblai convectif	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
D	Remblai convectif	Vertical	1.80	6	0.3; 0.6; 0.9; 1.2; 1.5; 1.8	Interface remblai convectif	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
E	Berme convective	Vertical	1.50	6	0; 0.3; 0.6; 0.9; 1.2; 1.5	Surface terrain	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
F	Sol naturel sous la berme	Vertical	2.00	3	-0.5; -1; -2	Surface terrain	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
G	Sol naturel sous la berme	Vertical	2.00	3	-0.5; -1; -2	Surface terrain	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
H	Interface berme/sol naturel	Horizontal	16.00	9	62.5; 64.5; 66.5; 68.5; 70.5; 72.5; 74.5; 76.5; 78.5	Centre ligne	2009-09-25	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
PUV-2019-F1A	Pied de remblai	Vertical	4	11	-0.25; -0.5; -0.75; -1; -1.25; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -4	Surface terrain	2019-07-18	automatisée/ULogC32	température du sol	Fonctionnel
PUV-2019-F1B	Berme convective/sol naturel	Horizontal	46	21	In#1; In#2; Out#1; Out#2; 45; 50; 55; 56.5; 59; 61; 63; 65; 69; 73; 79; 81; 83; 85; 87; 89; 91	Centre ligne	2019-07-18	automatisée/ULogC32	température du sol	Fonctionnel
PUV-2019-F2A	Pied de remblai	Vertical	2.5	8	-0.25; -0.5; -0.75; -1; -1.25; -1.5; -2; -2.5	Surface terrain	2019-07-18	automatisée/ULogC32	température du sol	Fonctionnel
PUV-2019-F2B	Remblai convectif/sol naturel	Horizontal	25	16	-45; -51; -53; -55; -57; -59; -61; -63; -65; -67; -69; -71	Centre ligne	2019-07-18	automatisée/ULogC32	température du sol	Fonctionnel

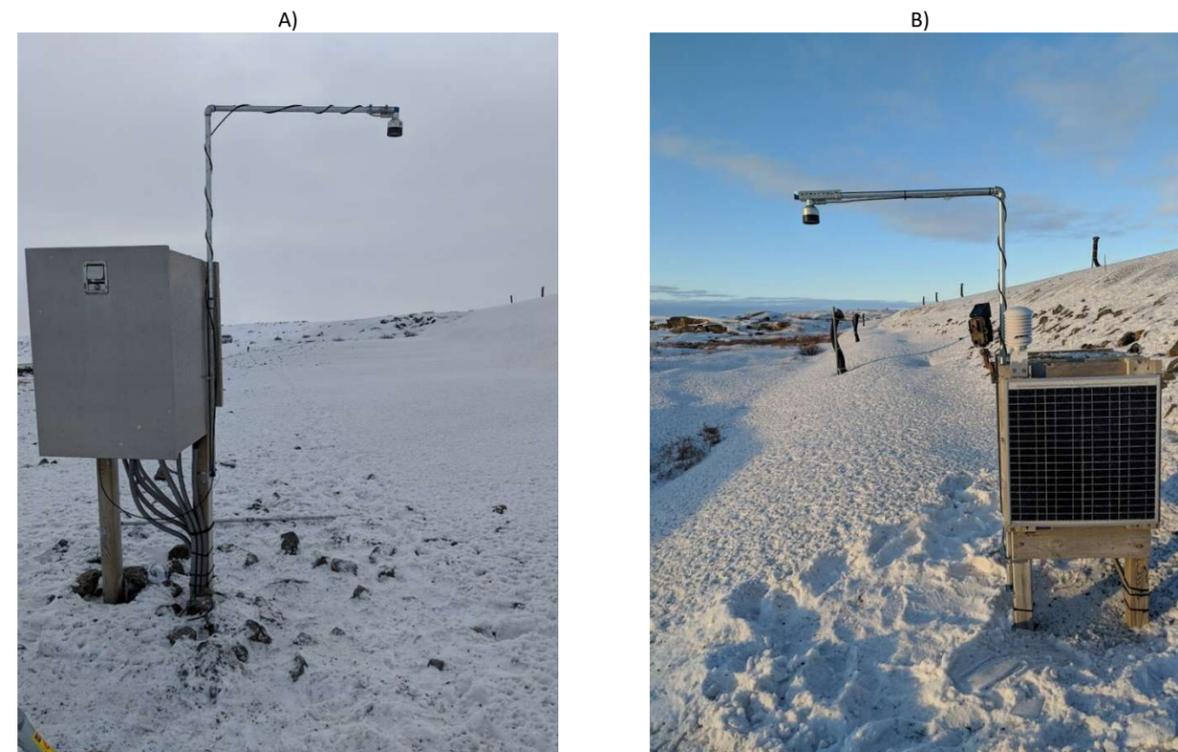


Tableau 5 : Caractéristiques techniques des sondes à neige installées aux stations PUV-F2 (A) et PUV-F5 (B) en octobre 2018, piste d'atterrissage de Puvirnituk.

Localisation	X (m)	Y (m)	Z (m)	Modèle de capteur	Hauteur (m)	Date d'installation	Fréquence de mesure
Station PUV-F2	428 031.504	6 661 535.454	15.12	SR50A	2.50	2018-10-24	Horaire
Station PUV-F5	427 883.365	6 661 597.950	16.82	SR50A	2.00	2018-10-24	Horaire
Station PUV-F5*	427 883.365	6 661 597.950	16.82	SR50A	2.45	2019-07-18	Horaire

*Nouvelle hauteur de la sonde SR50A installée à la station PUV-F5 effective depuis juillet 2019.



Tableau 6 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées sur le site de la piste de Puvirnituk en octobre 2018.

Nom	Coordonnées MTM (m)			Chaînage (m)	Distance du centre-ligne (m)	Hauteur caméra (m)		Orientation (°)	Nombre de photos/jour	Date d'installation
	x	y	z			sol	CL			
A) PuvCam-1	428 047.579	6 661 431.400	18.37	6+094	60	1.5	-1.13	105	4	2018-10-24
B) PuvCam-2	428 070.057	6 661 447.806	14.55	6+110	85	1.5	-4.95	105	4	2018-10-24
C) PuvCam-3	427 883.628	6 661 597.008	16.82	6+302	58	1.25	-3.53	226	4	2018-10-25
D) PuvCam-4	427 865.730	6 661 666.297	18.00	6+370	58	1.5	-2.5	284	4	2018-10-25

1.6.1.5 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION POUR LA PISTE D'ATERRISSAGE DE PUVIRNITUQ POUR LA PÉRIODE 2009-2020

1.6.1.5.1 PERFORMANCE THERMIQUE

Pour la période de suivi de la performance de la stratégie d'adaptation à Puvirnitua qui s'étend de 2009 à 2020, le climat récent dans la communauté de Puvirnitua a connu une légère tendance au refroidissement (Figure 21) marquée par des années particulièrement froides (Tableau 7). Ce fut le cas pour les années de 2014-2015 et 2017-2018 pour lesquelles les hivers ont été plus longs et plus froids que la moyenne et les étés plus courts et plus frais, dont particulièrement l'été de 2018. Outre l'année 2009-2010, qui a été particulièrement chaudes et qui est d'ailleurs considérée comme étant la plus chaude jamais enregistrée partout au Nunavik, le contexte climatique récent à Puvirnitua a été favorable au maintien de conditions thermiques froides au sein du pergélisol.

Du côté amont, les températures à l'interface remblai/sol naturel enregistrées par le câble F5 entre 2010 et 2017 démontrent un écart important d'environ 10°C et 14°C entre les températures maximales et minimales (Figure 23A). Malgré cet écart, les températures maximales, minimales et moyennes affichent sensiblement toutes la même tendance graduelle au refroidissement au cours de cette même période. L'hiver 2014, particulièrement froid, a permis d'atteindre les valeurs de températures minimales à l'interface remblai/sol naturel les plus basses entre 2010-2017. En moyenne autour de -5°C à -6°C, la courbe des températures minimales à l'interface remblai/sol naturel confirme la capacité du remblai à convection à extraire une certaine quantité de chaleur malgré la présence d'importante quantité de neige qui s'accumule en marge du remblai convectif du côté amont. La courbe des températures maximales à l'interface remblai/sol naturel confirme toujours la présence d'un apport estival de chaleur par conduction dans le sol sous l'infrastructure, toutefois, ce dernier a diminué graduellement depuis la mise en place du remblai à convection. Globalement, la diminution des températures maximales et minimales à l'interface remblai/sol naturel est telle que la température moyenne pour cette interface demeure, depuis 2013, sous les 0°C. Ce passage des températures moyennes à l'interface remblai/sol naturel sous 0°C favorise également un refroidissement lent et graduel des températures du sol plus en profondeur. Par exemple, les températures du sol maximales, minimales et moyennes mesurées à 6,5 m de profondeur présentent les mêmes tendances au refroidissement en plus d'une diminution des écarts entre les températures maximales et minimales (Figure 23B).

Du côté aval, l'écart entre les températures maximales et minimales à l'interface remblai/sol naturel est moins élevé (environ 9°C) que du côté amont (Figure 24A). Cet écart plus faible se traduit par des températures maximales plus basses et des températures minimales plus élevées. Outre que par la différence d'épaisseur de remblai au-dessus des câbles à thermistances entre les deux côtés, cet écart moins important entre les températures maximales et minimales peut s'expliquer par une plus faible exposition à la radiation solaire estivale et une capacité convective de la berme moins efficace en hiver. Depuis 2013, malgré des températures minimales plus élevées du côté amont, la température moyenne à l'interface remblai/sol naturel demeure inférieure à 0°C. Ce refroidissement à l'interface a permis un refroidissement des six premiers mètres du sol présent sous le remblai, se traduisant par une remontée notable du plafond du pergélisol. Néanmoins, malgré ce refroidissement des températures dans la partie superficielle du sol sous la berme, les températures enregistrées à 15 m de profondeur ont augmenté linéairement d'environ 0,4 °C de 2010 à 2017 (Figure 24B).

Le tableau 8 montre l'évolution de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel au cours de la période 2009-2019. Par rapport au niveau de référence de 2008, c'est-à-dire avant la mise en place des remblais à convection, la position maximale du front de dégel a remonté considérablement au cours des dix dernières années. Du côté amont, on enregistre une diminution de 2.87 m de l'épaisseur de la couche qui demeure non-gelée, passant de 6.75 m à 3.88 m de profondeur par rapport à l'interface sol naturel/base du remblai ce qui correspond à une remontée du plafond du pergélisol d'environ 42 %. Du côté aval, la profondeur maximale

atteinte par le front de dégel sous la berme est passée de 5.56 m à 1.87 m, représentant une remontée du pergélisol de 66 %. Du même côté, les données de températures enregistrées sous la berme convective aux emplacements des câbles à thermistances F et G (Tableau 9) démontrent également une remontée du pergélisol au cours de la même période. Pour ces deux câbles à thermistances, la profondeur de dégel étant supérieure à la position de la dernière thermistance, il est impossible de déterminer la remontée totale du plafond du pergélisol. Néanmoins, cette remontée est minimalement supérieure à 0.49 m (câble à thermistances F) et 0.84 m (câble à thermistances H) depuis la mise en place de la berme convective. D'après les données thermiques enregistrées, le régime thermique sous la berme s'est stabilisé après 3 à 4 années suivant la mise en place de la berme convective à l'automne 2009 pour ensuite fluctuer en réponse aux fluctuations climatiques interannuelles. Au cours de cette période, il est à noter qu'entre les deux câbles, les fluctuations annuelles de la profondeur de dégel sont synchrones (Figure 21). Malgré cette synchronicité, le régime thermique est généralement plus froid à l'emplacement du câble G qu'à l'emplacement du câble F qui se caractérise par des températures hivernales plus froides et une pénétration du front de dégel moins importante malgré une progression généralement plus hâtive au début de l'été. Ces différences notables dans le régime thermique, et ce, malgré la faible distance qui sépare les deux câbles (environ 6 m), pourrait s'expliquer par une accumulation de neige moins importante et plus tardive à l'emplacement du câble G et la proximité de ce dernier par rapport aux cheminées d'entrée d'air.

L'interprétation du levé géoradar réalisé sur le côté aval en ligne avec le câble à thermistances PUV-F2 permet de constater que la profondeur du front de dégel diminue graduellement en fonction de la distance du talus (Figure 25B). Cette observation coïncide avec les estimations des positions maximales du front de dégel réalisées à partir des mesures thermiques des câbles PUV-F2, F et G qui ont atteint, en 2019, des profondeurs de 3.67 m, 3.31 m et 2.96 m respectivement. Cette différence dans la position du front de dégel maximale entre les câbles s'explique possiblement par une dégradation thermique du pergélisol qui était initialement plus importante au pied de l'ancien remblai (Figure 16D) ou un refroidissement plus efficace aux extrémités de la berme en raison de plus faible épaisseur de neige et de la proximité des cheminées de ventilation d'entrée d'air. L'atténuation du signal géoradar sur les profils réalisés au mois de septembre 2019 suggère la présence d'une quantité considérable d'eau dans la couche active en pied de remblai, particulièrement du côté amont. Les données de température du sol mesurées par les nouveaux câbles à thermistances situés en pied de remblai (PUV-2019-F1A et PUV-2019-F2A), et qui seront récupérées à l'automne 2020, permettront de valider cette hypothèse.

Malgré les signes encourageant d'une reprise du pergélisol du côté amont et du côté aval (remontée du pergélisol et la résorption graduelle du talik), les températures dans les six premiers mètres du sol demeurent très près du point de congélation (Figure 22). Par conséquent, la situation demeure précaire. L'absence de câble de référence à Puvirnituaq ne permet pas de comparer les régimes thermiques mesurés sous les remblais convectifs avec un régime thermique non perturbé et représentatif des conditions en milieu naturel. Ainsi, il demeure difficile de départager la part des changements thermiques d'origine climatique versus ceux découlant de la mise en place des remblais à convection. Par exemple, à une profondeur de 15 m sous la berme (PUV-F2), les températures enregistrées ont augmenté linéairement d'environ 0,4 °C tout au long de la période de suivi (Figure 24B). Cette augmentation récente et constante des températures du sol en profondeur peut être le résultat d'un réajustement thermique en réponse au réchauffement des températures de l'air observées au Nunavik entre 2000-2010 ou simplement d'un réajustement du profil thermique en réponse à l'ajout d'une épaisseur d'environ 2 m de matériau sur le sol naturel.

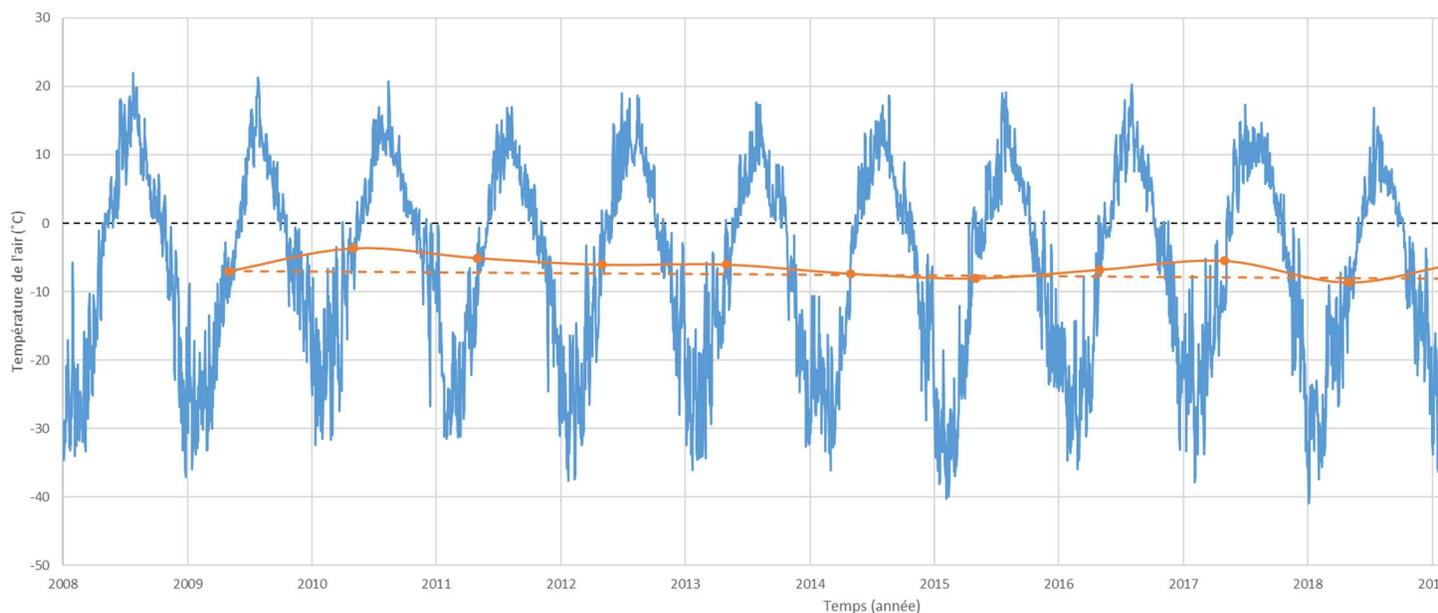


Figure 21 : Variation de la température journalière de l'air (TMJA) et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) à Puvirnituk pour la période 2008-2020. Les températures journalières et annuelles ont été calculées à partir des températures de l'air horaires mesurées à la station de référence PUV-FOR1A.

Tableau 7 : Variables climatiques pour la période 2008-2020 calculées à partir des températures journalières de l'air (TMJA) mesurées à la station de référence de la piste d'atterrissage de Puvirnituk.

Année climatique		2008-09	2009-10	2010-11	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19
Saison de gel	Début	29-oct	19-oct	04-nov	23-oct	05-oct	24-oct	17-oct	10-oct	11-oct	16-oct	01-nov
	Fin	02-juin	11-mai	01-juin	29-mai	26-mai	20-mai	31-mai	01-juin	08-mai	09-juin	16-juin
	Durée	217	205	210	220	234	209	227	236	210	237	216
	Moyenne T°C	-16.59	-12.82	-13.57	-15.01	-13.88	-17.95	-16.98	-15.41	-15.46	-15.85	-15.85
Indice de gel (FI)		-3599	-2629	-2851	-3303	-3247	-3752	-3854	-3637	-3247	-3757	-3757
Saison de dégel	Début	03-juin	12-mai	02-juin	30-mai	27-mai	21-mai	01-juin	02-juin	09-mai	10-juin	17-juin
	Fin	18-oct	03-nov	22-oct	04-oct	23-oct	16-oct	09-oct	10-oct	15-oct	07-oct	24-oct
	Durée	138	176	143	128	150	149	131	131	160	120	138
	Moyenne T°C	8.06	7.07	7.40	9.32	6.20	7.43	7.32	8.69	7.60	5.49	8.06
Indice de dégel (TI)		1112	1243	1059	1193	929	1108	959	1139	1217	658	1112
Moyenne annuelle*		-7.00	-3.64	-5.08	-6.06	-6.04	-7.39	-8.09	-6.81	-5.49	-8.68	-7.00
Ratio (FI/TI)		3.24	2.11	2.69	2.77	3.49	3.39	4.02	3.19	2.67	5.71	3.24
Nombre de jour		355	381	353	348	384	358	358	367	370	357	355

*Valeur approximative, année climatique incomplète.

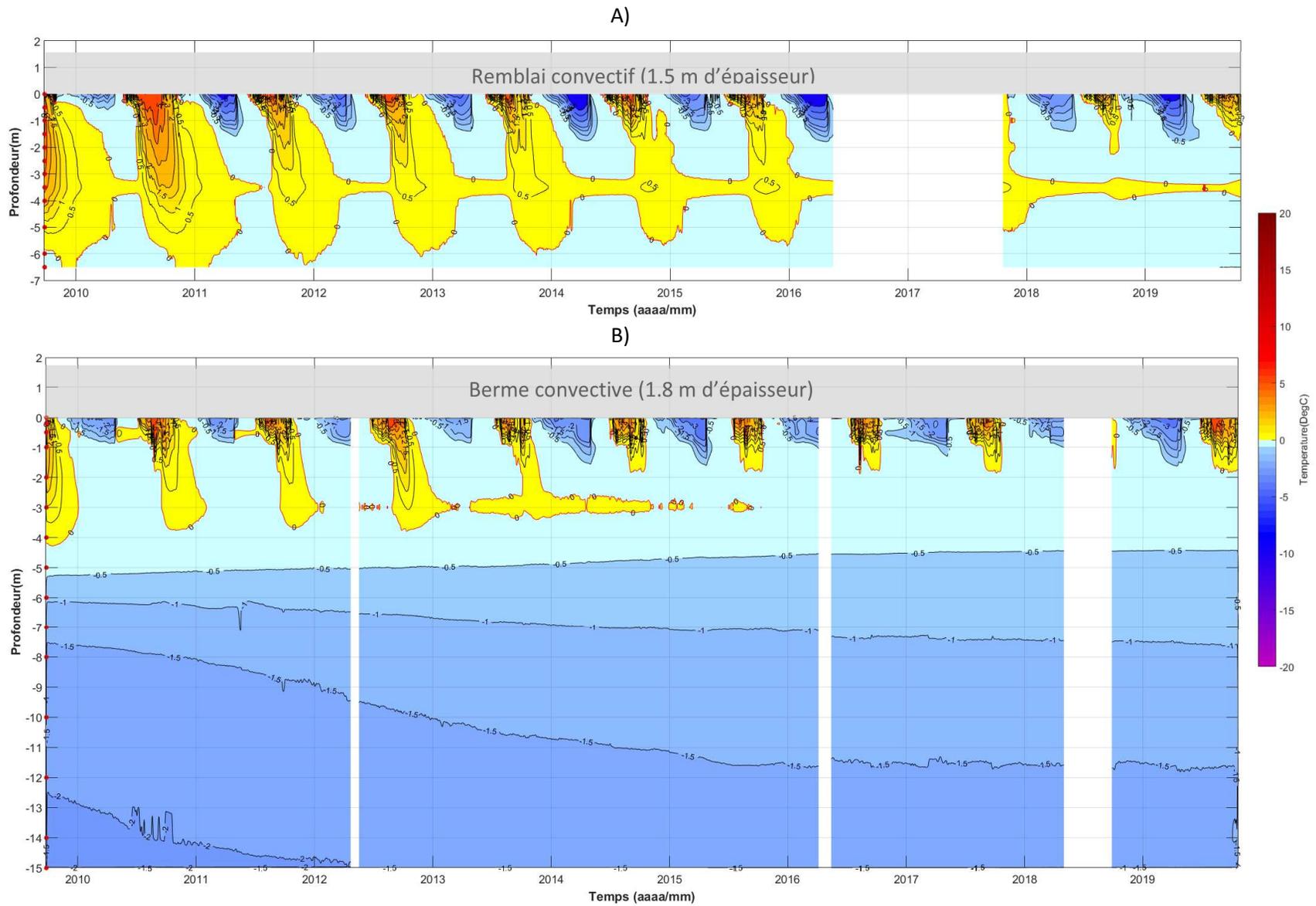


Figure 22 : Variation journalière de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps A) sous le remblai convectif côté amont (câble à thermistances PUV-F5) et B) sous la berme convective côté aval (câble à thermistances PUV-F2). Période de juillet 2009 à octobre 2019, piste d'atterrissage de Puvirnitug.

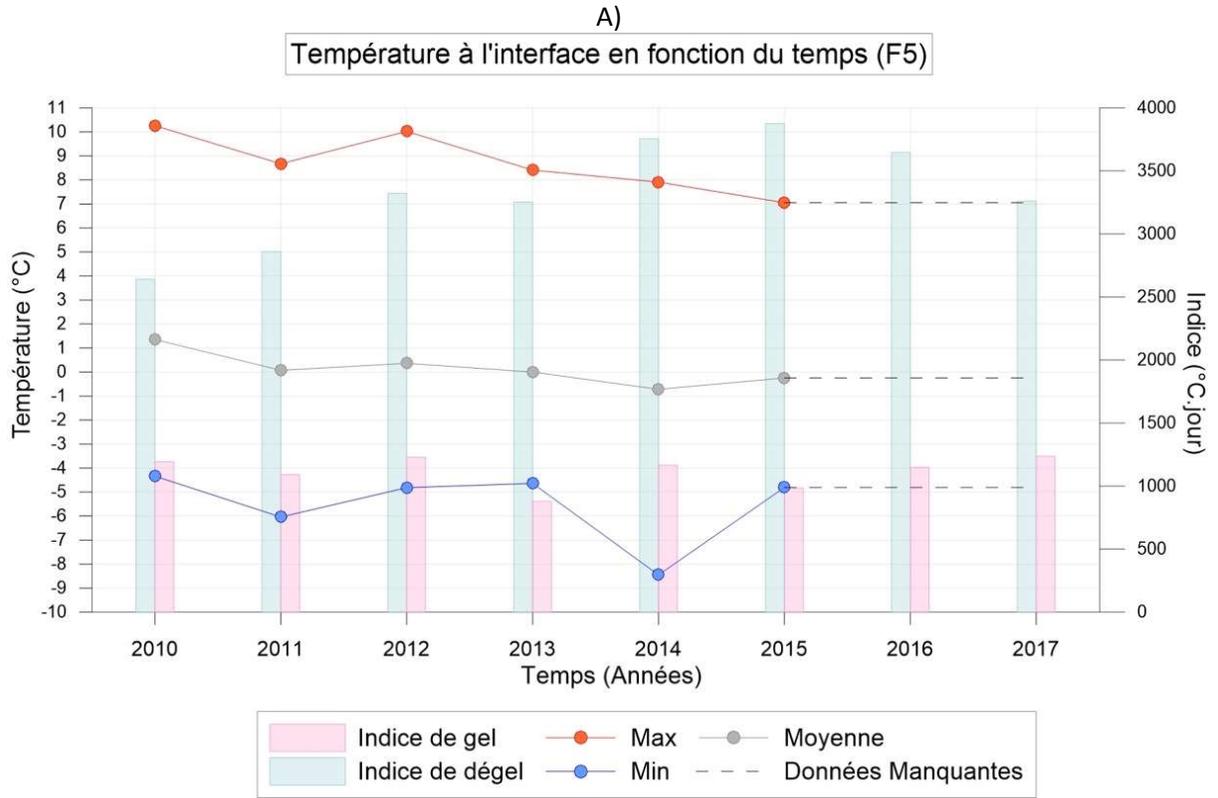


Figure 23 : Températures maximales, minimales et moyennes A) à l'interface remblai convectif/sol naturel et B) à 6.5 m de profondeur mesurées par le câble à thermistances PUV-F5 pour la période 2010-2017, piste d'atterrissage de Puvirnituaq.

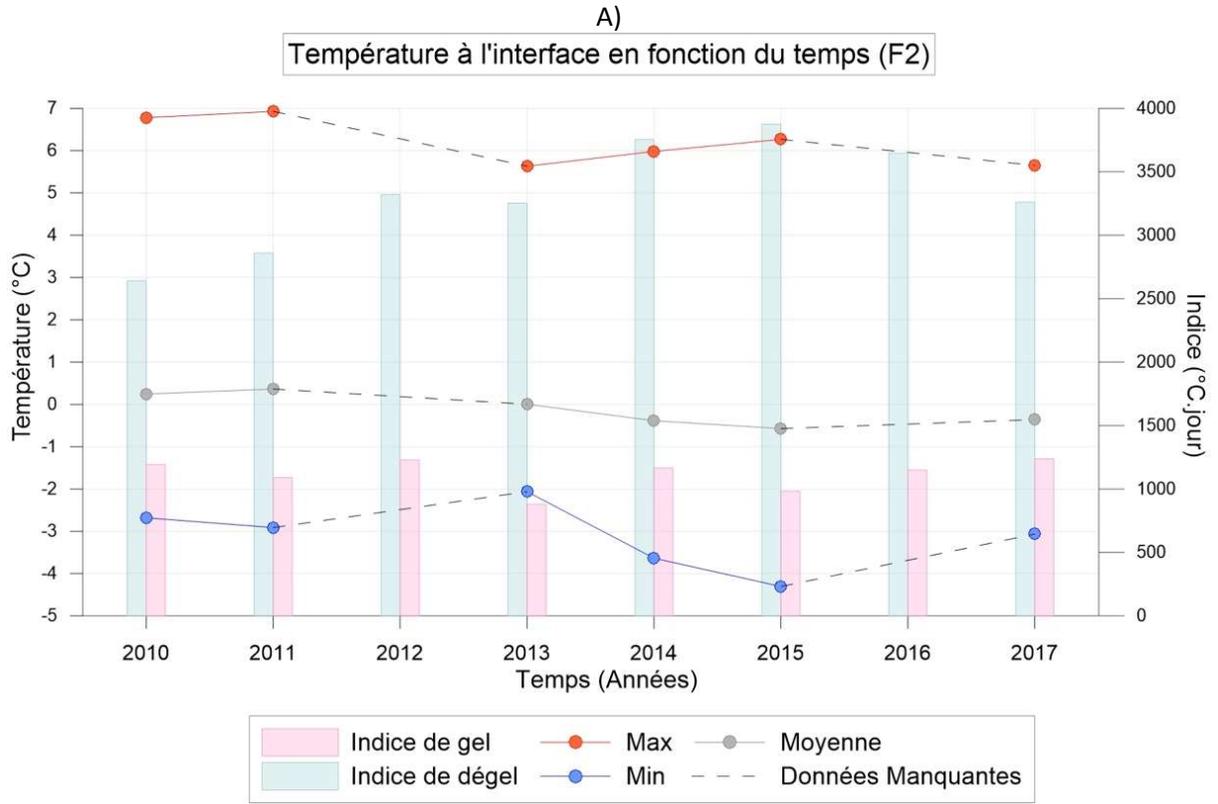
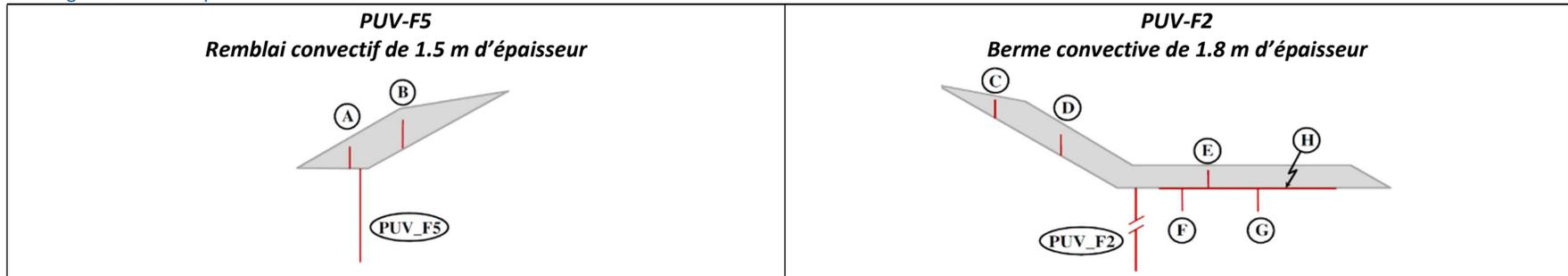


Figure 24 : Températures maximales, minimales et moyennes A) à l'interface remblai convectif/sol naturel et B) à 15 m de profondeur mesurées par le câble à thermistances PUV-F2 pour la période 2010-2017, piste d'atterrissage de Puvirnitug.

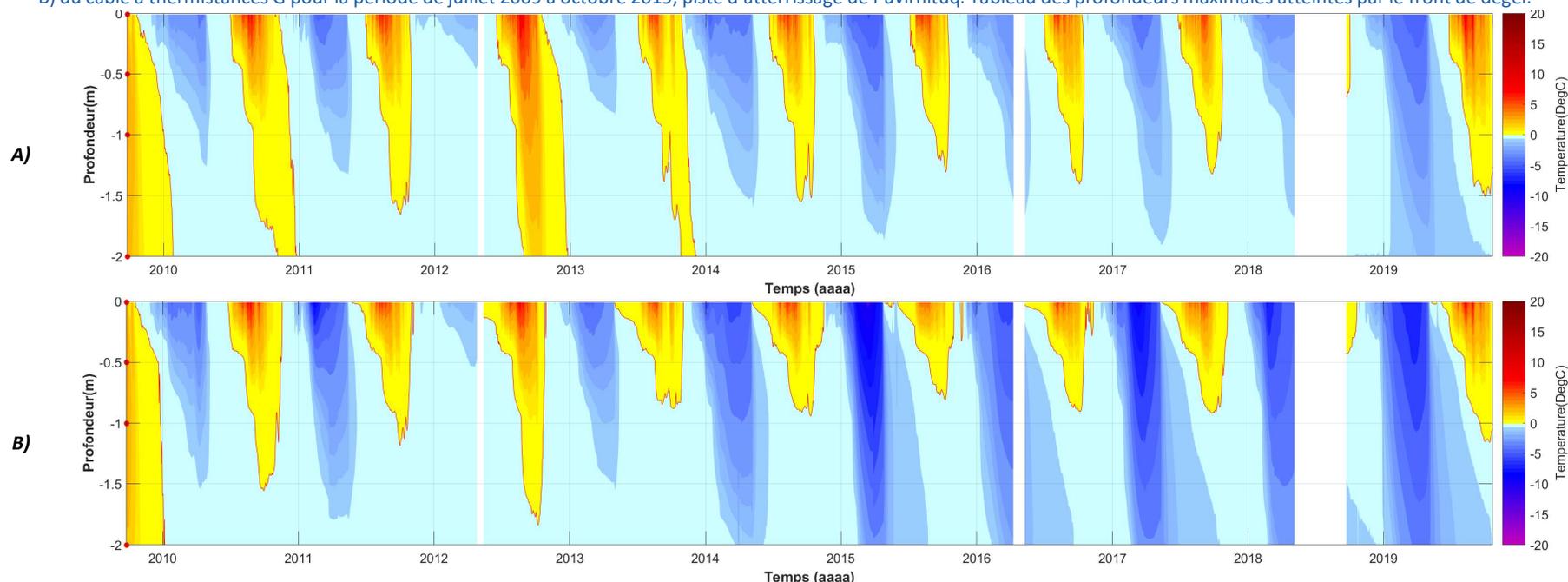
Tableau 8 : Profondeurs maximales atteintes par le front de dégel au cours de la période 2009-2019 à l'emplacement des câbles à thermistances PUV-F5 et PUV-F2, piste d'atterrissage de Puvirnituq.



Saison de dégel	Position du front de dégel (m)		Δ (m)		Position du front de dégel (m)		Δ (m)	
	Interface sol naturel/remblai	Surface du remblai	↑remontée ↓approfondissement	↑remontée ↓approfondissement	Interface sol naturel/remblai	Surface du remblai	↑remontée ↓approfondissement	↑remontée ↓approfondissement
2008	-6.75*	n.a	n.a	n.a	-5.56	n.a	n.a	n.a
2009	<-6.50	<-8.13	n.a	n.a	-4.29	-6.09	↑1.27	↑22.9
2010	<-6.50	<-8.13	n.a	n.a	-3.76	-5.56	↑0.52	↑12.2
2011	-6.38	-7.88	↑0.37	↑5.5	-3.69	-5.49	↑0.08	↑2.0
2012	-6.12	-7.62	↑0.26	↑4.1	-3.84	-5.64	↓0.15	↓4.1
2013	-6.06	-7.56	↑0.06	↑0.9	-3.42	-5.22	↑0.41	↑10.8
2014	-5.68	-7.18	↑0.38	↑6.3	-3.32	-5.12	↑0.11	↑3.1
2015	-5.71	-7.21	↓0.03	↓0.6	-3.17	-4.97	↑0.15	↑4.4
2016	n.d	n.d	n.a	n.a	-1.77	-3.57	↑1.40	↑44.2
2017	-5.19	-6.69	n.a	n.a	-1.86	-3.66	↓0.09	↓4.8
2018	-3.98	-5.48	↑1.21	↑23.3	-1.75	-3.55	↑0.11	↑5.8
2019	-3.88	-5.38	↑0.10	↑2.4	-1.87	-3.67	↓0.12	↓6.9
Remontée du front de dégel (2019 versus 2008)			↑2.87	↑42.4	Remontée du front de dégel (2019 versus 2008)		↑3.69	↑66.4

*Lectures manuelles effectuées le 29 octobre 2008 (L'Hérault *et al.*, 2012)

Tableau 9 : Variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps sous la berme convective A) à l'emplacement du câble à thermistances F et B) du câble à thermistances G pour la période de juillet 2009 à octobre 2019, piste d'atterrissage de Puvirniq. Tableau des profondeurs maximales atteintes par le front de dégel.



Saison de dégel	Câble à thermistances F (Berme convective de 1.8 m d'épaisseur)				Câble à thermistances G (Berme convective de 1.8 m d'épaisseur)			
	Position du front de dégel (m)		Δ (m)		Position du front de dégel (m)		Δ (m)	
	Interface sol naturel/remblai	Surface du remblai	↑remontée ↓approfondissement	↑remontée ↓approfondissement	Interface sol naturel/remblai	Surface du remblai	↑remontée ↓approfondissement	↑remontée ↓approfondissement
2008	n.d	n.a	n.a	n.a	n.d	n.a	n.a	n.a
2009	<-2.00	<-3.80	n.a	n.a	<-2.00	<-3.80	n.a	n.a
2010	<-2.00	<-3.80	n.a	n.a	-1.56	-3.36	>↑0.44	>↑22.0
2011	-1.66	-3.46	>↑0.34	>↑17.0	-1.19	-2.99	↑0.37	↑23.7
2012	<-2.00	<-3.80	>↓0.34	>↓17.0	-1.84	-3.64	↓0.65	↓54.6
2013	<-2.00	<-3.80	n.a	n.a	-0.88	-2.68	↑0.96	↑52.2
2014	-1.55	-3.35	>↑0.45	>↑22.5	-0.94	-2.74	↓0.06	↓6.8
2015	-1.31	-3.11	↑0.14	↑9.0	-0.81	-2.61	↑0.13	↑13.8
2016	-1.41	-3.21	↓0.10	↓7.6	-0.90	-2.70	↓0.09	↓11.1
2017	-1.32	-3.12	↑0.09	↑6.4	-0.92	-2.72	↓0.02	↓2.2
2018	-0.68*	-2.48	↑0.64	↑48.5	-0.43*	-2.23	↑0.49	↑53.3
2019	-1.51	-3.31	↓0.83	↓122.1	-1.16	-2.96	↓0.73	↓158.7
Remontée du front de dégel 2019 versus 2008			>↑0.49	>↑24.5			>↑0.84	>↑42.0

*Données incomplètes.

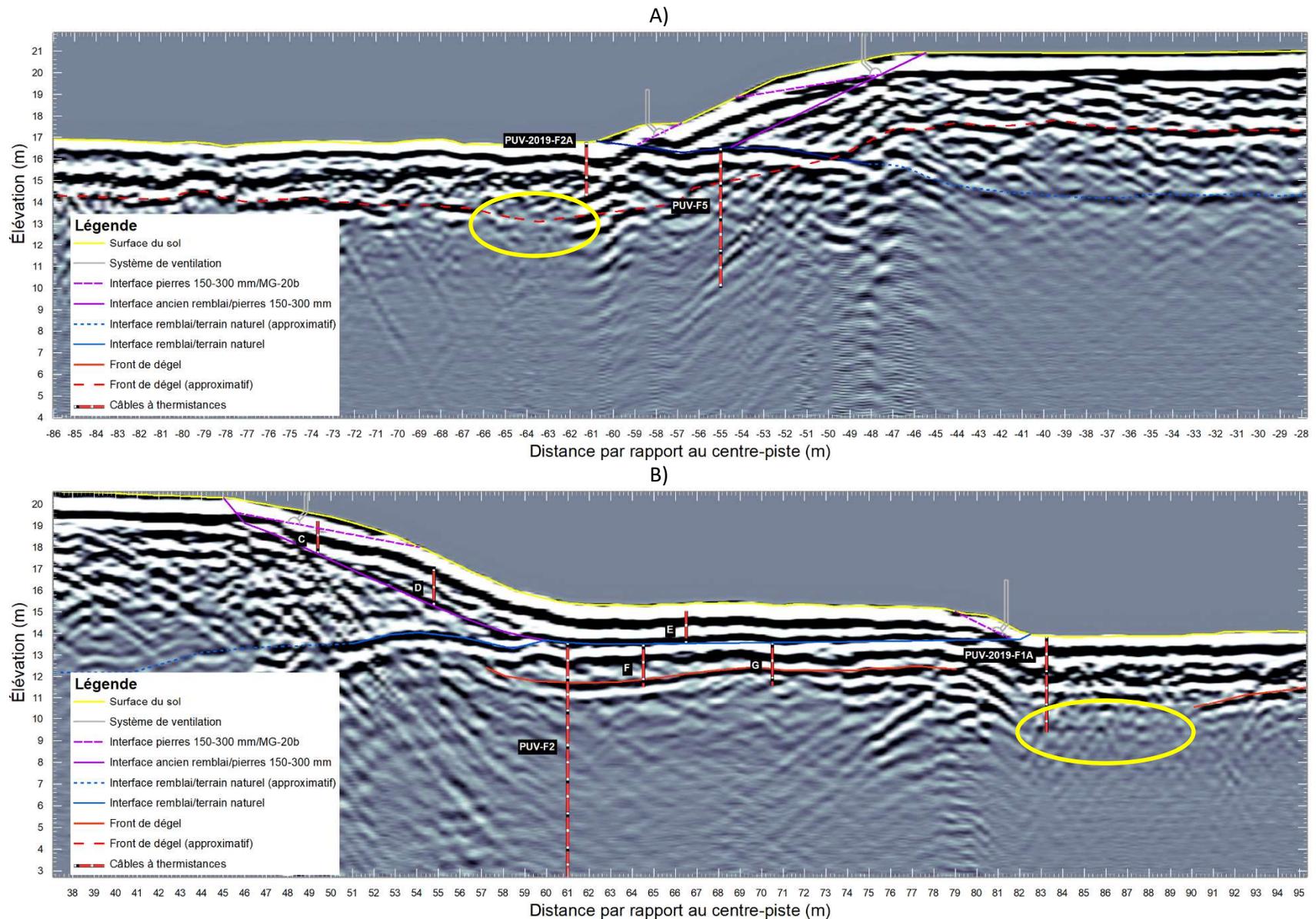


Figure 25 : Interprétation des levés de géoradar transversaux à l'axe de la piste de Puvirniq réalisés en septembre 2019 A) du côté amont et B) du côté aval. L'atténuation du réflecteur identifié comme étant le front de dégel suggère la présence d'eau en pied de remblai (zone encerclée jaune).

1.6.1.5.2 PERFORMANCE MÉCANIQUE

Entre 2009 et 2012, des déplacements de quelques centimètres s'étaient rapidement développés après la construction du remblai et de la berme convective pour ensuite se stabiliser graduellement (Gravel-Gaumond et Doré, 2013). Selon ces mêmes auteurs, les déplacements enregistrés en fonction de la profondeur au cours des trois premières années suivant la mise en place de la berme convective s'étaient développés principalement à trois endroits, soit dans le centre de la berme convective à environ 1 m de profondeur, entre 2.5 et 4 m de profondeur et entre 4.5 et 6.5 m de profondeur. En fonction de la signature caractéristique du profil de déformation du sol (profil en « S ») qui met en évidence des mouvements en direction opposée (Figure 26), Gravel-Gaumond et Doré (2013) avaient associé ces déformations à un mouvement de compression verticale et non à un mouvement d'initiation d'une rupture sous le remblai. D'après ces mêmes auteurs, cette compression verticale des sols serait le résultat de la consolidation de la couche de silt argileux dégelée sous la contrainte verticale appliquée au-dessus du sol naturel par l'ajout de la berme convective. En cohérence avec cette hypothèse, les plus grands déplacements au cours des trois années de suivi post adaptation se sont produits lors de la première année avec des déplacements à 3.5 et 5 m de profondeur de 26 et 38 mm respectivement pour ensuite diminuer en amplitude au cours de la deuxième et troisième année. Les déplacements relativement faibles et de sens opposé entre la section supérieure du sol et la section inférieure avaient écarté l'hypothèse d'un possible mouvement de rupture en développement sous le remblai confirmant par le fait même l'efficacité de la berme comme méthode de stabilisation mécanique.

Les plus récentes données enregistrées par l'inclinomètre, qui couvrent désormais la période 2009-2019, ont été compilées puis analysées dans le cadre du présent projet. Les déplacements cumulatifs sur une base annuelle en fonction de la profondeur sont présentés à la figure 26. Tel qu'initialement présenté par l'analyse réalisée par Gravel-Gaumond et Doré (2013), les déplacements se concentrent toujours à l'intérieur de trois principales zones (zone 1, 2 et 3, voir figure 26) et les profils de déformations présentent toujours une allure similaire en forme de « S ». Toutefois, au lieu de montrer une diminution d'amplitude en fonction du temps, signature typique d'une consolidation de la couche de silt argileux, les déplacements au sein de ces trois zones ont continué d'évoluer voire se sont accrus au cours des 4 dernières années (2016 à 2019 inclusivement), particulièrement en 2018 durant laquelle les maximums de déplacement ont été atteints. En 2018, les déplacements cumulatifs maximums ont atteint 40-50 mm, 50-60 mm, 30-40 mm et <10 mm pour les zones 1, 2, 3 et 4 respectivement. Les déplacements maximums enregistrés se limitent à la couche de silt-argileux et particulièrement dans la zone du dépôt dont la température demeure supérieure à -1 °C tout au long de l'année (isotherme -1 °C, figure 26). En deçà de la position de l'isotherme -1 °C (≈ 9.8 m de profondeur), les déplacements enregistrés sont très faibles et s'expliquent possiblement par : la diminution en fonction de la profondeur des contraintes induites par le poids de la berme (Théorie de Boussinesq), un changement dans la stratigraphie et en l'occurrence le comportement mécanique des sols (transition entre un dépôt de silt-argileux à un dépôt de till) et une température légèrement plus froide qui permet d'accroître la résistance du sol.

Pour les quatre zones identifiées à la figure 26, l'évolution des déplacements cumulatifs sur une base mensuelle est présentée à la figure 27A et B. L'évolution des déplacements sur une base mensuelle suggère une certaine saisonnalité dans les vitesses de déplacement qui s'accroissent légèrement entre les mois de juillet et août au cours desquels les températures dans le sol sont les plus chaudes. Kurz *et al.*, (2018) avaient observé une saisonnalité similaire dans les vitesses de déplacement sous un remblai de route construit en zone de pergélisol discontinu situé dans le nord du Manitoba. Malheureusement, l'absence d'enregistrement en période hivernale ne permet pas d'avoir un suivi complet du cycle saisonnier de déformation, mais tout porte à croire que le refroidissement graduel des températures dans le sol au début de l'hiver ralentit les vitesses de déplacements. Fait intéressant, principalement pour les zones 1, 2 et 3, l'inclinomètre enregistre des positions suggérant un déplacement opposé à celui enregistré à la fin de la saison de dégel précédente. Ces déplacements opposés pourraient s'expliquer par

la formation de lentilles de glace dans la couche active lors de son regel. Cette divergence non conventionnelle de la direction des déplacements enregistrés par l'inclinomètre se produit non seulement sur une base saisonnière, mais également d'une année à l'autre. Cette observation pourrait supporter l'hypothèse qu'en l'absence d'un gradient de pente important qui oriente les déplacements du sol, les déplacements enregistrés pourraient être le résultat d'une combinaison de mouvements associés au soulèvement gélocal saisonnier et à la consolidation du dépôt de silt-argileux sous le poids de la berme. Il n'est pas à exclure qu'une partie des déplacements plus en profondeur pourrait provenir également du fluage interne en compression et en cisaillement sous le poids de la berme, mais également sous celui du remblai qui mesure plus de 7 m d'épaisseur dans cette section de l'infrastructure.

Afin de corréliser les déplacements enregistrés par l'inclinomètre à de possibles déformations de surface, une comparaison des jeux de données LIDAR de 2010 et de 2016 a été effectuée. Les deux relevés disponibles ont été réalisés respectivement le 23 août 2010 et 25 juillet 2016. Le jeu de données de 2016 constitue la surface de référence à partir de laquelle les données de 2010 ont été comparées en utilisant l'algorithme de comparaison de nuage de points M3C2 et le logiciel CloudCompare V2.11.0. Le résultat de cette analyse entre les deux nuages de points a permis d'obtenir une carte de déplacements différentiels de la surface survenus entre 2010 et 2016 (Figure 28A). Il est toutefois à noter qu'en raison de l'imprécision des différents jeux de données LIDAR inhérente aux erreurs de positionnement (planimétrique ± 25 cm et altimétrique ± 15 cm) et à l'effet de la rugosité de la surface sur la distribution des mesures (impossibilité d'obtenir la même position de mesure entre deux relevés), ces résultats doivent être interprétés avec prudence. Pour cette raison, seules les zones de mouvements importants (mouvements supérieurs à ± 10 cm) par rapport à la surface de référence de 2016 sont considérées dans l'analyse. Sommes toutes, malgré cette imprécision, certains patrons de déformations sont observables et permettent d'identifier des zones de mouvements (Figure 28A).

Au niveau de la berme convective, on remarque deux zones de tassements : une sur le talus en amont de l'inclinomètre vertical et l'autre sur la berme à l'emplacement de la résurgence d'eau observée en 2009 avant les travaux d'adaptation (Figure 28C). L'analyse des données LIDAR estime l'ampleur de ces tassements compris entre 5 et 20 cm. Pour la section du talus en amont de l'inclinomètre, ces tassements pourraient expliquer la persistance des mouvements enregistrés par l'inclinomètre dans les zones 1 et 2 du profil de sol (Figure 26). Outre ces deux zones de tassements identifiées du côté aval, une autre zone attire l'attention. Il s'agit d'une section de la route de contournement située à une trentaine de mètres du pied de la berme convective. Même si cette zone ne comporte aucun risque pour la piste, elle témoigne de la fragilité du pergélisol dans le secteur. Selon les données LIDAR, la surface s'est affaissée de plus de 50 centimètres par endroit entre 2010 et 2016. Des photos prises de ce secteur en 2010 (Figure 28D) et 2015 (Figure 28E) confirment l'importance du tassement qui affecte cette section de la route de contournement. L'entrave à l'écoulement d'eau que provoque la route et l'absence de ponceau semblent vraisemblablement à l'origine de la dégradation rapide du pergélisol dans ce secteur. Toutefois, pour valider cette hypothèse, des études supplémentaires sont requises.

En plus de l'identification de zones de tassements, l'analyse de données LIDAR suggère le soulèvement de certaines zones de la berme qui varie généralement entre 5 à 20 cm par endroits (Figure 28A). Deux hypothèses pourraient expliquer ces soulèvements et un effet cumulatif n'est pas à exclure. Il pourrait s'agir d'une part d'un soulèvement gélocal induit par la remontée graduelle du pergélisol suite à la mise en place de la berme convective et d'autre part l'accumulation de gravier soufflé lors des opérations de déneigement (Figure 29A). De manière générale, le remblai convectif du côté amont présente que très peu de déformations à l'exception de quelques zones de soulèvements probablement attribuable à des accumulations de gravier locales résultant des opérations de déneigement. En ce qui concerne la surface de roulement de la piste, cette dernière présente également que très peu de déformations significatives hormis quelques zones de dépressions au centre de la piste attribuable à l'érosion de la surface par le passage répété des avions. Les hauts de talus au sud et au nord des remblais convectifs

présentent quelques tassements qui s'expliquent par le déplacement du gravier vers le bas de pente soit par l'eau ou simplement la gravité (Figure 29B).

Les inspections visuelles réalisées par l'équipe de recherche lors des visites sur le terrain à l'été 2018 et 2019 n'ont pas révélé la présence de tassements ou des fissures de tension dans les talus et les accotements qui pourraient indiquer une certaine instabilité mécanique du remblai. Toutefois, quelques petites fissures, autant du côté amont que du côté aval, ont été observées au-dessus des systèmes de ventilation au pied des remblais (Figure 30). Ces fissures avaient également été observées lors d'une tournée de vérification organisée par le ministère en 2013 et lors des travaux de Gravel-Gaumond et Doré 2013 et 2014. Ces fissures suggèrent un léger affaissement des pieds de remblai provoqué par une dégradation très localisée du pergélisol en marge des remblais convectifs à cause de l'effet isolant d'importantes accumulations de neige. Dans ces zones en marge des remblais convectifs, l'effet de refroidissement prévu par la convection initiée en hiver ne s'étend que sous le remblai et non en périphérie, ce qui en fait des zones sensibles susceptibles de se dégrader.

Dans le cadre du projet, une compilation des mesures de tassement prélevé aux bornes de tassement par le personnel du MTQ était prévue afin de corroborer les mesures de déformations enregistrées par l'inclinomètre vertical, les analyses des données LIDAR et les observations de terrain. Malheureusement, en date de la rédaction de ce rapport, aucune de ces mesures n'a été mise à jour par le MTQ, donc toujours indisponibles.

Des analyses de stabilité réalisées par Gravel-Gaumond et Doré (2013) avaient également démontré que la stabilité du remblai est fortement dépendante de la géométrie que prend l'interface entre la zone dégelée et le pergélisol. La remontée post-adaptation du plafond du pergélisol, confirmée par les lectures du câble à thermistances PUV-F2 et les relevés géoradar, limite actuellement la formation d'un cercle de rupture de grande dimension. Par conséquent, le comportement thermique encourageant du pergélisol sous la berme ne justifie pas la mise à jour d'une telle analyse, d'autant plus que la berme érigée agit désormais comme un contrepoids considérable qui malgré une formation éventuelle d'un cercle de rupture suite à une dégradation marquée du pergélisol permettrait d'assurer la stabilité de l'ouvrage.

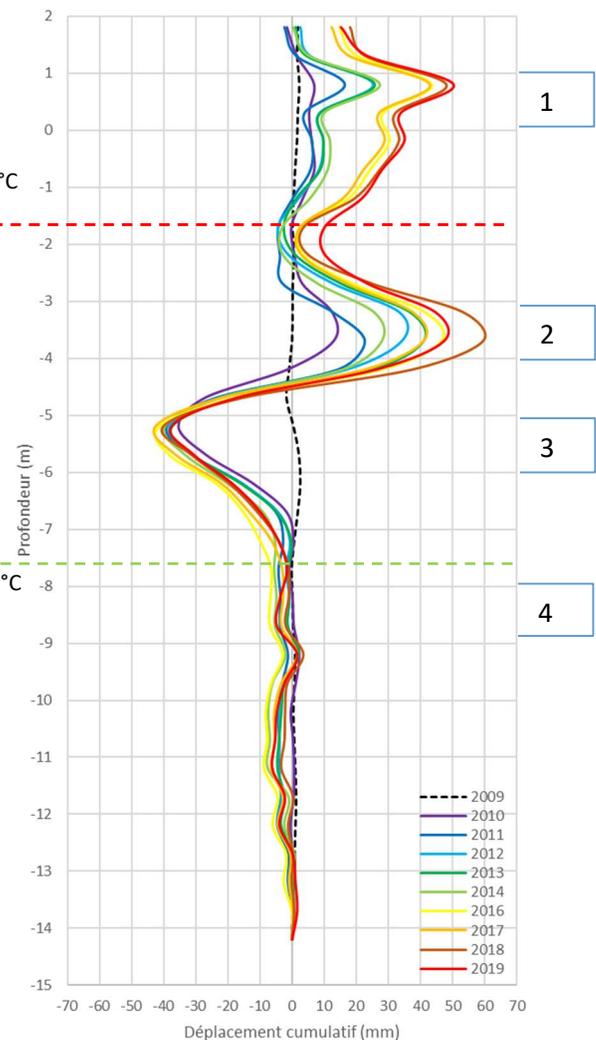
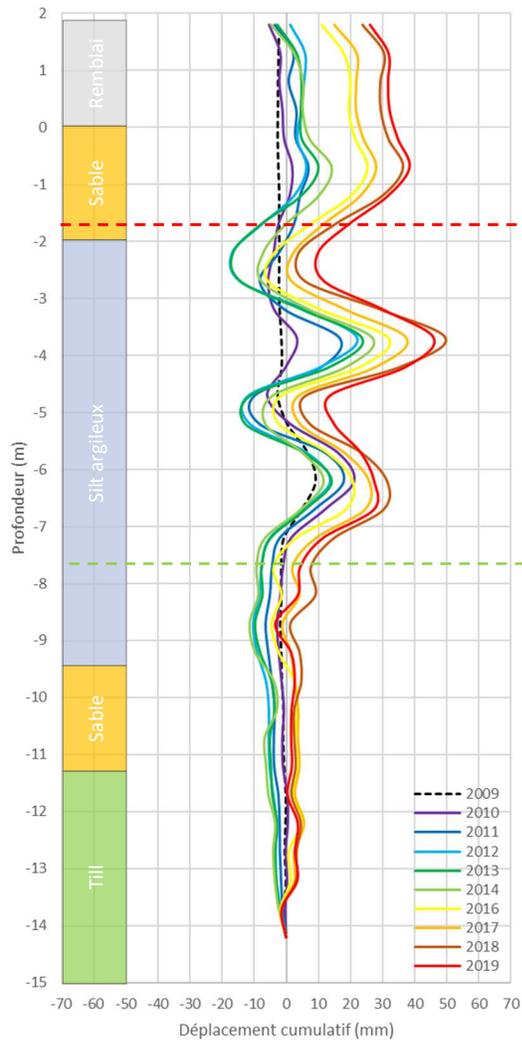
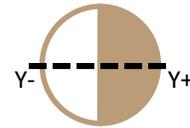
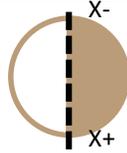
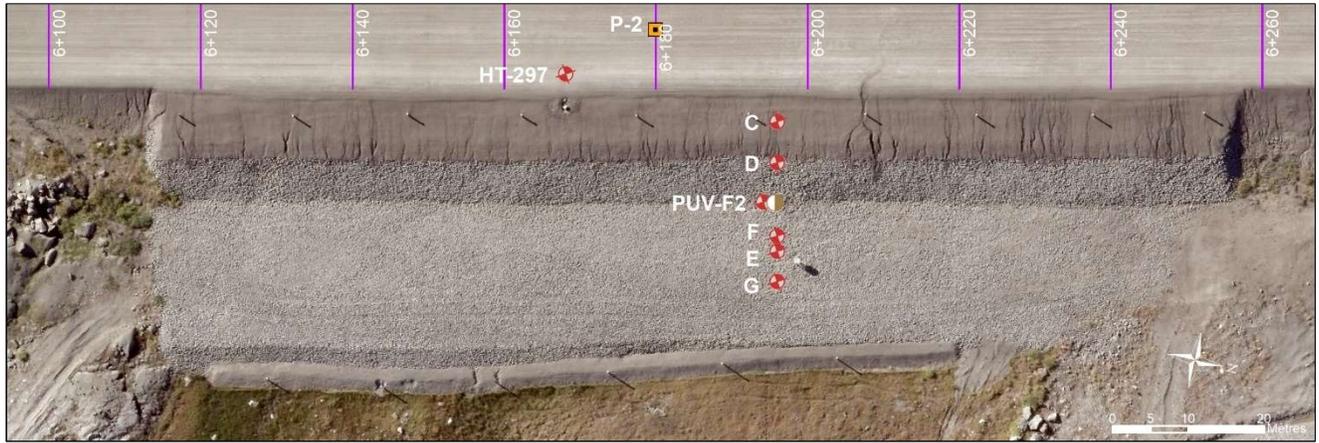


Figure 26 : Déplacements moyens annuels en fonction de la profondeur enregistrés par l'inclinomètre vertical situé à proximité du câble PUV-F2 (côté aval de la piste) pour la période 2009-2019. L'axe X-X' est transversal et l'axe Y-Y' longitudinal à la piste de Puvirniq.

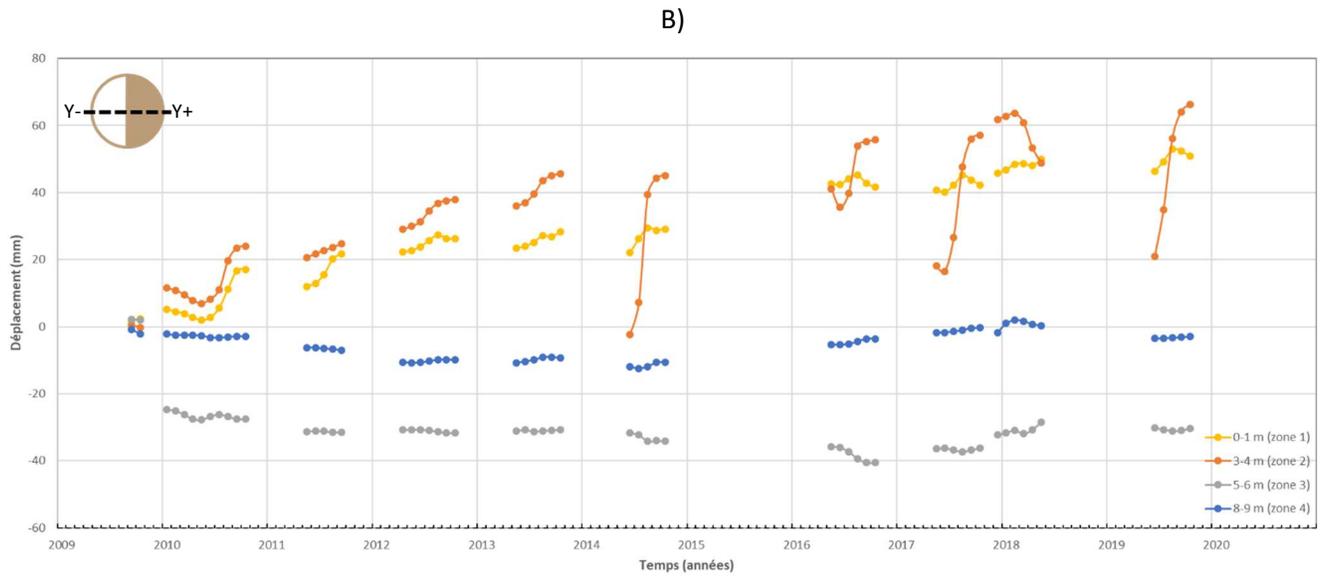
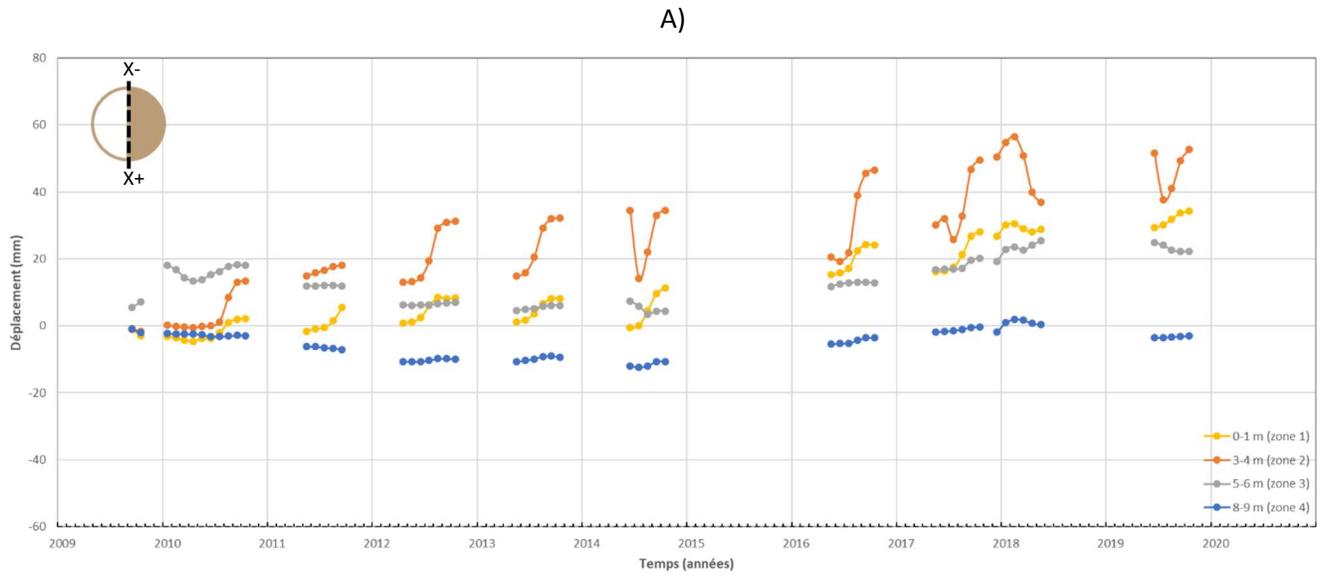


Figure 27 : Évolution des déplacements moyens mensuels cumulatifs mesurés au cours de la période 2009 à 2019 pour quatre différentes profondeurs, piste d'atterrissage de Puvirnituaq. A) axe X- X+ et B) axe Y- Y+.

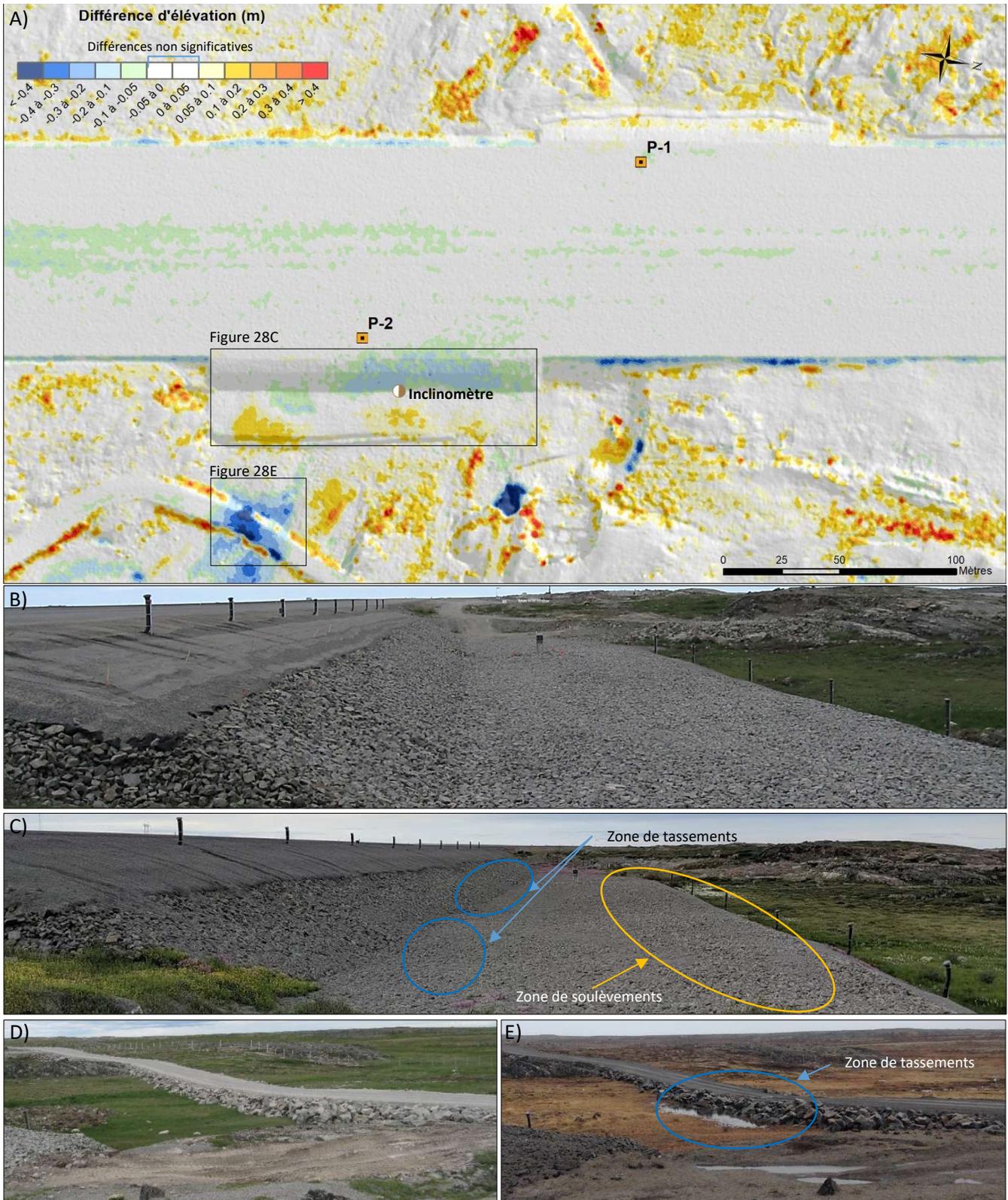


Figure 28 : A) Différence d'élévation entre le nuage de point des données LIDAR de 2010 par rapport à celui de 2016. Les zones en teintes de bleue et verte correspondent à des tassements tandis que les zones en teintes de jaune et rouge correspondent à un soulèvement de la surface. Les différences non significatives sont présentées en teinte de gris (± 0.05 m). Photos de la berme convective en B) 2010 et C) en 2019. Photos de la route de contournement située légèrement en aval de la berme convective D) en 2010 et E) en 2015.

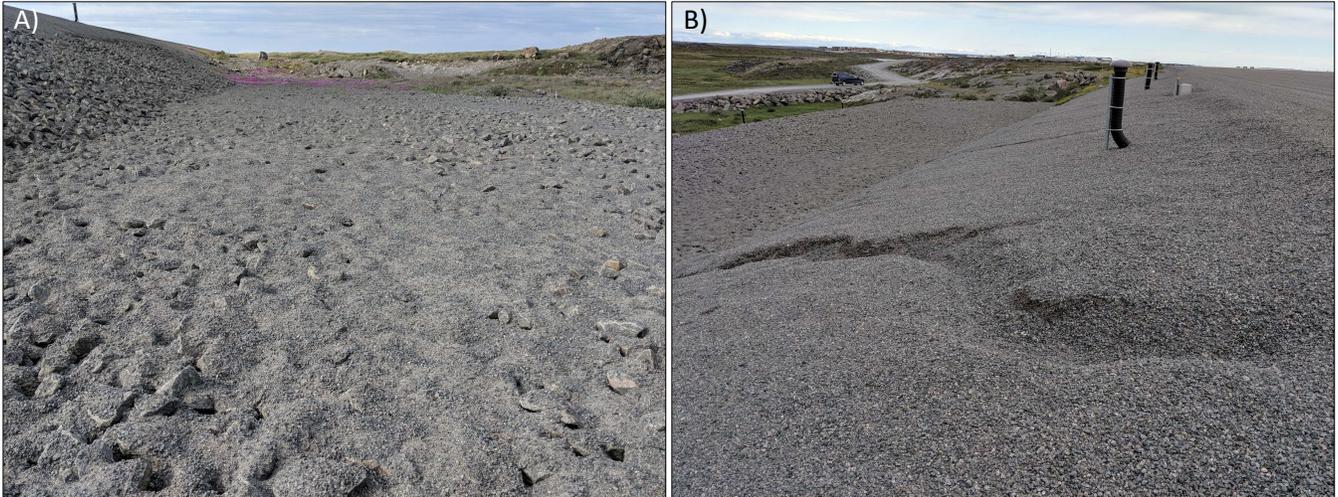


Figure 29 : A) Accumulation sur la berme convective de gravier soufflé par les opérations de déneigement et B) érosion en haut de talus du gravier sous l'effet du ruissellement.

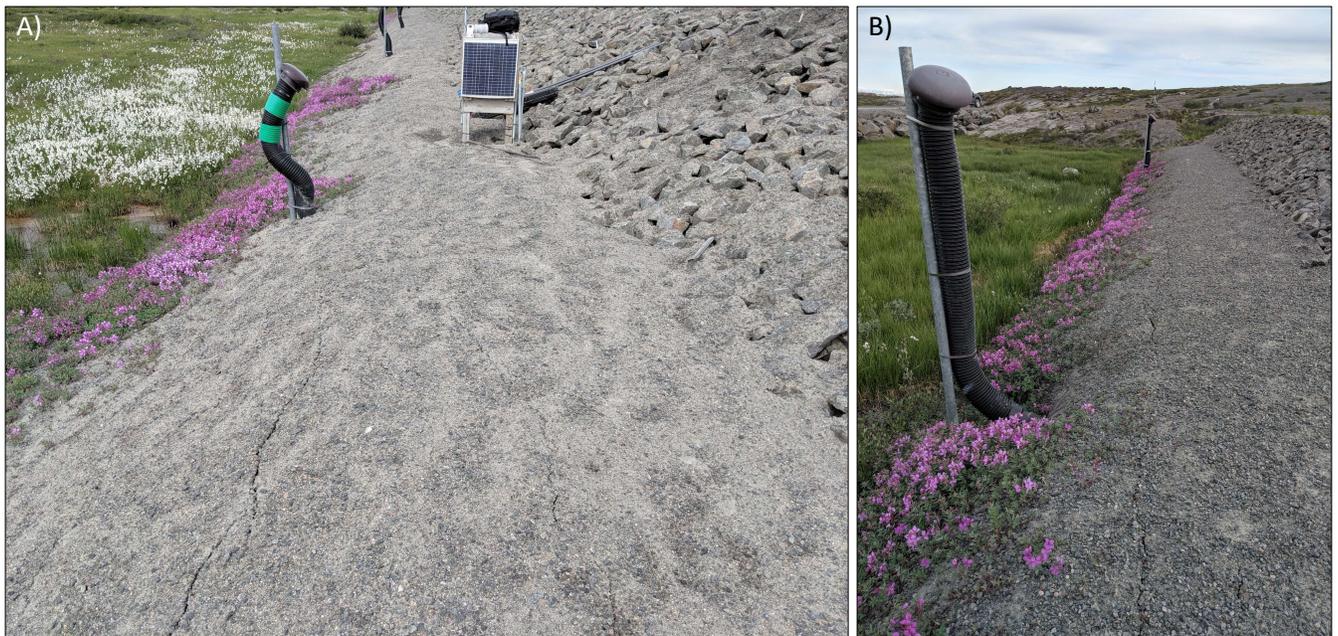


Figure 30 : Petites fissures longitudinales observée à l'été 2019 au-dessus des systèmes de ventilations au pied A) du remblai convectif côté amont et B) de la berme convective côté aval.

1.6.1.5.3 EFFICACITÉ DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATIONS À LIMITER L'INFLUENCE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX DANS LA DÉGRADATION THERMIQUE DU PERGÉLISOL

Compte tenu du rôle important de l'enneigement et du drainage à l'origine de la dégradation du pergélisol sous et aux abords de la piste d'atterrissage de Puvirnituk et compte tenu du fait que, malgré la mise en place des mesures/techniques de mitigation en 2009, ces conditions demeurent similaires, du moins en ce qui concerne l'enneigement (Figure 31), la caractérisation de ces facteurs environnementaux est essentielle pour une évaluation adéquate de la performance des solutions implantées.

Pour documenter la dynamique d'enneigement en marge du remblai côté amont et aval, deux caméras automatisées ont été installées (PuvCam-4 côté amont et PuvCam-1 côté aval). Trois exemples de suivis photographiques des conditions d'enneigement sont présentés aux figures 32, 33 et 34. En plus de permettre d'offrir une appréciation de la répartition de la neige aux abords des remblais convectifs, ce suivi photographique permet d'estimer le rythme auquel la neige s'accumule. Par exemple, au cours de l'hiver 2018-2019, le couvert nival de chaque côté de la piste a atteint son niveau maximal environ deux mois et demi suivant la première neige. Fait également confirmé par les sondes d'épaisseurs de neige installées aux stations PUV-F2 et PUV-F5 (Figure 35). Ces observations suggèrent que le remaniement de la neige par le vent contribue rapidement à l'édification d'importantes accumulations de neige en marge des remblais. Sous l'action du vent, nonobstant la quantité totale de précipitations de neige reçue au courant de l'hiver, le couvert de neige atteint rapidement un angle de stabilisation autour de 1V :7H reliant le haut de talus au terrain naturel. Par conséquent, la couverture de neige en marge des remblais présente sensiblement les mêmes patrons de distribution et variation d'épaisseurs d'une année à l'autre comme en témoigne des photos prises à l'hiver 2019-2020 lors de relevés de neige effectués par le BCNQ (Figure 36). Ainsi, la variabilité interannuelle des précipitations solides reçues, jusqu'à un certain point, n'est pas un facteur déterminant à considérer pour caractériser la dynamique d'enneigement en marge des remblais, dont entre autres, l'épaisseur maximale probable du couvert de neige. À noter également que les opérations de déneigement, qui consistent à souffler la neige à une certaine distance du remblai, n'influencent pas la dynamique d'enneigement dans le secteur. Le suivi photographique des caméras PuvCam-4 (côté amont) et PuvCam-2 (côté aval) a également permis de déterminer à quel moment le couvert de neige recouvre les cheminées d'entrée d'air situées en pied de remblai. La date de recouvrement par la neige de toutes les cheminées d'entrées d'air côté amont est estimée au 11 janvier 2019 (Figure 32F). Du côté aval, deux cheminées d'entrées d'air sur six ont été recouvertes complètement par le couvert de neige que tard à l'hiver, soit à partir du 23 mars 2019 (Figure 34F). Pour ce qui est des cheminées de sorties d'air situées en haut de talus, ces dernières sont demeurées au-dessus du couvert de neige durant tout l'hiver.

Afin d'avoir une estimation précise de la variation des épaisseurs du couvert de neige en fonction de la distance par rapport au haut de talus, quatre relevés de neige orientés perpendiculairement à la piste ont été réalisés à l'hiver 2019. Les profils des épaisseurs de neige produits à partir de ces relevés sont présentés à la figure 37. Sur ces profils, il est possible de confirmer que l'angle de la couverture de neige en marge de la piste respecte bel et bien l'angle théorique de 1V:7H. À partir de ces relevés, les épaisseurs maximales de neige atteintes en pied de remblai sont comprises entre 1.5 et 2 m du côté amont et autour de 2.5 m du côté aval. À noter que les levés d'épaisseurs de neige ont été réalisés un mois après le début de la fonte du couvert de neige. Par conséquent, les épaisseurs mesurées le long des relevés ne correspondent pas aux épaisseurs maximales atteintes à l'hiver 2019. Toutefois, à partir des mesures de la sonde à neige (SR50) installées en 2018 à la station PUV-F2 côté aval (Figure 19 et tableau 5), il est possible d'appliquer un facteur de correction de 0.75 m d'épaisseur qui s'applique uniformément sur l'ensemble des mesures réalisées le long des transects réalisées du côté aval. Du côté amont, la neige a complètement recouvert la sonde à neige au courant de l'hiver 2019, rendant impossible la détermination de l'épaisseur maximale de neige. Néanmoins, il y a fort à penser qu'un facteur de correction similaire à celui déterminé du côté aval peut s'appliquer également sur les mesures d'épaisseur de neige prises du côté amont.

D'après le suivi photographique assuré par les caméras automatisées, la fonte du couvert de neige au printemps 2019 a débuté autour du 10 avril et s'est complétée le 7 juin. Ces observations coïncident également avec les mesures d'épaisseurs de neige enregistrées par les sondes à neige installées aux stations PUV-F2 et PUV-F5 (Figure 35). Pour le suivi spécifique des conditions de drainage en pied de remblai, deux caméras ont été spécifiquement positionnées sur chacun des côtés de l'infrastructure. La caméra PuvCam-1 du côté aval, orientée vers le nord, regarde le pied de la berme convective tandis que la caméra PuvCam-3, orientée vers le sud-ouest, regarde le nouveau fossé de drainage excavé dans le roc localisé sur le côté amont (Tableau 6). Malheureusement, la caméra PuvCam-3 a arrêté de fonctionner seulement un mois après sa mise en marche au mois d'octobre 2018. Toutefois, le suivi photographique assuré par la caméra PuvCam-4 a permis de suivre la formation d'une importante accumulation d'eau en pied de remblai entre le 13 et 16 mai 2019 qui s'est, par la suite, rapidement drainée en l'espace de quelques jours par le fossé excavé dans le roc (Figure 38). Cette observation confirme l'efficacité du fossé à drainer l'eau du côté amont lors de la fonte printanière. Durant la même période, aucune accumulation significative d'eau en pied de remblai suite à la fonte printanière n'a été observé du côté aval.

Le suivi photographique en période estivale n'apporte aucune précision quant aux conditions de drainage tant du côté amont que du côté aval. Malgré l'absence de ce suivi photographique, la réalisation d'un forage en pied de remblai à l'été 2019 (PUV-2019-F2A) a permis d'observer un niveau d'eau dans la couche active assez haut comparativement à celui observé lors du forage réalisé en pied de remblai du côté aval (PUV-2019-F1A). Ces observations suggèrent que l'eau dans la couche active n'est pas en mesure de se drainer par le fossé et demeure ainsi piégée contre le remblai, phénomène laissant d'ailleurs une signature thermique particulière (présence importante de chaleur latente qui retarde le regel de la couche active voire l'empêche complètement) sur les lectures du câble à thermistance PUV-F5. Cette incapacité du fossé à drainer l'eau s'explique par sa faible profondeur. En effet, avec une profondeur n'excédant pas le niveau de la surface du terrain naturel environnant, le fossé excavé dans le roc permet de drainer l'eau de surface, mais pas l'eau présente dans la couche active. Cette incapacité du fossé de drainage à drainer l'eau dans la couche active s'accroît au fur et à mesure que cette dernière s'épaissit au courant de l'été. Il est fort probable que cette eau coincée dans la couche active côté amont cherche à se frayer un chemin d'écoulement au travers le remblai pour ressortir du côté aval à l'emplacement où une résurgence d'eau persiste toujours en période estivale. La réalisation d'essais à l'aide d'un traceur hydrologique afin de valider cette hypothèse et préciser les paramètres d'écoulements d'eau sous le remblai s'il y a lieu (vitesse, débit, emplacement, etc.) serait pertinente, mais n'a malheureusement pu être réalisé dans le cadre de la présente étude.

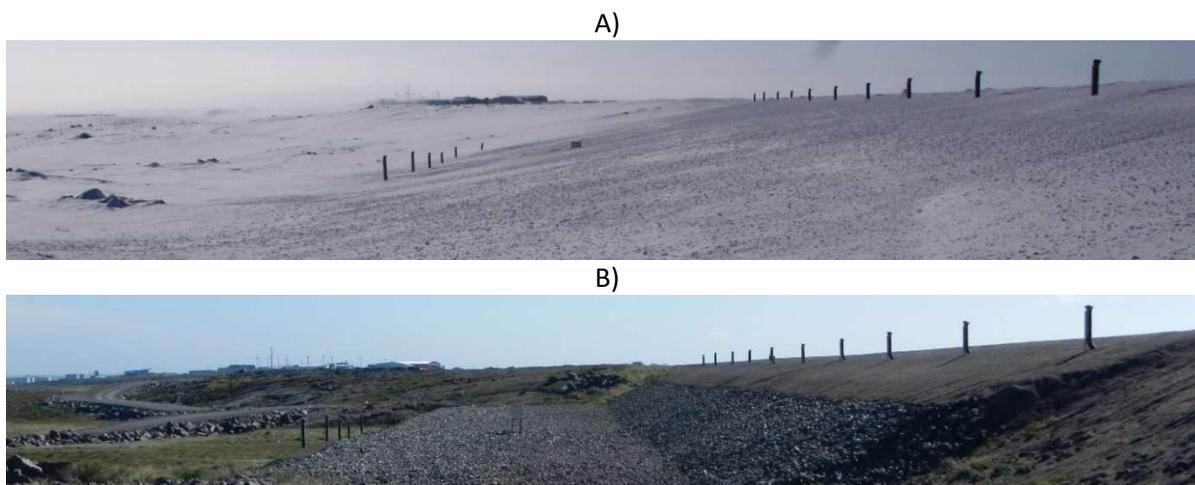


Figure 31 : A) Conditions d'enneigement en marge du talus aval de la piste d'atterrissage de Puvirnituk en date du 22 mars 2017 (Photo : Denis Sarrazin). B) Aperçu du même secteur en été.



Figure 32 : Suivi photographique des conditions d'enneigement en marge de la piste d'atterrissage de Puvirnituk côté amont pour l'hiver 2018-2019, caméra automatisée PuvCam-4. Conditions d'enneigement au cours de l'hiver 2018-2019 au A) 24 octobre, B) 14 novembre, C) 28 novembre, D) 22 décembre, E) 5 janvier et F) 11 janvier. À noter que la date apparaissant sur l'image F est erronée en raison du dérèglement de l'horloge interne de la caméra.



Figure 33 : Suivi photographique des conditions d'enneigement en marge de la piste d'atterrissage de Puvirnituk côté aval pour l'hiver 2018-2019, caméra automatisée PuvCam-1. Conditions d'enneigement au cours de l'hiver 2018-2019 au A) 24 octobre, B) 14 novembre, C) 29 novembre, D) 24 décembre, E) 6 janvier et F) 3 avril. À noter que les dates apparaissant sur les images C à F inclusivement sont erronées en raison du dérèglement de l'horloge interne de la caméra.

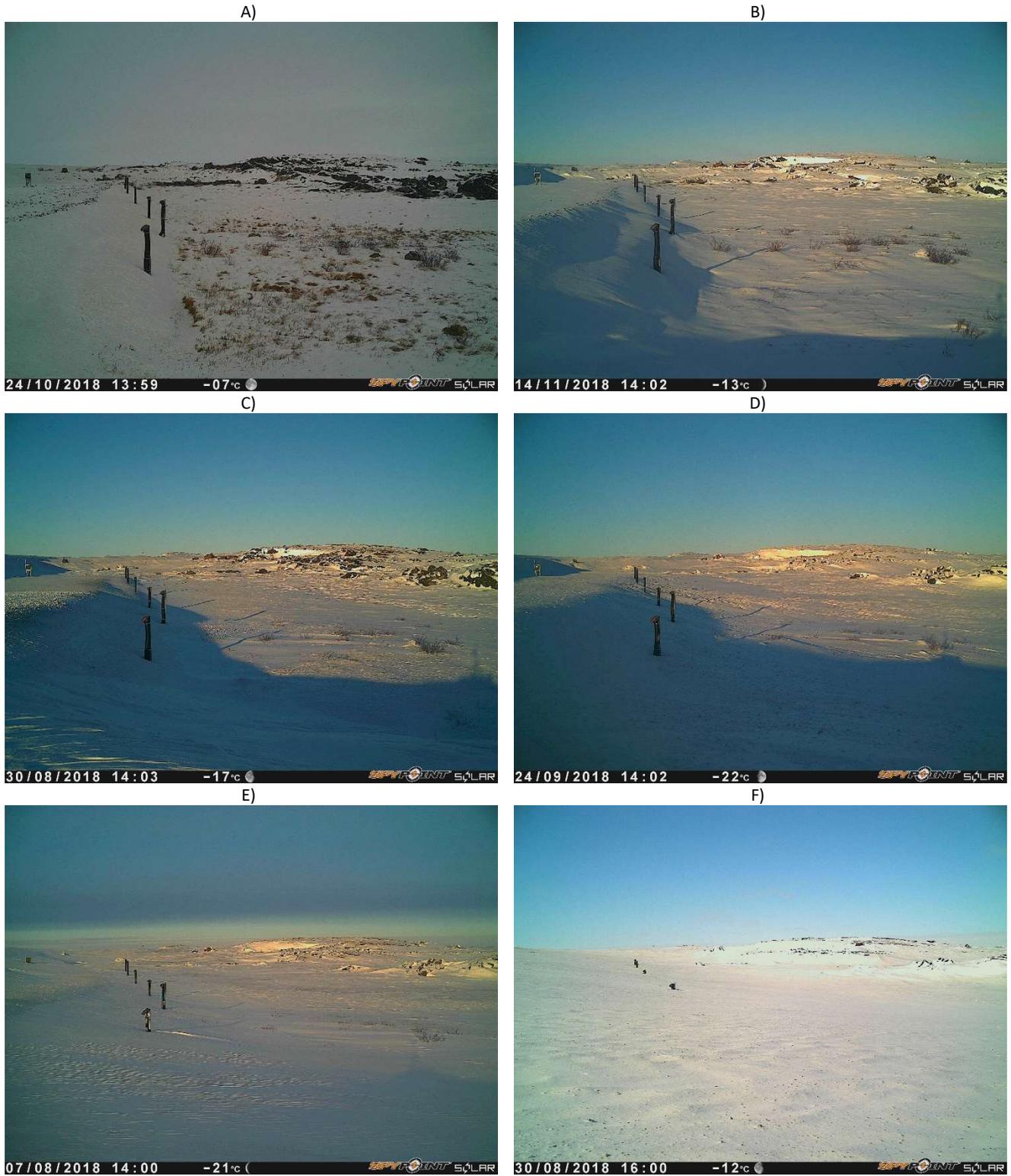


Figure 34 : Suivi photographique des conditions d'enneigement en marge de la piste d'atterrissage de Puvirnituk côté aval pour l'hiver 2018-2019, caméra automatisée PuvCam-2. Conditions d'enneigement au cours de l'hiver 2018-2019 au A) 24 octobre, B) 14 novembre, C) 29 novembre, D) 24 décembre, E) 8 janvier et F) 3 avril. À noter que les dates apparaissant sur les images C à F inclusivement sont erronées en raison du dérèglement de l'horloge interne de la caméra.

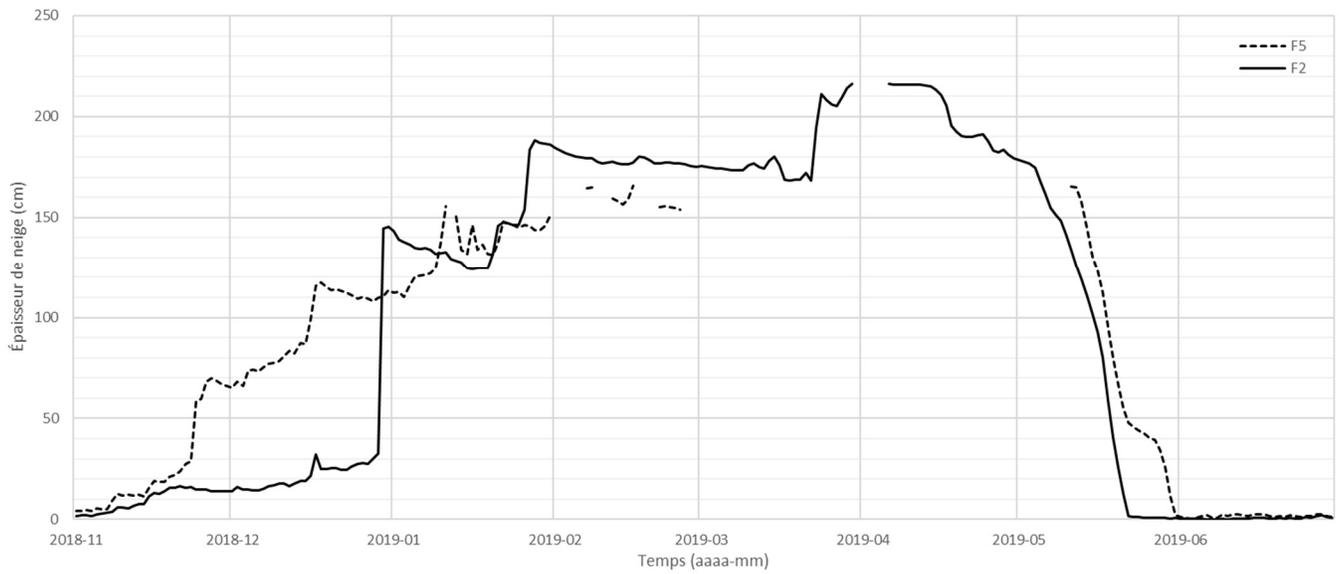


Figure 35 : Évolution de l'épaisseur du couvert de neige au cours de l'hiver 2018-2019 mesurées par des sondes à neige aux emplacements des stations PUV-F2 et PUV-F5, piste d'atterrissage de Puvirnituk, Nunavik.



Figure 36 : Conditions d'enneigement en date du 12 février 2020 A) côté amont et B) aval, piste d'atterrissage de Puvirnituk. (source : BCNQ, 2020)

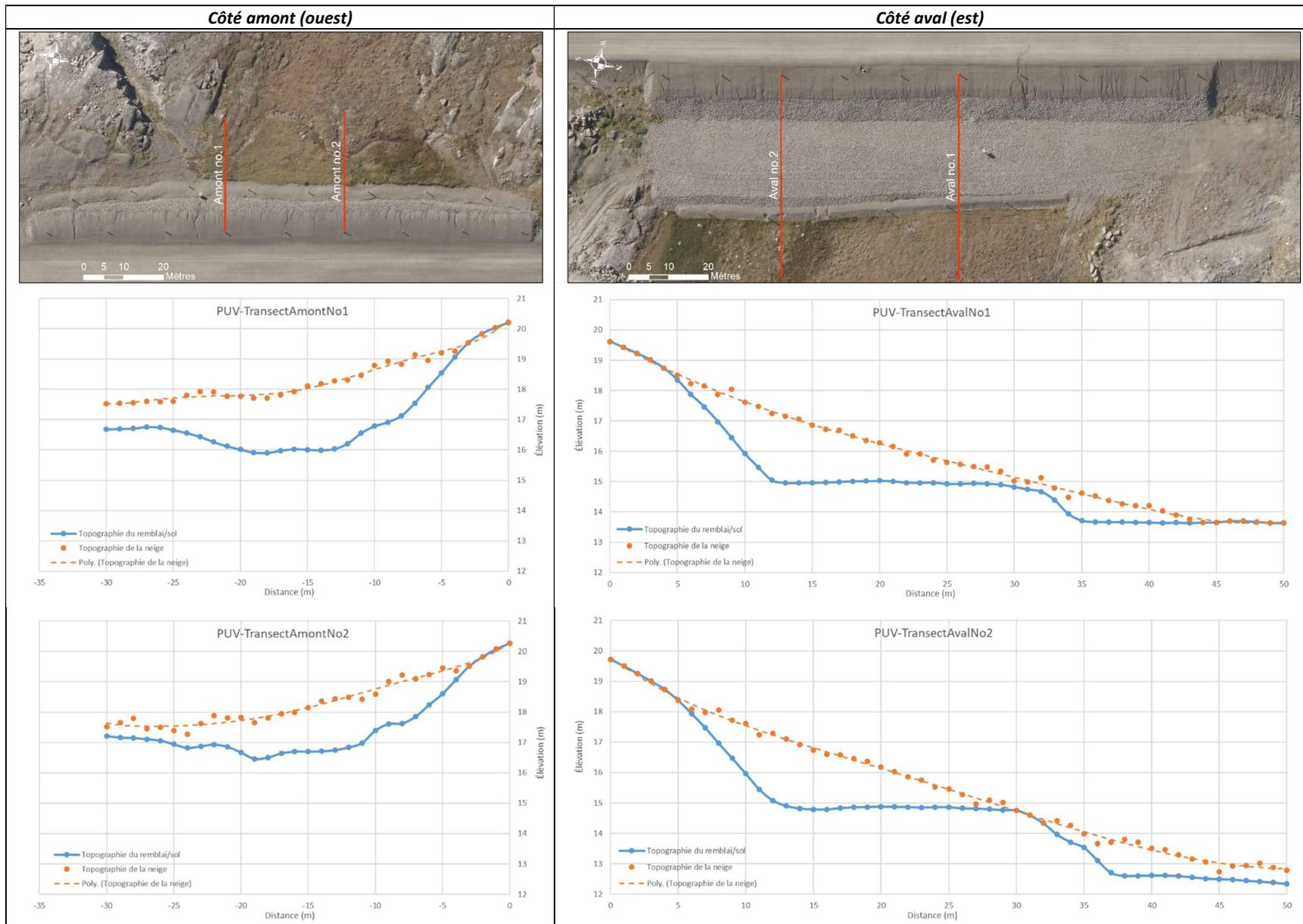


Figure 37 : Relevés des épaisseurs de neige réalisés à la fin de l'hiver 2020 du côté amont et du côté aval de la section adaptée de la piste d'atterrissage de Puvirniq. À noter que pour estimer l'épaisseur maximale du couvert de neige à l'hiver 2019, un facteur de correction de 0.75 m doit être appliqué uniformément sur l'ensemble des mesures.

Tableau 10 : Mesures de densité de la neige réalisées à l'hiver 2018-2019 dans un puits d'observation situé à proximité de la station PUV-F2, côté aval, piste d'atterrissage de Puvirnitug.

Puits d'observation		Numéro d'échantillon	Profondeur / surface (m)	Densité (g·cm ⁻³)
	No.1	-0.25 à -0.30	0.545	
	No.2	-0.40 à -0.45	0.534	
	No.3	-0.55 à -0.60	0.544	
	No.4	-0.70 à -0.75	0.538	
	No.5	-0.90 à -0.95	0.574	
	No.6	-1.15 à -1.20	0.562	

A)



B)



C)



D)



Figure 38 : Accumulation d'eau importante en pied de remblai côté amont (ouest) survenue au printemps 2019 entre B) le 15 et C) le 16 mai, puis D) rapidement drainé par le fossé de drainage excavé dans le roc, piste d'atterrissage de Puvirnitug.

Dans le contexte d'adaptation de la piste d'atterrissage de Puvirnituk, les techniques de protection contre le dégel du pergélisol qui ont été mises en place en 2009-2010 ont certainement bénéficié du climat récent plus frais pour favoriser davantage la reprise du pergélisol en pied de remblai où subsistaient, jusqu'à tout récemment, des zones non gelées atteignant plus de 6 mètres d'épaisseur. Pour la période 2009-2019, le suivi thermique sous le remblai à convection côté amont (PUV-F5) et sous la berme convective côté aval (PUV-F2) montre en effet une reprise du pergélisol. Cette reprise se caractérise par le refroidissement des températures du sol dans les premiers mètres sous les remblais à convection, une diminution de l'épaisseur de la couche active et une résorption graduelle des taliks (Figure 22).

D'après Gravel-Gaumond et Doré (2013), sur les cinq séries de thermistances installées dans le remblai à convection en 2009, seule la série de thermistances D (Figure 19), située en milieu de talus du côté est de la piste (côté de la berme), a permis de démontrer la présence de convection dans le remblai. En effet, d'après les auteurs, cette série est la seule à avoir démontré un gradient de température nul ou inverse, tandis que les autres (séries A, B, C et E montraient des gradients normaux (température plus chaude à la base du remblai par rapport au sommet) durant les hivers 2009-2010, 2010-2011 et 2011-2012. En résumé, il est possible que des mouvements convectifs se soient développés sans toutefois être suffisamment forts pour modifier le gradient à l'intérieur du remblai. Il s'est avéré également difficile de démontrer les effets convectifs à l'interface entre la base du remblai convectif et le sol naturel (série H), où un chapelet de thermistances n'a montré aucun signe de convection évidente. Sommes toutes, la température du sol naturel sous la berme (PUV-F2, séries F et G), se sont considérablement refroidies avec une remontée globale du plafond du pergélisol estimée à 3,69 m à l'emplacement du câble PUV-F2 entre 2008 et 2019. Outre le potentiel convectif anticipé, mais non confirmé, du remblai et de la berme, cette remontée est attribuable probablement en partie à une combinaison de facteurs favorables tels que des conditions météorologiques plus froides au cours des années post-adaptation, l'ajout d'une épaisseur considérable de matériau granulaire (≈ 2 m) au-dessus du sol naturel, la diminution de l'apport de chaleur convective par l'écoulement d'eau au travers du remblai et le refroidissement par convection favorisée par le remblai et la berme convective.

À noter que des différences notables sont observables entre le régime thermique des sols mesuré sous le remblai à convection du côté amont versus celui mesuré sous la berme côté aval. Par exemple, la comparaison des régimes thermiques sous les remblais à convection du côté amont versus du côté aval (Figure 22A et B) permet de constater que le front de gel pénètre généralement plus rapidement et plus profondément du côté amont (PUV-F5) que du côté aval (PUV-F2). Également, du côté amont, les températures hivernales dans les deux premiers mètres de sol sous le remblai à convection sont habituellement plus froides, phénomène observable au cours des hivers 2011, 2012, 2013, 2014, 2016 et 2018 (Figure 22A et B). Malgré des conditions thermiques à l'interface qui devraient favoriser des conditions de pergélisol plus froides, le régime thermique mesuré du côté amont (PUV-F5) est significativement plus chaud que celui mesuré sous la berme côté aval (PUV-F2) et montre une restauration du pergélisol plus lente depuis la mise en place de la stratégie d'adaptation en 2009. Par exemple, du côté amont, un talik subsiste toujours entre 3 et 4 m de profondeur sous le remblai (Figure 22A) tandis que du côté aval, la zone non gelée résiduelle fut complètement résorbée en 2016 (Figure 22B). Cette différence peut s'expliquer par la contribution de facteurs favorisant des conditions plus chaudes du côté amont tels que l'exposition au rayonnement solaire plus important, l'accumulation d'eau dans la couche active qui se retrouve piégée contre le remblai, le blocage des cheminées par la neige durant l'hiver et une possible contribution d'apport estivale de chaleur par le vent qui s'infiltré dans le remblai à convection. Par exemple, Mu *et al*, (2018) avaient observé une différence significative des températures du pergélisol sous un remblai convectif selon l'exposition des épaulements aux radiations solaires, soit des températures du pergélisol plus froides du côté ombragé. Ces

différences de température se traduisaient également par une remontée plus importante du plafond du pergélisol sous le côté ombragé du remblai à convection.

Lors de l'installation du câble à thermistance PUV-2019-F2A côté amont, un niveau d'eau très haut a été observé dans la couche active, ce qui avait d'ailleurs limité la pénétration de la foreuse et par conséquent la profondeur maximale du puits pour l'instrumentation. Cette importante quantité d'eau dans la couche active est possiblement à l'origine de l'atténuation du signal observé sur le levé géoradar réalisé du côté amont à l'automne 2019 (Figure 25A). En fonction de ces différentes observations, l'eau apparaît ici comme un des facteurs déterminants responsables du retard dans la reprise du pergélisol du côté amont. L'hypothèse actuelle qui explique cette présence d'eau résiduelle dans la couche active en pied de remblai du côté amont est le niveau du fossé excavé dans le roc qui n'est pas assez profond. La base du fossé est en réalité à la même hauteur que la surface du terrain. Par conséquent, le fossé permet le drainage de l'eau qui s'écoule en surface, particulièrement lors de la fonte de neige et en début d'été lorsque la couche active est faiblement dégelée, mais devient rapidement inefficace au fur et à mesure que la couche active s'épaissit au courant de l'été. Cette quantité d'eau dans le sol limite considérablement la capacité du sol à regeler et ainsi permettre une extraction efficace de la chaleur durant l'hiver. Cette limitation est telle qu'elle explique la persistance d'une zone non gelée entre 3 et 4 mètres de profondeur sous le remblai à convection côté amont. Malgré des bénéfices thermiques obtenus sensiblement moins importants du côté amont que du côté aval, le régime thermique se refroidit graduellement et tranquillement permettant ainsi une remontée du pergélisol sous le remblai à convection et la résorption graduelle du talik. Depuis 2018, probablement favorisé par des conditions climatiques particulièrement froides, le front de dégel n'a pas atteint le talik et tout porte à croire que ce dernier disparaîtra au cours des prochaines années (Figure 22A).

La géométrie des remblais à convection étant similaire à celle d'un remblai conventionnel (1V : 2H), les accumulations de neige demeurent aussi importantes en pied de remblai, ce qui limite l'extraction de chaleur en hiver et contribue au réchauffement du pergélisol dans cette zone marginale. Par conséquent, même si le remblai à convection a pour but de limiter l'effet isolant de la neige en favorisant l'extraction de chaleur par la formation de boucles convectives en hiver, le terrain naturel situé en marge de l'infrastructure ne bénéficie pas du refroidissement favorisé par la convection et continuera à se dégrader (Figure 39A). Pour l'instant, cette hypothèse semble la plus probable pour expliquer le développement des tassements et des fissures qui affectent les bas de talus du côté amont et aval. Ces fissures sont facilement visibles dans le dépôt de MG-20b utilisés pour recouvrir les systèmes de ventilation en bas de talus et elles s'étendent sur presque toute la longueur des zones adaptées (Figure 39B et C). Gravel-Gaumond et Doré (2013) avaient également noté la présence de ces fissures, ce qui permet de confirmer que leur développement a débuté que quelques années après la mise en place de la stratégie d'adaptation. Particulièrement du côté amont où le fossé de drainage actuel ne permet pas le drainage de l'eau dans la couche active, cet approfondissement de la couche active en pied de remblai risque de favoriser davantage le piégeage d'eau contre le remblai et ultimement entraîner une perte d'efficacité du remblai à convection à refroidir efficacement le pergélisol sous l'accotement.

À noter que lors d'une visite hivernale, Gravel-Gaumond et Doré (2013) avaient observé un mauvais fonctionnement du système de ventilation du remblai convectif attribuable, selon ces derniers, à trois causes : la formation d'un couvert de glace directement sous le capuchon de ventilation dans la majorité des cheminées, la formation d'un bouchon de glace dans les tuyaux de ventilations par condensation de l'eau sur les parois de ces derniers, particulièrement au niveau des cheminées de sorties situées au sommet des remblais convectifs, et le recouvrement total des cheminées par le couvert nival côté ouest (amont). Les observations réalisées dans le cadre du présent projet confirment que les cheminées d'entrée situées en pied de remblai côté amont sont recouvertes de neige une bonne partie de l'hiver (Figure 32F). Du côté aval, le suivi photographique démontre que deux des six cheminées d'entrée situées au pied de la berme convective sont recouvertes de neige. L'impact du

recouvrement par la neige des cheminées sur la performance du remblai à convection à extraire la chaleur n'a jamais été évaluée, toutefois, l'instrumentation récente à l'été 2019 de quatre cheminées situées sur le côté amont (deux cheminées d'entrée et deux cheminées de sortie d'air) et quatre cheminées situées sur le côté aval permettra d'apporter certainement précisions lors de recherches futures. De manière générale, les systèmes de ventilation côté ouest et côté est nécessitent d'importants travaux de réfection afin de s'assurer que les tuyaux demeurent dégagés de toute glace durant l'hiver et que les cheminées du côté amont (côté ouest) demeurent au-dessus du couvert nival maximal en permanence. Pour ce faire, des plans de réfection supportés par les plus récentes mesures d'épaisseurs de neige ont été transmis au Ministère en septembre dernier. Les modifications proposées aux cheminées de ventilation devraient améliorer l'efficacité du système à convection. Un autre correctif, mais qui est malheureusement plus difficile à mettre en place a posteriori, serait d'augmenter le diamètre des tuyaux de ventilation. Un diamètre plus grand pour les cheminées de ventilation permettrait d'améliorer la circulation de l'air dans le remblai à convection et également d'éviter la formation de bouchons de glace par la condensation de l'air au niveau des cheminées de sorties.

À la lueur des observations et analyses effectuées sur la performance du système à convection mis en place à Puvirnituk, il apparaît primordial lors de prochaine implémentation de :

- S'assurer de bien maîtriser les écoulements de surface et dans la couche active en marge de l'infrastructure afin de limiter les apports de chaleur convective ou la persistance d'importantes quantités de chaleur latente qui ralenties le refroidissement des accotements.
- S'assurer que les cheminées de ventilation ont un diamètre et une hauteur suffisante afin de permettre une circulation efficace de l'air dans le système en hiver.
- Prévoir une certaine dégradation thermique des pieds de remblai aux endroits où s'accumulent d'importantes quantités de neige. Localisés en dehors de la zone d'influence du remblai à convection, les pieds de remblai demeurent des endroits sensibles dont la dégradation thermique peut induire des problèmes de stabilité mécanique des accotements.

L'effet de calfeutrage en surface des remblais convectifs par du gravier soufflé lors des opérations de déneigement n'a pu être spécifiquement analysé dans le cadre du projet, mais il est probable qu'un effet atténuant du potentiel convectif en résulte. Dans des études ultérieures, il serait intéressant de s'attarder plus spécifiquement à cette question en vue de proposer, advenant un impact significatif sur la performance des remblais à convection, des solutions pour en limiter les effets.

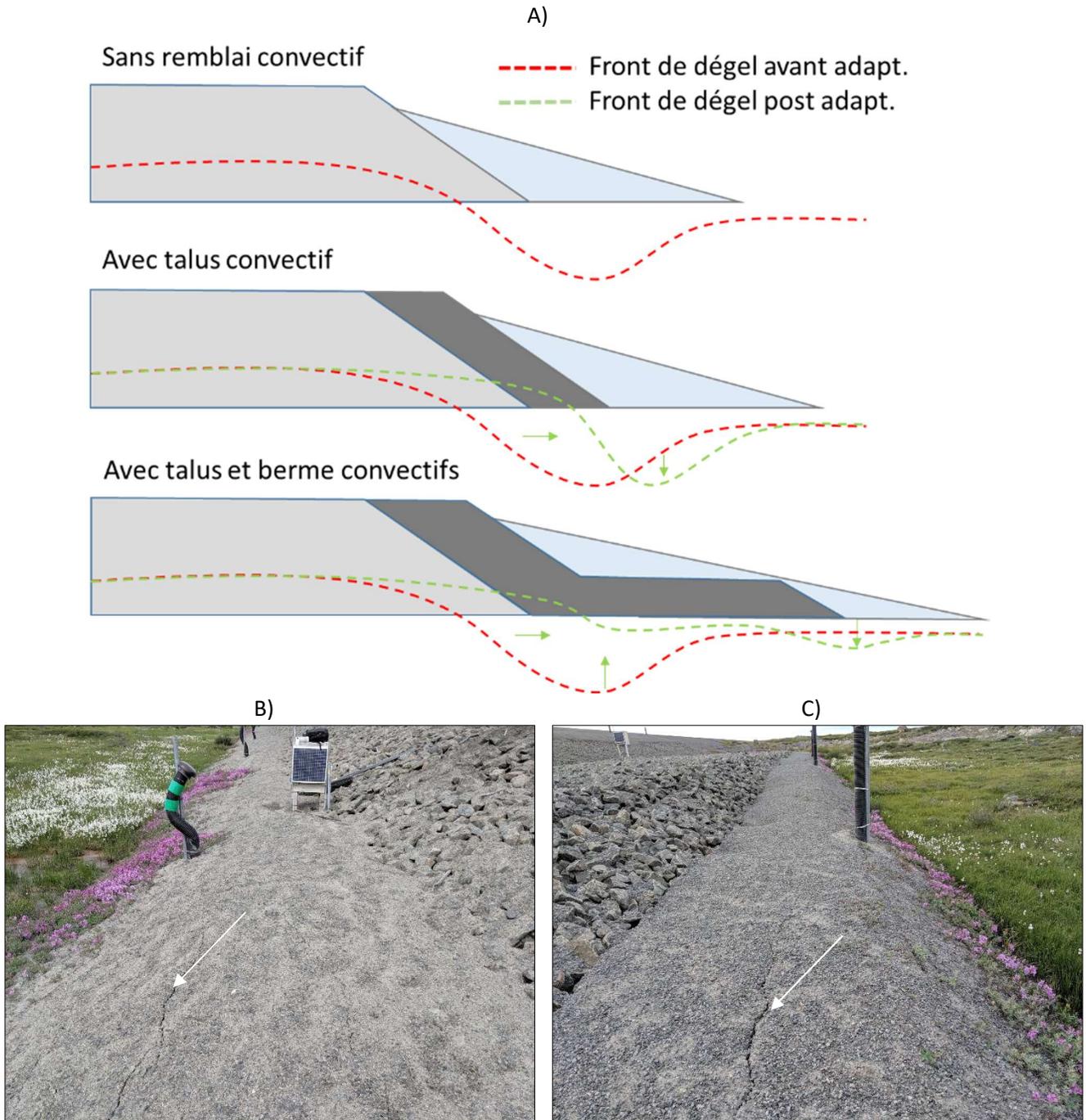


Figure 39 : A) Modifications anticipées de la position du front de dégel en réponse à la translation des zones d'accumulation de neige post adaptation de la piste d'atterrissage de Puvirniq. Fissures visibles dans le MG-20b qui recouvre les systèmes de ventilation situés en bas de talus B) du côté amont et C) du côté aval.

1.6.2 LA ROUTE D'ACCÈS À L'AÉROPORT DE SALLUIT

1.6.2.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

La route d'accès à l'aéroport de Salluit était d'une longueur de 3.057 km, du chaînage 0+629 m au chaînage 3+686 (Plan tel que construit no. CH-85-17-2003, 1990-04-23). Toutefois, l'expansion du village vers le sud ainsi que la relocalisation de la zone en déblai à proximité de l'aéroport porte désormais la longueur totale de la route à 2756 m (MTQ, 2022). Avant les travaux de réfection et d'adaptation aux changements climatiques complétés en 2012, la route d'accès à l'aéroport de Salluit présentait de nombreuses déformations attribuables à des tassements différentiels dus au dégel du pergélisol. Certaines de ces déformations observées étaient localisées dans la section de la route construite sur un dépôt de till relativement riche en glace (entre les chaînages 2+200 m à 3+200 m), mais les plus nombreuses et les plus importantes étaient localisées dans la section de la route construite sur des silts argileux marins très riches en glace (entre les chaînages 1+300 m et 2+200 m) (L'Hérault *et al.*, 2012) (Figure 40A). Sur le côté amont de la route, les dépressions étaient presque systématiquement accompagnées d'accumulations d'eau en pied de remblai favorisées par l'entrave au drainage naturel du versant inféré par l'infrastructure.

Également, la présence de fissures longitudinales en bordure de l'accotement ainsi que dans la partie pavée plus au centre de la route (Figure 40B) et la déformation graduelle d'un tuyau de PVC initialement installé à la verticale en pied de remblai (Figure 40C), suggéraient des mouvements latéraux lents du talus de remblai vers le bas de pente. Ce dépôt de silt argileux sur lequel repose la route est également sujet aux ruptures de la couche active (L'Hérault, 2009). De telles ruptures se sont produites dans la vallée lors des étés 1998, 2005 et 2010 ce qui confirme la sensibilité du pergélisol au dégel dans le secteur et en l'occurrence la présence d'un risque d'instabilité pour l'infrastructure. La rupture de la couche active survenue à l'été 2005 au chaînage 0+960 m, dont l'escarpement à la tête n'était qu'à une quinzaine de mètres du pied du remblai côté ouest, présentait un risque éventuel pour le remblai de la route d'accès (Figure 40D). Quelques années plus tard, soit en août 2010, une seconde rupture de la couche active s'est à nouveau produite dans le même secteur. À l'automne 2010, des travaux de stabilisation ont donc été réalisés afin de stabiliser mécaniquement le secteur et ainsi éviter qu'une section ou la totalité du remblai de la route soit affectée.

La présence d'un pergélisol très riche en glace, donc sensible et instable au dégel, l'isolation des talus et pied de remblai par d'importantes accumulations de neige (Figure 41), des apports localisés de chaleur à travers le remblai véhiculé par des écoulements d'eau transversaux et l'absorption de chaleur en surface par le revêtement bitumineux ont été identifiés comme étant les principaux facteurs responsables de la dégradation du pergélisol sous et en marge de l'infrastructure.

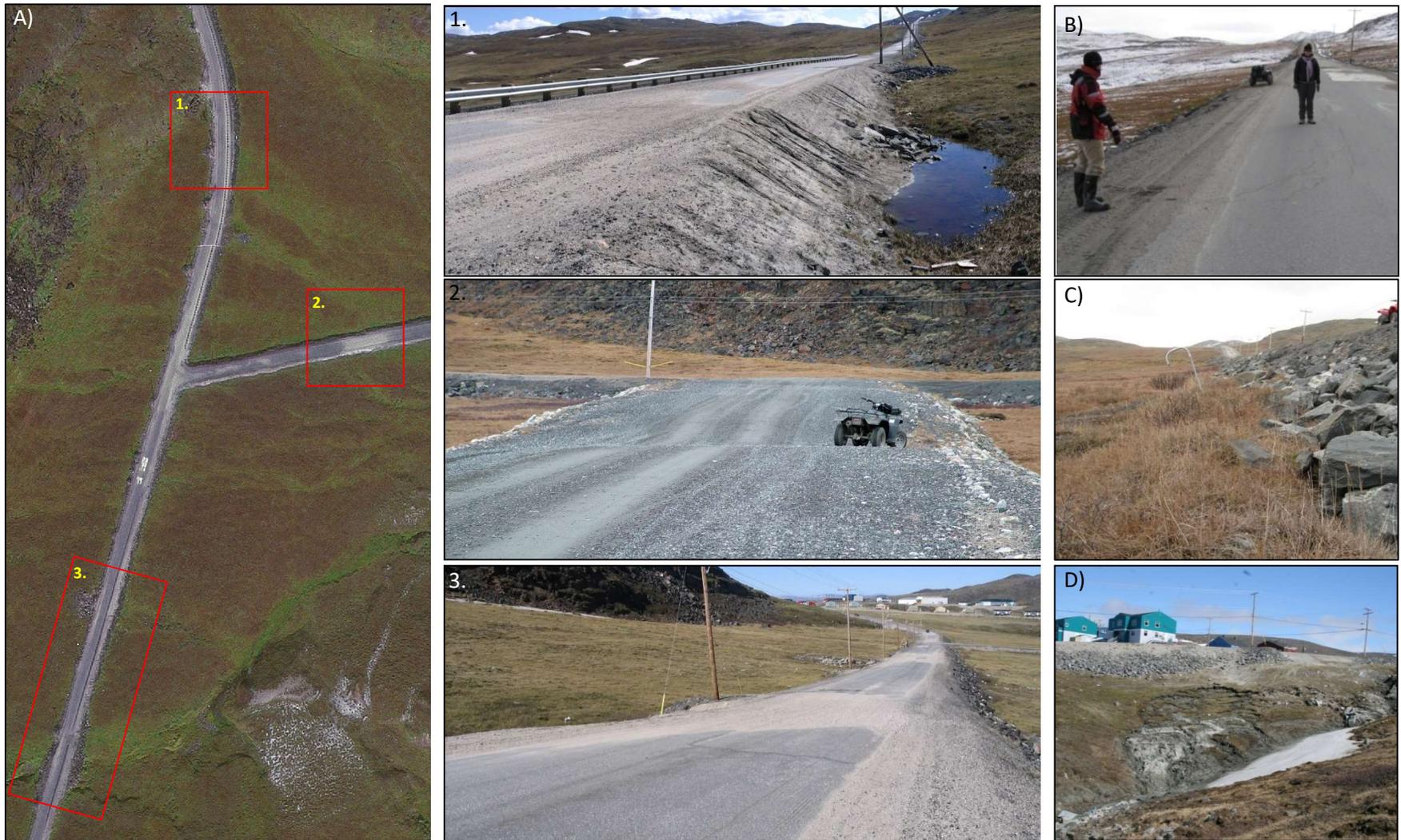


Figure 40 : A) Tassements affectant la route d'accès à l'aéroport de Salluit (no. 1 et 3) et la route qui mène au développement domiciliaire de Salluit-2 (no.2). Ces tassements sont localisés préférentiellement au passage des chenaux humides sous les remblais. B) Fissures longitudinales dans le revêtement 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) Rupture du mollisol en bordure de la route d'accès au chaînage 0+960 m côté ouest. (Modifiée de L'Hérault *et al.*, 2012).



Figure 41 : Conditions d'enneigement le long de la route de Salluit avant la mise en place de la stratégie d'adaptation (mai 2011).

1.6.2.2 STRATÉGIE D'ADAPTATION MISE EN PLACE

Considérant l'importance de cette route pour la communauté de Salluit, le Ministère a réalisé à l'été 2012 des travaux d'adaptation majeurs afin d'assurer la stabilité thermique et mécanique de cette infrastructure. Ces travaux visaient à favoriser la remontée du plafond du pergélisol pour stabiliser thermiquement et mécaniquement la route et à améliorer le drainage du côté amont. Pour ce faire, le remblai de la route a été rehaussé d'une trentaine de centimètres en moyenne, un drain thermique a été installé dans l'épaule du remblai du côté aval de la route et la pente du remblai du côté amont adoucie (1V:5H à 7H en moyenne). Pour améliorer le drainage, un fossé peu profond avec empierrement a été aménagé au pied du nouveau remblai sur le côté amont et des ponceaux transversaux ont été ajoutés à plusieurs endroits. Pour minimiser les infiltrations d'eau et risque de thermo-érosion, les entrées des ponceaux ont été imperméabilisées avec de la bentonite et des tapis de diffusion ont été ajoutés aux sorties. La majorité des travaux d'adaptation effectués se concentrent entre les chaînages 1+070 m et 2+220 m (Figure 42).

Le système à convection consiste : en un drain thermique de type géocomposite de marque Terradrain d'une épaisseur de 25 mm déposé sur une couche de matériau granulaire CG-14 reposant sur un géotextile, des demi-ponceaux de type TTOG de 600 mm de diamètre placés aux extrémités du drain (au sommet et à sa base) et des cheminées de ventilation de 200 mm de diamètre connectées à ces demi-ponceaux. Le drain est par la suite recouvert d'une couche supplémentaire de matériau granulaire CG-14, d'un géotextile et d'une couche de matériau de remblai provenant de l'excavation initiale composée de MG-20 / CG-14 / MG-112, de gros blocs et de béton bitumineux. Il est à noter que la configuration finale du drain thermique, par rapport au design initial tel que présenté dans les plans de construction (Figure 43A), est considérablement différente. En effet, selon les plans tel que construit (Figure 43B), le drain thermique affiche plutôt un profil parallèle à la pente du talus (1V :2H) au lieu d'avoir un profil longeant la base du remblai avec une faible pente (1V :10H) sur quelques mètres pour ensuite remonter plus abruptement à l'intérieur du remblai avec une pente d'environ (1V :1H). Cette configuration non conforme du drain, liée à une erreur d'arpentage, s'étend sur pratiquement toute la section adaptée de la route, soit du chaînage 1+300 m jusqu'au chaînage 2+160 m. À toute fin pratique, seulement les 70 premiers mètres de la route d'accès, du chaînage 1+227 m au chaînage 1+300 m, respectent la configuration du drain thermique initialement prévue et non du chaînage 1+227 m au chaînage 1+500 m tel que proposé par Périer *et al.* (2016). Les étapes d'installation du drain thermique sont présentées à la figure 43C et l'aperçu de l'infrastructure une fois les travaux complétés à la figure 43D.

Afin de permettre le suivi thermique et mécanique du remblai routier ainsi que la performance des mesures d'adaptation mises en place, des thermistances, de la fibre optique (DTS, qui permet de mesurer la température dans le sol en tout point et de façon linéaire) et des inclinomètres ont été installés dans l'infrastructure et en pied de remblai à différents emplacements le long de la route. Ce suivi a d'ailleurs fait l'objet d'un projet de recherche intitulé : « *Suivi du comportement thermique et mécanique de la route d'accès de Salluit et expérimentation d'une méthode de détection de la dégradation de pergélisol le long des structures linéaires* ». C'est d'ailleurs suite aux recommandations issues du rapport final (Périer *et al.*, 2016) que le fossé de drainage côté amont a été reprofilé et des bermes de déviation installées à l'été 2016 (Figure 43E).

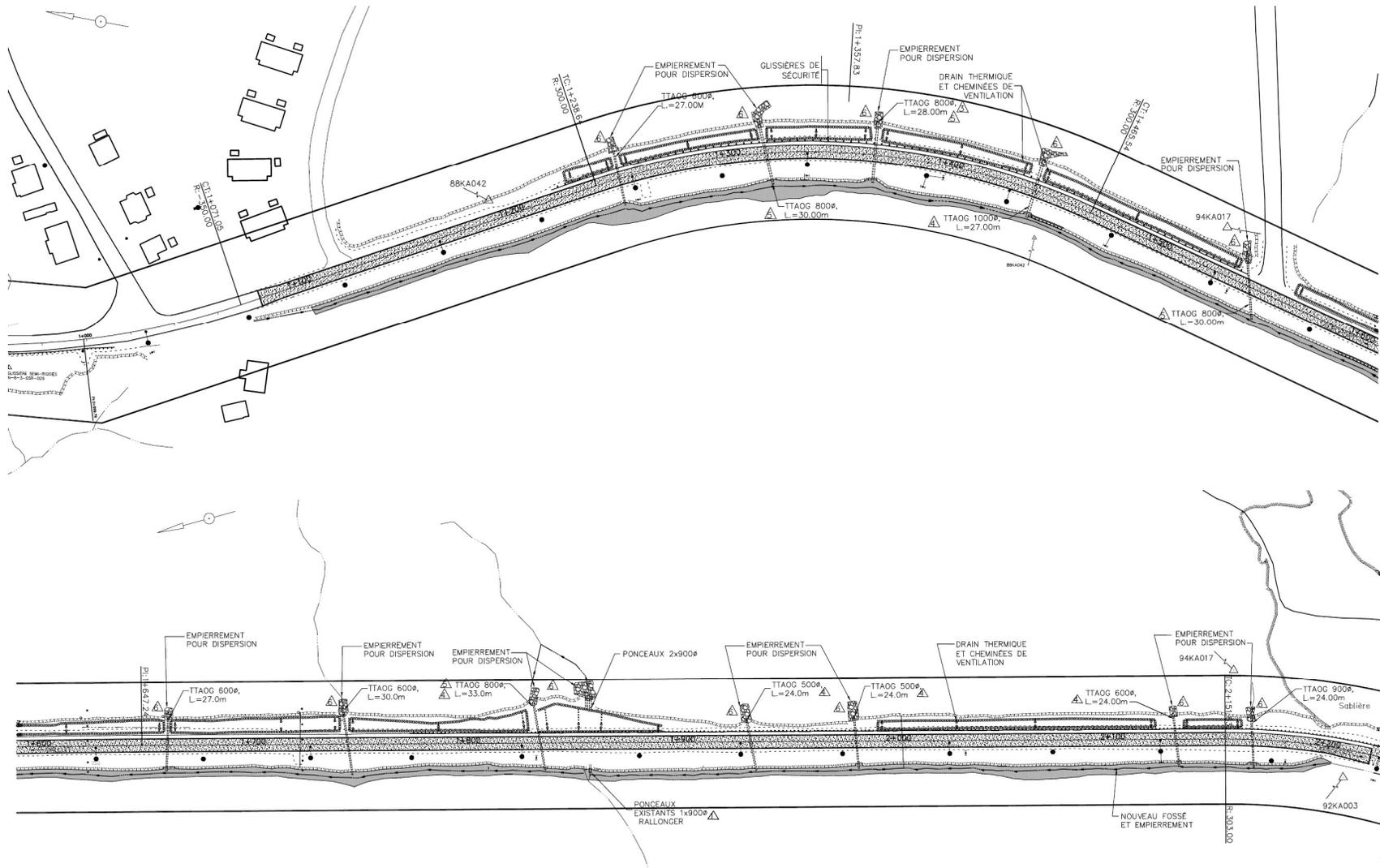


Figure 42 : Aperçu des travaux d'adaptation réalisés en 2012 le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit (tiré des plans « tel que construit » no. CH-7202-154-06-1384, page 6 et 7, Genivar, 2015).

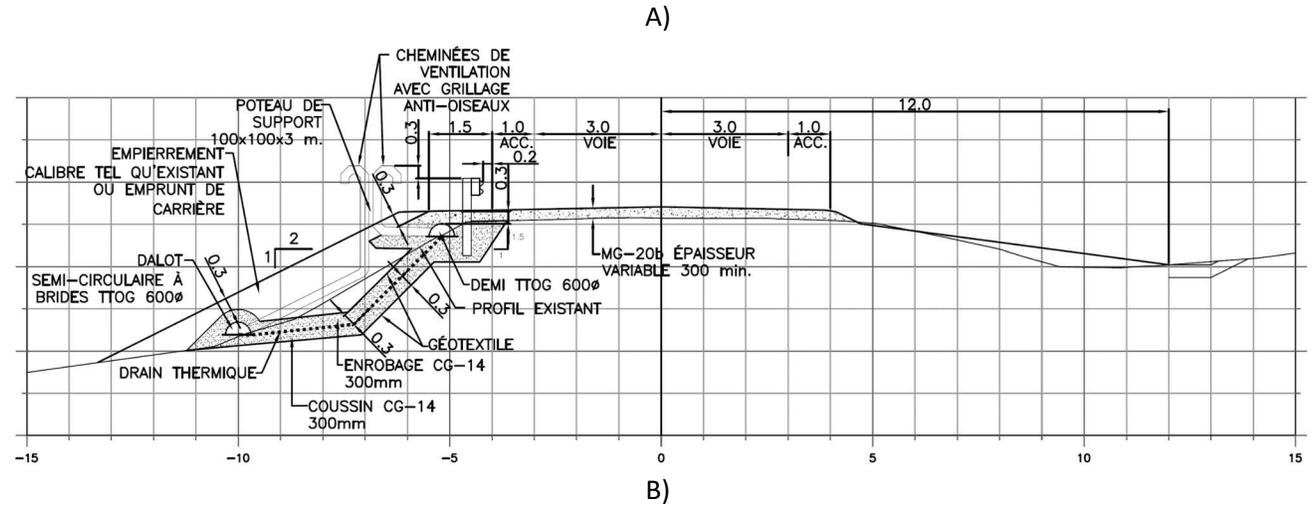


Figure 43 : Vue en coupe de la route d'accès à l'aéroport de Salluit avec pente douce (côté amont) et drain thermique (côté aval) tirée A) des plans de construction et B) des plans tel que construit. C.1, C.2 et C.3) Étapes d'installations du drain thermique avec cheminées de ventilation. D) Aperçu de l'infrastructure une fois les travaux complétés. E) Exemple d'une berme de déviation installée en 2016 dans le fossé de drainage à l'entrée d'un ponteau côté amont.

1.6.2.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts de la stratégie d'adaptation mise en place le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, initialement comptabilisés par Périer *et al.*, (2016), sont présentés au tableau 11. Par rapport au coût total des travaux, le coût relié aux travaux d'adaptation représente 51 % des coûts totaux, soit une augmentation de 104 % par rapport à des travaux visant la simple conservation de l'ouvrage. Les coûts présentés n'incluent pas les dépenses supplémentaires réalisés en 2016 afin d'apporter des modifications au réseau de drainage (ajout de bermes filtrantes à l'entrée des ponceaux et le reprofilage du fossé côté amont) et les coûts d'entretien subséquents depuis la mise en place.

Les coûts de la mise en place de la stratégie d'adaptation pour la route d'accès à l'aéroport de Salluit sont présentés au tableau 11. À l'intérieur de ce tableau, les coûts tirés du bordereau de paiements associé au devis no. 7202-12-0101 pour les travaux exécutés en 2012 et au devis no. 7204-16-3501 pour les travaux exécutés en 2016 ont été regroupés selon les différentes mesures d'adaptation mises en place. D'après cette compilation, les coûts des travaux d'adaptation portant spécifiquement sur l'adoucissement des pentes, la révision du drainage et la réfection d'une section de la clôture totalisent 1 347 071 \$. À noter que les coûts associés à l'élargissement de la piste, ne faisant pas partie de l'adaptation de la piste, ont été exclus.

Lors de la mise en place de la stratégie d'adaptation, des travaux d'entretien ont également été réalisés et consistaient à la scarification, nivellement et rechargement de 54 740 m² de piste nécessitant 6256 m³ de MG 20b modifié, la mise en réserve de 3007 m³ de MG20b modifié supplémentaire et le nettoyage et reprofilage de 932 m de fossés latéraux. Le coût de ces travaux d'entretien est estimé à 722 680 \$. À noter que les deux dernières interventions portant sur l'entretien de la piste remontent à 2008 et 2004. Ces dernières interventions consistaient au rechargement des 120 premiers mètres du seuil de piste nécessitant, chaque fois, environ 250 m³ de gravier.

Tableau 11 : Coûts des travaux des mesures d'adaptation, route d'accès à l'aéroport de Salluit (modifié de Périer *et al.*, 2016).

Année	Mesures	Description	Coût (\$)	
2012	Aménagement des drains thermiques	Granulats concassés MG 20b modifié	n.d	
		Tuyau en tôle d'acier ondulée galvanisée (TTAOG)	n.d	
		Drains thermiques	792 000.00	
		Cheminées de ventilation	228 000.00	
			Sous-total =	n.d
	Adoucissement des talus	Matériau de remblaiement	n.d	
		Autres	n.d	
			Sous-total =	n.d
	Rallongement, remplacement et ajout de ponceaux, reprofilage de fossé, décharge et empierrement	Tuyau en tôle d'acier ondulée galvanisée (TTAOG)	n.d	
		Imperméabilisation d'extrémités de ponceaux	n.d	
		Fossé de décharge	n.d	
		Autres	n.d	
			Sous-total =	n.d
	Rechargement, correction des déformations et application d'un abat-poussière	Granulats concassés MG 20b modifié	n.d	
Abat poussière		n.d		
Autres		n.d		
		Sous-total =	n.d	
Sous-total travaux d'adaptation de 2012 =			2 915 855.10	
2016	Bermes filtrantes à l'entrée des ponceaux	Berne filtrante et trappe à sédiments permanentes	7 040.00	
		Sous-total =	7 040.00	
Total travaux d'adaptation (2012 et 2016) =			2 922 895.10	
2012-2020	Entretien	Scarification et nivellement de la route (2012)	n.d	
		MG 20b modifié (rechargement) (2012)	n.d	
		Nettoyage de fossés (2016)	38 430.00	
		Total travaux d'entretien =	45 470.00	
Grand total =			n.d	

1.6.2.4 INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DE PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION

Divers instruments ont été installés afin d'assurer le suivi du comportement thermique et mécanique du remblai de la route et du pergélisol sous-jacent. À cette instrumentation, s'ajoute également quelques câbles à thermistances en milieu naturel et une station météorologique du CEN (Réseau SILA) disposés à proximité de l'infrastructure et maintenus par le Centre d'études Nordiques (Figure 44). Par exemple, en milieu naturel, donc non perturbé, à une centaine de mètres du pied de remblai côté aval, un câble à thermistances peu profond installé en 2006 (L'Hérault, 2009) permet de suivre avec précision la progression de l'isotherme de 0 °C, ou front de dégel, dans la zone de transition mollisol/pergélisol. Lors des travaux d'investigations géotechniques réalisées à l'automne 2008 (L'Hérault *et al.*, 2012), un tubage de PVC avait été installé dans le puits du forage SAL-F6 afin de permettre au MTQ de l'instrumenter pour faire le suivi thermique du pergélisol ultérieurement. Lors de travaux d'entretien du réseau de suivi thermique du pergélisol du CEN, un câble et un système d'acquisition de données ont temporairement été installés dans le puits en question, assurant ainsi un suivi du régime thermique depuis 2010.

Lors des travaux de réfection de la route en 2012, chacune des deux sections, situées respectivement aux chaînages 1+620 et 1+720, ont été instrumentées à l'aide de cinq câbles à thermistances verticaux composés de 10 thermistances chacun. Les câbles à thermistances verticaux ont été insérés dans un tubage de PVC rempli d'huile de silicone préalablement introduit dans des puits de forages de 5 pouces de diamètre et de 5 mètres de profondeur réalisés à l'aide d'une foreuse pneumatique à percussions. Les câbles ont été positionnés le long d'un axe transversal à la route en respectant les positions suivantes : en pied de remblai de chaque côté de la route, sous le drain thermique à mi-pente du talus, sous le centre de la chaussée et finalement, sous la pente douce à mi-pente du talus (Figure 44). Cette configuration permet de suivre les températures dans le remblai et le pergélisol sous-jacent pour différentes positions et ainsi offrir une vision en plan du régime géothermique. Chaque câble est nommé par la lettre de sa station puis suivi d'un numéro allant de 3 à 7. La numérotation est dans l'ordre croissant du côté amont (pente douce) vers le côté aval (drain). Pour chacune des sections, les câbles sont raccordés à un système d'acquisition de données CR1000 de la compagnie Campbell Scientific Inc. munit d'un multiplexeur AM16/32 afin de permettre de brancher toutes les thermistances. Les systèmes d'acquisition sont protégés par des boîtiers situés dans l'accotement côté amont et sont nommés respectivement stations A (1+620) et B (1+720). Selon Périer *et al.* (2016), la validation des positions des câbles à thermistances a été difficile en raison d'erreurs de dimensions de pentes et d'élévations dans les premières versions des plans tels que construits. Toutefois, une seconde révision des plans avec validation par des mesures sur le terrain et photos lors de l'installation a permis de repositionner avec une bonne précision les câbles à thermistances (Périer *et al.* 2015). D'après ces mêmes auteurs, le positionnement des profondeurs des thermistances pour les différents câbles par rapport à la surface du remblai a également été problématique. Après validation, à l'exception des câbles A6 et B6, les profondeurs initialement prévues par rapport à la surface du remblai ont été respectées (Tableau 12). Pour ce qui est des câbles A6 et B6, les premières thermistances ont été positionnées à 50 cm par rapport au drain thermique et non à la surface remblai. Selon les plans tel que construit, le drain repose à environ 100 cm et 75 cm sous la surface aux sections A et B respectivement. Ainsi, afin de faciliter la comparaison des données de températures avec les autres câbles à thermistances, les thermistances de ces derniers ont été repositionnées par rapport à la surface du remblai et non par rapport au drain thermique (Tableau 12). À noter qu'au cours de l'hiver 2019, les câbles à thermistances de la station B ont été presque complètement sectionnés au pied du boîtier du système d'acquisition par les opérations de déneigement. À l'été 2019, l'équipe de recherche a été en mesure de réparer 3 des 5 câbles à thermistances de la station B, soit les câbles B3, B4 et B5. Les câbles à thermistances B6 et B7, situés respectivement sous le talus du drain thermique et en pied de remblai côté aval, sont toujours non fonctionnels.

Deux câbles à thermistances ont été installés et courent à l'horizontal au pied de l'ancien remblai sur une longueur de 50 m de chaque côté de la route. Composés chacun de 25 thermistances espacées à tous les deux mètres, ces câbles suivent le tracé du câble de fibres optiques (DTS) entre les chaînages 1+630 et 1+680 (côté amont; pente douce) et entre les chaînages 1+620 et 1+670 (côté aval; drain thermique). Positionnés légèrement au-dessus du câble DTS sur une couche de sable puis recouverts d'une autre couche de sable afin d'assurer leur protection, ces câbles servent à valider les températures obtenues avec le DTS en plus de permettre un suivi thermique supplémentaire en surface, dans un axe parallèle à l'infrastructure. Lors des travaux en 2012, six thermistances réparties le long de deux transects (à proximité d'une cheminée de ventilation et à 15 m de cette cheminée) ont été installées directement dans le drain thermique pour mesurer les températures de l'air à trois hauteurs (bas de pente, quart inférieur de pente et en milieu de pente) près de la station B. À l'été 2013, six autres thermistances suivant la même configuration ont été ajoutées à la station A au chaînage 1+620. Cette configuration permet d'évaluer la différence de température le long du drain en vue de confirmer la présence d'un gradient thermique et le quantifier, et ce, en fonction de la distance par rapport à une cheminée de ventilation. À l'été 2015, six enregistreurs de température de la compagnie Onset ont été insérés à l'intérieur de trois paires de cheminées de ventilation (entrée et sortie) aux sites A et B et au chaînage 1+340 m. Ces capteurs, localisés à une quinzaine de centimètres sous la surface, avaient pour objectif de comparer l'efficacité du drain où la pente et la géométrie recommandées ont été respectées (chaînage 1+340) avec une portion où son installation n'est pas optimale (stations A et B). L'emplacement de l'instrumentation installée le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit pour le suivi thermique est présenté à la figure 44 et les caractéristiques techniques résumées au tableau 12.

Deux câbles de fibres optiques spécialement conçus pour permettre la mesure de températures linéairement distribuées à tous les 25 centimètres (*Distributed Temperature Sensing, DTS*) ont été enfouis sous les talus de part et d'autre de la route. Ces câbles, de la compagnie britannique AP Sensing GmbH, sont protégés par une gaine métallique de 3,8 mm de diamètre et comportent deux fibres optiques chacun. Les deux câbles ont une longueur totale de 2,2 km et ont été installés de manière à former une boucle ce qui permet de réaliser des lectures en mode différentiel et limiter le risque de perte de données en cas de bris. Les tracés exacts des câbles sont présentés à la figure 44. Sur le côté amont, le câble s'étend du chaînage 1+250 au chaînage 2+100 (850 m) et a été enfoui à deux profondeurs soit : à 30 cm sous le niveau naturel du sol à l'aller et à l'interface entre le sol naturel et le remblai au retour. Du côté aval (drain thermique), le câble est localisé sous le drain thermique entre le chaînage 1+250 à 1+740 (490 m) et passe également sous 4 ponceaux pour ensuite revenir dans le terrain naturel, à environ une dizaine de mètres du pied de remblai. Au cours de l'installation des câbles de fibres optiques en 2012, ces derniers ont été endommagés à quelques endroits durant l'installation ou par de la machinerie lors de la réalisation de travaux d'excavation à proximité, mais ont été rapidement réparés par l'entrepreneur. Après environ quatre années de fonctionnement, le câble du côté amont s'est brisé à deux endroits et celui sur le côté aval à un seul endroit. Compte tenu de la configuration en boucle des deux câbles, c'est-à-dire que les extrémités de chaque câble sont branchées au système d'acquisition, chaque lecture est prise par les deux extrémités dans un sens puis dans l'autre. Ce type de configuration assure une certaine résilience au système, car jusqu'à concurrence d'un seul bris, elle permet de faire des lectures sur la totalité du câble. Toutefois, dès que le même câble est brisé à plus d'un endroit, il devient impossible d'effectuer la lecture pour les sections du câble situées entre les bris, ce qui résulte en des mesures incomplètes. Pour cette raison, seules les mesures réalisées sur le câble côté amont qui était brisé à plus d'un endroit, étaient incomplètes. Afin de corriger la situation, à l'été 2016, le MTQ a mandaté le CEN pour procéder à la réparation du câble côté amont (L'Hérault et Allard, 2016).

Afin de faire le suivi des déformations de la route d'accès, 5 inclinomètres (3 verticaux et 2 horizontaux) ont été installés lors des travaux de réfection de la route en 2012 (Figure 44). Les tubes d'un diamètre de 80 mm ainsi que les sondes amovibles utilisées sont de la marque RST Instruments et les données mesurées sont traitées avec les logiciels « *Inclinalysis* » (inclinomètres verticaux) et « *Horizontal Inclinalysis* » (inclinomètres horizontaux) de RST Instruments Ltd. Les inclinomètres verticaux ont été installés en pied de talus du remblai du côté aval (drain

thermique) aux chaînages 1+620, 1+660 et 1+720 dans des trous de 5 m de profondeur réalisés préalablement avec une foreuse pneumatique à percussion. Les vides entre les tubes et les parois ont été remplis de sable et d'eau, puis les tubes remplis d'huile de silicone afin de prévenir la formation de bouchons de glace. Les tubes ont été minutieusement orientés de manière à ce que les guides internes des tubes assurent une lecture dans les plans perpendiculaires et parallèles à l'axe de la route et ainsi quantifier toutes rotations d'épaulement ou affaissements de talus. Afin d'éviter l'infiltration d'eau à l'intérieur des tubes, ces derniers ont été capés à l'aide de bouchons de plastiques amovibles qui sont retirés au moment d'effectuer des mesures. En ce qui concerne les inclinomètres horizontaux, ces derniers ont été installés à l'horizontale, à l'interface sol naturel et la base du remblai, aux chaînages 1+720 et 2+000 et mesurent respectivement 25 m et 24 m. L'installation des inclinomètres horizontaux a nécessité l'excavation complète du remblai de la route à deux endroits dans lesquelles les tubes ont été minutieusement orientés de manière à ce que les guides internes des tubes assurent une lecture dans les plans transversaux à l'axe de la route et ainsi quantifier les tassements du remblai.

Contrairement à l'inclinomètre installé dans la berme convective à Puvirnitug, ceux installés à Salluit ne sont pas automatisés. Par conséquent, la prise des lectures se fait manuellement à l'aide d'une sonde que l'on insère dans les tubes inclinométriques, et ce, une fois par année lors de la période de dégel maximale (mois d'août ou septembre). Pour la prise des lectures des inclinomètres horizontaux, des bouchons de glace se sont formés à l'intérieur des tubes dès la première année suivant la fin des travaux, limitant ainsi la prise de mesure. En 2014, un câble chauffant a été ajouté dans chaque inclinomètre horizontal pour faciliter son déglacement, mais l'utilisation d'un jet d'eau sous pression demeure tout de même nécessaire pour finaliser le déglacement. Outre la formation récurrente de bouchons de glace, la présence d'obstacles ou la simple dislocation des tubes au niveau du centre ligne de la route requière que les lectures pour les inclinomètres horizontaux soient prises à partir de chaque extrémité. Les données ainsi obtenues sont valables, mais difficiles à interpréter en l'absence d'une référence géodésique externe qui permettrait d'associer les deux sections du profil mesuré (Périer *et al.*, 2016). À noter que l'extrémité amont (côté pente douce) du tube au chaînage 2+000 a été écrasée et cassée sur 128 cm. Depuis 2015, cette portion a été coupée et sera donc à retrancher des mesures futures. À l'automne 2019, les déformations trop importantes dans le premier mètre et demi des inclinomètres verticaux situés aux chaînages 1+620 et 1+660 n'ont pas permis, et ne permettront plus, d'effectuer des mesures de déformations. Néanmoins, des mesures ont été effectuées dans le troisième inclinomètre vertical situé au chaînage 1+720 qui est, quant à lui, toujours fonctionnel.

À l'été 2018, dans le cadre du présent projet, trois câbles à thermistances ont été ajoutés au réseau de suivi thermique de la route d'accès. L'objectif de ces trois nouveaux câbles est d'évaluer la performance thermique de trois sections perpendiculaires à l'infrastructure partant de l'accotement côté aval jusqu'à une dizaine de mètres du pied de remblai vers le bas de pente. Les ajouts consistent en une section vis-à-vis des cheminées (chaînage 1+485 m et 1+612 m) et une section à une quinzaine de mètres des cheminées (chaînage 1+500 m). Les localisations de ces trois sections sont présentées à la figure 44. Ces câbles à thermistances, comparativement aux câbles à thermistances verticaux ou horizontaux standards préalablement installés, ont une configuration bien particulière, dite en étoile. Cette configuration permet, avec un seul système d'acquisition de données, d'assurer un suivi des températures à l'intérieur des différentes composantes critiques de l'infrastructure et du milieu naturel sans se restreindre qu'à un seul axe (vertical ou horizontal). Le positionnement des thermistances pour chacune des trois sections est présenté à la figure 45. Les étapes d'installation de ces thermistances pour les chaînages 1+485 m et 1+500 m sont présentées à la figure 46. Le suivi thermique de ces trois sections a permis : de confirmer la présence, ou non, de mouvement convectif à l'intérieur du drain et de le quantifier en mesurant les températures tout le long de la boucle de circulation convective du système partant de la cheminée d'entrée jusqu'à la cheminée de sortie, et ce, pour les trois sections; de mesurer précisément les températures de surfaces le long d'un transect allant de l'accotement jusqu'à une dizaine de mètres du pied de remblai en milieu naturel

afin de définir les conditions limites en fonction des variations du type de surface et des conditions d'enneigements; et de mesurer les gradients thermiques dans le remblai au-dessus et sous le drain.

Dans le cadre du projet, cinq caméras ont également été installées à l'été 2018 le long de la route d'accès. Trois caméras ont été installées sur le côté amont pour suivre les conditions de drainage dans les fossés et d'enneigement sur la pente douce, tandis que les deux autres ont été installées sur le côté aval avec des repères gradués pour suivre les conditions d'enneigement en marge du remblai muni d'un drain thermique. Les emplacements des caméras sont présentés à la figure 44 et leurs spécifications techniques résumées au tableau 12. En compléments aux suivis photographiques, des relevées de neige le long de profils perpendiculaires à l'axe de l'infrastructure ont été réalisés à l'hiver 2019. En complémentarité aux relevés des épaisseurs de neige, des puits d'observation ont été réalisés afin d'observer les différentes couches et structures de neige et procéder à des mesures de densité de la neige.

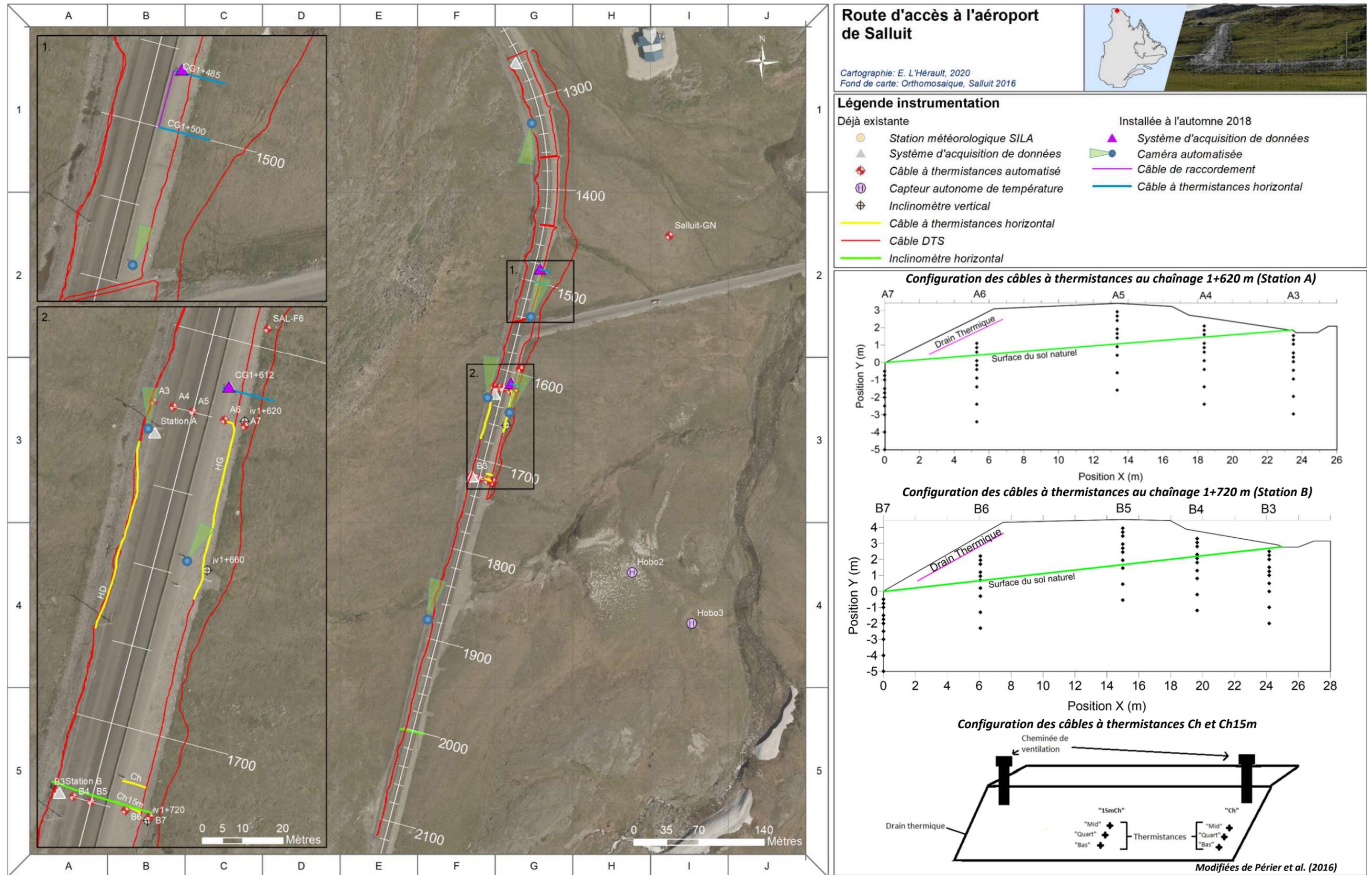
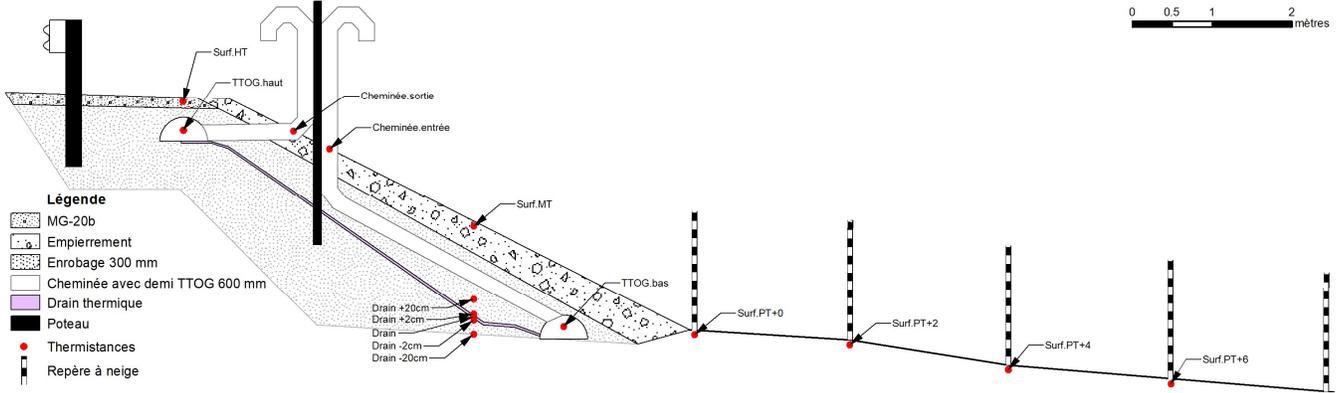


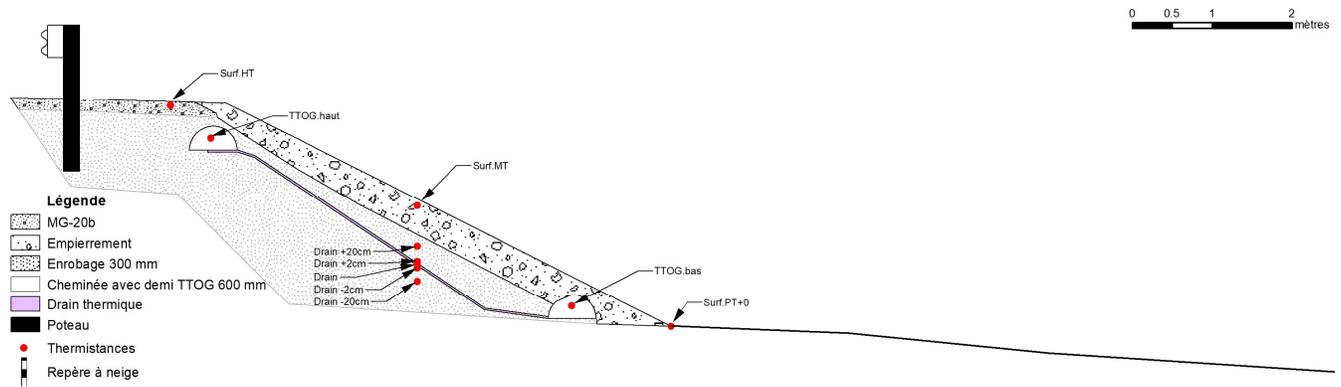
Figure 44 : Instrumentation déjà existante, celle nouvellement installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques de mitigation implémentées le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.

Chaînage 1+485 m

C



Chaînage 1+500 m



Chaînage 1+612 m

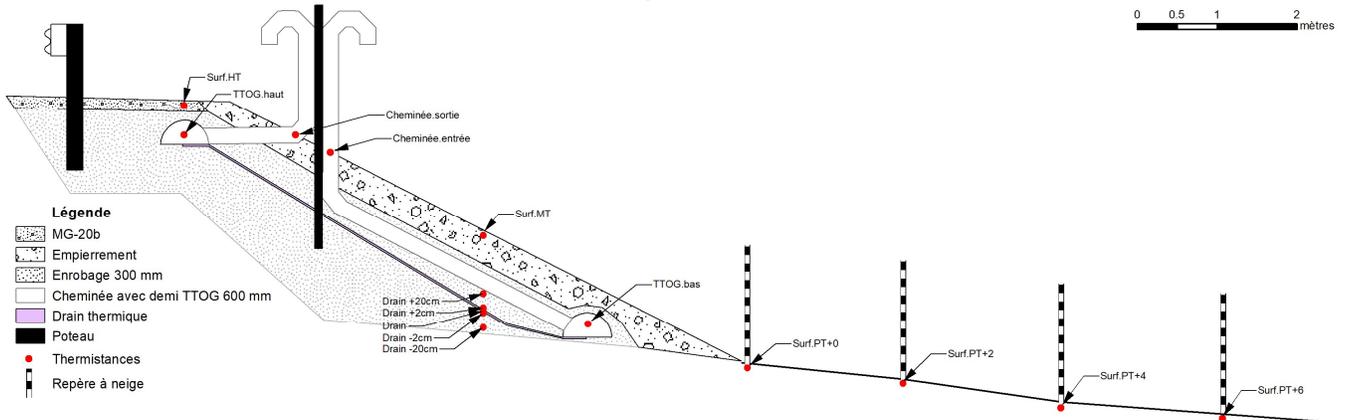


Figure 45 : Schéma d'installation des nouvelles thermistances pour évaluer la capacité convective du drain thermique pour trois sections le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. Deux vis-à-vis des cheminées (Chaînage 1+485 m et 1+612 m) et une à une certaine distance des cheminées (chaînage 1+500 m). Pour chacune des sections, les thermistances sont branchées à un système d'acquisition autonome.



Figure 46 : A) Excavation du talus de remblai côté aval à l'été 2018 dans le secteur de la route d'accès à l'aéroport de Salluit en vue de l'instrumentation d'une section du remblai avec des thermistances (chaînage 1+485 m). B) Thermistances installées dans les différentes sections du drain et du remblai juste avant de remblayer l'excavation. C) Tranchée d'une quinzaine de mètres de longueur réalisée dans l'accotement, entre le chaînage 1+485 m et 1+500 m, pour acheminer les câbles à thermistances au système d'acquisition de données. D) Système d'acquisition de données compact. E) Vue d'ensemble de la section du remblai de la route instrumentée au chaînage 1+500 m.

Tableau 12 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans le secteur de la route d'accès à l'aéroport de Salluit qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.

No. forage	Localisation	Orientation	Longueur (m)	Nb. thermistances	Répartition des thermistances (m)	Zéro de référence	Mise en service	Type lecture/système	Paramètres mesurés	État
GN	Terrain naturel	Vertical		24	-0.02; -0.1; -0.2; -0.3; -0.4; -0.5; -0.6; -0.7; -0.75; -0.8; -0.85; -0.9; -0.95; -1; -1.05; -1.1; -1.15; -1.2; -1.25; -1.3; -1.4; -1.5; -1.7; -2;	Surface terrain	2006-07-06	automatisée/CR10X	température du sol	Fonctionnel
SAL-F6	Pied de remblai	Vertical	10.00	13	-0.50; -0.75; -1; -1.25; -1.5; -2; -2.5; -3; -4; -5; -6; -8; -10	Surface terrain	2014-09-28	automatisée/RBR	température du sol	Semi fonctionnel
A3	remblai	Vertical	5.00	10	-0.50; -0.75; -1; -1.5; -1.75; -2; -2.5; -3; -4; -5	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
A4	remblai	Vertical	5.00	10	-0.50; -0.75; -1; -1.5; -1.75; -2; -2.5; -3; -4; -5	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
A5	Terrain naturel	Vertical	5.00	10	-0.50; -0.75; -1; -1.5; -1.75; -2; -2.5; -3; -4; -5	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
A6	Pied de remblai	Vertical	5.00	10	-1.5; -1.75; -2; -2.5; -2.75; -3; -3.5; -4; -5; -6*	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
A7	Pied de remblai	Vertical	5.00	10	-0.50; -0.75; -1; -1.5; -1.75; -2; -2.5; -3; -4; -5	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
B3	Remblai convectif	Vertical	5.00	10	-0.50; -0.75; -1; -1.5; -1.75; -2; -2.5; -3; -4; -5	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
B4	Remblai convectif	Vertical	5.00	10	-0.50; -0.75; -1; -1.5; -1.75; -2; -2.5; -3; -4; -5	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
B5	Remblai convectif	Vertical	5.00	10	-0.50; -0.75; -1; -1.5; -1.75; -2; -2.5; -3; -4; -5	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
B6	Remblai convectif	Vertical	5.00	10	-1.25; -1.5; -1.75; -2.25; -2.5; -2.75; -3.25; -3.75; -4.75; -5.75*	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
B7	Berme convective	Vertical	5.00	10	-0.50; -0.75; -1; -1.5; -1.75; -2; -2.5; -3; -4; -5	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
HD	Interface remblai/sol naturel	Horizontal	50.00	25	À tous les 2 m	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
HG	Interface remblai/sol naturel	Horizontal	50.00	25	À tous les 2 m	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
Ch	Drain	diagonale	n.a	3	Milieu de pente, quart de pente et bas de pente	Pied de talus	2012-10-08	automatisée/CR1000	température de l'air	Fonctionnel
Ch15m	Drain	diagonale	n.a	3	Milieu de pente, quart de pente et bas de pente	Pied de talus	2012-10-08	automatisée/CR1000	température de l'air	Fonctionnel
CG1+485	Côté aval	mixte	n.a	15	Voir croquis à la figure 45	Surface terrain	2018-08-30	automatisée/ULogC32	température du sol/air	Fonctionnel
CG1+500	Côté aval	mixte	n.a	10	Voir croquis à la figure 45	Surface terrain	2018-08-30	automatisée/ULogC32	température du sol/air	Fonctionnel
CG1+612	Côté aval	mixte	n.a	15	Voir croquis à la figure 45	Surface terrain	2018-08-30	automatisée/ULogC32	température du sol/air	Fonctionnel

A) 

B) 

C) 

D) 

E) 





Tableau 13 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées en août 2018 le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.

Nom	Coordonnées MTM (m)			Chainage (m)	Distance du CL (m)	Hauteur caméra (m)		Orientation (°)	Photos/jour	Date d'installation
	x	y	z			sol	CL			
A) SalCam-1	349 355.419	6 898 475.011	49.63	1+338	10	3	n.a	270	4	2018-08-27
B) SalCam-2	349 250.829	6 897 948.145	63.92	1+880	9.2	3	n.a	78	4	2018-08-27
C) SalCam-3	349 350.022	6 898 277.918	44.95	1+535	7.7	1	n.a	85	4	2018-08-29
D) SalCam-4	349 320.150	6 898 161.082	48.3	1+655	7.6	1	n.a	69	4	2018-08-29
E) SalCam-5	349 311.260	6 898 192.938	49.15	1+626	8.7	3	n.a	79	4	2018-08-31

1.6.2.5 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU REMBLAI DE LA ROUTE D'ACCÈS À L'AÉROPORT DE SALLUIT POUR LA PÉRIODE 2013-2020

1.6.2.5.1 PERFORMANCE THERMIQUE GÉNÉRALE

Le suivi climatique assuré par la station météorologique SILA localisée dans la vallée à proximité de la route d'accès permet, depuis la mise en place de la stratégie d'adaptation en 2012, d'évaluer l'influence des fluctuations interannuelles récentes sur la réponse du pergélisol post-adaptation. La variabilité journalière des températures de l'air pour la période comprise entre 2009 et 2019 ainsi que les différentes variables climatiques calculées sont présentées respectivement à la figure 47 et au tableau 14. Au cours des dix dernières années, la température annuelle moyenne de l'air pour la région de Salluit s'est avérée relativement stable avec une température annuelle moyenne de l'air de $-6.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un écart-type de $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Au cours de cette période, les températures moyennes annuelles de l'air affichent même une légère tendance au refroidissement. L'année climatique de 2009-2010 est la plus chaude enregistrée au cours de cette période avec une température moyenne annuelle de $-3.46\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit nettement inférieure à la moyenne. Cette température annuelle de l'air particulièrement chaude s'explique par un hiver très doux et un été plus long que la moyenne (Tableau 14). À l'opposé, l'année climatique de 2017-2018 est la plus froide enregistrée avec une TMAA de $-8.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui découle d'un hiver légèrement plus froid et plus long, mais surtout par un été nettement plus court et plus froid que la moyenne.

Les levés géoradar réalisés perpendiculairement à la route d'accès aux chaînages 1+620 et 1+720 suggèrent la présence d'un important réflecteur facilement identifiable sous la section de la pente douce du côté amont et en marge du remblai dans le terrain naturel côté aval (Figure 48). Cet important réflecteur a été identifié comme étant le plafond du pergélisol riche en glace estimé à environ 1.25 m de profondeur tel qu'observé lors de forages réalisés en marge du remblai (L'Hérault et al., 2012) et en milieu naturel (L'Hérault, 2009). Du côté amont, ce réflecteur plonge à une profondeur de 2.5 m (chaînage 1+620 m) et 3.5 m (chaînage 1+720 m) sous la pente douce pour ensuite remonter légèrement dans le remblai à proximité de l'épaulement actuel du remblai. Toutefois, en comparant la position de ce réflecteur avec les positions du front de dégel déterminées à partir des températures mesurées aux câbles A3, A4, B3 et B4, il n'y a pas de correspondance. Par conséquent, il est probable que ce réflecteur correspond plutôt à l'ancien contact cryostratigraphique avant adaptation entre la base de la couche active et le plafond du pergélisol riche en glace. Cette hypothèse coïncide avec les importantes déformations du côté amont observées le long de la route avant la mise en place du remblai à pente adoucie (L'Hérault *et al.*, 2012). Ce contact cryostratigraphique ne doit pas être confondu avec la profondeur maximale du front de dégel identifiée le long de ces mêmes profils géoradar. Ces observations suggèrent une aggradation du pergélisol sous les accotements autant du côté amont que du côté aval et que la profondeur maximale de dégel demeure désormais dans le remblai ou pénètre que légèrement sous la base de ce dernier. La reprise du pergélisol au sein de ces zones initialement dégelées au cours des années suivant la mise en place de la pente douce côté amont, du rehaussement du remblai au centre et l'ajout du drain thermique côté aval, présentent désormais un avantage considérable pour la stabilité future de l'infrastructure. En effet, cette remontée du pergélisol au sein d'un matériau auparavant dégelé puis consolidé forme une couche tampon dont le dégel éventuel n'entraînera que très peu de tassements supplémentaires. Ce n'est qu'advenant un dégel au-delà de l'ancien contact cryostratigraphique, correspondant à l'ancien plafond du pergélisol, que des tassements plus importants risquent de se produire à nouveau.

L'analyse des données thermiques enregistrées par les câbles à thermistances aux sections 1+620 m (station A) et 1+720 m (station B) a permis de tracer, en plan transversal au remblai et pour la période de 2012 à 2019, la profondeur annuelle maximale atteinte par le front de dégel. Pour les stations A et B, les profondeurs annuelles maximales du front de dégel (isotherme $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) sont présentées respectivement aux figures 49 et 50. Pour l'ensemble des câbles présents aux deux sections, la profondeur maximale du front de dégel a diminué considérablement dès l'été suivant la mise en place des pentes douces côté amont (câbles A3, A4, B3 et B4),

l'enlèvement de la couche d'asphalte et le rehaussement au centre du remblai (câbles A5 et B5) et l'installation d'un drain thermique coté aval (câbles A6 et B6) pour ensuite demeurer sensiblement stable et fluctuer de manière synchrone aux variations climatiques récentes (2013-2019). Cette diminution marquée de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel entre l'été 2012 et l'été 2013 s'explique essentiellement par un réajustement thermique post adaptation en réponse au changement apporté à l'infrastructure. Considérant la position du front de dégel à l'été 2012 comme étant la position de référence et en excluant l'été particulièrement froid de 2018, la profondeur maximale atteinte par le front de dégel entre 2012 et 2019 a diminué de plus d'une vingtaine de centimètres à la section A (Figure 49) et d'une quarantaine de centimètres à la section B (Figure 50).

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette différence relativement importante dans la diminution de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel entre les deux sections suite à la mise en place des mesures d'adaptation. La première hypothèse suggère qu'une épaisseur de remblai initialement plus importante, 1.9 m au centre du remblai pour le chaînage 1+620 m versus 2.2 m pour le chaînage 1+720 m, a nécessité l'ajout d'une couche de matériau plus importante du côté de la pente adoucie à la section B qu'à la section A comme le témoigne les profils topographiques initiaux et après adaptation présentés aux figures 49 et 50. Cette différence d'épaisseur de matériau ajouté du côté de la pente adoucie entre les deux sections permettrait d'expliquer cette diminution plus marquée de la profondeur du front de dégel à l'emplacement du câble B3 comparativement au câble A3. Pour l'épaulement côté amont (câbles A4 et B4) et la section centrale de la route (câbles A5 et B5), les plans tel que construit suggèrent un rehaussement plus important du remblai entre les deux sections. Ce rehaussement est estimé à environ 0.2 m pour la section A comparativement à 0.4 m pour la section B, ce qui peut également expliquer en partie la différence observée quant à la position maximale atteinte par le front de dégel entre ces deux sections. Du côté du drain thermique (câble A6 et B6), une épaisseur du remblai plus importante à la section B a nécessité l'installation d'un drain thermique plus long (6.7 m versus 5 m pour la section A) et avec un différentiel de hauteur entre l'entrée et la sortie d'air plus important (3 m versus 2.4 m pour la section A). D'après Châtagner (2008), plus le différentiel de hauteur entre l'entrée et la sortie du drain augmente, plus l'amplitude du flux thermique augmente ce qui se traduit par une extraction de chaleur plus efficace en hiver. Toutefois, cette différence d'efficacité attribuable au différentiel de hauteur entre les cheminées d'entrée et de sortie demeure très faible lorsque cette différence demeure inférieure à l'ordre du mètre (Châtagner, 2008), le cas échéant. Même si la capacité d'extraction de chaleur du drain thermique est directement proportionnelle à l'épaisseur du remblai (épaisseur plus grande = extraction plus importante), la longueur du drain constitue, quant à elle, une variable limitative (Kong, 2019). Pour ces raisons, il est donc peu probable que la petite différence dans le différentiel de hauteur entre l'entrée et la sortie du drain thermique, contrebalancée par un drain thermique légèrement plus long, soit responsable de cette diminution plus importante du front de dégel entre les sections A et B.

Pour la section A, la position du front de dégel maximale sous le centre de la route (câble A5) se situe désormais à l'interface entre la base du remblai et la surface du sol naturel. Sous la pente douce (A3), l'accotement côté amont (A4) et sous le drain thermique (A6), la position moyenne du front de dégel pour la période post adaptation entre 2013 et 2019, la position du front de dégel pénètre sous le remblai à une profondeur moyenne de 0.8 m. Pour cette même section, seul le câble sous la pente adoucie (A3) montre une augmentation de la profondeur maximale du front de dégel pour la période 2012-2019. En effet, restée sensiblement la même depuis la mise en place de la pente douce, la profondeur maximale de dégel s'est approfondie à cet endroit de plus d'une quinzaine de centimètres en 2019, probablement favorisée par un été plus chaud que la moyenne en 2019. Sous le drain thermique (câble A6), la profondeur maximale du front de dégel n'a diminué que d'une dizaine de centimètres tout au plus au cours de la même période (Figure 49). Le centre de la route est l'endroit pour lequel la diminution de la profondeur maximale du front de dégel est la plus marquée avec une diminution de 0.24 m (câble A4) et 0.47 m (câble A5) entre 2012 et 2019 (Figure 49). Pour ce qui est de la section B, la variation de la profondeur maximale du front de dégel montre sensiblement la même tendance. La profondeur maximale du front de dégel

sous le centre de la route (câble B5) se situe désormais à la base du remblai et pénètre légèrement dans le sol naturel sous la pente adoucie (câble B3), sur l'épaulement côté amont (câble B4) et sous le drain thermique (câble B6). Il est important de mentionner qu'une certaine incertitude demeure quant à la position réelle de la première thermistance aux câbles A6 et B6 situés dans le talus de pente du remblai côté aval. Par conséquent, les positions du front de dégel estimées peuvent sensiblement varier selon la profondeur réelle de ces dernières.

Afin de visualiser les températures dans le remblai, des graphiques de distribution spatiale des températures sous formes d'isothermes le long des sections A et B ont été générés. Afin de limiter le nombre de graphiques, les moyennes mensuelles des températures par profondeurs pour l'ensemble de la période de suivi (2012 à 2019 pour le câble A et de 2012 à 2017 pour le câble B) ont été utilisées pour chacune des sections et seulement celles des mois de décembre, mars, juin et septembre sont présentées à la figure 51. Ces différents graphiques démontrent que pour les deux sections, les températures sous l'empreinte totale de la route, c'est-à-dire sous les talus du côté amont (pentes adoucies), sous le centre de la route (surface de roulement) et du côté aval (drain thermique), se refroidissent uniformément au début de l'hiver (décembre). Ce refroidissement uniforme des températures le long des profils, mis en évidence par la linéarité et le parallélisme des isothermes, se poursuit tout au long de l'hiver. Toutefois, à mesure que l'hiver progresse (mars), les isothermes de températures affichent graduellement des profils concaves ce qui confirment un refroidissement plus important du remblai sous la surface de roulement par rapport aux talus du côté de la pente adoucie et du drain thermique. Cette différence en termes de régime thermique entre les talus et la section centrale de la route (surface de roulement) est attribuable à l'absence de neige sur cette dernière qui favorise une extraction efficace de la chaleur accumulée au sein du remblai lors de la période estivale antérieure. Le régime thermique plus froid dans la section centrale de la route contribue au développement d'un bulbe de température plus froide sous la route par rapport aux talus qui persiste jusqu'au début de la saison de dégel. Graduellement, tout au long de la saison de dégel, cette dynamique thermique s'inverse, marquée par des températures plus chaudes dans les premiers mètres du remblai sous la surface de roulement par rapport aux talus. En comparaison avec les isothermes hivernaux, les isothermes estivaux affichent une linéarité et un parallélisme à la fin de l'été sur l'ensemble de l'empreinte de l'infrastructure, ce qui suggère un réajustement relativement uniforme du régime thermique. Malgré cette linéarité des isothermes, le front de dégel (isotherme 0°C) est légèrement plus profond sous le talus côté aval pour les deux sections (Figure 51), et ce, malgré une épaisseur de remblai plus importante par rapport à la section centrale de la route et au niveau du talus côté amont (pente adoucie). Cette divergence pourrait s'expliquer par une exposition au rayonnement plus directe en période estivale et un effet isolant de la neige en hiver plus important du talus côté aval par rapport au centre du remblai et le talus côté amont.

Pour chacune des deux sections instrumentées (section A et B), les profils moyens de températures minimales, maximales et moyennes pour la période 2012-2019 sont présentés à la figure 52. Pour les accotements du côté amont (A4 et B4) et la section centrale du remblai (A5 et B5), les profils montrent tous une similitude à savoir une amplitude plus importante dans les premiers mètres sous la surface et des températures moyennes plus froides tout le long du profil. Pour ces deux endroits, le gradient thermique entre 0.5 m et 5 m de profondeur est normal (température moyenne plus froide en surface qu'en profondeur), ce qui témoigne d'un comportement thermique favorable au refroidissement des températures dans le sol naturel sous l'infrastructure et du maintien du pergélisol (Figure 53). Du côté des pentes adoucies (câbles A3 et B3) et les pieds de talus côté aval (câbles Sal-F6 et B7), l'amplitude des températures est beaucoup moins marquée, caractérisée par des températures minimales en surface nettement plus chaudes en hiver et des températures maximales moins élevées en été (Figure 52). La présence d'amoncellements importants de neige résultants des opérations de déneigement en période hivernale et une exposition à la radiation moins directe en période estivale expliquent vraisemblablement les régimes thermiques distinctifs observés sous les pentes adoucies. Pour les deux sections, ces régimes thermiques sous les pentes adoucies confèrent un gradient thermique légèrement inverse comme en témoigne les profils des températures moyennes dans le sol pour les câbles A3 et B3 (Figure 53). Par conséquent, les conditions

thermiques plus chaudes rencontrées en surface se traduisent également plus en profondeur contribuant ainsi à avoir des régimes thermiques en déséquilibre qui tendent vers des conditions plus chaudes en profondeur. Sous le drain thermique (câbles A6 et B6), l'amplitude des températures du sol est moins importante que sous le centre de la route, mais supérieure à celle observée du côté de la pente douce et des pieds remblais côté aval. Sous le drain thermique, les profils de températures minimales se rapprochent de ceux observés au centre de la route, ce qui contribue à maintenir un gradient thermique normal (Figure 53), donc de favoriser un maintien du profil de température du sol en conditions froides qui confère une certaine stabilité thermique.

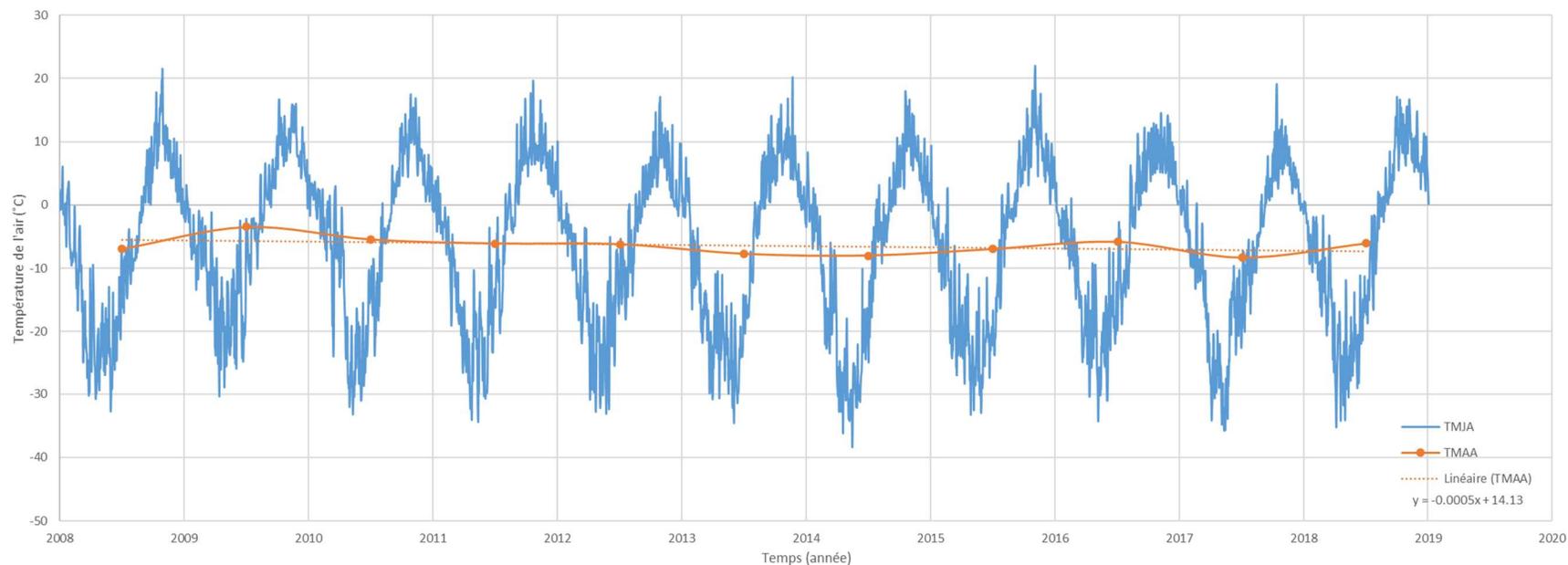


Figure 47 : Variation de la température journalière de l'air (TMJA) et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) à Salluit pour la période 2008-2019. Les moyennes journalières et annuelles ont été calculées à partir des températures de l'air horaires mesurées à la station météorologique SILA située dans Salluit-2.

Tableau 14 : Variables climatiques pour la période 2008-2019 calculées à partir des températures journalières de l'air (TMJA) mesurées à la station météorologique SILA, Salluit-2.

Année climatique		2008-09	2009-10	2010-11	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20	Moyenne
Saison de gel	Début	10-oct	29-sept	04-nov	18-oct	03-oct	24-oct	10-oct	05-oct	05-oct	16-oct	21-sept	n.d.	10-oct
	Fin	02-juin	23-mai	01-juin	29-mai	06-juin	21-mai	01-juin	08-juin	24-mai	09-juin	26-mai	n.d.	30-mai
	Durée	236	237	210	225	247	210	235	248	232	237	248	n.d.	233
	Moyenne T°C	-14.10	-10.35	-13.18	-13.86	-12.48	-16.98	-15.68	-14.18	-13.11	-14.64	-13.39	n.d.	-13.82
	Indice de gel (FI)	-3326	-2454	-2768	-3119	-3084	-3567	-3685	-3517	-3042	-3469	-3322	n.d.	-3214
Saison de dégel	Début	03-juin	24-mai	02-juin	30-mai	07-juin	22-mai	02-juin	09-juin	25-mai	10-juin	27-mai	n.d.	31-mai
	Fin	28-sept	03-nov	17-oct	02-oct	23-oct	09-oct	04-oct	04-oct	15-oct	20-sept	02-oct*	n.d.	09-oct
	Durée	118	164	138	126	139	141	125	118	144	103	129*	n.d.	131
	Moyenne T°C	7.31	6.51	6.32	7.81	4.98	6.03	6.39	8.20	5.91	6.13	8.00*	n.d.	6.69
	Indice de dégel (TI)	862	1067	872	984	693	851	799	968	852	631	1032*	n.d.	874
Moyenne annuelle		-6.96	-3.46	-5.45	-6.09	-6.19	-7.74	-8.02	-6.96	-5.82	-8.35	-6.07*	n.d.	-6.37
Ratio (FI/TI)		3.86	2.30	3.17	3.17	4.45	4.19	4.61	3.63	3.57	5.50	3.22*	n.d.	3.26
Nombre de jour		354	401	348	351	386	351	360	366	376	340	377*	n.d.	365

*Valeur approximative, données climatiques incomplètes.

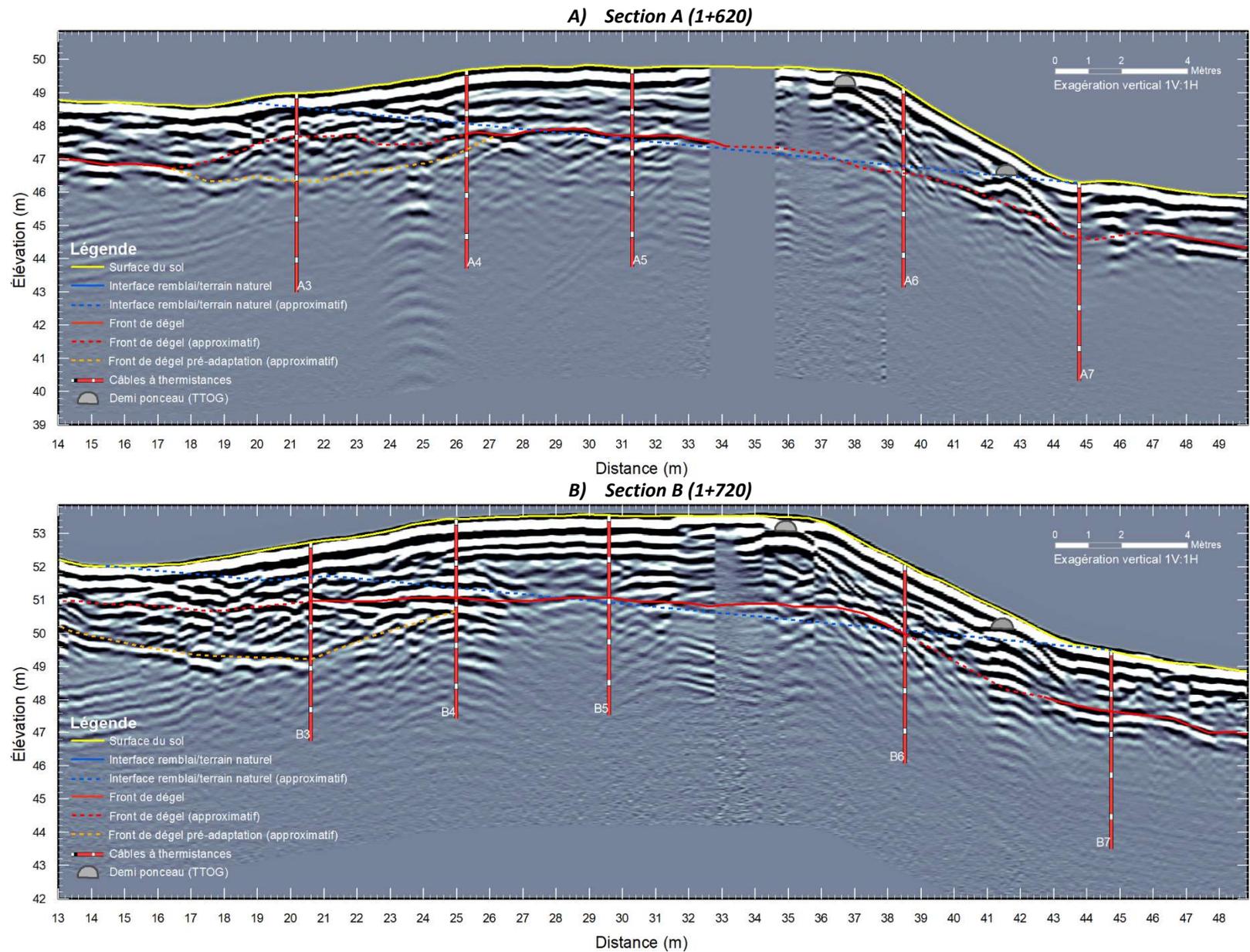
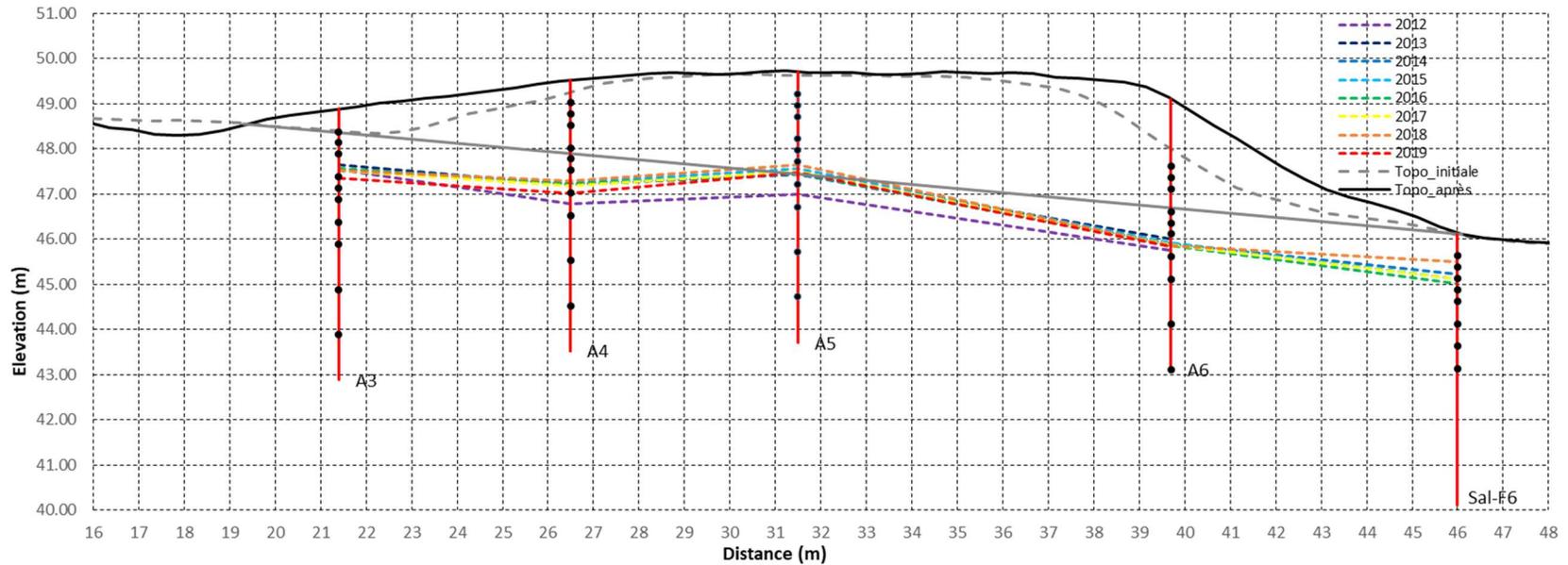
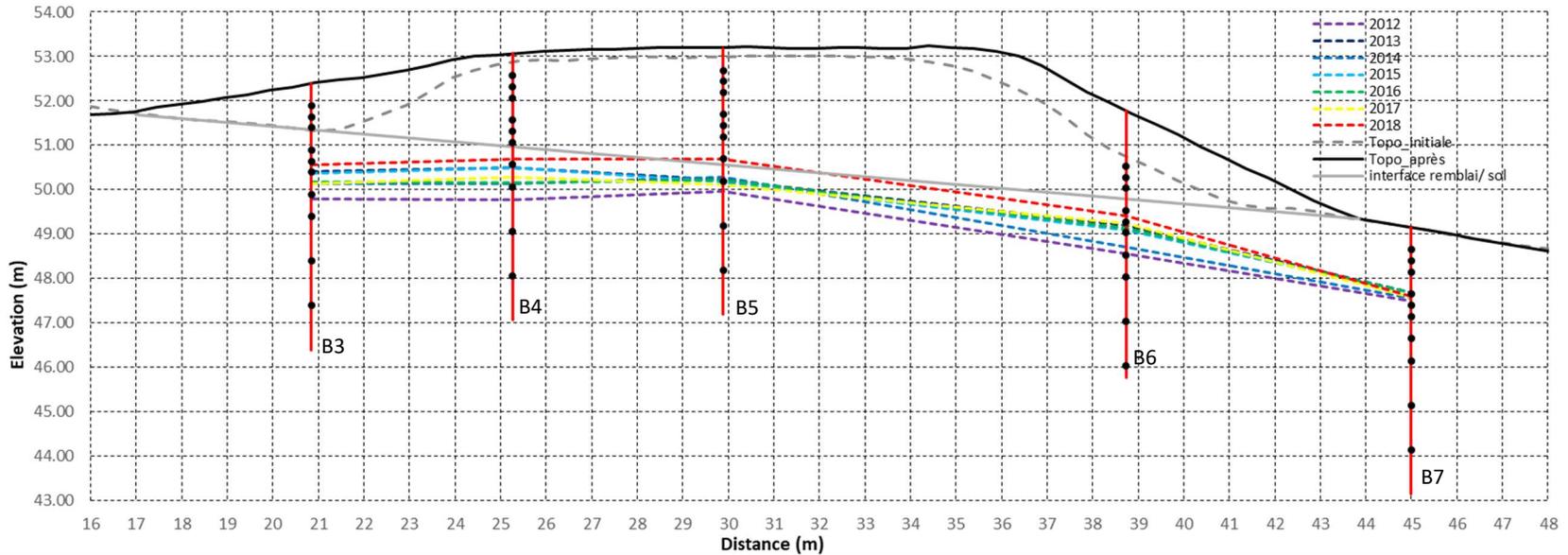


Figure 48 : Interprétation des levés de géoradar transversaux à l'axe de la route d'accès à l'aéroport de Salluit réalisés en septembre 2019 aux chaînages A) 1+620 m et B) 1+720 m.



<i>Profondeur maximale du front de dégel par rapport à la surface du terrain (m)</i>											
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne	Delta (2019 vs 2012)
A3	-1.34	-1.24	-1.36	-1.31	-1.32	-1.35	-1.37	-1.53		-1.35	0.19
A4	-2.74	-2.32	-2.31	-2.27	-2.29	-2.35	-2.23	-2.50		-2.38	-0.24
A5	-2.71	-2.27	-2.26	-2.14	-2.25	-2.21	-2.07	-2.24		-2.27	-0.47
A6	-3.36	-3.10	-3.20	-3.20	-3.25	-3.23	-3.26	-3.28		-3.23	-0.08
SAL-F6	n.d.	n.d.	-0.89	-0.99	-1.11	-1.01	-0.62	n.d.		-0.92	n.d.

Figure 49 : Positions du front de dégel sous la surface du sol déterminées à partir des lectures de températures du sol mesurées aux câbles à thermistances de la section A (chaînage 1+620), route d'accès à l'aéroport de Salluit.



<i>Profondeur maximale du front de dégel par rapport à la surface du terrain (m)</i>											
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne	Delta (2018 vs 2012)
B3	-2.61	-1.98	-2.25	-2.02	-2.22	-2.25	-1.83	n.d	n.d	-2.17	-0.78
B4	-3.30	-2.57	-2.93	-2.57	-2.90	-2.79	-2.38	n.d	n.d	-2.78	-0.92
B5	-3.23	-2.96	-2.90	-3.00	-2.96	-3.07	-2.50	n.d	n.d	-2.95	-0.73
B6	-3.22	-2.59	-3.08	-2.70	-2.64	-2.53	-2.38	n.d	n.d	-2.73	-0.84
B7	-1.65	-1.47	-1.58	-1.46	-1.46	-1.56	-1.55	n.d	n.d	-1.53	-0.10

Figure 50 : Positions du front de dégel sous la surface du sol déterminées à partir des lectures de températures du sol mesurées aux câbles à thermistances de la section B (chaînage 1+720), route d'accès à l'aéroport de Salluit.

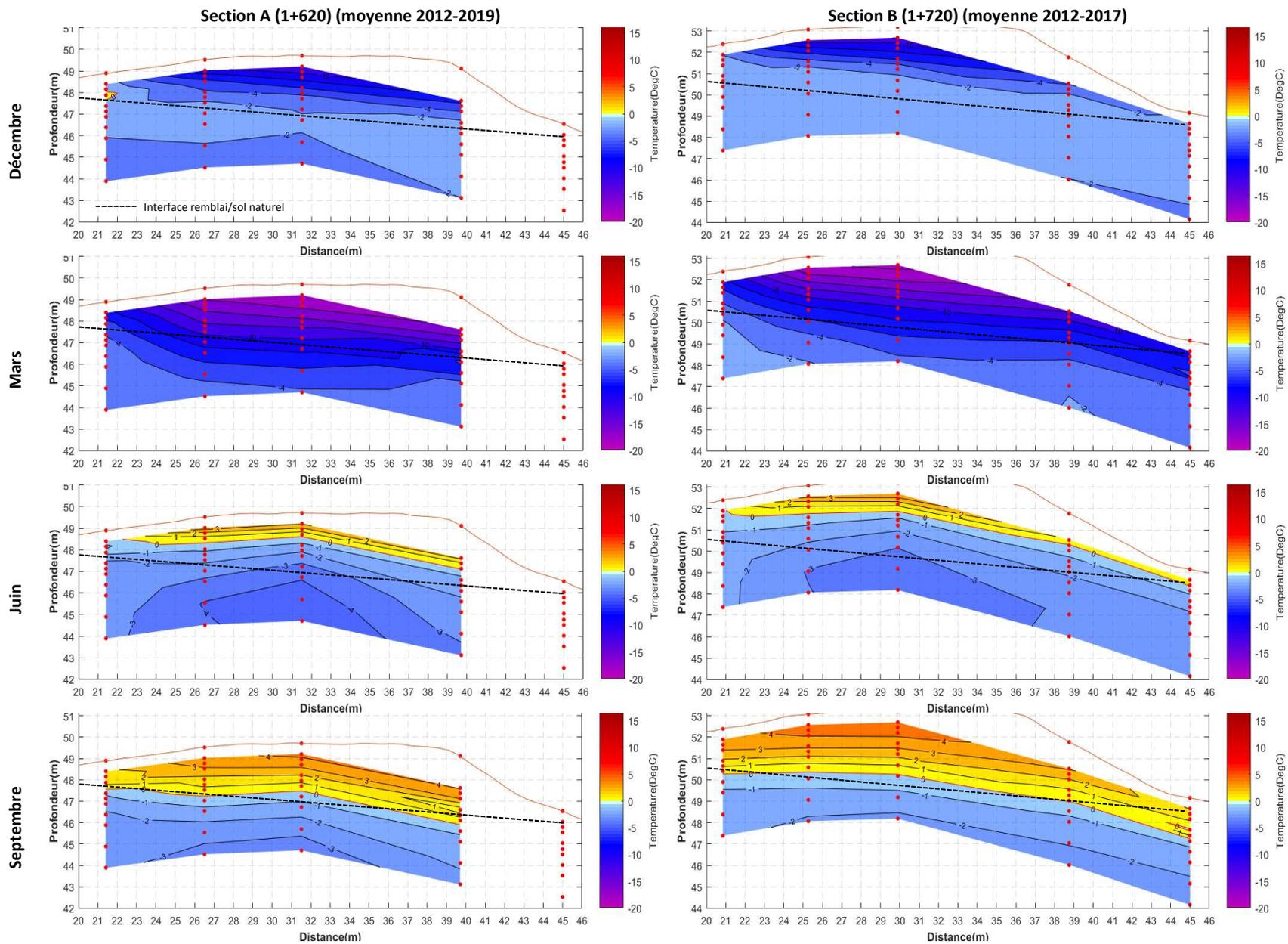


Figure 51 : Distribution spatiale des moyennes mensuelles des températures dans le remblai et le sol sous-jacent pour la section A (2012-2019) et la section B (2012-2017).

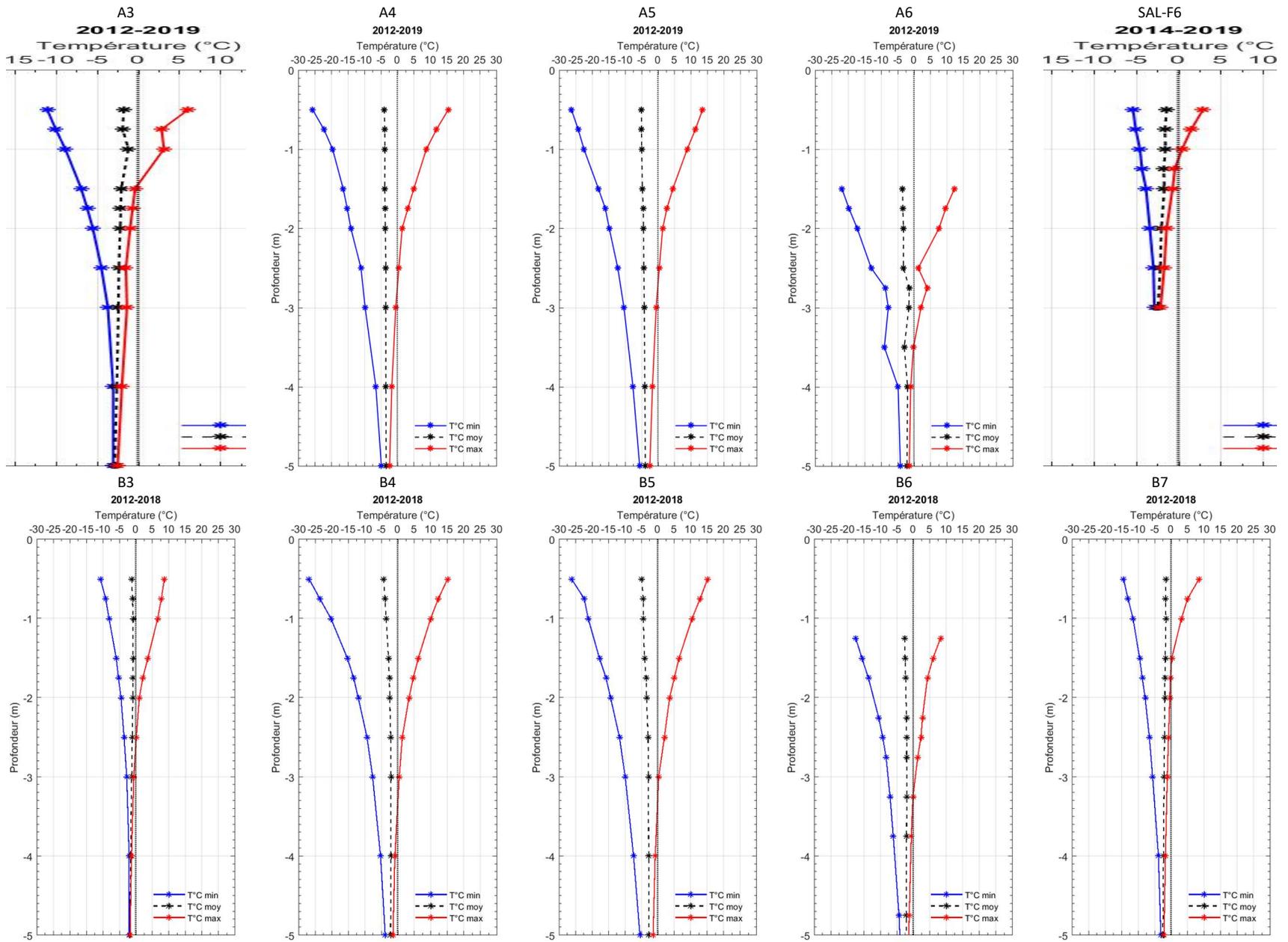


Figure 52 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales pour la section A (chaînage 1+620) et la section B (chaînage 1+720), route d'accès à l'aéroport de Salluit.

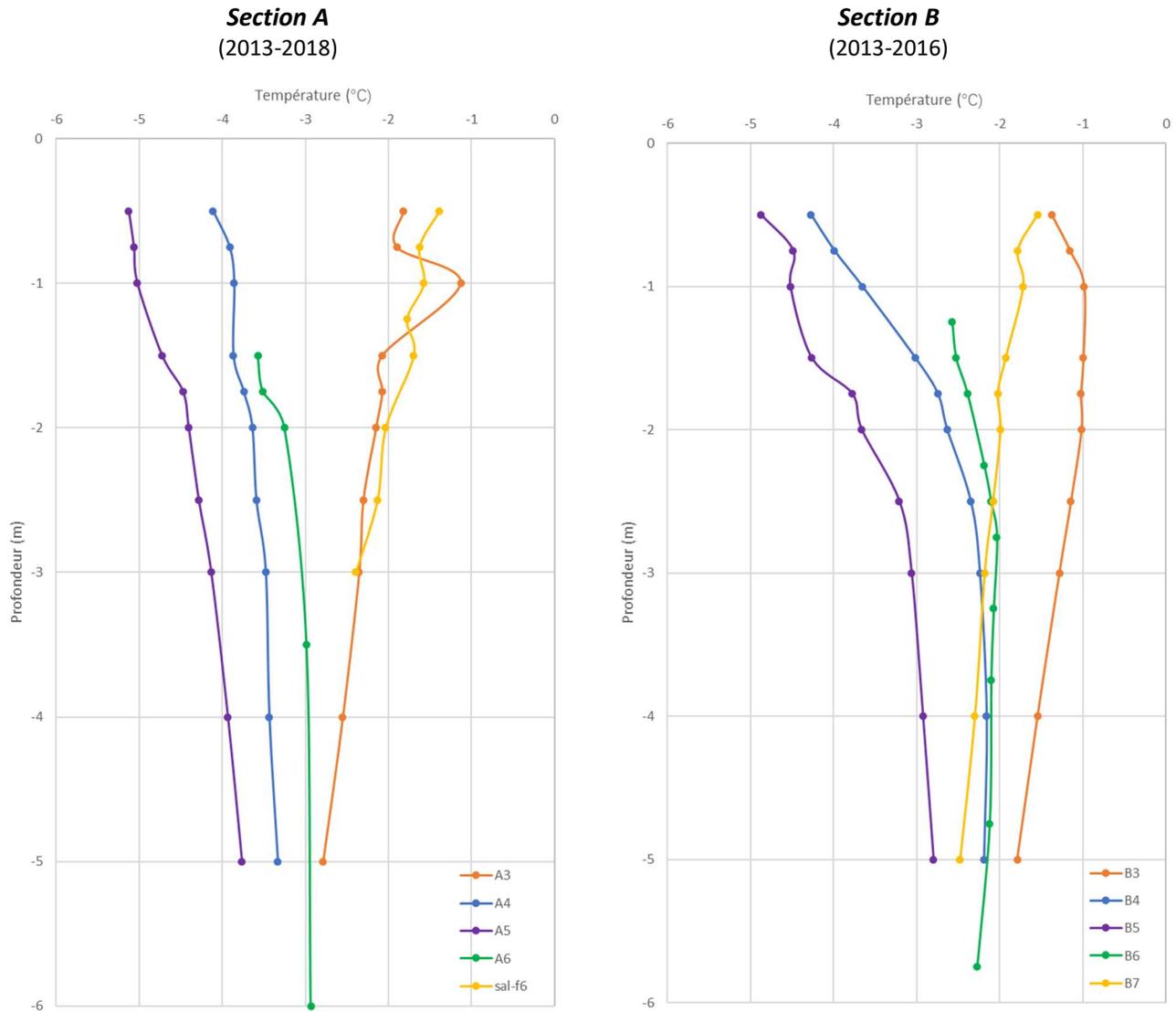


Figure 53 : Profils des températures moyennes pour la période 2013-2018 (section A) et 2013-2016 (section B). À noter que pour le câble A6 de la station A, les thermistances aux profondeurs -2.5 m, -2.75 m, -3 m, -4 m et -5 m présentent des anomalies et ont donc été exclues de l'analyse.

1.6.2.5.2 PERFORMANCE DU DRAIN THERMIQUE

En raison du positionnement non conforme du drain thermique pour les trois sections nouvellement instrumentées, il est malheureusement impossible d'évaluer l'impact de cette mauvaise configuration du drain sur la performance du système. Toutefois, l'instrumentation des différentes sections du système convectif avec des capteurs de températures spécifiquement positionnés (Figure 45) permet de suivre la variation des températures en vue de mieux comprendre les mouvements d'air qui s'initie. Ce suivi permet de déterminer d'une part l'occurrence de condition thermique susceptibles d'engendrer la convection, le sens de la circulation de l'air en suivant une logique de déplacement basée sur la thermodynamique des masses d'air et la polarité des gradients thermiques au-dessus et sous le drain thermique au courant des saisons.

Basé sur le principe de fonctionnement du drain thermique, la figure 54A présente de manière schématique le sens de la circulation d'air au cours de la saison de gel lors que le système, en activité, permet l'extraction de chaleur en hiver. Basé sur cette présentation schématique de la circulation de l'air à l'intérieur du drain thermique, en période d'extraction de la chaleur, il est donc attendu que la température à l'intérieur des cheminées d'entrée se rapproche de la température de l'air. Cet air froid plus dense, mais également aspiré par le mouvement ascendant de l'air plus chaud dans le drain qui est acheminé par la cheminée de sortie, se dirige vers la base du drain (TTOG.Bas) pour ensuite remonter tranquillement le long du drain et capter la chaleur accumulée dans le remblai en été. L'air dans le drain se réchauffe jusqu'à saturation ($\Delta T^{\circ}\text{C}$ entre le sol sous le drain et l'air dans le drain \approx nulle), poursuit son ascension dans le drain pour s'accumuler dans le système de captation (TTOG.Haut) et ultimement sortir par les cheminées de sortie. Cette circulation théorique est à la base du fonctionnement du drain thermique à l'intérieur duquel, la boucle de convection ainsi créée en hiver permet l'extraction graduelle de la chaleur accumulée dans le remblai au courant de l'été précédent. Basé sur cette circulation théorique, un gradient de température devrait s'installer dans les différentes composantes et se résumer par : une température de l'air dans les cheminées d'entrée et à la base du système (TTOG.Bas) égale ou légèrement plus chaude que celle de l'air, une température de l'air dans le drain plus chaude que celle à l'entrée et à la base du système, mais plus froide que celles accumulées dans le système de captation au sommet du système (TTOG.Haut) et à sa sortie (cheminées de sortie). Ce gradient thermique théorique est représenté à la figure 54B.

En comparant les moyennes mensuelles des températures de l'air à l'intérieur des différentes composantes du système à convection (Figure 55), on remarque que ces dernières ne correspondent pas au gradient thermique théorique anticipé. En effet, pour les mois d'octobre à avril, soit pour la période pour laquelle la convection devrait être active, les températures à l'entrée du système (Cheminée.Entrée et TTOG.Bas) sont plus chaudes que celles à la sortie du système (TTOG.Haut et Cheminée.Sortie). Ces observations ne permettent pas de déterminer la présence d'une boucle convective franche dans le système à convection, et ce, pour les deux sections nouvellement instrumentées (1+485 m et 1+612 m). Pour la saison de dégel, soit de mai à septembre, les températures à l'intérieur du drain sont plus froides que celles mesurées dans les cheminées d'entrées et de sorties, ce qui confirme l'état de dormance du système caractérisé par une absence de circulation d'air chaud dans le drain qui pourrait favoriser le réchauffement du sol sous-jacent.

Pour les sections du drain thermique instrumentées aux chaînages 1+485 m et 1+612 m, les profils verticaux des températures moyennes mensuelles entre la température de l'air, la température de surface (Surf.MT) et les thermistances dans le remblai situées au-dessus, à l'intérieur et sous le drain thermique sont présentés à la figure 56. Au cours de l'hiver, pour les deux sections instrumentées, on remarque que les températures de l'air sont nettement plus froides que les températures de surface mesurées en milieu de talus, cette différence s'explique par l'effet isolant de la neige qui s'accumule le long des talus et en pied de remblai. La différence entre les températures de l'air et celles de surface en milieu de talus est plus marquée pour les mois de décembre, janvier, février et mars, avec des températures de surface jusqu'à 12°C supérieure à celle de l'air. Malgré cette différence de température, les températures de surface demeurent suffisamment froides pour permettent une bonne

extraction de chaleur dans le remblai au courant de l'hiver qui s'exprime par un gradient thermique linéaire normal relativement constant entre la surface du remblai et le drain thermique. De part et d'autre du drain thermique, autant au cours de l'hiver qu'au cours de l'été, on remarque une cassure dans le gradient thermique. Cette cassure s'exprime par une augmentation des températures du sol en fonction de la profondeur plus importante de part et d'autre du drain thermique ce qui suggère la présence d'une résistance thermique induite par le drain et la faible conductivité thermique de la couche d'air qui s'y trouve. Malgré des températures relativement froides de l'air à l'intérieur du drain, ces dernières sont nettement plus chaudes que la température de l'air à l'extérieure et dans les cheminées d'entrée d'air (Figure 55) et dans une moindre mesure que celles dans le sol juste au-dessus du drain (Figure 56). Toutefois, au courant de l'hiver, les températures dans le drain demeurent inférieures à celles du sol sous-jacent, ce qui favorise une certaine extraction de chaleur, mais somme toute assez limitée.

Au cours de l'été, la température à la surface du remblai affiche des valeurs nettement plus élevées que celles de l'air. Cette augmentation des températures de surface par rapport à celle de l'air est attribuable à l'albédo de la surface du gravier. Ces températures estivales plus élevées en surface accentuent le gradient thermique inverse qui s'installe au courant de l'été et qui indique le passage d'un régime d'extraction de chaleur à un régime inductif (apport de chaleur) qui s'installe dans le remblai. Fait intéressant, le drain semble jouer un rôle d'isolant telle qu'observé en période hivernale. En effet, le même phénomène de cassure du gradient thermique au travers de l'interface remblai-drain-remblai s'observe dès le mois de mai pour ensuite s'intensifier au courant des mois de juillet et août (Figure 56). Cet effet isolant du drain en période estivale permet de freiner considérablement la pénétration de chaleur plus en profondeur. En conséquence, le gradient thermique inverse qui se développe dans le sol sous le drain est beaucoup moins marqué ce qui permet de limiter l'induction de chaleur. Il s'agit ici d'un effet secondaire positif du drain thermique qui s'additionne à la performance générale de cette technique de mitigation.

Saison de gel (drain thermique actif)

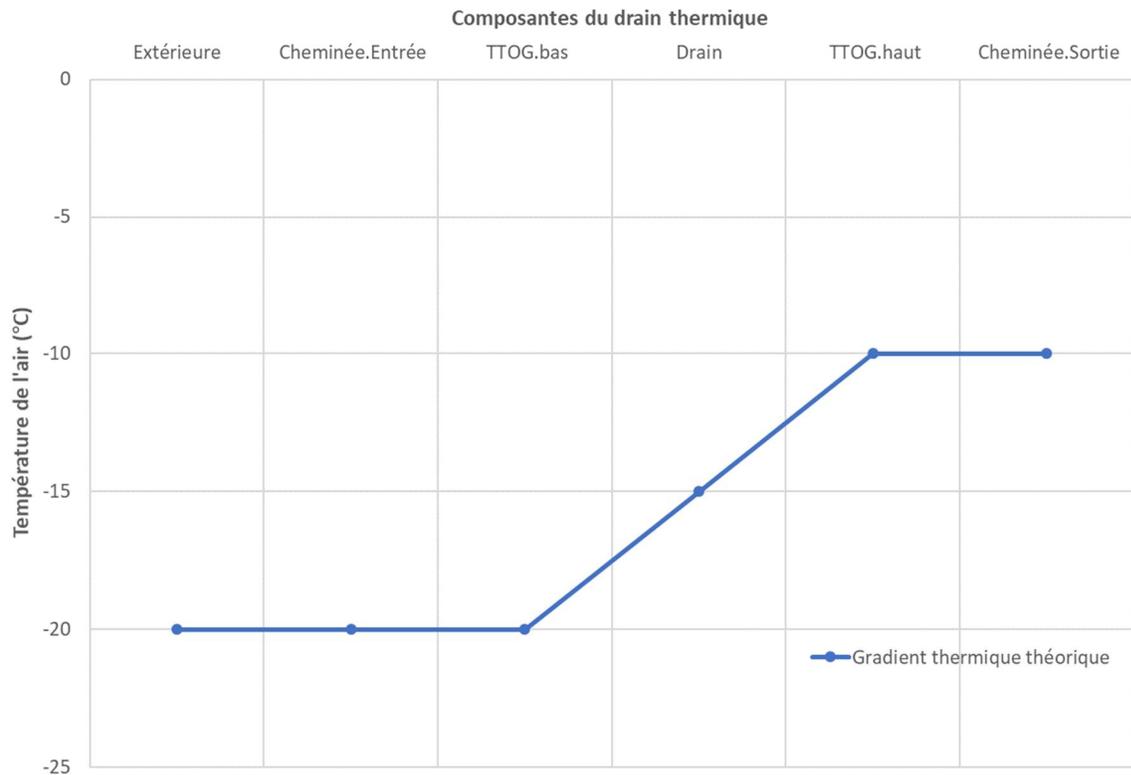
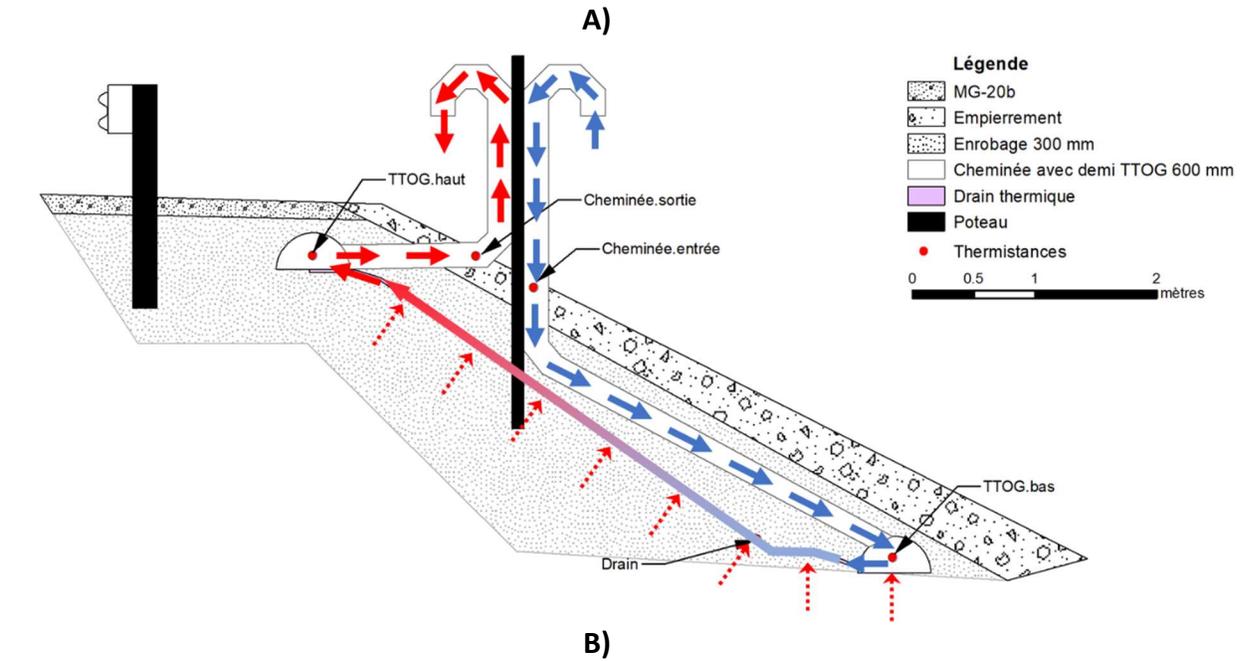


Figure 54 : A) Sens théorique de la circulation de l'air à l'intérieur du système à convection (drain thermique avec cheminées de ventilation) installé dans le remblai de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. La direction théorique de la circulation de l'air dans le système est indiquée par le sens des flèches et la couleur indique le gradient thermique anticipée (bleu \approx température extérieure froide et rouge \approx température du sol sous le drain plus chaude). B) Gradient thermique théorique en hiver entre les différentes composantes du système convectif soit la température de l'air : à l'extérieur, dans la cheminée d'entrée, dans le TTOG à la base du remblai, dans le drain, dans le TTOG en haut de remblai et dans la cheminée de sortie.

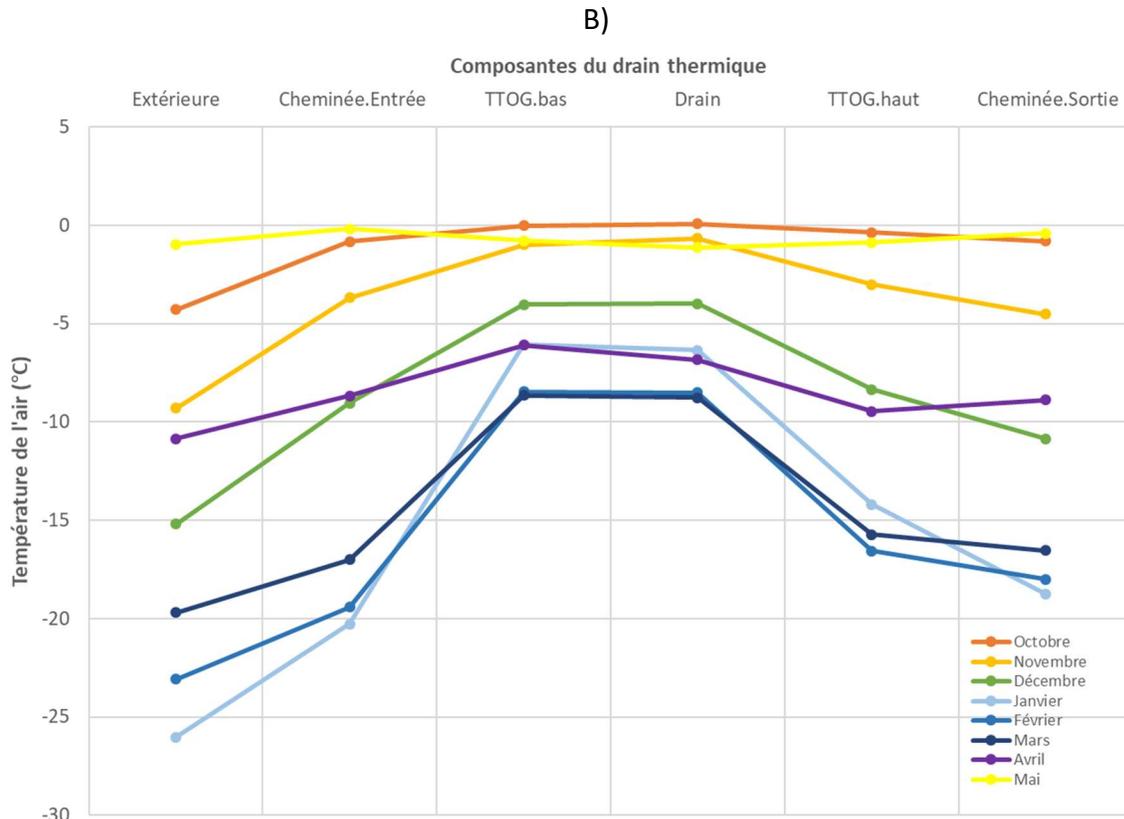
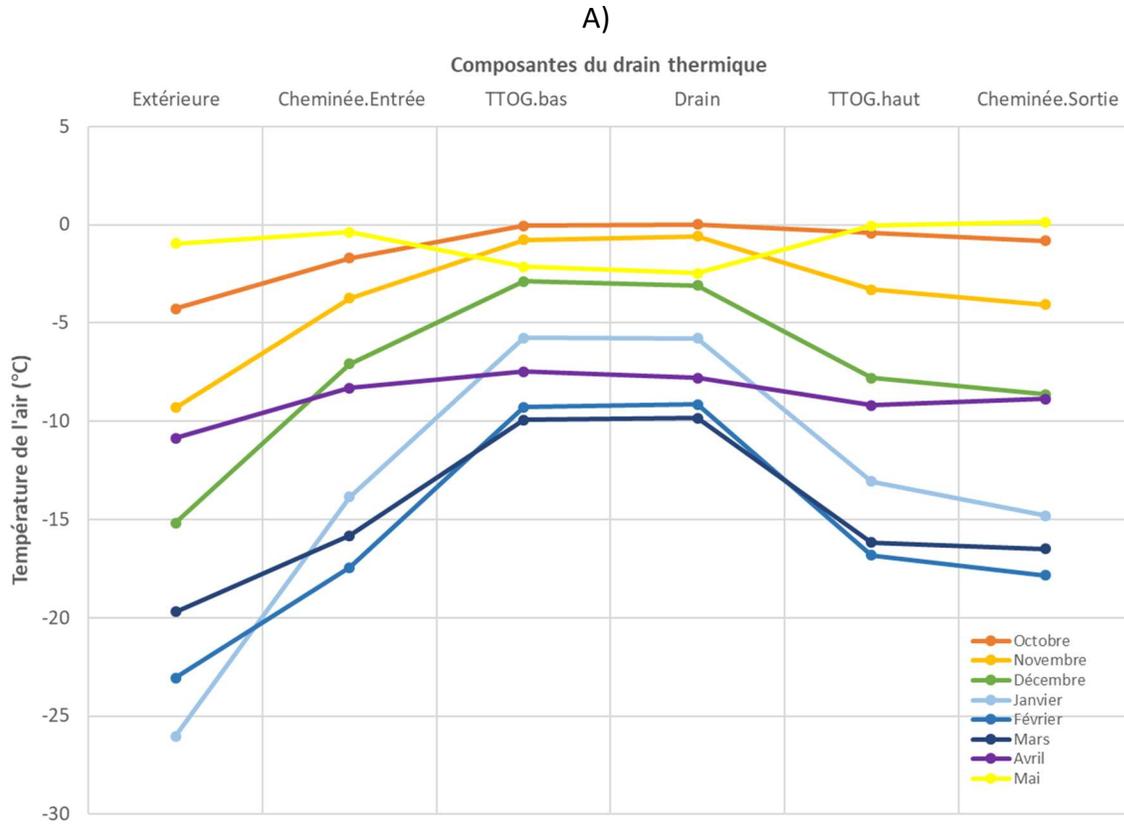


Figure 55 : Températures moyennes mensuelles entre les mois de septembre 2018 à août 2019 pour les différentes composantes du système convectif. Sections du drain thermique instrumentées aux chaînages A) 1+485 m et B) 1+612 m.

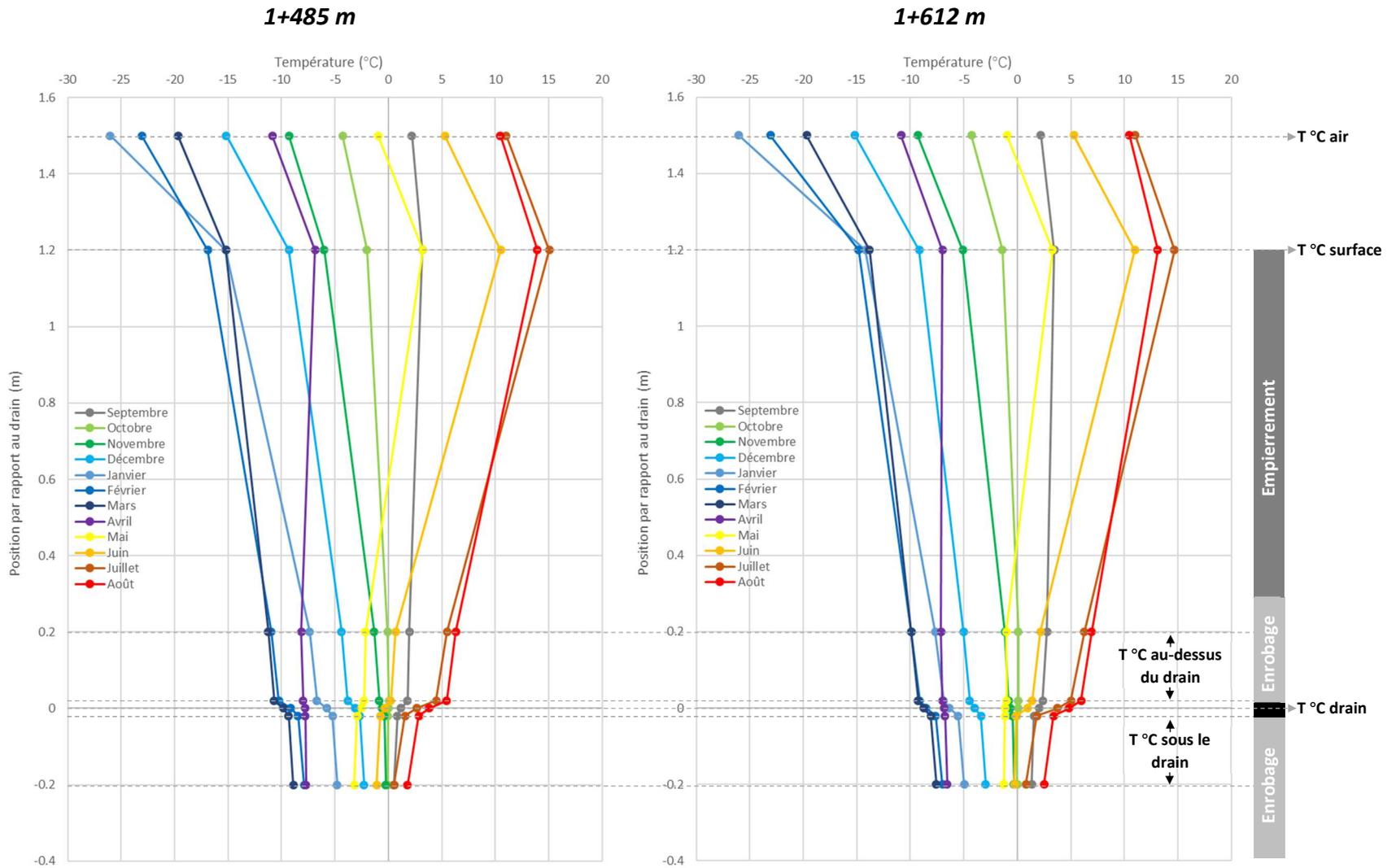


Figure 56 : Profils verticaux des températures moyennes mensuelles (septembre 2018 à août 2019) entre la température de l'air, la température de surface (Surf.MT) et les thermistances dans le remblai situées au-dessus, à l'intérieur et sous le drain thermique pour les sections instrumentées aux chaînages A) 1+485 m et B) 1+612 m.

1.6.2.5.3 PERFORMANCE MÉCANIQUE

Dans le cadre du projet, une compilation des nombreuses observations réalisées par le personnel du BCNQ et de l'Université Laval a été effectuée. Cette compilation donne une appréciation ponctuelle de l'évolution des tassements et autres signes de dégradation dans le temps et a permis d'identifier les secteurs sensibles. À cela s'ajoute également une analyse des données enregistrées par les inclinomètres verticaux et horizontaux stratégiquement localisés le long de la route (Figure 44) et qui permettent de préciser l'ampleur des déformations en fonction de la profondeur et du temps ainsi que leur direction.

Il existe une forte correspondance en termes de localisation entre les défauts observés le long de la route dans le cadre de ce projet et celles recensées avant l'adaptation de la route (L'Hérault *et al.* 2012) et quelques années après son adaptation (Perier *et al.* 2016). De manière générale, les principaux signes de dégradation le long de la route sont circonscrits entre les chaînages 1+360 m et 1+900 m, c'est-à-dire sur la section de la route qui repose sur un dépôt de silt argileux salin très riche en glace (Allard *et al.*, 2004; L'Hérault 2009 et L'Hérault *et al.*, 2012). Il importe de faire une distinction entre les signes de défauts observés du côté amont (pente adoucie avec fossé de drainage) de ceux recensés sur le côté aval (drain thermique) de par leurs origines différentes.

Du côté amont, les déformations les plus importantes ont été observées entre les chaînages 1+360 m et 1+500 m. Il s'agit d'un secteur particulièrement sensible en raison d'une part de la présence de dépôt très riche en glace, mais également de la convergence des écoulements d'eau de surface. Lors de l'adaptation de la route en 2012, outre la mise en place d'une pente douce, un fossé de drainage avait également été excavé tout le long de ce côté nécessitant à certains endroits l'excavation de la couche active et d'une partie du plafond du pergélisol pour ensuite recouvrir le fond du fossé d'enrochement. Une telle intervention a provoqué un dégel accéléré du pergélisol et le développement d'importantes dépressions accompagnées de fissures longitudinales dans le talus à pente adoucie au cours des quelques années qui ont suivi (Figure 57A) pour ensuite s'agrandir considérablement favorisant ainsi la formation d'importantes mares d'eau (Figure 57B). Cette situation a forcé la réalisation d'une intervention à l'été 2016 afin de venir combler les dépressions dans le fossé pour éviter de telles accumulations d'eau et l'ajout de bermes pour segmenter le drainage et éviter que ce dernier se concentre dans quelques ponceaux. Depuis l'intervention de 2016, les tassements se sont stabilisés du côté amont, mais certaines dépressions sont réapparues, plus spécifiquement entre les chaînages 1+400 m et 1+500 m, où persistent encore quelques accumulations d'eau tout au long de l'été (Figure 57C). Outre ces accumulations d'eau, plusieurs fissures parallèles au fossé ont été observées le long du talus à pente adoucie, particulièrement vis-à-vis les anciennes dépressions dans le fossé (Figure 57), mais également à quelques endroits vers le sud (Figure 58, photos no.2,3,4 et 5). Néanmoins, l'évolution de ces quelques fissures présentes sur le talus de la pente adoucie est assez stable dont l'origine découle essentiellement de tassement et consolidation du fossé suite au réajustement post adaptation du régime thermique dans les sections excavées ou celles exposées à d'importantes accumulations d'eau. Les températures dans le sol dans les talus du remblai à pente adoucie et le pergélisol sous-jacent (câbles à thermistances A3 et B3) indiquent une remontée du pergélisol au cours des années récentes qui se situe désormais dans l'ancienne couche active (Figures 49 et figure 52).

Du côté aval de la route, c'est-à-dire du côté du drain thermique, la situation est sensiblement différente. Quelques années seulement après la mise en place du drain thermique au cours de l'été et l'automne 2012, des fissures longitudinales sont apparues dans l'accotement, en haut et milieu de talus, et ce, à plusieurs endroits entre les chaînages 1+500 m et 1+800 m (Figure 58, photos no. 6 à 11). Depuis leur apparition, ces fissures continuent d'évoluer ce qui témoigne que le processus en cause est toujours actif. Par exemple, dans le secteur de la station A, plus spécifiquement entre les chaînages 1+580 m et 1+600 m, les premières fissures dans l'accotement ont été observées à la fin de l'été 2016 (Figure 59B). Initialement de très faible largeur, ces fissures se sont par la suite considérablement agrandies au cours des étés 2017, 2018 (Figure 59C), 2019 (Figure 59D) et

2020 (Figure 59E). Un peu plus loin en direction sud, à quelques mètres de l'inclinomètre vertical localisé au chaînage 1+660 m, quelques fissures en arc de cercle sont apparues en haut de talus à la fin de l'été 2019 entre les chaînages 1+630 m à 1+660 m (Figure 60B). Ces dernières se sont agrandies considérablement depuis, comme le témoigne une photo récente prise à l'automne 2020 (Figure 60C). Le suivi photographique du secteur assuré par la caméra automatisée SalCam-4 a permis de suivre le développement de ces fissures sur une base journalière et ainsi préciser les périodes d'activités. D'après ce suivi, le développement de ces fissures s'est effectué en deux phases, soit à la toute fin de la saison de dégel de 2019 (phase initiale) et entre la mi-septembre et la mi-octobre 2020. Entre les chaînages 1+100 m et 1+500 m inclusivement, très peu de fissures ont été observées, toutefois, il est probable que certaines fissures se soient développées dans l'accotement, puis effacées en surface par le passage fréquent de piétons dans le secteur.

Depuis 2013, des lectures de déformations ponctuelles sont réalisées annuellement à la fin de l'été aux inclinomètres verticaux installés en pied de remblai le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit aux chaînages 1+620 m, 1+660 m et 1+720 m (Figure 44). Pour les trois inclinomètres, les déplacements cumulatifs en fonction de la profondeur ainsi que leur évolution dans le temps par profondeur sont présentés respectivement aux figures 61 et 62. À noter que pour les inclinomètres localisés aux chaînages 1+620 m et 1+660 m, il n'a pas été possible de relever les déformations à l'été 2019 en raison d'une déformation trop importante des tubages. Ces mesures de déformation indiquent que les déplacements se concentrent dans les 2.5 m premiers mètres de la surface, soit dans la couche active et le premier mètre de pergélisol. Ces déformations s'orientent essentiellement dans l'axe A-A' des inclinomètres, donc perpendiculairement à l'axe de la route, et dans une moindre mesure dans l'axe B-B', soit orienté parallèlement à la route. Les déformations les plus élevées ont été mesurées à 0.5 m de profondeur et peuvent atteindre plus de 0.35 m en direction est dans l'axe A-A' (Figure 61). Les mouvements les plus importants, autant dans l'axe A-A' que dans l'axe B-B' ont été enregistrés à l'inclinomètre vertical 1+620 m. Les deux autres inclinomètres verticaux, 1+660 m et 1+720 m, montrent des déplacements cumulatifs similaires en surface (Figure 61). Toutefois, pour l'inclinomètre vertical 1+660 m, l'amplitude des mouvements diminue plus rapidement en profondeur pour être pratiquement nulle autour de 2 m de profondeur. Pour les inclinomètres verticaux 1+620 m et 1+720 m, l'amplitude des déformations diminue également graduellement, mais moins rapidement, en fonction de la profondeur pour être pratiquement nulle autour de 2.5 m et 3 m respectivement. Ces profondeurs de déformation nulle correspondent essentiellement à la position de l'isotherme de température de -1°C qui semble représenter le seuil thermique en deçà duquel le fluage des silt-argileux est plus limité. Pour chacun des inclinomètres verticaux, les courbes de déformation par profondeur en fonction du temps présentées à la figure 62 semblent toutes indiquer une certaine diminution des déformations au cours des années récentes. Cette diminution des déformations en fonction du temps suggère qu'il s'agit toujours d'un fluage en phase primaire. Une stabilisation des taux de déformations, non atteinte pour le moment, marquerait l'entrée en phase de fluage secondaire, ce qui est éventuellement à prévoir pour un sol riche en glace (Ladanyi, 1994) tel que celui qu'on retrouve dans le secteur (Allard *et al.*, 2007, L'Hérault 2009, L'Hérault *et al.*, 2012). Au cours de cette phase de fluage secondaire, les premiers mètres du sol sous le remblai continueront de se déformer annuellement à des taux de déformation constants qui correspondront aux taux de fluage minimums. En conséquence, l'évolution des fissures observées dans les accotements et les pentes du talus devrait se poursuivre et ainsi forcer une intervention à court terme.

La route d'accès dispose de deux inclinomètres horizontaux à la base du remblai et terrain naturel localisés respectivement aux chaînages 1+720 m et 2+000 m. La prise de lectures de ces inclinomètres horizontaux, installés lors des travaux d'adaptation de la route en 2012, a toujours été problématique (Lemieux *et al.*, 2014; Périer *et al.*, 2015; 2016). En effet, en raison de la formation de bouchons de glace à l'intérieur des tubages dès 2013 et une possible dislocation de ces derniers en 2015, des lectures complètes sont disponibles que pour seulement deux années (2012 et 2015). Cette situation complexifie le référencement des mesures de déformations prises à partir de 2015, ce qui ajoute, selon Périer *et al.* (2016), une incertitude considérable sur les

mouvements mesurés. Toutefois, de manière très conservatrice, ce suivi fragmentaire des déformations aux inclinomètres horizontaux présenté à la figure 63 indique que les principales déformations mesurées sont survenues sous les accotements et les talus tant du côté des pentes adoucies que du drain thermique et dans une moindre mesure sous le centre de la route. La section de la route au chaînage 1+720 m est celle qui a subi les plus importantes déformations. Déformations qui atteignaient, sous les accotements, environ 25 mm en 2014 et 55 mm en 2015 (Figure 63). Un patron de déformation similaire, mais de moindre amplitude, a été également mesuré au chaînage 2+000 m. Pour cette section, les déformations cumulatives atteignaient en 2015 environ 23 mm dans l'accotement du côté de la pente adoucie et environ 43 mm dans l'accotement du côté du drain thermique (Figure 63). Pour cette section, des valeurs de déformations positives du côté de la pente adoucie suggèrent un soulèvement. Périer *et al.* (2016) attribue ce comportement soit à un affaissement de 25 mm de l'extrémité de l'inclinomètre servant de point de référence ou bel et bien un soulèvement provoqué par les tassements qui se sont développés sous les accotements.

Malheureusement, dans le cadre de ce projet, l'obstruction des tubages des inclinomètres horizontaux n'a pas permis de procéder à des lectures lors des campagnes de terrain de 2018 et 2019. Une tentative de prise de lectures était prévue à l'automne 2020, toutefois, la campagne de terrain fut annulée. Advenant une prolongation du suivi dans les années à venir pour les inclinomètres horizontaux, il est recommandé de modifier le protocole de prise de mesure afin d'ajouter des références géodésiques externes aux deux extrémités des tubages, et ce, avant chaque prise de mesures. Étant donné que seulement les déplacements verticaux sont mesurés par les inclinomètres horizontaux, une simple coordonnée en Z de haute précision serait requise aux deux extrémités pour bien positionner les profils l'un par rapport à l'autre et ainsi minimiser les incertitudes dans les données.

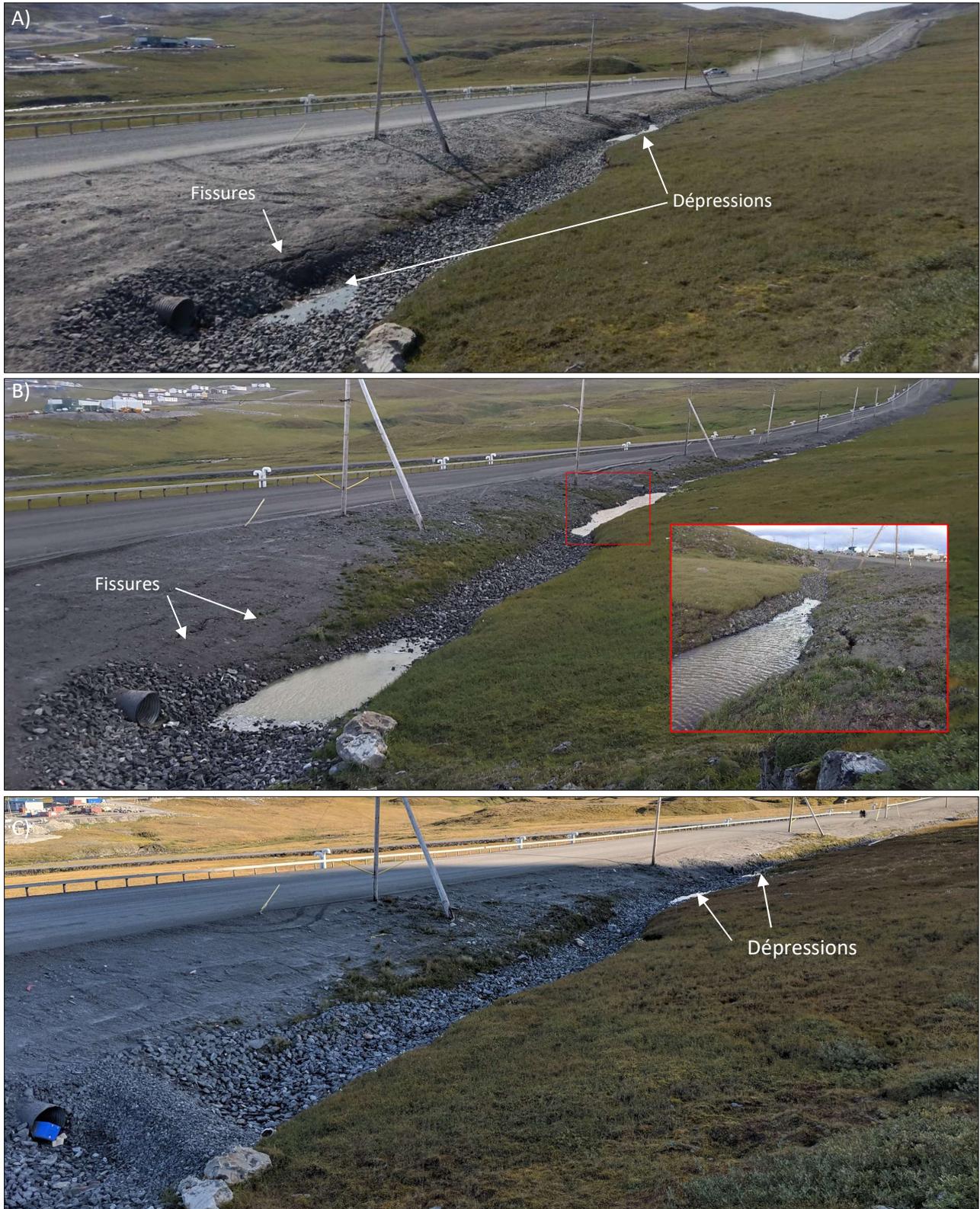


Figure 57 : Dépressions dans le fossé et fissures longitudinales dans le talus à pente adoucie telles qu’observée en A) 2014 et B) 2016. Aperçu du même secteur en 2018, quelques années après l’intervention visant à combler les dépressions et segmenter le drainage à l’aide de bermes. Malgré les quelques dépressions qui sont réapparues, la situation demeure stable.

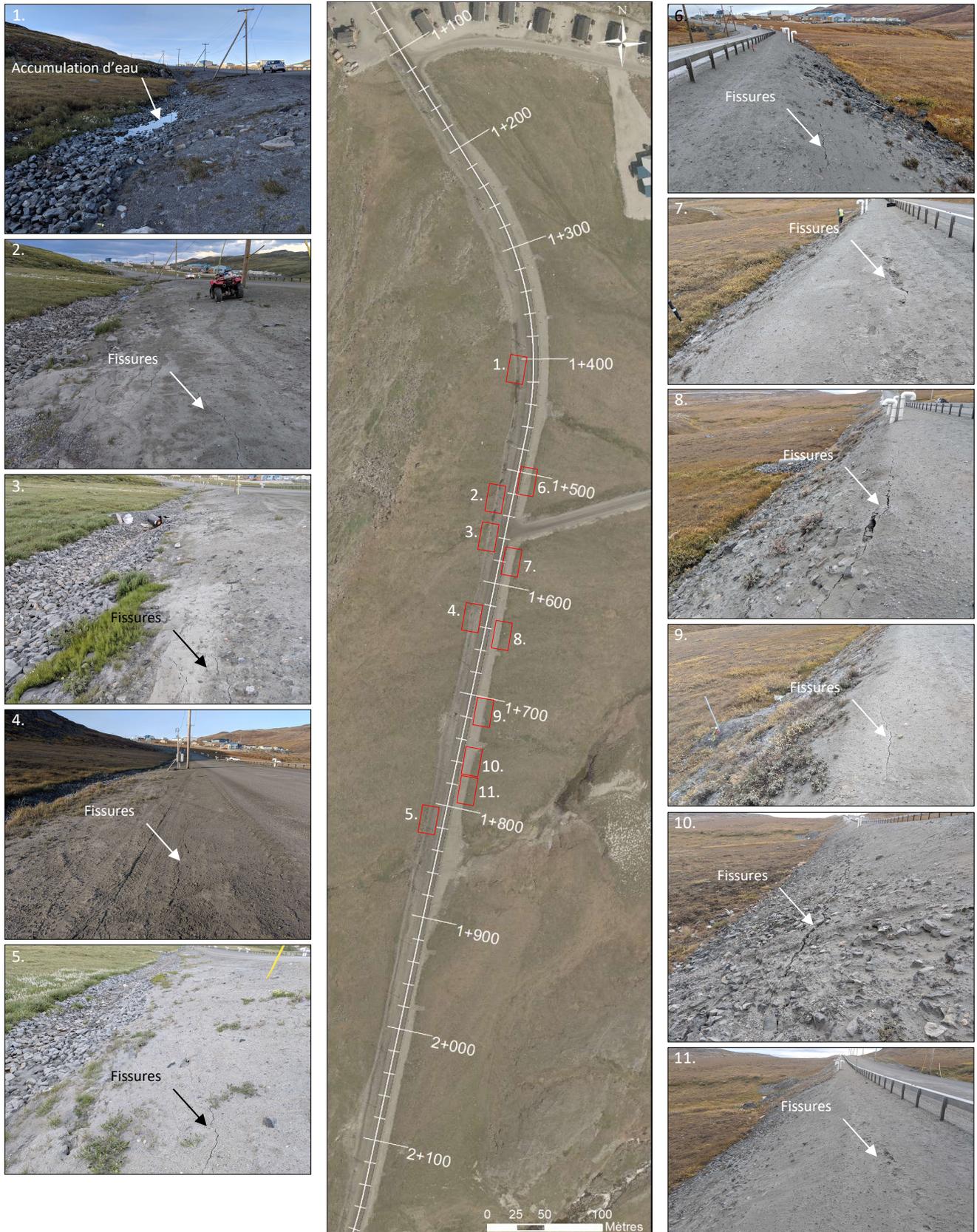


Figure 58 : Relevé des défauts observés le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, septembre 2019.

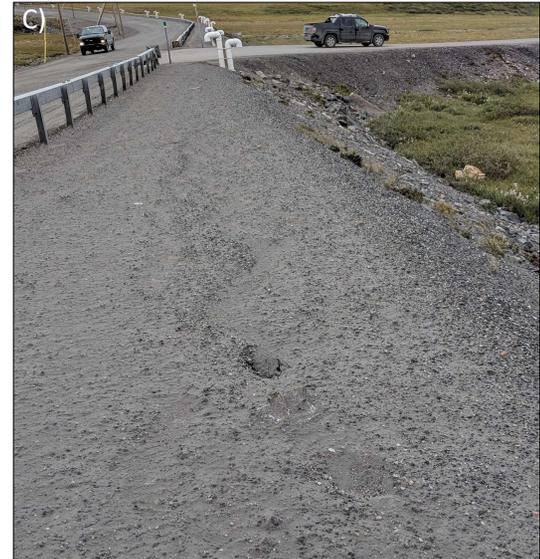


Figure 59 : Évolution de fissures situées dans l'accotement du côté aval entre les chaînages 1+580 m et 1+600 m, route d'accès à l'aéroport de Salluit. A) 30 juillet 2014, B) 25 août 2016, C) 26 août 2018, D) 16 septembre 2019 et E) 10 octobre 2020.

2018



2019



2020



Figure 60 : : Évolution de fissures situées dans l'accotement du côté aval entre les chaînages 1+630 m et 1+660 m, route d'accès à l'aéroport de Salluit. A) 26 août 2018, B) 17 septembre 2019 et C) 10 octobre 2020.

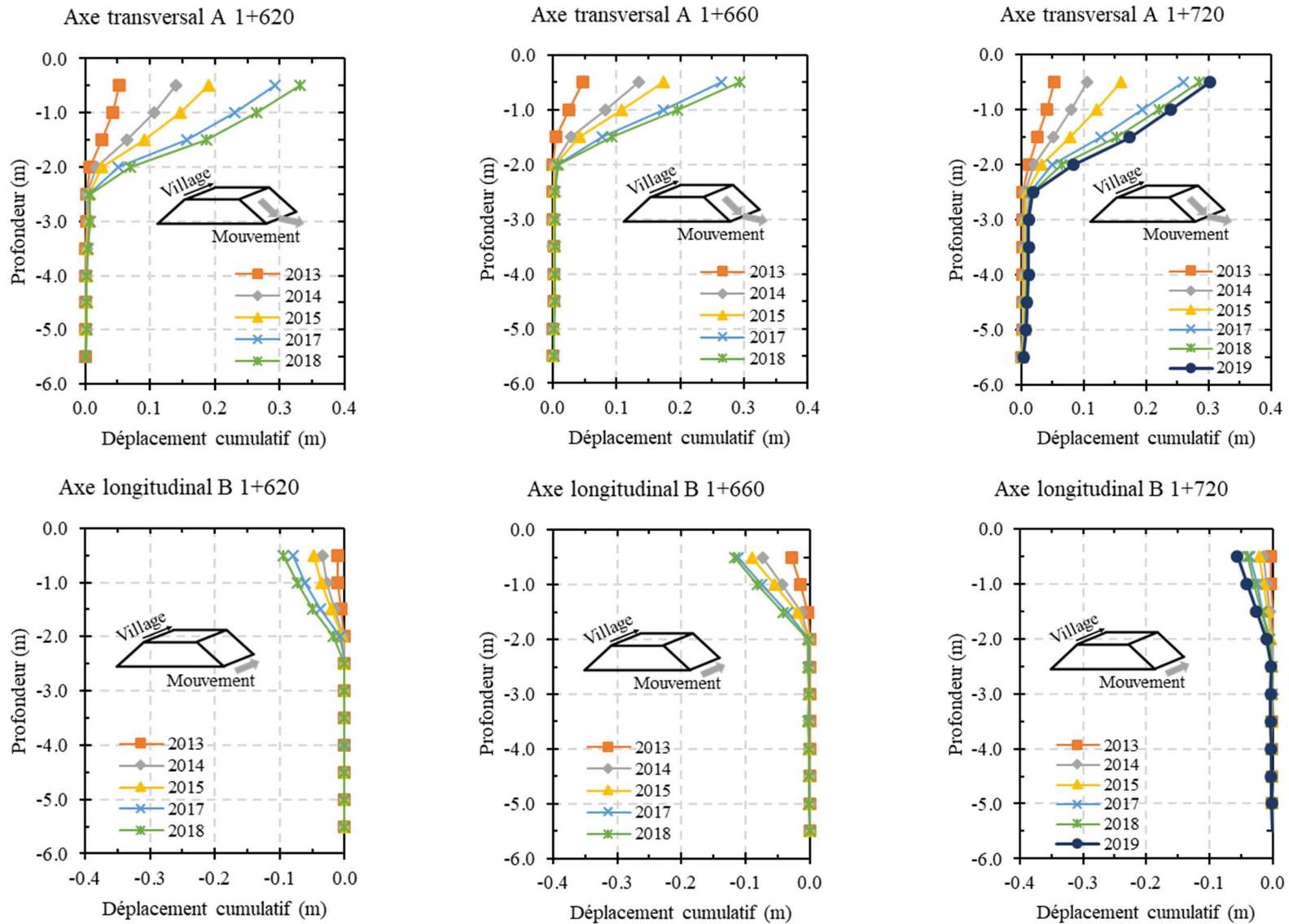


Figure 61 : Déplacements cumulatifs mesurés annuellement à la fin de l'été aux inclinomètres verticaux installés en pied de remblai le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit aux chaînages 1+620 m, 1+660 m et 1+720 m. À noter que pour les inclinomètres aux chaînages 1+620 m et 1+660 m, il n'a pas été possible de relever les déformations à l'été 2019 en raison d'une déformation trop importante du tubage de l'inclinomètre.

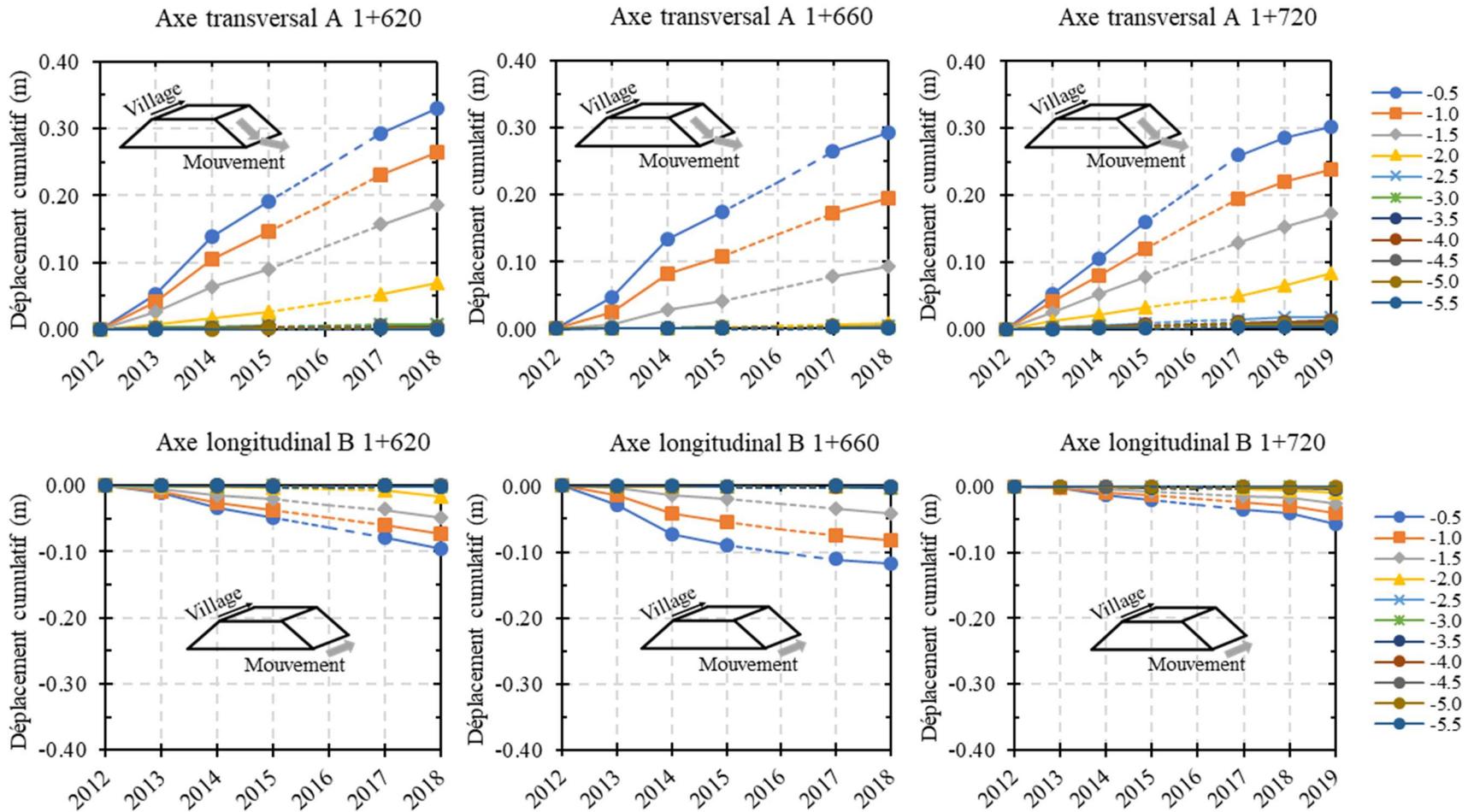


Figure 62 : Déplacements cumulatifs par profondeur mesurés annuellement à la fin de l'été aux inclinomètres verticaux installés en pied de remblai le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit aux chaînages 1+620 m, 1+660 m et 1+720 m

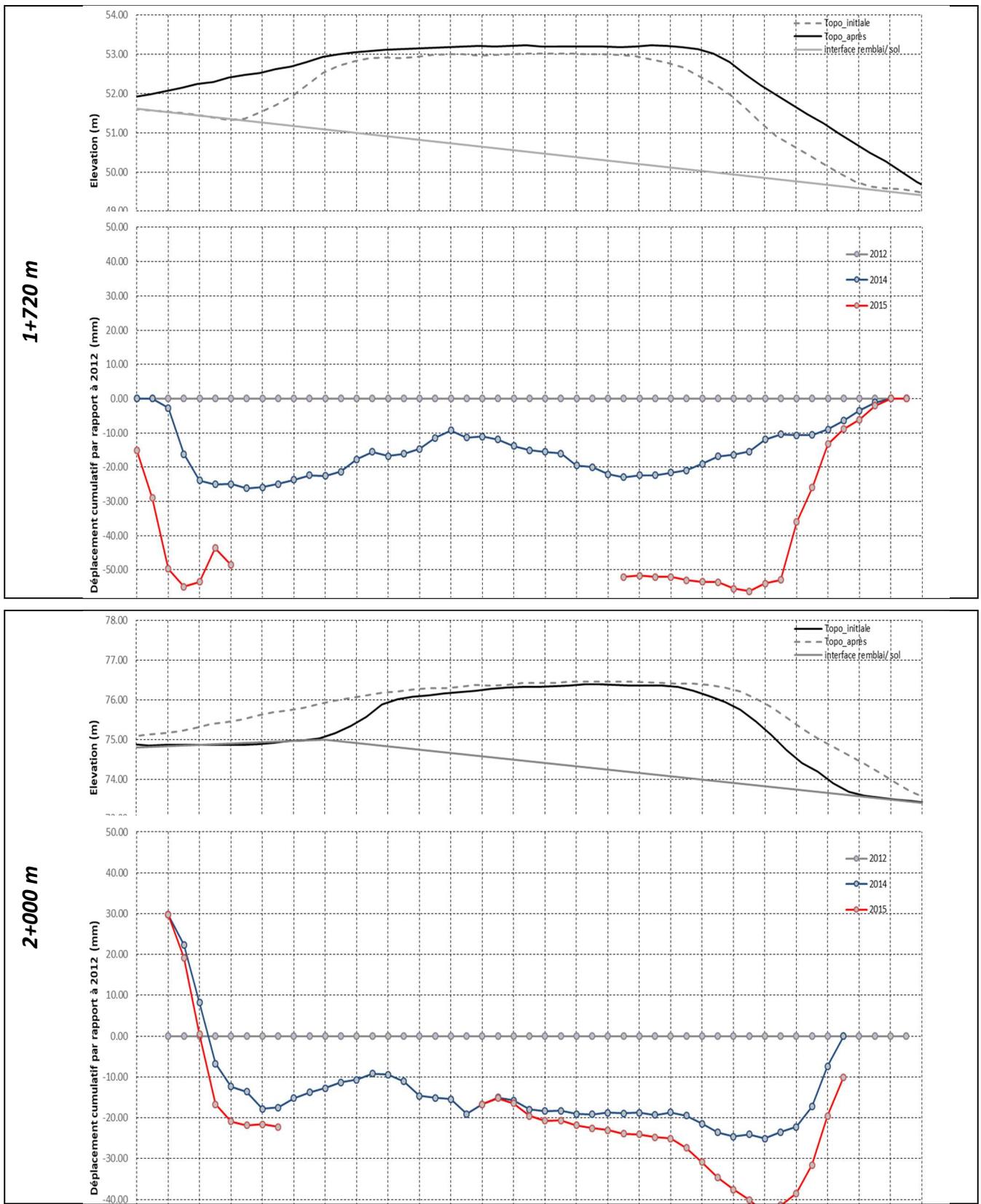


Figure 63 : Déplacement relatif pour la période de 2012 à 2015 par rapport à la position des extrémités des inclinomètres horizontaux côté aval installés aux chaînages 1+720 m et 1+200 m le long de route d'accès à l'aéroport de Salluit (modifié de Périer *et al.* 2016)

1.6.2.5.4 EFFICACITÉ DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATIONS À LIMITER L'INFLUENCE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX DANS LA DÉGRADATION THERMIQUE DU PERGÉLISOL

1.6.2.5.4.1 Conditions d'enneigement

La visite tardive de l'équipe à la fin de l'hiver 2019, soit environ deux semaines après le début de la fonte des neiges, et le mauvais fonctionnement de la plupart des caméras au cours des mois de mars et avril 2019 ne permettent pas de déterminer les épaisseurs maximales de neige le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit pour l'hiver 2018-2019. Toutefois, les suivis photographiques fragmentaires et les relevés de neige réalisés à l'hiver 2019 confirment que les conditions d'enneigement le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit sont relativement variables. En effet, les photos prises à la fin de l'hiver 2019 (Figure 64) permettent de constater que du côté aval (côté du drain thermique), les épaisseurs de neige étaient plus importantes entre les chaînages 1+200 m et 1+600 m (Figure 64A) qu'entre les chaînages 1+600 m et 1+840 m (Figure 64B). Du côté de la pente douce, l'empilement de la neige par les opérations de déneigement forme d'importantes accumulations de neige sur la pente du talus et pied de remblai tout le long de la route (Figure 64C). Ces épaisseurs de neige du côté de la pente douce atteignaient plus de 3 m d'épaisseur et une dizaine de mètres de largeur par endroit à l'hiver 2018-2019. Des accumulations d'ampleur similaire ont également été observées à l'hiver 2019-2020 (Figure 64D). À noter que du côté amont, l'objectif de la mise en place de la pente douce est de minimiser les accumulations de neige d'une part et d'autre part, d'éloigner du centre-ligne de possibles dégradations en lien avec l'écoulement d'eau dans les fossés et aux abords des ponceaux. Pour cette raison, la situation actuelle en hiver du côté de la pente douce, qui découle des opérations de déneigement en vigueur, s'avère néfaste à la performance de l'infrastructure.

Le remplacement des caméras défectueuses à l'été 2019 a permis d'obtenir un suivi photographique des conditions d'enneigement pour l'hiver 2019-2020 relativement complet, et ce, pour la plupart des sites. Par rapport au suivi de l'hiver 2018-2019, on remarque qu'à l'hiver 2019-2020, les accumulations de neige étaient plus importantes entre les chaînages 1+560 m à 1+840 m qu'entre les chaînages 1+200 m et 1+560 m. Ceci confirme une certaine variabilité interannuelle dans les patrons de distribution de la neige du côté aval. Chose certaine, les épaisseurs de neige les plus importantes se retrouvent en pieds de remblai du côté aval, tant pour l'hiver 2018-2019 que celui de 2019-2020, pour diminuer graduellement à des valeurs minimales (< 20 cm) à une distance d'environ une dizaine de mètres du pied de remblai. Au chaînage 1+612 m, les repères gradués permettent de déterminer que l'épaisseur maximale des accumulations de neige en pied de remblai atteignent leurs valeurs maximales vers la fin du mois de janvier pour ensuite demeurer relativement stable. À cet emplacement, l'épaisseur maximale de neige a atteint à l'hiver 2019-2020 environ 1.6 m d'épaisseur en pied de remblai pour ensuite diminuer à 0.5 m à 8 mètres de distance de ce dernier. Ces observations suggèrent que le remaniement de la neige par le vent contribue rapidement à l'édification d'importantes accumulations de neige en marge des remblais. Ces mesures confirment la pente naturelle de stabilisation du couvert de neige en marge du remblai autour de 1V :7H et 1V :8H et qui tant à relier le haut de talus et le terrain naturel environnant sur une distance d'au plus une dizaine de mètres. Au chaînage 1+485 m, l'épaisseur maximale du couvert de neige a atteint moins de 0.5 m d'épaisseur en pied de remblai pour graduellement diminuer à moins de 0.1 m à une distance de 8 m de ce dernier. Ces observations confirment que du côté du drain thermique, les épaisseurs de neige peuvent atteindre des épaisseurs considérables en pied de remblai (>1.5 m au chaînage 1+612 m), mais demeurent sombres toutes variables. Malgré ces différences dans les épaisseurs de neige le long de la route, le couvert de neige qui s'accumule en marge de l'infrastructure présente un profil similaire respectant une pente de 1V :7H à 1V :8H et, au-delà d'une distance d'une dizaine de mètres du pied de remblai, les épaisseurs de neige sont minimales. Une photo prise par le personnel du MTQ lors de leur visite à l'hiver 2020 permet d'illustrer cette relation entre l'épaisseur de la neige en fonction de la distance du pied de remblai (Figure 66A). Fait intéressant, au cours de cette même visite, une cheminée de ventilation d'entrée air ainsi qu'un ponceau double étaient complètement bouchés par la neige (Figure 66B et C).



Figure 64 : A) Conditions d'enneigement le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit en date du 9 mai 2019 A) SalCam-3, B) SalCam-4 et C) SalCam-2. D) Conditions d'enneigement le long de la route du côté amont (pente douce) observées à la fin de l'hiver 2019-2020.



Figure 65 : Suivi photographique des conditions d'enneigement en marge de la route d'accès à l'aéroport de Salluit côté aval (drain thermique) pour l'hiver 2019-2020, caméra automatisée SalCam-4. Conditions d'enneigement au cours de l'hiver 2019-2020 au A) 23 novembre, B) 26 décembre, C) 25 janvier, D) 26 Février, E) 26 avril et F) 26 mai.



Figure 66 : Relation entre épaisseur de neige en marge de l'infrastructure et la distance du pied de remblai (Source : Geneviève Trudel, février 2020). Photos B) d'une cheminée d'entrée d'air du système à convection et C) d'un ponceau double bouchés par de la neige (Source : Yves Pilotte, février 2020).

1.6.2.5.4.2 Performance du réseau de drainage

Lors des visites de terrain entre 2012 et 2015, Périer *et al.* (2016) avaient noté les problématiques suivantes : affaissement des fossés et accumulations d'eau du côté amont, certains ponceaux trop hauts et/ou endommagés avec parfois une infiltration sous l'embouchure malgré leurs imperméabilisations, résurgence en pied de remblai du côté aval et affaissement de la pente douce. Dans le cadre de travaux dans le secteur, L'Hérault et Allard (2016) avaient également constaté que le terrain en marge de la route et en pied de remblai le long du côté droit (côté amont) s'était affaissé considérablement rendant certaines sections des fossés et certains ponceaux inopérants (Figure 67). Cette conjoncture particulière avait favorisé la formation de quelques mares de dimension relativement importante localisées en pied de remblai du côté amont entre les chaînages 1+360 m et 1+560 m (Figure 67). Afin de minimiser le risque de thermo-érosion du pergélisol du côté amont Périer *et al.* (2016) avaient proposé une série de recommandations se résumant à : 1) reprofiler le fossé de drainage par comblement des dépressions pour éviter les accumulations d'eau et assurer un écoulement efficace par les ponceaux; 2) mettre en place des bermes de déviation dans le fossé de drainage pour forcer l'eau à utiliser tous les ponceaux et ainsi limiter les accumulations d'eau en bas de pente; 3) mettre en place une membrane imperméabilisante autour des quelques ponceaux où l'eau s'écoule en dessous et 4) réajuster la hauteur des coussins diffuseurs à la sortie des ponceaux afin d'éviter une érosion sous la chute d'eau due à la hauteur entre l'extrémité du ponceau et l'empierrement. Suite à ces recommandations, le MTQ a effectué à l'été 2016 une série de travaux afin de corriger certaines des problématiques citées précédemment. Un aperçu des travaux de réfection effectués à l'été 2016 est présenté à la figure 68.

Comme en témoigne la figure 68, le reprofilage du fossé par comblement et l'ajout de bermes aux abords des ponceaux en 2016 ont permis de grandement améliorer le drainage du côté amont. Par exemple, l'ajout de bermes permet désormais de segmenter le drainage et ainsi mieux distribuer la quantité d'eau qui s'écoule dans chaque ponceau. Le comblement des dépressions qui étaient présentes dans le fossé (reprofilage) permet actuellement un écoulement efficace de l'eau tout en limitant la formation de mares d'eau stagnante en pied de remblai.

Dans le cadre du projet, plusieurs caméras automatisées ont été spécifiquement localisées du côté amont de l'infrastructure (Figure 44) afin de suivre l'évolution des conditions de drainage en période de fonte printanière et tout au long de la saison de dégel tant du côté amont (SalCam-1, SalCam-2 et SalCam-5) que du côté aval (SalCam-3 et SalCam-4). Au cours de la fonte printanière, même si certains ponceaux sont fréquemment obstrués par la neige en hiver et d'importantes quantités de neige sont déposées sur la pente douce et en pied de remblai du côté amont, ce suivi révèle que le drainage du côté amont n'est plus problématique. En effet, au cours des printemps 2019 et 2020, aucune accumulation d'eau importante n'est survenue du côté amont de la route. En effet, tout au long de cette période de fonte printanière qui dure environ un mois, de la mi-mai à la mi-juin, l'eau de fonte est rapidement drainée du côté amont et dirigée efficacement par les bermes et les ponceaux du côté aval. Cette efficacité du drainage persiste tout au long de l'été et de l'automne. Du côté aval, les conditions de drainage n'ont jamais été problématiques en raison de la pente du terrain naturel qui permet un écoulement efficace des eaux de fonte et de ruissellement loin de l'infrastructure. Périer *et al.* (2016) avaient toutefois observé du côté aval, vis-à-vis certains ponceaux, des résurgences d'eau en pied de remblai. Toutefois, depuis les interventions en 2016, aucune résurgence d'eau en pied de remblai n'a été observée lors des visites sur le terrain de 2018 et 2019. En ce qui concerne les coussins de diffusion mise en place à l'exutoire de chacun des ponceaux, ces derniers démontrent une bonne efficacité à limiter la thermo-érosion qui peut s'avérer très problématique dans le secteur. Le risque de thermo-érosion apparaît désormais contrôlé pour l'ensemble de l'infrastructure, toutefois, la susceptibilité du secteur envers ce processus de dégradation rapide demeure élevée.

Même si les conditions de drainage ont été nettement améliorées lors de l'adaptation de la route en 2012 par la mise en place d'un fossé et des ponceaux jusqu'alors inexistantes et que des améliorations ultérieures ont été apportées en 2016 (reprofilage du fossé et mise en place de bermes), le réseau de drainage demeure une

composante sensible de l'infrastructure. À ce titre, il est anticipé que des tassements continuent de se développer dans le fossé, d'une part en raison de l'empilement d'importantes quantités de neige du côté amont, de la fragilité thermique du fossé en raison de l'excavation de la couche active et d'une partie du pergélisol lors de sa mise en place en 2012 (Figure 70A) et de la présence d'un pergélisol riche en glace. À juste titre, après le reprofilage des fossés en 2016, de nouvelles dépressions accompagnées de mares d'eau sont réapparues entre les chaînages 1+360 m à 1+460 m (Figure 70B). Il est donc recommandé de poursuivre le suivi de l'évolution de ces dépressions et d'élaborer un plan d'entretien préventif du fossé de drainage afin d'éviter que la situation se dégrade rapidement. À noter que le MTQ réalisera des travaux de réfection afin de remplacer l'extrémité de certains ponceaux endommagés par les opérations de déneigement et de remplacer complètement ceux qui présentent des déformations trop importantes. Il s'agirait alors d'une belle occasion de procéder au reprofilage du fossé tel qu'effectué en 2016, soit par le comblement des dépressions par l'ajout de matériau granulaire.

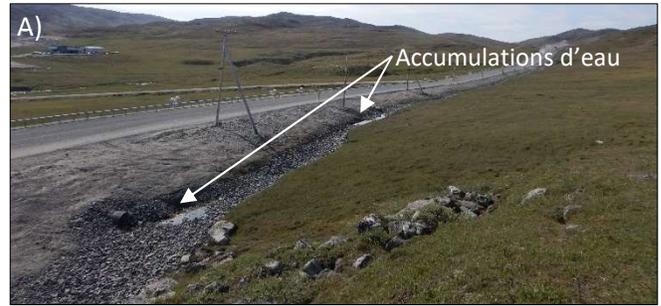


Figure 67 : Section de la route d'accès à l'aéroport de Salluit présentant des problèmes de drainage. A), B), C) et D) Accumulations d'eau côté amont associées à un mauvais drainage. E) Écoulement d'eau en pied de remblai côté aval (Modifiée de L'Héroult et Allard, 2016).



Figure 68 : A et B) Reprofilage par comblement du fossé côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. C) Aperçu final du profil du fossé dans lequel l'écoulement est désormais rectiligne et fluant (Tirée de L'Hérault et Allard, 2016).



Figure 69 : Conditions du fossé de drainage sur le côté amont de la route d'accès à l'aéroport de Salluit avant (A et C) et après (B et D) les travaux correctifs de 2016 qui consistaient à reprofiler le fossé et mettre en place des bermes de déviation (Tirée de L'Hérault et Allard, 2016).



Figure 70 : A) Exposition d'un pergélisol riche en glace et développement d'une niche de thermo-érosion lors de l'excavation du terrain naturel à l'été 2012 au cours de la mise en place fossé de drainage côté amont, chaînage 1+380 m, route d'accès à l'aéroport de Salluit. B) Dépressions accompagnées d'accumulation d'eau observées à l'été 2019 entre les chaînages 1+380 m et 1+460 m.

Performance thermique générale

Bien que la performance des mesures d'adaptation soit encourageante selon Périer *et al.* (2016), la poursuite du suivi de l'efficacité de ces dernières pour une période additionnelle de quatre ans a permis de confirmer les tendances observées et de documenter la performance à long terme des mesures d'adaptation mises en place.

Le suivi climatique assuré par la station météorologique SILA localisée dans la vallée à proximité de la route d'accès permet d'infirmer qu'au cours des dix dernières années, la température annuelle moyenne de l'air pour la région de Salluit s'est avérée relativement stable montrant une légère tendance au refroidissement. Ce contexte climatique récent a été très bénéfique dans la performance thermique globale des techniques d'adaptation mise en place. Les analyses thermiques réalisées à ce jour, couvrant la période de 2012 à 2019, ont permis de déterminer d'une part que la position du plafond du pergélisol est demeurée relativement stable dans le remblai tant du côté de la pente douce, du centre de la route et du côté du drain thermique. Pour les deux sections instrumentées (chaînages 1+620 et 1+720), la position maximale du front de dégel est remontée significativement dès la première année suivant la mise en place des méthodes d'adaptation. Cette diminution marquée de la profondeur maximale atteinte par le front de dégel entre l'été 2012 et l'été 2013 s'explique essentiellement par un réajustement thermique post adaptation en réponse au changement apporté à l'infrastructure. À rappeler ici que les changements consistaient : à la mise en place d'une pente adoucie du côté amont du remblai, au retrait de l'asphalte et au rehaussement d'une trentaine de centimètres en moyenne de l'épaisseur du remblai dans la section centrale de la route et à l'installation d'un drain thermique dans l'accotement du côté aval.

La remontée du pergélisol ainsi observée sous la pente douce témoigne de l'efficacité de cette méthode, lorsque couplée avec un système de drainage adéquat, à maintenir des conditions favorables au refroidissement du pergélisol en marge et sous les accotements du remblai. Néanmoins, la performance de la pente douce est atténuée par l'empilement d'importante quantité de neige au cours de l'hiver par les opérations de déneigement. Cet impact thermique des accumulations de neige se traduit par des profils thermiques de températures plus chauds en hiver qui forcent le régime thermique annuelle à tendre vers des conditions plus chaudes. Visant initialement à minimiser l'effet isolant de la neige en diminuant les accumulations de neige, les pratiques de déneigement en cours viennent à l'encontre du principe de base dictant l'efficacité de cette technique, et certes, influencent donc négativement la performance globale de cette dernière. Il apparaît donc important de revoir les pratiques de déneigement, particulièrement pour la section de la route comprise entre les chaînages 1+360 m et 2+200 m. Pour ce qui est du centre de l'infrastructure, le retrait du pavage et le rehaussement de la surface du remblai se sont avérés très bénéfiques thermiquement. C'est d'ailleurs la partie centrale de la route qui présente les remontées du front de dégel les plus importantes et les profils de températures les plus froids par rapport aux talus du côté de la pente adoucie et du drain thermique. Cette différence en termes de régime thermique entre les talus et la section centrale de la route (surface de roulement) est attribuable à l'absence de neige sur cette dernière qui favorise une extraction efficace de la chaleur accumulée au sein du remblai en hiver. Ce régime thermique plus froid dans la section centrale de la route contribue au développement d'un bulbe de température plus froide sous la route par rapport aux talus. Cette situation contribue efficacement au refroidissement des températures dans le sol naturel sous l'infrastructure et au maintien du pergélisol sous le remblai de la route. Du côté du drain thermique, le front de dégel (isotherme 0°C) atteint de plus grandes profondeurs, et ce, malgré une épaisseur de remblai plus importante par rapport à la section centrale de la route et au niveau du talus côté amont (pente adoucie). Cette plus grande pénétration du front de dégel pourrait s'expliquer par une exposition au rayonnement plus directe en période estivale et un effet isolant de la neige en hiver plus important du talus côté aval par rapport au centre du remblai et le talus côté amont. Néanmoins, même si les profils de températures du sol sous le drain thermique sont légèrement plus chauds que sous la route, la présence d'un gradient thermique normal entre 0.5 m et 5 m de profondeur (température moyenne plus froide en surface qu'en profondeur)

favorise un maintien du profil de température du sol en conditions froides ce qui confère une certaine stabilité thermique pour cette section de l'infrastructure.

Performance du drain thermique

En ce qui concerne l'efficacité du drain thermique, les analyses thermiques récentes effectuées à partir des deux sections du drain thermique nouvelles instrumentées, avec des capteurs de températures spécifiquement positionnés, visaient à confirmer la présence de mouvements convectifs dans le système en hiver et quantifier la capacité d'extraction de chaleur du drain thermique. Basé sur le principe de fonctionnement du drain thermique et la circulation d'air anticipée, il était attendu que la température de l'air à l'intérieur des cheminées d'entrée d'air, à la base du drain thermique et dans le drain se rapproche de celle extérieure (température de l'air) pour ensuite graduellement se réchauffer en réponse à l'extraction de la chaleur de la section du remblai sous le drain au sein du remblai. Graduellement plus chaude, il était également anticipé que l'air dans le drain continue son ascension pour s'accumuler dans le système de captation (TTOG.Haut) et ultimement s'évacuer par les cheminées de sortie d'air. Basé sur cette circulation théorique, un gradient de température devait s'installer dans les différentes composantes et se résumer par : une température de l'air dans les cheminées d'entrée et à la base du système (TTOG.Bas) égale ou légèrement plus chaude que celle de l'air, une température de l'air dans le drain plus chaude que celle à l'entrée et à la base du système, mais plus froide que celle accumulée dans le système de captation au sommet du système (TTOG.Haut) et à sa sortie (cheminées de sortie). Malheureusement, à partir de ces analyses, il est actuellement difficile de confirmer la présence de mouvements convectifs dans le drain en hiver. Il a été documenté que les températures dans les différentes composantes du système du drain thermique ne présentent pas le gradient thermique théorique anticipé avec des températures à l'entrée du système (Cheminée.Entrée et TTOG.Bas) plus chaudes que celles à la sortie du système (TTOG.Haut et Cheminée.Sortie). Périer *et al.* (2016) avaient noté un comportement thermique similaire en comparant les différences de température entre le sol et l'air dans le drain. Ces derniers avaient attribué cette incohérence du comportement thermique dans le drain à un mauvais fonctionnement des systèmes de mesure ou une erreur dans la manipulation des données, ce qui n'apparaît pas être le cas.

Plusieurs raisons peuvent expliquer cette performance mitigée du drain thermique. Tout d'abord, à noter que lors de son installation, une erreur d'arpentage s'est traduite par un non-respect des pentes optimales du drain thermique. Les exercices de modélisation numériques effectués par Chataigner (2008) suggèrent une efficacité accrue du drain lorsque ce dernier est positionné près du sol et affiche une configuration optimale des angles ϕ_1 et ϕ_2 autour de 0° et 45° respectivement (Figure 71A). Dans le cas du drain thermique le long de la route d'accès à l'aéroport, la configuration actuelle du drain présente un angle parallèle à la surface du talus sans distinction entre les angles ϕ_1 et ϕ_2 (Figure 71B). Cette configuration particulière et non optimale du drain fait en sorte que ce dernier se retrouve éloigné de l'interface sol naturel et base du remblai, ce qui, à la lueur des analyses conduites par Chataigner (2008), réduirait son efficacité. La réduction de l'efficacité liée à cette mauvaise configuration avait été estimée à environ 30% par Périer *et al.* (2016). D'après les plans tel que construit, cette mauvaise configuration du drain s'étend sur pratiquement toute la longueur de l'infrastructure adaptée à l'exception des 70 premiers mètres du chaînage 1+300 m jusqu'au chaînage 2+160 m. Par conséquent, l'instrumentation des nouvelles sections du drain thermique au chaînage 1+485 m, 1+500 m et 1+612m, se trouvant dans des sections du drain non conforme, ne permettent pas, tel qu'initialement convenu dans ce projet, l'évaluation de l'impact de cette mauvaise configuration du drain thermique sur la performance du système.

Toujours selon les travaux de Chataigner (2008), le différentiel de hauteur entre les cheminées d'entrée et de sortie d'air s'est avéré avoir un impact sur la performance du drain thermique. De manière générale, plus le différentiel de hauteur entre l'entrée et la sortie du drain augmente, plus l'amplitude du flux thermique augmente ce qui se traduit par une extraction de chaleur plus efficace en hiver. À noter que dans la configuration actuelle des cheminées de ventilation (entrée et sortie d'air), ces dernières sont positionnées côte à côte et à la même

hauteur. Cette configuration, en plus de ne pas permettre un différentiel de hauteur entre les deux, implique l'utilisation d'une grande longueur de tuyau et de nombreux coudes reliant la base du drain à la cheminée d'entrée d'air. Cette complexité du réseau de ventilation tend à ajouter une certaine restriction dans la circulation de l'air dans le système attribuable à une perte de charge linéaire liée au frottement des molécules d'air sur les parois des composantes (conduit, TTOG et drain thermique) et une perte de charge singulière induite par des restrictions dans l'écoulement de l'air imposées par l'utilisation de coudes et réduits. En somme, une simplification du réseau de ventilation dans le remblai, en plus de réduire les coûts des matériaux et d'installation, permettrait de réduire cette perte de charge cumulée (linéaire et singulière). Dans le cadre de ce projet, cet aspect n'a pas été évalué, mais devrait faire l'objet d'une évaluation future afin d'en préciser les impacts et ainsi optimiser la conception de tel système au besoin. Un autre aspect non négligeable à l'origine de la faible performance du drain thermique pourrait être attribuable à sa faible épaisseur. D'après les travaux de Châtaigner (2008), même si une épaisseur de 25 mm permet une certaine extraction de chaleur, cette capacité d'extraction serait considérablement augmentée par l'utilisation d'un drain d'une épaisseur plus grande (40 mm d'épaisseur par exemple). La compagnie Terradrain, la compagnie manufacturière du drain utilisé le long de la route d'accès de Salluit, offre désormais des drains plus épais dont l'utilisation représenterait certes une amélioration lors d'installations futures. Lors d'une visite sur le terrain par le personnel du MTQ, certaines cheminées étaient bouchées par de la glace. L'étendue de cette situation demeure un point à éclaircir afin de vérifier s'il s'agit d'une situation unique ou que cette dernière s'applique à l'ensemble des cheminées de ventilation. Si telle est le cas, une augmentation du diamètre autant du drain que des cheminées pourrait minimiser, tout en augmentant la capacité extractive du système, le risque d'obstruction par la glace.

Malgré la performance mitigée du drain thermique, certains bénéfices thermiques découlent de son utilisation. Contrairement à un remblai convectif, le drain thermique, en l'absence de circulation d'air, constitue une couche isolante. Cet effet isolant a été observé en hiver aux sections instrumentées 1+485 m et 1+612 m, ce qui n'est pas souhaitable, car il limite l'extraction de chaleur possible par conduction. Toutefois, cet effet non désiré est nettement contrebalancé par les bénéfices thermiques estivaux de cette isolation en permettant de freiner considérablement la pénétration de chaleur plus en profondeur au courant de l'été. Il s'agit ici d'un effet secondaire positif du drain thermique qui s'additionne à la performance générale de cette technique de mitigation. La capacité du drain thermique à limiter considérablement la pénétration du front de dégel en période estivale avait également été observée par Chataigner (2008) lors d'exercices de simulation numériques. À noter que malgré l'effet isolant du drain thermique en hiver qui découle vraisemblablement d'une mauvaise circulation de l'air dans le système, l'air à l'intérieur du drain demeure inférieur à celle du sol sous-jacent, ce qui favorise une certaine extraction de chaleur, somme toute assez limitée.

À la lueur des analyses de la performance thermique du drain thermique, cette très faible, voire absence de convection dans le drain thermique installée le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit peut s'expliquer par différentes hypothèses allant du non-respect de l'angle optimal lors de l'installation du drain thermique, d'un différentiel de hauteur insuffisante entre l'entrée et la sortie des systèmes attribuable à la conception même du système de ventilation, l'espacement trop élevé entre les cheminées, une faible épaisseur du drain thermique, le calfeutrage par le givre du drain et des cheminées d'entrée et de sortie d'air, et la trop grande restriction dans la circulation d'air induite par les pertes de charge cumulées du réseau de ventilation. Bref, les raisons d'un mauvais fonctionnement sont nombreuses et il apparaît difficile à ce stade de déterminer avec certitude la ou les causes pouvant expliquer une telle performance. Même si de nombreux essais en laboratoire (Beaulac, 2004; Voyer, 2009), exercices de simulation numériques (Chataigner, 2009; Kong, 2019) et essais sur le terrain (Ficher et Doré, 2011) ont démontré l'efficacité du drain thermique comme technique de mitigation visant à limiter le dégel du pergélisol, la conception actuelle et les défis d'installation que cette méthode requière pourrait faire l'objet d'une optimisation. Pour de prochaines installations, les aspects suivants devront être étudiés afin d'améliorer l'efficacité d'un tel système :

- S'assurer de la conformité des angles du drain afin de le positionner le plus près possible de l'interface base du remblai/sol naturel ;
- Augmenter l'épaisseur du drain thermique de 2.5 cm à 5 cm ;
- Optimiser la configuration des cheminées d'entrée et de sortie afin de maximiser le différentiel de hauteur et minimiser la longueur des conduits et l'utilisation de coudes (minimiser les pertes de charge cumulées) ;
- S'assurer que les composantes du système de ventilation (cheminées et drain) ne soient pas obstruées par la formation de glace issue de la condensation ;
- S'assurer que la base du drain demeure légèrement au-dessus du terrain naturel pour minimiser le risque d'obstruction de son entrée par l'eau.

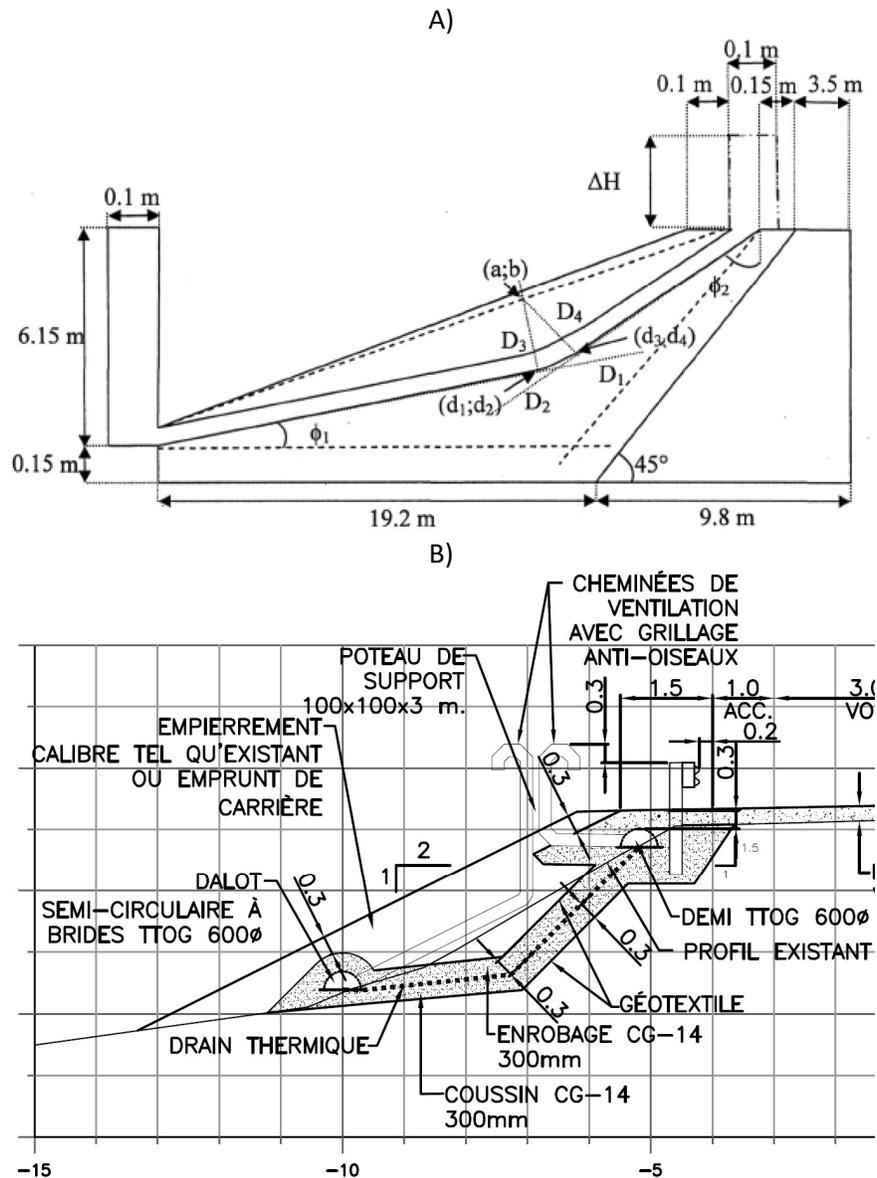


Figure 71 : A) Géométrie du dispositif d'optimisation du positionnement du drain (tirée de Châtagner, 2008). B) Configuration prévue (ligne noire pointillée) et actuelle (ligne rouge pointillée) du drain thermique et des composantes du système de ventilation installés le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.

Performance mécanique

De manière générale, la performance mécanique du remblai de la route d'accès à l'aéroport de Salluit est relativement bonne. Les enregistrements des câbles à thermistances aux chaînages 1+620 et 1+720 m ainsi que les profils géoradar réalisés perpendiculairement à l'axe de la route indiquent que la position du sommet du pergélisol, après une remontée considérable sous l'ensemble de la route dans les années suivant la mise en place des techniques d'adaptation, est demeuré relativement stable. Les conditions climatiques récentes affichant une légère tendance au refroidissement ont certes contribué à la performance mécanique généralement bonne du remblai de la route d'accès à l'aéroport de Salluit.

La section centrale du remblai ne présente pas de déformations majeures qui laisseraient présager une dégradation du pergélisol en cours. Caractérisé par un régime thermique très froid et thermiquement stable, le centre de la route affiche une excellente performance thermique qui confère une très bonne stabilité mécanique. Cette bonne performance thermique découle principalement de retrait de la couche d'asphalte, du rehaussement de la surface et du maintien d'une surface exempte de neige en hiver favorisant une extraction maximale de chaleur au courant de l'hiver et limitant l'induction de chaleur en été. Les conditions thermiques particulièrement froides contribuent donc au maintien du pergélisol sous la route dans une plage de température qui limite considérablement les déformations possibles liées au fluage ou au tassement et consolidation au dégel. Néanmoins, advenant un réchauffement futur du profil de sol sous le centre de la route à des valeurs de températures autour de -1°C , des déformations par fluage pourraient se développer sous l'effet des contraintes appliquées par le remblai lui-même.

Les conditions thermiques sous les pentes adoucies et en pied de remblai sont, quant à elles, plus précaires. Les conditions thermiques plus chaudes observées dans ces sections de l'infrastructure les rendent mécaniquement plus sensibles aux déformations. Ayant des régimes thermiques en déséquilibres (gradients thermiques inverses), le pergélisol présent à ces endroits tend à se réchauffer graduellement. Cette précarité thermique est vraisemblablement à l'origine d'une bonne partie des dégradations qui affectent actuellement le remblai du côté de la pente adoucie et l'accotement du côté du drain thermique (Figure 58). Toutefois, malgré des signes d'instabilité assez importants au cours des années suivant l'adaptation de l'infrastructure, le développement des déformations du fossé et du talus de la pente douce du côté amont ont considérablement ralenti depuis l'intervention de 2016. À l'exception de quelques dépressions qui sont réapparues suite au profilage du fossé à l'été 2016, cette section de l'infrastructure demeure relativement stable. Pour cette section de l'infrastructure, la réduction des accumulations de neige par l'instauration de meilleures pratiques de déneigement permettrait de grandement améliorer la performance thermique et mécanique des pentes adoucies. De telle pratique peuvent se résumer à privilégier le ramassage de la neige pour le tronçon de la route entre les chaînages 1+300 m et 2+200 m ou simplement souffler la neige à une bonne distance soit du côté amont ou du côté aval.

Actuellement, la principale inquiétude quant à la stabilité mécanique de la route d'accès porte principalement sur la stabilité des accotements et talus du côté du drain thermique. Les observations visuelles couplées avec les données des inclinomètres verticaux installés en pied de remblai du côté aval confirment la présence de mouvements relativement importants en pied de remblai. Ce sont ces mouvements qui sont à l'origine du développement des fissures observées à plusieurs endroits dans l'accotement et le talus du côté aval (Figure 58). Dans le cadre du suivi du comportement thermique et mécanique de la route d'accès à l'aéroport de Salluit réalisé par Périer *et al.* (2016), le processus de cryoptation, mouvement lent saisonnier issu de l'activité du gel-dégel et sous l'effet de la gravité, avait été identifié comme étant le processus principalement responsable du développement de ces déformations suite à l'adaptation de l'infrastructure en 2012. Ce processus saisonnier et superficiel entraîne un déplacement latéral vers le bas de pente des matériaux de remblai (Figure 72) et est

fréquemment à l'origine du phénomène d'étalement latéral des remblais qui surviennent dans les zones de pergélisol, mais également en zone de pergélisol discontinu (Batenipour *et al.*, 2014) et en zone de gel saisonnier.

Sans complètement exclure l'influence de la cryoreptation dans la genèse des déformations qui affectent les accotements et talus du remblai du côté du drain thermique, certains indices semblent plutôt indiquer qu'une bonne partie des déformations seraient davantage attribuables au fluage. L'un de ces indices est l'occurrence de mouvements mesurés par les inclinomètres au-delà de l'épaisseur maximale de la couche active. À cette profondeur, le sol demeure gelé, donc est non soumis aux cycles de gel et dégel à l'origine du processus de cryoreptation. La présence d'un pergélisol riche en glace (Allard *et al.*, 2004, L'Hérault 2009, L'Hérault *et al.*, 2012), légèrement salin et soumis à des contraintes de charge statique représente ici des conditions propices au fluage des matériaux (Nixon et Lem, 1984 ; Verreault, 2015 ; Durand-Jézéquel, 2016). À noter que les courbes de déformation par profondeur en fonction du temps pour chacun des inclinomètres verticaux semblent toutes indiquer une certaine diminution des déformations au cours des années récentes. Cette diminution des déformations en fonction du temps suggère qu'il pourrait s'agir toujours d'un fluage en phase primaire. Une stabilisation des taux de déformations, non atteinte pour le moment, marquerait l'entrée en phase de fluage secondaire. À noter que les déformations qui affectent actuellement le remblai du côté du drain thermique ne constituent pas une situation inédite. Avant l'adaptation de l'infrastructure en 2012, la déformation graduelle d'un tuyau de PVC installé en 2008 dans un puits de forage situé en pied de remblai (Sal-F6) suggérait dès lors la présence d'un mouvement latéral s'apparentant au fluage (L'Hérault *et al.*, 2012).

Cette situation amène des questionnements quant à l'importance de préserver des conditions thermiques marginales froides en pied de remblai. Par exemple, malgré la capacité du drain thermique à extraire la chaleur accumulée dans le remblai en hiver même sous d'importantes accumulations de neige, cette technique apporte des bénéfices thermiques qui se limitent à l'infrastructure. Par conséquent, malgré son utilisation, les températures de surface en pied de remblai et jusqu'à une certaine distance demeurent généralement au-dessus ou légèrement en dessous de 0 °C. Ces températures près du point de congélation entraînent nécessairement un réchauffement graduellement des températures dans les premiers mètres du pergélisol ce qui favorise le fluage voire même ultimement le tassement et la consolidation de ce dernier advenant son dégel. À cette situation, s'ajoutent les enjeux de stabilités attribuables à l'utilisation du drain lui-même qui constitue un plan de cisaillement préférentiel (faible friction interne entre les couches de matériaux sus et sous-jacents). Dans le cas de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, la mauvaise configuration de la pente du drain pourrait avoir également contribué aux problèmes de stabilité mécanique rencontrés au niveau de l'utilisation du drain thermique. Cette situation justifie la pertinence, dans une conception future, de considérer l'intégration d'éléments de renforcement mécanique au sein du remblai. L'efficacité d'un tel renforcement mécanique soit par l'encapsulation des matériaux de remblai ou par l'utilisation de renforts géosynthétiques est présentement à l'étude au Manitoba (Kurz *et al.*, 2018).

Pour le moment, l'absence de mesure de déformation en continu ne permet pas de suivre l'évolution des mouvements sur une base saisonnière et ainsi permettre de départager l'apport d'un processus plutôt qu'un autre. Seulement une prise de mesures régulières de déformation sur une base annuelle permettrait de départager la contribution des différents processus à l'origine des déformations observées (Harris, 2017) ce qui n'est malheureusement pas le cas actuellement. Chose certaine, il s'agit ici de processus de dégradation lent et graduel qui requièrent une surveillance soutenue à court terme et des interventions à moyen terme. Étant donné la situation préoccupante en termes de stabilité des accotements du côté aval, il est recommandé de poursuivre le suivi mécanique. Toutefois, la poursuite d'un tel suivi nécessitera de procéder à l'installation de nouveaux tubages verticaux pour remplacer ceux trop déformés. Il pourrait également s'avérer pertinent de procéder à des mesures de déformation plus régulière dans le temps, ce qui permettrait de départager les contributions des processus de fluage versus de cryoreptation à l'origine des déformations observées. Ces relevés inclinométriques

pourraient également être couplés à des mesures de déformation de surface réalisées à partir de plaque de tassement, comme c'est le cas pour plusieurs pistes d'atterrissage actuellement, qui pourraient être installées au centre de la route, dans l'accotement, dans le talus et en pied de remblai. Les données de déformations très précises et spatialement distribuées mesurées soient par InSAR (Eppler *et al.*, 2015) ou à l'aide d'un LIDAR terrestre permettraient possiblement de préciser les processus impliqués dans les déformations du remblai et mieux délimiter les secteurs instables. Chose certaine, le processus en vigueur actuellement représente un risque pour l'infrastructure et requiert un suivi.

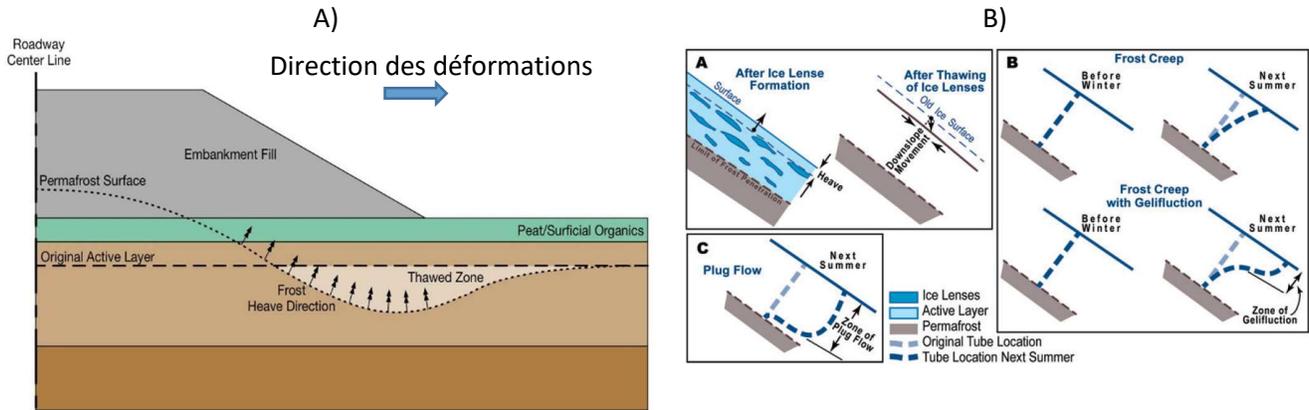


Figure 72 : A) Schématisation de la section sous l'accotement sujette à la cryoptation qui entraîne l'étalement des accotements (tirée de Brooks, 2019). B) Mécanismes de déformations associés à la cryoptation avec ou sans gélifluxion et leurs impacts sur un tubage flexible (tirée de Harris, 2017).

Performance du réseau de drainage

Pour ce qui est du drainage, les améliorations apportées en 2016 (reprofilage des fossés et ajouts de bermes de déviation aux abords des ponceaux) confèrent au système de drainage une très bonne performance. Il est important de mentionner que le fossé de drainage du côté amont, particulièrement entre les chaînages 1+300 et 1+840 m, repose sur un pergélisol extrêmement riche en glace. Sa réalisation lors des travaux initiaux d'adaptation en 2012 a nécessité l'excavation d'une bonne partie de la couche active et le remplacement de la couche organique par un matériau granulaire. Ces interventions ont considérablement perturbé le régime thermique initial du pergélisol forçant un réajustement thermique rapide au cours des années successives. Ce réajustement thermique est à l'origine des nombreuses déformations qui se sont développées dans le fossé et également dans le talus du remblai à pente adoucie entre 2012 et 2016. En raison de la précarité thermique et du contenu en glace élevé du pergélisol présent sous le fossé, d'autres déformations sont à anticiper. À juste titre, d'autres dépressions se sont formées dans le fossé depuis le reprofilage du fossé à l'été 2016. Certaines de ces dépressions favorisent actuellement la formation de mares d'eau au fond du fossé qui persistent une bonne partie de l'été. Il s'avère donc nécessaire, malgré une performance somme toute adéquate du fossé de drainage dans son état actuel, de procéder régulièrement à son profilage par comblement afin de maintenir un écoulement efficace des eaux de surface et ainsi éviter les accumulations d'eau stagnante. Les ponceaux qui traversent la route à plusieurs endroits sont des composantes critiques qui assurent une bonne performance du réseau de drainage actuel. Au cours de la période 2012-2020, certains ponceaux se sont déformés à un point tel qu'il est nécessaire de les remplacer. À noter que le MTQ réalisera des travaux de réfection des ponceaux à l'été 2021. Lors de ces travaux, il est recommandé de procéder au reprofilage du fossé tel qu'effectué en 2016, soit par le comblement des dépressions par l'ajout de matériau granulaire. Point à noter, les coussins de dispersions à l'exutoire des ponceaux et l'ajout de bermes dans l'optique de segmenter l'écoulement, même si les bénéfices de ces ajouts sont difficilement quantifiables, s'avèrent de bonnes pratiques à maintenir lors de la conception des réseaux de drainage pour des projets d'ingénieries en contexte similaire.

1.6.3 LA PISTE D'ATERRISSAGE DE SALLUIT

1.6.3.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

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

Située sur des hauts plateaux caractérisés par un relief modelé où s'alternent sommets et creux, la piste d'atterrissage 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 discontinu sur le roc (Tm/R) et des affleurements rocheux (R) (L'Hérault *et al.*, 2012). 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. Dans l'ensemble, les échantillons de till prélevés dans le pergélisol à l'aéroport ont révélé la présence d'importante quantité de glace sous forme de lentilles de glace de ségrégation avec à l'occasion une structure réticulée (Figure 73A 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 % (L'Hérault *et al.*, 2012). En raison de sa teneur en glace importante, le till est susceptible de se tasser au dégel ou de fluer sous contrainte (Verreault, 2009). Des essais de tassement et consolidation au dégel réalisés par L'Hérault *et al.* (2012) sur des échantillons de till pergélisolé prélevés aux abords de la piste avait permis d'estimer un potentiel de tassement entre 30 et 40 % sous des contraintes de 100 kPa avec des valeurs plus élevées dans les zones extrêmement riches en glace. Aux endroits où l'épaisseur du remblai atteint des valeurs considérables (p. ex. > 5 m), des tassements en fluage sont susceptibles de se développer dans les sols gelés (Verreault, 2009 ; L'Hérault *et al.*, 2012).

D'après les travaux de Allard *et al.* (2007) et L'Hérault *et al.* (2012), les dégradations observées consistaient en des tassements dans les zones où des déblais ont été réalisés dans le till lors de la construction de la piste. La première section affectée par des tassements était située à l'extrémité nord-ouest, près de la voie de circulation et le long de l'accotement entre les chaînages 2+760 et 2+920 m. Plusieurs dépressions avaient également été observées tout au long de l'accotement du côté est de la piste (chaînage 2+030 m, 2+180 m et 2+500 m) et s'accompagnaient généralement de mares d'eau en pied de remblai (Figure 73C). Des mesures de nivellement effectuées dans ces secteurs entre 2005-2011 indiquaient des affaissements de l'ordre de 9.4 à 16.6 cm (MTQ, 2015). Selon Allard *et al.* (2007), ces tassements, préférentiellement localisés sur le long des accotements, étaient le résultat de perturbations thermiques du pergélisol engendrées par la présence d'importantes épaisseurs de neige ainsi qu'un mauvais système de drainage qui retenait l'eau contre le pied du remblai et, à certains endroits, favorisait même des infiltrations sous la piste. Le tassement le plus notable observé le long de la piste d'atterrissage était situé au niveau des deux ponceaux superposés situés au chaînage 2+030 m (Figure 73D). Dans cette zone affectée, de nombreuses fissures de tensions et un trou d'une trentaine de centimètres de largeur et de profondeur avaient été observés en bordure de piste et le basculement des extrémités des ponceaux vers l'intérieur de la piste témoignait de l'ampleur du tassement dans le secteur. C'est également dans cette zone qu'un écoulement d'eau s'infiltrant au pied du remblai avait été observé (L'Hérault *et al.*, 2012).

D'après les exercices de simulation numériques réalisés par L'Hérault *et al.* (2012), la couche active au centre-piste devrait augmenter d'au plus 1.12 m d'ici 2050 pour atteindre des épaisseurs comprises entre 3,2 et 4,5 m. 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 probabilité élevée de retrouver un till riche en glace sous la piste, ne devrait pas générer de tassements notables. Toutefois, dans certains secteurs en déblai déjà fragilisés ou aux endroits où le remblai est mince, l'augmentation projetée devrait atteindre et possiblement pénétrer le niveau du pergélisol d'avant construction et ainsi occasionner des tassements dans ces zones. Comme il existe trois

principales zones de déblai sur till dans l'axe de la piste (2+120 à 2+220 m, 2+320 à 2+540 m et 2+780 à 2+970 m), le pergélisol risque d'être perturbé dans ces zones et la piste peut être affectée par des tassements plus importants. Outre l'apparition et l'évolution graduelle des tassements au dégel en fonction de la dégradation anticipée du pergélisol et l'augmentation de la couche active associée, un réchauffement des températures plus en profondeur pourrait également favoriser le fluage interne du till riche en glace, particulièrement dans les secteurs où le remblai est très épais (chaînage 1+900 à 2+120 m). Ce fluage interne pourrait contribuer à la dégradation lente de l'infrastructure. La présence de dépôt riche en glace sous une bonne partie de l'infrastructure, les multiples zones en déblais effectuées lors de la construction de la piste et les épaisseurs considérables de remblai par endroit contribuent à rendre cette infrastructure à risque de dégradation élevé en fonction des changements climatiques projetés. Des entretiens plus fréquents sont donc à prévoir.

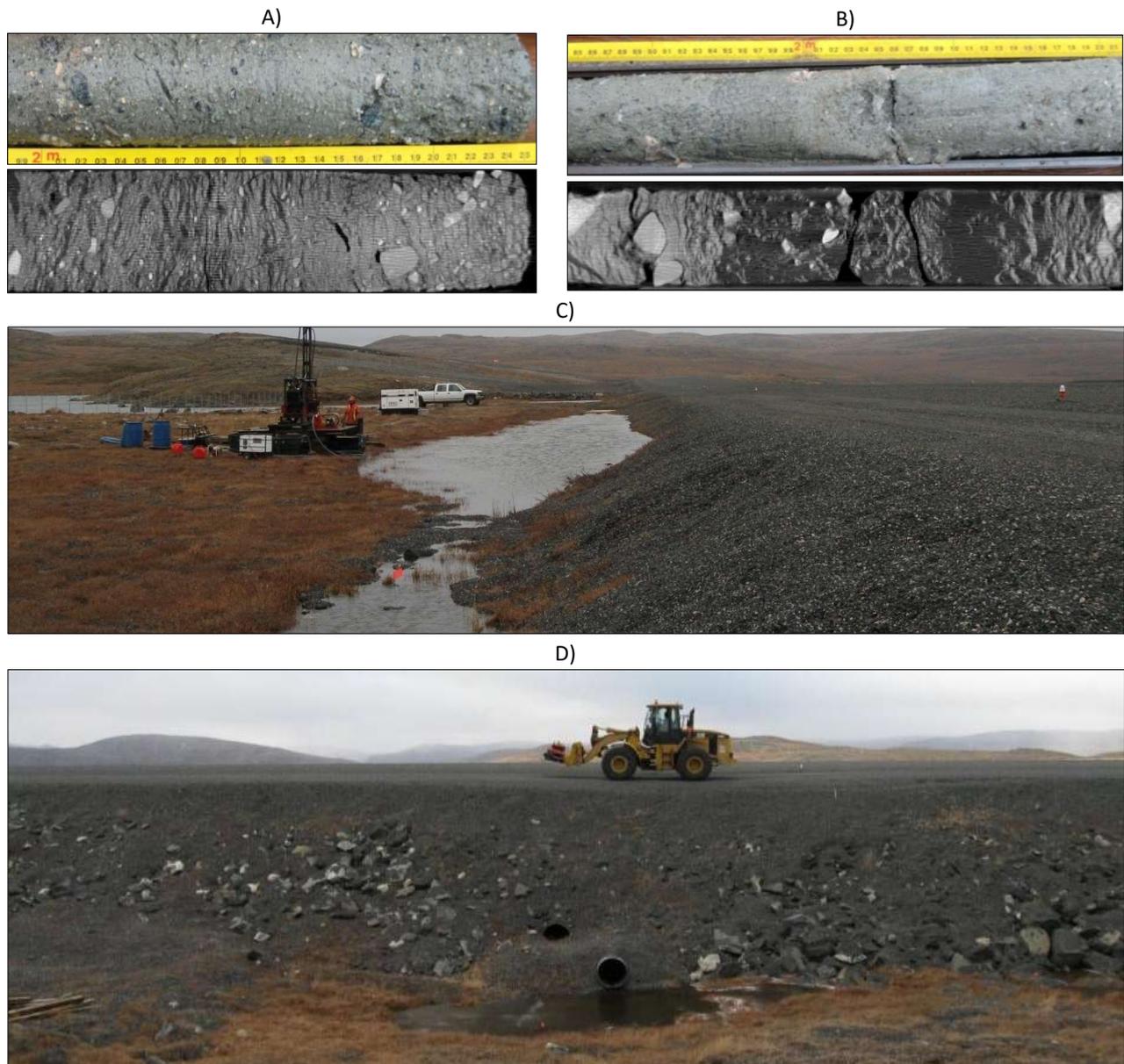


Figure 73 : A) Till riche en glace avec structure lenticulaire entre 1,97 et 2,25 m de profondeur, forage SAL-F3. B) Plafond du pergélisol riche en glace entre 1,92 m à 2,12 m, forage SAL-F5. C) Accumulations d'eau côté est, chaînage 2+510 m. D) Dépression importante sur le côté est de la piste au niveau des deux ponceaux superposés situés au chaînage 2+030 m. (modifiée de L'Hérault *et al.*, 2012).

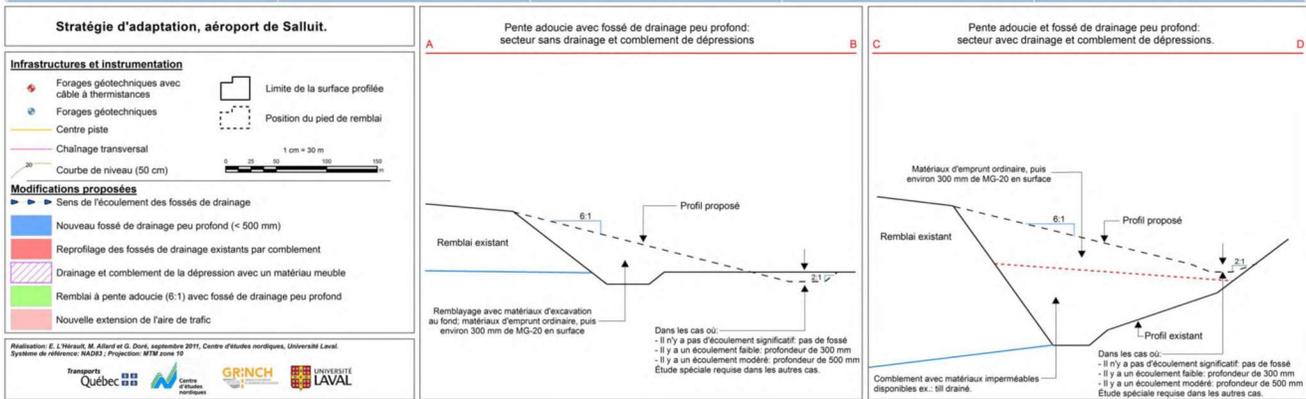
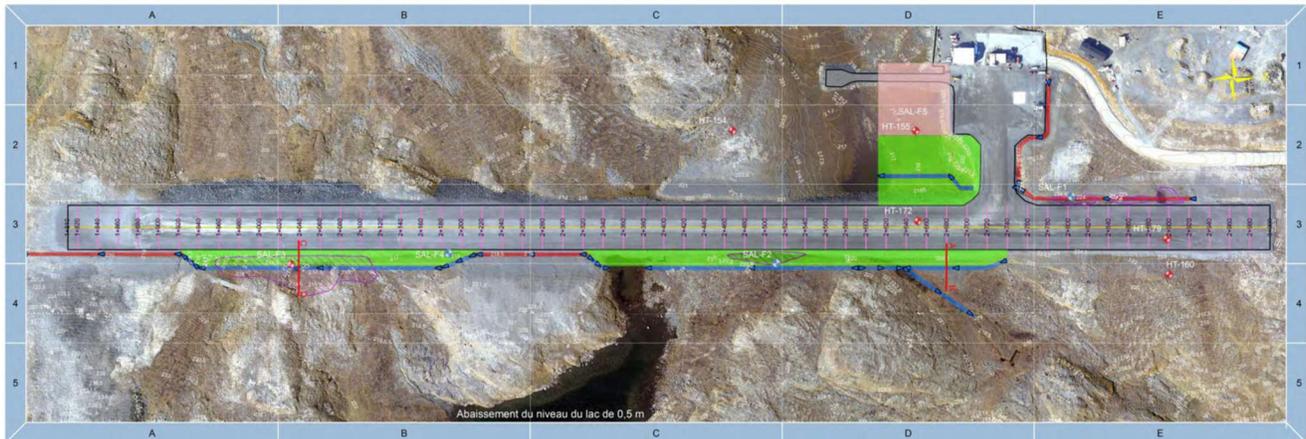
Afin de minimiser l'influence des accumulations de neige et des accumulations d'eau, identifiées comme étant les facteurs en partie responsables du développement de plusieurs dépressions observées le long des accotements à l'extrémité nord-ouest et du côté est de la piste, un plan de rénovation de la piste de Salluit avait été élaboré conjointement par le MTQ et le CEN (L'Hérault *et al.*, 2012) afin d'adapter l'infrastructure à la sensibilité du terrain. Ce plan sommaire de rénovation, présenté à la Figure 74A, avait 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 avait 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 le déplacement de la neige par le vent et ainsi diminuer les accumulations nivales en pied de remblai. Pour ce faire, il avait alors été proposé de drainer et combler les dépressions majeures présentes en pied de remblai pour ensuite adoucir les pentes du remblai sur une bonne section du côté est de la piste. Afin d'éviter tout impact thermique potentiel du lac situé sur le côté est entre les chaînages 2+340 et 2+380 m, il avait alors été recommandé d'abaisser le niveau de ce dernier d'au moins 0,5 m en excavant son exutoire.

Les adaptations plus spécifiques aux mesures de protection du pergélisol à mettre en place ont été coordonnées aux travaux prévus pour l'élargissement de la piste (élargissement d'environ 1 m des accotements) et l'agrandissement de l'aire de trafic. Les travaux d'adaptation de la piste d'atterrissage de Salluit se sont déroulés en deux étapes, soit à l'été et automne 2012 et à l'été et automne 2016 et se résumaient à :

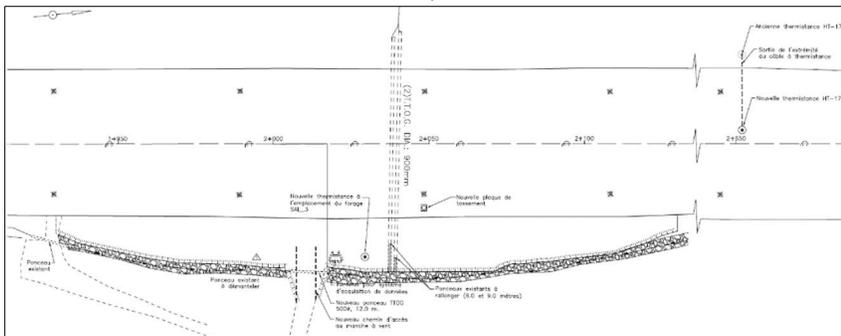
- L'adoucissement des pentes (1V :7H)
 - Talus extérieur existant de la piste (chaînage 2+340 à 2+640 m)
 - Remblai pente douce tronqué (chaînage 1+920 à 2+140 m)
 - Talus intérieur gauche existant de la piste (chaînage 2+570 à 2+700 m)
 - Talus intérieur gauche de la voie de circulation (chaînage 5+023 à 5+093 m)
 - Talus adjacent à l'agrandissement de l'aire de trafic et de son agrandissement
- L'amélioration du drainage de certaines sections
 - Allongement de ponceau
 - Nettoyage et reprofilage de fossés latéraux
 - Remblayage de dépression en amont des ponceaux
 - Abaissement du niveau du lac
 - Détournement du fossé latéral de la voie de circulation (2016)
 - Nouveau fossé de décharge (2016)
- La réfection d'une section de la clôture endommagée par le soulèvement gélival (150 m) par l'utilisation de poteaux russes
- Le maintien des équipements de suivi (ex : plaque de tassements et câbles à thermistances)

À noter que plusieurs éléments de la stratégie initialement proposée (Figure 74A) ont été modifiés ou exclus des travaux à réaliser. Il s'agit, en outre, des interventions entre les chaînages 1+810 à 2+120 m. Dans ce secteur, la dépression n'a pas été comblée complètement de manière à pouvoir rediriger le drainage vers le sud. Le remblai a été élargie d'une dizaine de mètres avec en surface une pente de 1V :6H (pente douce tronquée) et les ponceaux rallongés (Figure 74B et C). En ce qui concerne le secteur de l'aire de trafic, la section en bordure de l'agrandissement entre la piste et le chemin d'accès aux stations d'environnement Canada a été complètement comblée et le fossé de drainage prolongé vers le sud (Figure 74D). La prolongation du fossé de drainage vers le sud a nécessité l'excavation de l'affleurement rocheux sur plusieurs mètres de profondeur.

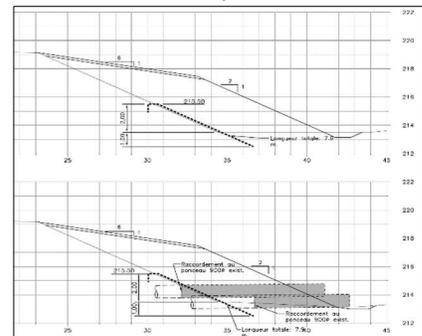
A)



B)



C)



D)

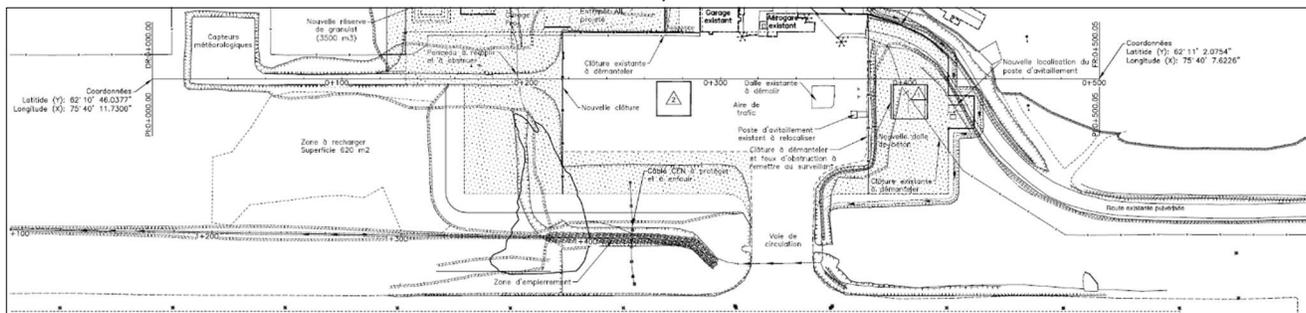


Figure 74 : A) Stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Salluit telle que proposée dans L'Hérault et al. (2012). B) et C) Élargissement du remblai, pente adoucie tronquée et prolongation des ponceaux entre les chaînages 1+920 et 2+120 m (Plan tel que construit no : PA-7202-154-04-1164-1). D) Adoucissement des pentes du talus adjacent à l'agrandissement de l'aire de trafic, rechargement et prolongation du fossé de drainage vers le sud (Plan tel que construit no : PA-7202-154-04-1164-1).

1.6.3.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts de la mise en place de la stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Salluit sont présentés au tableau 15. À l'intérieur de ce tableau, les coûts tirés des bordereaux de paiements associés aux devis no. 7202-11-3501 et no. 7202-12-0101 ont été regroupés selon les différentes mesures d'adaptation mises en place. D'après cette compilation, les coûts des travaux d'adaptation portant spécifiquement sur l'adoucissement des pentes, la révision du drainage et la réfection d'une section de la clôture totalisent 1 347 071 \$. À noter que les coûts associés à l'élargissement de la piste, ne faisant pas partie de l'adaptation de la piste, ont été exclus.

Lors de la mise en place de la stratégie d'adaptation, des travaux d'entretien ont également été réalisés et consistaient à la scarification, nivellement et rechargement de 54 740 m² de piste nécessitant 6256 m³ de MG 20b modifié, la mise en réserve de 3007 m³ de MG20b modifié supplémentaire et le nettoyage et reprofilage de 932 m de fossés latéraux. Le coût de ces travaux d'entretien est estimé à 722 680 \$. À noter que les deux dernières interventions portant sur l'entretien de la piste remontent à 2008 et 2004. Ces dernières interventions consistaient au rechargement des 400 premiers pieds du seuil de piste nécessitant chaque fois environ 250 m³ de gravier.

Tableau 15 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Salluit.

Année	Mesures	Description	Coût (\$)
2012-2016	Adoucissement des pentes (7H :1V)	<i>Adoucissement des pentes de talus intérieur gauche et adjacent à l'aire de trafic</i>	
		Emprunt, matériau de carrière tout venant (D100 < 1000 mm)	905 471.00
		Adoucissement des pentes de talus adjacents	230 000.00
		<i>Adoucissement des pentes de talus adjacents 1+930 au 2+130 m (2012)</i>	
		Matériaux d'emprunt et granulats	195 225.00
		Imperméabilisation du remblai (2012)	93 028.00
		Rallongement des ponceaux et Imperméabilisation des extrémités	27 200.00
		Fossés latéraux	10 180.00
		Revêtement de protection pour fossés	25 861.50
		Autres	5 432.41
	Sous-total =		1 135 471.00
	Révision du drainage	Allongement de ponceau et travaux divers	10 080.00
		Nettoyage et reprofilage de fossés latéraux	15 844.00
		Abaissement du niveau du lac	69 500.00
		Détournement du fossé latéral de la voie de circulation	3 000.00
Nouveau fossé de décharge		57 000.00	
Sous-total =		155 424.00	
Réfection d'une section de la clôture	Clôture de type treillis pour gibier	20 776.00	
	45 x poteau de type « Yukon »	31 500.00	
	3 poteaux de type « Russe »	3 900.00	
Sous-total =		56 176.00	
Total travaux d'adaptation =		1 347 071.00	
2012-2020	Entretien	Scarification et mise en forme (2012)	180 642.00
		Granulats concassés MG 20b modifié (rechargement) (2012)	387 872.00
		Granulats concassés MG 20b modifié (mise en réserve) (2012)	138 322.00
		Nettoyage et reprofilage de fossés latéraux (2012)	15 844.00
Total travaux d'entretien =		722 680.00	
Grand total =		2 069 751.00	

1.6.3.4 INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DE PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION

Lors de la construction de la piste d'atterrissage de Salluit à l'été 1987, cinq câbles à thermistances ont été installés soit : un câble de 20 mètres dans un affleurement rocheux (HT-154) et un câble de 20 m dans le till au sud de

l'aérogare côté ouest (HT-155); un câble de 20 m dans la piste à travers le remblai épais (HT-172); un câble de 5 m dans le till sous le remblai mince dans la section nord de la piste (HT-179); un câble de 5 m dans le till et pénétrant dans le roc sous-jacent situé à une dizaine de mètres du pied de remblai (HT-160). De ces câbles anciens, les câbles HT-154, HT-155 et HT-172 sont munis de systèmes d'acquisition de données qui permettent un suivi des températures du sol en continu sur une base horaire. Quant aux câbles HT-160 et HT-179, les lectures sont effectuées manuellement quelques fois par année, donc discontinues. Plus récemment, dans le cadre d'un projet de recherche visant à faire la caractérisation des propriétés géotechniques, six forages ont été réalisés en marge de la piste et ont fait l'objet de lectures manuelles à l'aide d'un multimètre et d'une thermistance descendue graduellement dans les puits de forage remplis d'huile de silicone (L'Hérault *et al.*, 2012). Il s'agit ici de lectures manuelles de températures uniques effectuées en 2008 à l'exception du forage SAL-F4 muni depuis d'un chapelet de thermistances qui permet la prise de lectures manuelles sporadiques. Lors de la réalisation des travaux d'adaptation en 2012, un forage à proximité de l'emplacement du câble SAL-F3 a été réalisé sur le talus de la pente douce tronquée, puis instrumenté avec un câble à thermistances à lectures automatisées. Ce câble, d'une longueur de 15 m, traverse le remblai sur une épaisseur de 2.6 m pour ensuite pénétrer dans le dépôt de till. Au cours de ces mêmes travaux, le câble à thermistances HT-155 a été recouvert d'une épaisseur de 6.5 m de gravier lors de l'agrandissement de l'aire de trafic. Afin d'assurer la continuité des lectures de ce câble malgré son recouvrement, ce dernier a été prolongé en surface, puis raccordé au même système d'acquisition de données que le câble HT-172. En ce qui concerne le câble HT-172, ce dernier a été complètement remplacé à l'été 2012 après avoir été fortement endommagé lors des travaux de réfection du filage électrique lors de l'élargissement de la piste.

Au total, la piste d'atterrissage dispose de quatre plaques de tassement installées dans les accotements le long de la piste (Figure 75). Installées initialement en 2004-2005, les plaques de tassement P-1, P-2 et P-3 ont été remplacées en 2014, car non retrouvées suite au rechargement de la piste réalisé à l'été 2012. Quant à la plaque de tassement P-4, cette dernière a été remplacée en 2012.

Dans le cadre de ce projet de recherche, deux caméras ont été installées à l'été 2018 en bordure de la piste d'atterrissage. Ces deux caméras ont été spécifiquement positionnées pour assurer un suivi des conditions d'enneigement et de drainage de deux composantes de la stratégie d'adaptation mise en place soit : la pente douce tronquée avec prolongement des ponceaux (chaînage 1+920 à 2+140 m) et les pentes douces adjacentes à l'agrandissement de l'aire de trafic et la piste avec un le nouveau fossé de décharge. Un plan de localisation de l'ensemble de l'instrumentation pour l'aéroport de Salluit est présenté à la figure 75 et les caractéristiques techniques des câbles à thermistances et caméras automatisées sont résumées respectivement aux tableaux 12 et 13.

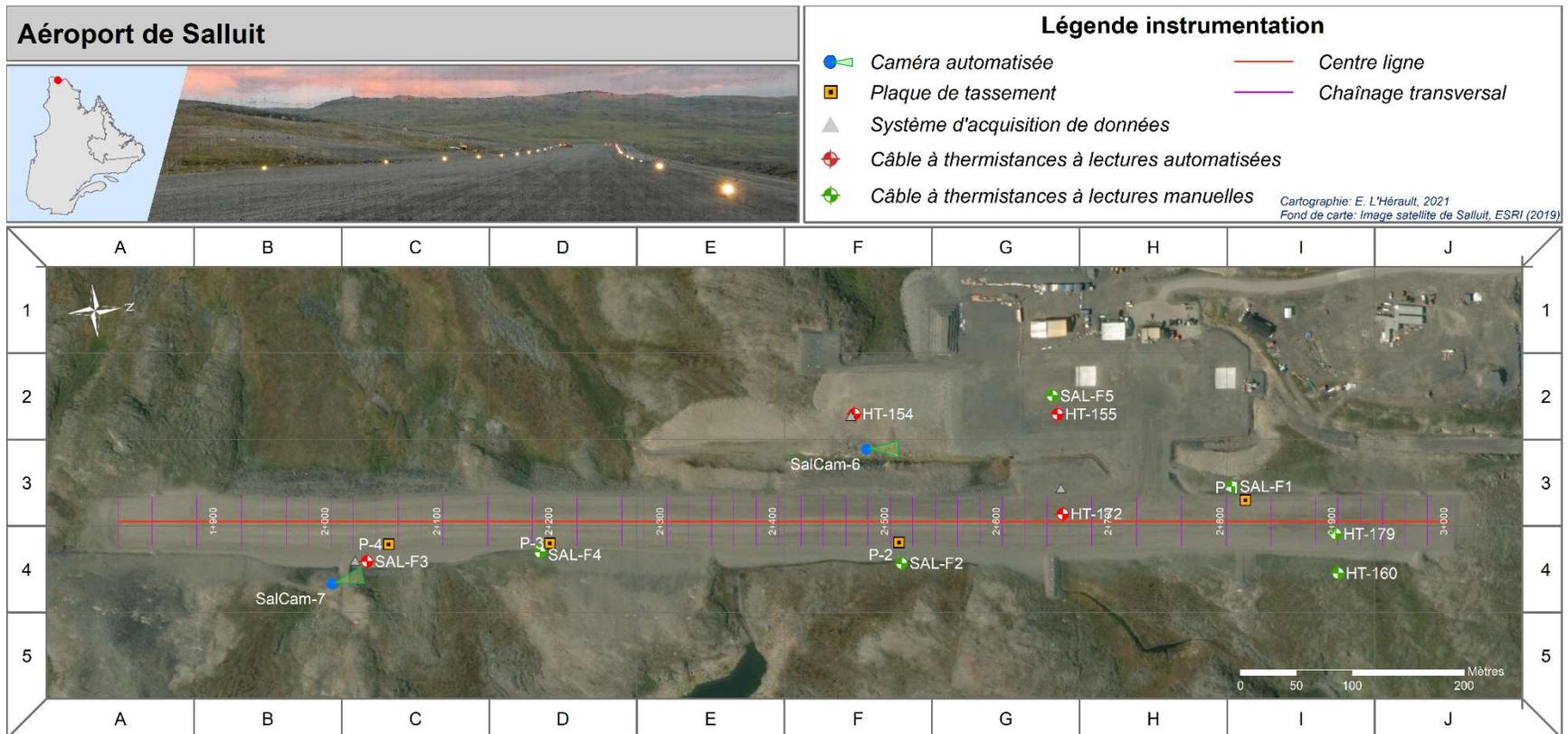


Figure 75 : Instrumentation existante et celle installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques d'adaptation mises en place à l'aéroport de Salluit.

Tableau 16 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans le secteur de la route d'accès à l'aéroport de Salluit qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.

No. forage	Localisation	Orientation	Longueur (m)	Nb. thermistances	Répartition des thermistances (m)	Zéro de référence	Mise en service	Type lecture/système	Paramètres mesurés	État
HT-154	Terrain naturel	Vertical	20.00	11	-1; -2; -3; -4; -6; -8; -10; -12; -15; -18; -20	Surface terrain	1987-07-17	automatisée/CR10	température du sol	Fonctionnel
HT-155	Tablier/remblai	Vertical	19.75	11	-0.75; -1.75; -2.75; -3.75; -5.75; -7.75; -9.75; -11.75; -14.75; -17.75; -19.75	Surface terrain	1987-07-17	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
HT-160	remblai	Vertical	5.00	11	-0.25; -0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -4; -4.5; 5	Surface terrain	1987-07-17	manuelle	température du sol	Fonctionnel
HT-172	remblai	Vertical	19.50	11	-0.25; -0.5; -1; -2; -3; -4; -5; -11; -14; -17; -19.5	Surface terrain	1987-07-16	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
HT-179	Terrain naturel	Vertical	7.07	11	-2.32; -2.57; -3.07; -3.57; -4.07; -4.57; -5.07; -5.57; -6.07; -6.57; -7.07	Surface terrain	1987-07-17	manuelle	température du sol	Fonctionnel
SAL-F1	Pied de remblai	Vertical	6	1	0; -0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -4; -4.5; -5; -5.5; -6	Surface terrain	2008-10-26	manuelle	température du sol	Non fonctionnel
SAL-F2	Pied de remblai	Vertical	8.28	1	0; -0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -4; -4.5; -5; -5.5; -6; -6.5; -7; -7.5; -8; -8.28	Surface terrain	2008-10-26	manuelle	température du sol	Non fonctionnel
SAL-F3	Talus	Vertical	15.00	15	-1; -2; -3; -4; -5; -5.5; -6; -6.5; -7; -7.5; -8; -8.5; -9; -11; -15	Surface terrain	2012-10-08	automatisée/CR1000	température du sol	Fonctionnel
SAL-F4	Pied de remblai	Vertical	4.95	10	-0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -4; -4.5; -4.95	Surface terrain	2008-10-26	manuelle	température du sol	Fonctionnel
SAL-F5	Terrain naturel	Vertical	7.2	1	0; -0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -4; -4.5; -5; -5.5; -6; -6.5; -7; -7.2	Surface terrain	2008-10-26	manuelle	température du sol	Non fonctionnel



Figure 76 : Localisation des caméras automatisées installées à l'été 2018 le long de la piste d'atterrissage de Salluit. A) Emplacement de la caméra SalCam-6 et sa perspective. B) Emplacement de la caméra SalCam-7 et sa perspective.

Tableau 17 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées en septembre 2018 le long de la piste d'atterrissage de Salluit.

Nom	Coordonnées MTM (m)			Chainage(m)	Distance du CL (m)	Hauteur caméra (m)		Orientation (°)	Photos/jour	Date d'installation
	x	y	z			sol	CL			
A) SalCam-6	348114.8	6896591	225.75	2+480	64	1.5	4.06	84	2	2018-09-06
B) SalCam-7	348183.3	6896103	220.10	2+000	56	1.5	0.65	106	2	2018-09-06

1.6.3.5 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE THERMIQUE ET MÉCANIQUE DE LA PISTE D'ATERRISSAGE DE SALLUIT POUR LA PÉRIODE 2012-2019

1.6.3.5.1 PERFORMANCE THERMIQUE

Dans le cadre de l'adaptation de la piste d'atterrissage de Salluit, deux types de pentes douces ont été aménagées sur le côté est de la piste. Pour la section en remblai mince (épaisseur < 2 m) entre les chaînages 2+340 à 2+640 m, une pente douce standard (7H :1V) a été mise en place. Pour la section en remblai épais (> 5 m), entre les chaînages 1+920 à 2+140 m, une pente douce tronquée a été utilisée afin de limiter la quantité de matériau nécessaire.

Pour la section de l'infrastructure où une pente douce standard a été mise en place, l'absence de câble à thermistances automatisé dans le secteur rend impossible l'évaluation de la performance thermique de cette technique dans ce secteur en particulier. Il en va de même pour les pentes douces mises en place le long du talus intérieur gauche existant de la piste, de la voie de circulation et celui adjacent à l'agrandissement de l'aire de trafic et de son agrandissement. Malgré l'absence de suivis thermiques spécifiques à ces sections adaptées, l'absence de signes de dégradation suggère une performance thermique adéquate. Entre les chaînages 2+340 et 2+640 m, le recouvrement des dépressions remplies d'eau par la pente douce ont certainement été bénéfiques en minimisant les accumulations de neige en pied de remblai. En complément, l'ajout d'un fossé de drainage peu profond et l'abaissement du niveau du lac permettent dorénavant de drainer efficacement l'eau. Il sera pertinent de poursuivre les relevés au niveau de la plaque de tassement P-2 et aussi relever tout signe de dégradation suggérant une dégradation du pergélisol en cours. Pour le moment, le climat relativement stable des 10 dernières années, affichant même une légère tendance au refroidissement (Tableau 14), a certainement contribué à la stabilité thermique générale de l'infrastructure.

En ce qui concerne la performance thermique de la pente douce tronquée positionnée entre les chaînages 1+920 à 2+140 m, la présence d'un câble à thermistances (SAL-F3) permet d'évaluer la réponse thermique du pergélisol depuis sa mise en place à l'été 2012. Les variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps sous le remblai à pente douce tronquée pour la période d'octobre 2012 à octobre 2020 sont présentées à la figure 77. Chronologiquement, dès la première année suivant la mise en place du remblai à pente douce tronquée, la position du plafond du pergélisol a remonté considérablement (1.37 m en 2013) pour ensuite demeurer relativement stable présentant quelques oscillations de plus ou moins 20 cm au cours de la période 2014-2020 (Tableau 18). La position du plafond du pergélisol semble s'être stabilisée à quelques décimètres sous la base du nouveau remblai. Parallèlement à cette remontée du plafond du pergélisol, on constate également que les températures tout le long du profil se sont refroidies. Par exemple, les plages de température comprises entre 0 et -0.5°C et -0.5 et -1°C se sont considérablement résorbées et présentent désormais une fluctuation saisonnière scindée par une plus grande pénétration des températures froides en hiver (Figure 77). Plus en profondeur, les isothermes de -1.5 et -2°C sont demeurés assez stables au cours de la période 2013-2016, mais affichent depuis une légère remontée graduelle (Figure 77). Depuis la mise en place de la pente douce tronquée, ce refroidissement généralisé et graduel de l'ensemble du régime thermique est clairement mis en évidence à la figure 78B. Entre 2012 et 2020, ce refroidissement est estimé à environ 0.5°C à 3 m (≈ interface base du remblai/sol naturel) et 0.15°C à 15 m de profondeur sous la surface actuelle du remblai. Il s'agit ici d'un refroidissement assez timide, probablement associé en partie aux températures moyennes annuelles de l'air à Salluit légèrement sous la normale (2008-2020) pour la période de 2016-2020 (Tableau 14).

Malgré un certain bénéfice thermique issue de la mise en place du remblai à pente douce tronquée, ce bénéfice résulte davantage du simple ajout d'environ 2.6 m de gravier sur la pente initiale que d'une amélioration des conditions d'enneigement. À ce jour, d'importantes épaisseurs de neige persistent toujours dans le secteur tout au long de l'hiver. Selon les relevés du MTQ effectués à cet endroit (N2 et N12), celles-ci atteignent en moyenne

depuis 2014 entre 1 et 1.25 m d'épaisseur et jusqu'à plus de 1.5 m à l'occasion. À noter que les points de mesures d'enneigement, selon les plans du MTQ, sont situés en milieu de talus. Par conséquent, de plus grandes épaisseurs se retrouvent nécessairement directement au pied de remblai. Chose certaine, les profils thermiques moyens mesurés au câble SAL-F3 présentent un gradient thermique inverse caractérisé par des températures du pergélisol plus chaudes dans les premiers mètres qu'en profondeur (Figure 78B). Ces gradients thermiques inverses suggèrent donc que les conditions en surface, en l'occurrence l'enneigement, contribuent au réchauffement général du profil thermique. À titre de comparaison, les profils thermiques moyens mesurés au centre-piste (câble HT-172) présentent des gradients thermiques normaux et significativement plus froids (Figure 78A).

Même si certains indicateurs demeurent encourageants et semblent confirmer une certaine efficacité de la pente douce tronquée, le régime thermique du pergélisol à cet endroit (câble SAL-F3) demeure nettement plus chaud que celui qui prévaut en milieu naturel (HT-160) et sous le centre de la piste (HT-172). En effet, comparativement au centre-piste (câble HT-172), le régime thermique sous le talus de la pente douce tronquée est nettement plus chaud et affiche un gradient thermique inverse. La masse thermique du centre de la piste, caractérisée par un régime thermique assez froid, constitue toutefois un avantage indéniable qui limite l'influence des conditions marginales plus chaude sur le régime thermique plus en profondeur qui prévaut sous les accotements et les pieds de remblai dans le secteur de la pente douce tronquée. La remontée significative du plafond du pergélisol qui se situe désormais à l'interface entre la base du remblai et le terrain naturel représente un gain considérable qui aura pour effet de limiter la dégradation du pergélisol riche en glace présent sous l'actuel talus de remblai.

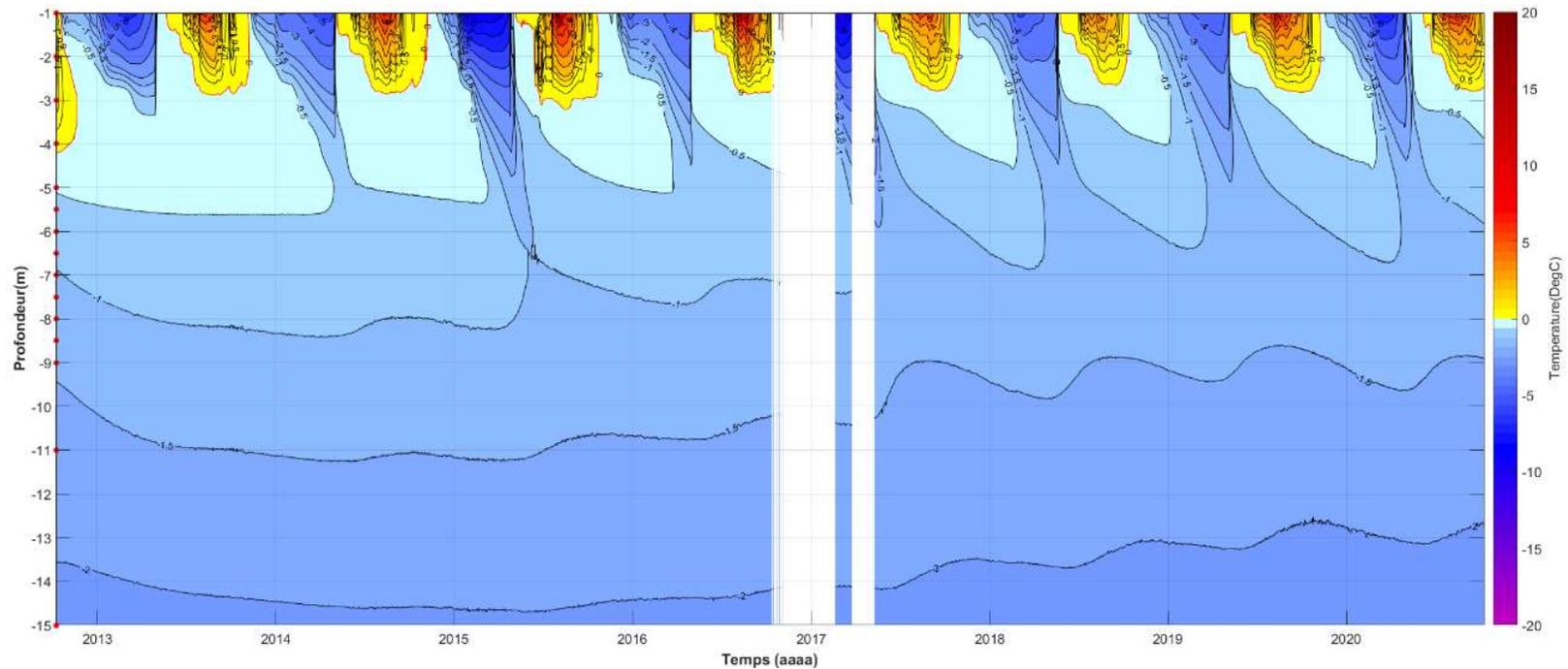
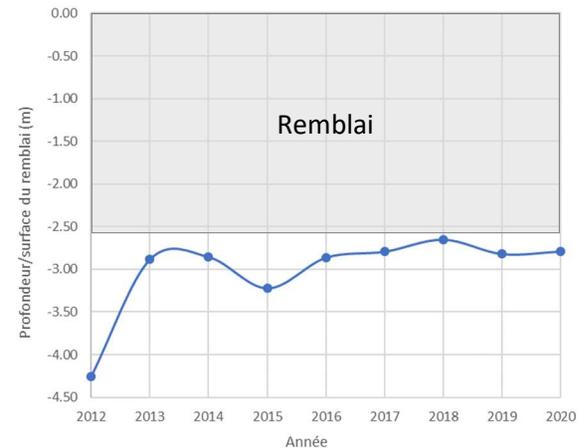


Figure 77 : Variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps sous le remblai à pente douce tronquée (câble à thermistances SAL-F3) pour la période d'octobre 2012 à octobre 2020, piste d'atterrissage de Salluit.

Tableau 18 : Profondeurs maximales atteintes par le front de dégel au cours de la période 2012-2020 sous la pente douce tronquée, câble SAL-F3, piste d'atterrissage de Salluit.

Saison de dégel	Position du front de dégel (m)		Fluctuations interannuelles Δ (m) ↑remontée ↓approfondissement
	Interface sol naturel/remblai	Surface du remblai	
2012	-1.65	-4.25	n.a
2013	-0.28	-2.88	↑1.37
2014	-0.26	-2.86	↑0.03
2015	-0.62	-3.22	↓0.37
2016	-0.26	-2.86	↑0.36
2017	-0.19	-2.79	↑0.07
2018	-0.05	-2.65	↑0.14
2019	-0.22	-2.82	↓0.17
2020	-0.19	-2.79	↑0.03
Remontée totale du front de dégel (2020 versus 2012)			
			↑1.46 m
			↑88.5 %



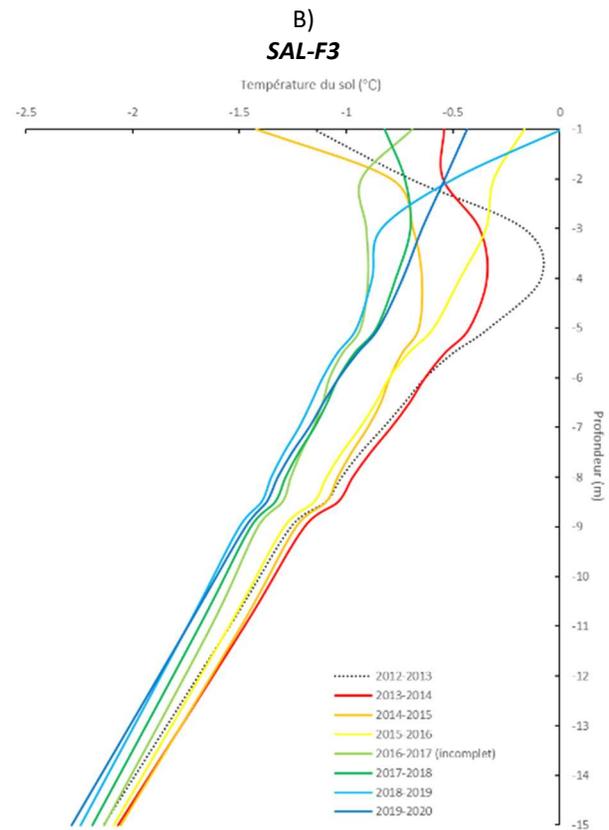
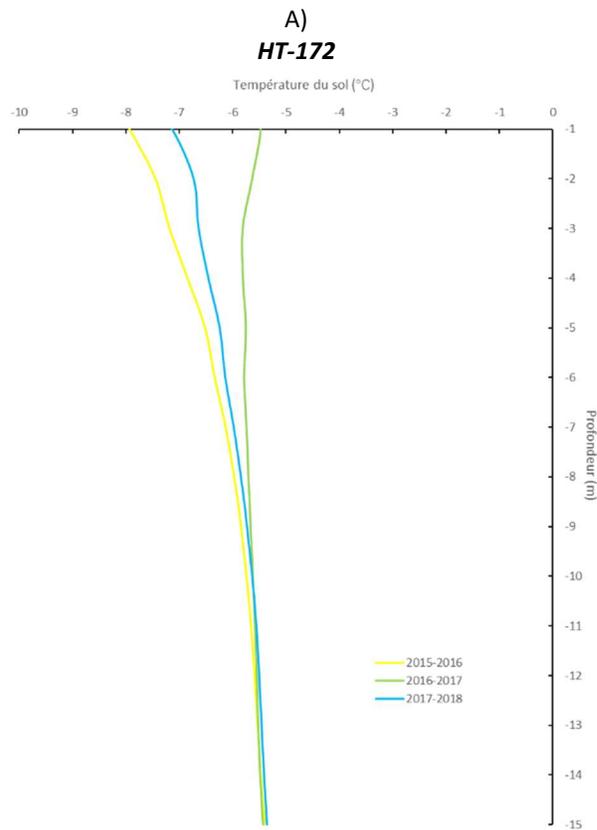
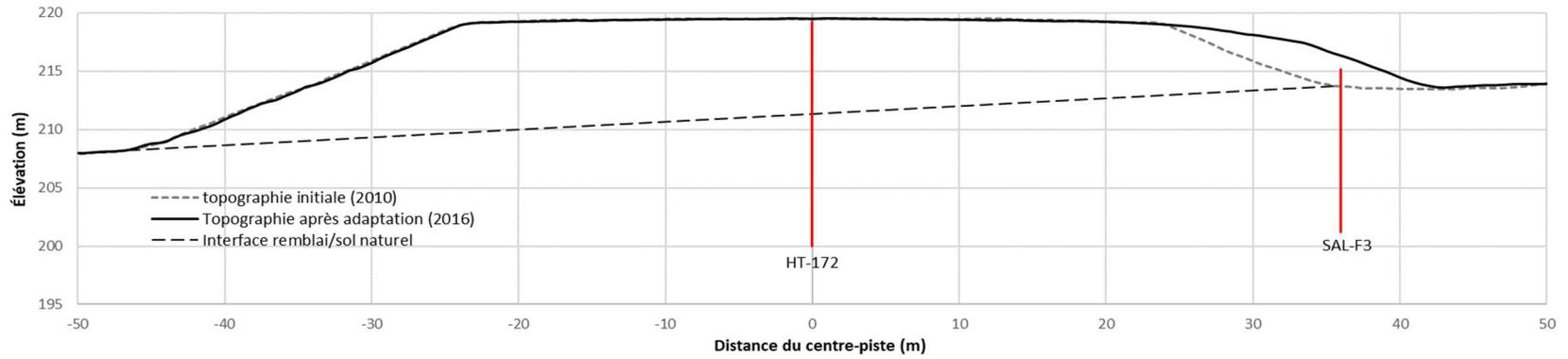


Figure 78 : Profils thermiques annuels moyens mesurés aux câbles A) HT-172 situé au centre-piste et B) SAL-F3 positionné sous le talus de la pente douce tronquée, piste d'atterrissage de Salluit, Nunavik.

1.6.3.5.2 PERFORMANCE MÉCANIQUE

Pour l'ensemble de la piste, aucune dégradation apparente (fissures, dépression ou autres) n'a été observée depuis l'adaptation de l'infrastructure en 2012. Néanmoins, quelques fissures se sont récemment développées de part et d'autre du nouveau fossé de décharge excavé en 2016, plus spécifiquement dans les secteurs en dépôt meuble en amont et en aval de l'affleurement rocheux dynamité.

Le site dispose de quatre plaques de tassement dont trois se retrouvent dans l'accotement de la piste du côté est et une dans l'accotement à l'extrémité de la piste côté ouest (Figure 79A). Pour la période 2005 à 2011, les tassements totaux mesurés à partir de ces plaques sont assez considérables affichant des valeurs comprises entre 10 et 16 cm (Figure 79B). Les tassements annuels les plus importants sont survenus au cours des années 2006 et 2011. Malheureusement, suite au rechargement de la piste en 2012, aucune plaque n'a été retrouvée, interrompant ainsi le suivi quelques années jusqu'à l'installation en 2014 de nouvelles plaques de tassement positionnées sensiblement aux mêmes emplacements. Depuis la réinstallation des nouvelles plaques de tassements, les plus récents relevés couvrant la période 2014-2020 ne sont toujours pas disponibles.

Afin d'offrir un aperçu des déformations de surface pour l'ensemble de la piste, une comparaison des jeux de données LIDAR acquis en 2010 par rapport à ceux de 2016 a été effectuée. Les deux relevés disponibles ont été réalisés respectivement le 5 septembre 2010 et 24 juillet 2016. Le jeu de données de 2016 constitue la surface de référence à partir de laquelle les données de 2010 ont été comparées en utilisant l'algorithme de comparaison de nuage de points M3C2 et le logiciel CloudCompare V2.11.0. Le résultat de cette analyse entre les deux nuages de points a permis d'obtenir une carte de déplacements différentiels de la surface survenus entre 2010 et 2016 (Figure 79A). Il est toutefois à noter qu'en raison de l'imprécision des différents jeux de données LIDAR inhérente aux erreurs de positionnement (planimétrique ± 25 cm et altimétrique ± 15 cm), ces résultats doivent être interprétés avec prudence. Néanmoins, il est possible d'observer un certain patron de déformations cohérent avec les mesures de tassements mesurées aux plaques de tassements. En raison de la période d'acquisition antérieure à la mise en place des méthodes d'adaptation pour le jeu de données de 2010, il est impossible de documenter spécifiquement la stabilité mécanique de l'ouvrage pour la période post adaptation (période 2012-2016). Par exemple, ayant fait l'objet d'un resurfaçage en 2012, certaines dépressions ont été comblées et apparaissent donc comme des zones de soulèvements. Ce fut le cas pour les dépressions aux emplacements des plaques de tassement P-1 et P-3. Des tassements de l'ordre de 5 à 20 cm se sont développés au cours de la période 2010-2016 sur une bonne section de la piste comprise entre le chaînage 2+360 et 3+000 m. Sans une validation appropriée auprès du MTQ, il est toutefois difficile de conclure si une partie de ces tassements découle du resurfaçage (égalisation de la surface) ou sont bel et bien des tassements qui n'ont tout simplement pas été comblés en 2012. Un relevé LIDAR plus récent permettrait d'évaluer plus spécifiquement la stabilité des pentes douces et des accotements pour la période de 2016 à aujourd'hui.

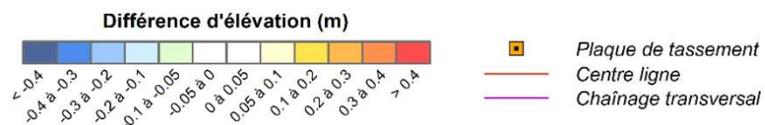
Malgré les défis que représentent l'interprétation des données LIDAR pour l'évaluation de la stabilité mécanique post-adaptation de la piste d'atterrissage de Salluit, deux secteurs de tassements importants sont apparus en marge des nouvelles sections adaptées de la piste. C'est le cas pour un petit secteur situé au pied de la pente douce tronquée entre le chaînage 1+960 m et 2+000 m (Figure 79A), pour lequel, les accumulations de neige importantes toujours en vigueur et la formation récurrente de mares au printemps semblent vraisemblablement à l'origine des tassements mesurés. À une certaine distance du pied de remblai à l'est de la piste, entre les chaînages 2+660 et 2+760 m, la réalisation d'un fossé de drainage au travers d'un dépôt très riche en glace semble avoir fortement perturbé le secteur et provoqué des tassements importants. Même si les dégradations observées dans ce secteur ne présentent aucun risque pour l'infrastructure, ces dernières permettent d'illustrer à quel point le pergélisol au site de l'aéroport est sensible au dégel et susceptible d'entraîner des tassements relativement importants en l'espace de quelques années seulement.

Suivi des déformations, Aéroport de Salluit

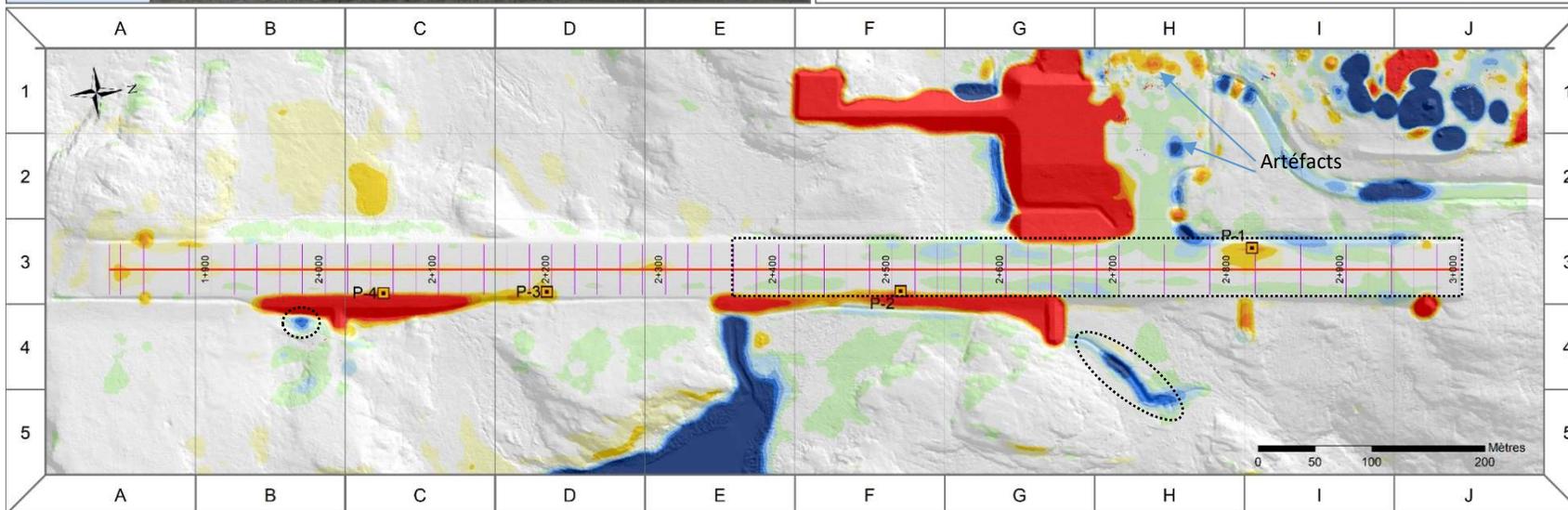


A)

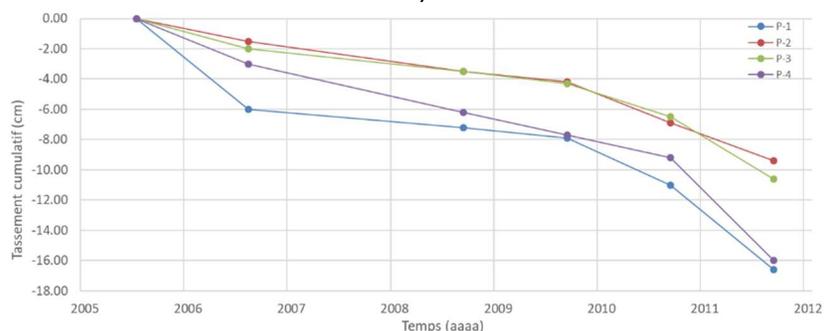
Légende



Cartographie: E. L'Héroult, 2021
Fond de carte: Relief ombragé, couverture LIDAR 2016



B)



C)

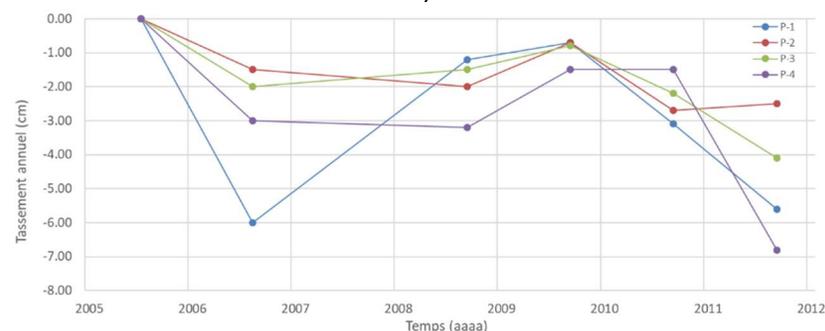


Figure 79 : A) Différence d'élévation entre le nuage de point des données LIDAR de 2010 par rapport à celui de 2016. Les teintes de bleu à vert correspondent à un tassement, les teintes de jaune à rouge correspondent à un soulèvement et le gris indique un mouvement non significatif (± 0.05 m). Les secteurs délimités par un trait tireté noir sont identifiés comme des zones présentant des tassements considérables. Tassements cumulatifs (B) et annuels (C) mesurés aux plaques de tassements installées dans les accotements.

1.6.3.5.3 EFFICACITÉ DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATIONS À LIMITER L'INFLUENCE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX DANS LA DÉGRADATION THERMIQUE DU PERGÉLISOL

1.6.3.5.3.1 Conditions d'enneigement et de drainage

Entre les chaînages 2+340 à 2+640 m, l'aménagement d'une pente douce semble avoir contribué à limiter les accumulations de neige du côté est de la piste. Toutefois, il est important de mentionner qu'en raison de l'épaisseur relativement faible du remblai du côté est de la piste dans le secteur (environ 2 m), les épaisseurs de neige qui s'accumulaient en pied de remblai étaient généralement faibles, soient en moyenne autour de 60 cm pour la période 2006-2012 (relevés du BCNQ). Néanmoins, d'après ces mêmes relevés, l'accumulation de neige en marge du talus semble avoir nettement diminué dans le secteur suite à la mise en place de la pente douce avec des accumulations moyennes désormais autour de 30 cm (période 2014 à 2020). Cette faible accumulation a été confirmée lors d'une visite à la fin de l'hiver 2019 (Figure 80A). Pour ce même secteur, les conditions de drainage se sont grandement améliorées. Par exemple, les dépressions qui étaient présentes en pied de remblai dans le secteur (E4, E6 et E7) avant l'intervention ont toutes été comblées et recouvertes par la pente douce. L'abaissement du niveau du lac a, quant à lui, permis de drainer la section de ce dernier qui était en contact avec la piste (E14). L'ajout d'un fossé de drainage au pied de la pente douce permet également de drainer l'eau vers le lac, toutefois, depuis 2012, une certaine quantité d'eau demeure dans le fossé. Il s'agit ici d'une situation qui n'est pas inquiétante et qui pourrait facilement être rectifiée par un simple reprofilage du fossé.

Pour ce qui est du secteur du remblai à pente douce tronquée (chaînage 1+920 à 2+140 m), d'importantes accumulations de neige se retrouvent toujours piégées dans la dépression encore présente (Figure 80B). Il s'agit en effet d'un secteur où la neige soufflée par le vent s'accumule rapidement au début de l'hiver. C'est au cours de la mi-décembre à la mi-janvier que l'épaisseur maximale de la neige est généralement atteinte. D'après le suivi photographique assuré dans le secteur par la caméra automatisée SalCam-7 (Figure 81) et en fonction de l'épaisseur du remblai et la topographie locale, l'épaisseur du couvert de neige maximale est estimée entre 2 et 3 m environ. Des relevés de neige effectués dans le secteur par le personnel du MTQ (N2 et N12) indiquent que les accumulations de neige, depuis le début du suivi en 2006, demeurent sensiblement les mêmes malgré la mise en place de la pente douce tronquée en 2012 avec des valeurs moyennes autour de 1.2 m pour la période 2006-2020. En raison du manque de précision de la localisation de ces relevés, il est toutefois difficile de déterminer si ces derniers sont effectués en pied de remblai ou à mi-talus. Il n'en demeure pas moins que les épaisseurs de neige dans ce secteur sont suffisantes pour expliquer que malgré une remontée du pergélisol de quelques mètres suite à la mise en place du remblai la pente douce tronquée et un refroidissement des profils thermiques moyens du sol depuis 2012, le régime thermique demeure en déséquilibre avec un gradient thermique inverse (température plus chaude en surface qu'en profondeur). En ce qui concerne les conditions de drainage, le suivi photographique permet de confirmer que les deux ponceaux assurent un drainage de l'eau efficace de l'autre côté de la piste en période de dégel et tout au long de l'été (Figure 81). La situation est tout autre du côté sud du chemin d'accès à l'anémomètre ou le ponceau qui traverse ce dernier est sujet à l'obstruction par la glace, ce qui crée des accumulations d'eau importantes au printemps (Figure 82).

Pour le talus intérieur gauche existant de la piste (chaînage 2+570 à 2+700 m), le talus intérieur gauche de la voie de circulation (chaînage 5+023 à 5+093 m) et le talus adjacent à l'agrandissement de l'aire de trafic et de son agrandissement, l'adoucissement des pentes limite considérablement la quantité de neige pouvant s'accumuler dans le secteur. Toutefois, du côté de l'agrandissement de l'aire du trafic, la neige déblayée est poussée dans le nouveau fossé de drainage et forme ainsi un gros monticule de neige (Figure 83C). Vis-à-vis, la petite section du remblai de la piste dont la pente n'a pas été adoucie, l'épaisseur de neige y est considérable. À la fonte des neiges, qui débute généralement au début mai et dure environ jusqu'à la fin juin, un lac se forme et persiste quelques jours avant de se drainer par le fossé de drainage (Figure 83H à L). Par exemple, au printemps 2020, la mare a commencé à se former un mois après le début de la fonte des neiges (début juin) pour atteindre son apogée vers

la fin juin. En l'espace d'une à deux journées, cette mare s'est rapidement drainée par le fossé une fois le bouchon de glace désagrégi. Même si cette situation s'avère non souhaitable, cette dernière ne semble pas affecter le régime thermique du pergélisol selon les lectures des câbles situés à proximité (HT-155 et HT-172). En aval du fossé de décharge, entre les chaînages 2+300 et 2+400 m, de nombreuses fissures ont été observées par le MTQ à partir de 2018 (Figure 84). Ces fissures localisées de part et d'autre du fossé de décharge se sont développées fort probablement en réponse à une dégradation localisée du pergélisol provoquée par un réajustement thermique lors de l'excavation complète de la couche active et d'une partie du plafond du pergélisol riche en glace nécessaire à la réalisation du fossé de décharge. Ce réajustement peut durer quelques années au cours desquelles des tassements et des fissures sont susceptibles de continuer à se développer, mais devraient ultimement se stabiliser. La distance de ces fissures par rapport au pied de remblai est actuellement d'une vingtaine de mètres, distance jugée suffisante pour ne pas affecter la stabilité du remblai. Toutefois, cette situation mérite d'être surveillée.

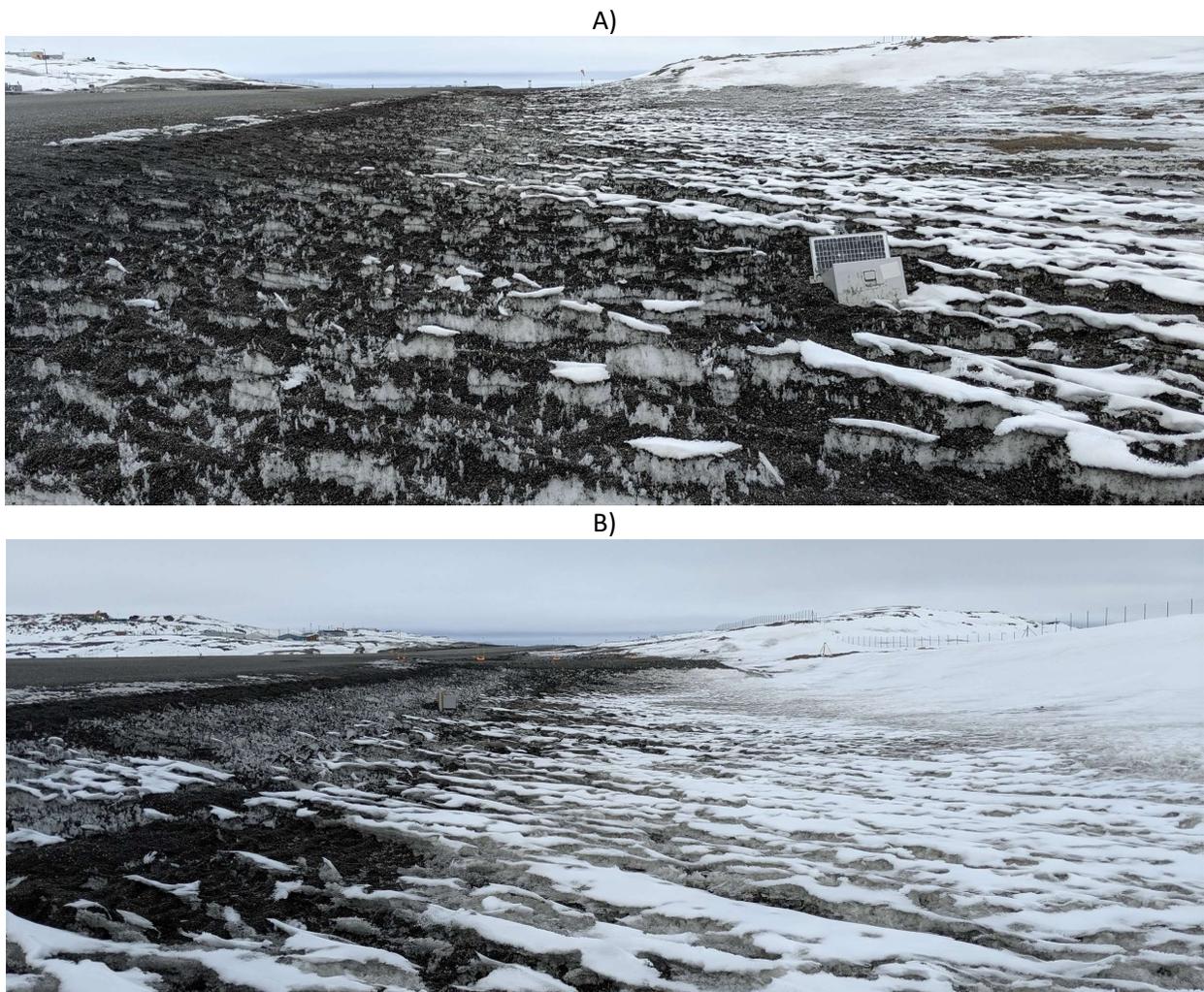


Figure 80 : A) Faibles accumulations de neige observées lors d'une visite à la fin de l'hiver 2019 à l'emplacement des pentes douces mises en place entre les chaînages 2+340 à 2+640 m. B) Importantes accumulations de neige toujours présentes dans le creux topographique en marge de la section de la pente douce tronquée entre les chaînages 1+920 à 2+140 m, piste d'atterrissage de Salluit.

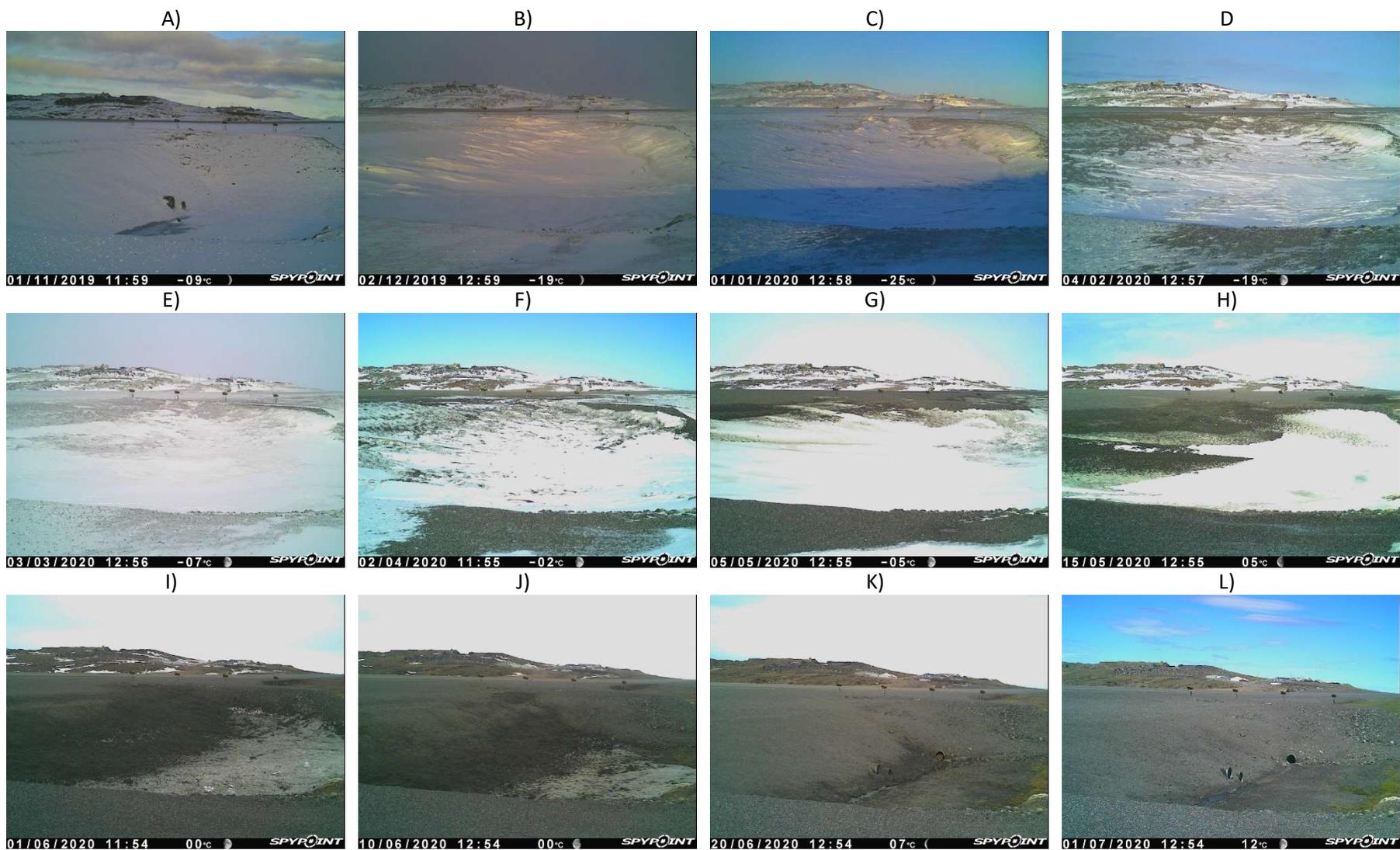


Figure 81 : Évolution des conditions d'enneigement entre les mois de novembre 2019 à avril 2020 (images A à G) et de drainage entre les mois de mai et juillet 2020 (images H à L), caméra SalCam-7, piste d'atterrissage de Salluit.



Figure 82 : Accumulation d'eau à la fin de la période de dégel (16 juin, 2015) pour la section de la pente douce tronquée située au sud du chemin d'accès à l'anémomètre, chaînage 1+940 à 2+000 m, piste d'atterrissage de Salluit.

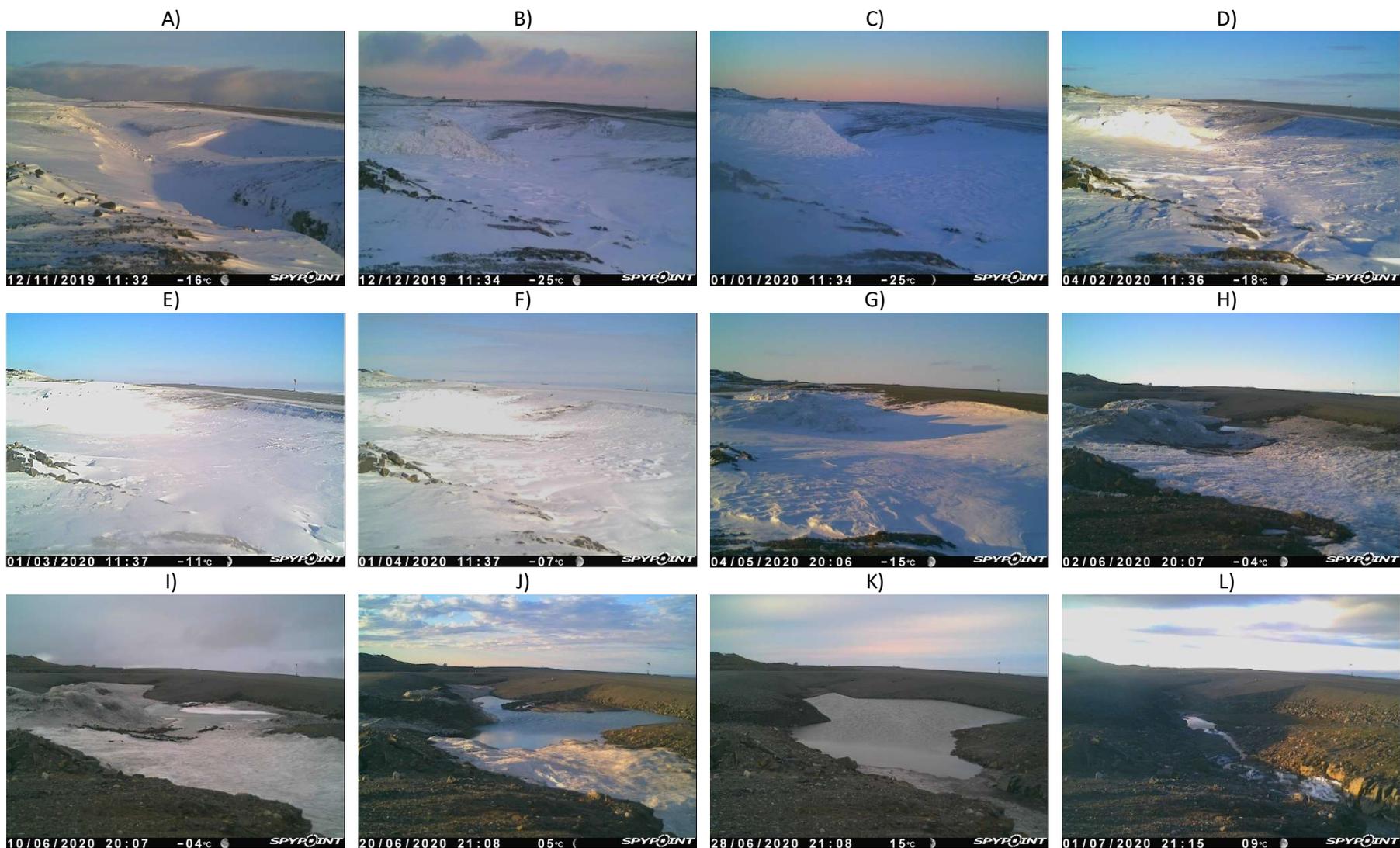


Figure 83 : Évolution des conditions d'enneigement entre les mois de novembre 2019 à avril 2020 (images A à G) et de drainage entre les mois de mai et juillet 2020 (images H à L), caméra SalCam-6, piste d'atterrissage de Salluit.



Figure 84 : Nombreuses fissures observées dans la section aval du fossé de décharge côté piste entre les chaînages 2+300 et 2+400 m (Source : MTQ, 2019).

1.6.3.6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Performance thermique

Le climat relativement stable des 10 dernières années, affichant même une légère tendance au refroidissement, a certainement contribué à la stabilité thermique générale de l'infrastructure. Tel que mentionné précédemment, l'absence de câbles à thermistances automatisés dans le secteur des pentes douces rend impossible l'évaluation de la performance thermique. Il en va de même pour les pentes douces mises en place le long du talus intérieur gauche existant de la piste, de la voie de circulation et celui adjacent à l'aire de trafic et de son agrandissement. Malgré l'absence de suivi thermique spécifique à ces sections adaptées, l'absence de signes de dégradation suggère une performance thermique adéquate. Entre les chaînages 2+340 et 2+640 m, le recouvrement des dépressions remplies d'eau par la pente douce, l'ajout d'un fossé de drainage peu profond et l'abaissement du niveau du lac ont certainement été bénéfiques permettant désormais un drainage adéquat de l'eau en marge de l'infrastructure tout en minimisant les accumulations de neige en pied de remblai. Pour ce qui est de la performance thermique de la pente douce tronquée positionnée entre les chaînages 1+920 à 2+140 m, les données du câble à thermistances (SAL-F3) permet d'évaluer la réponse thermique du pergélisol suite à la mise en place de cette dernière à l'été 2012. Dès la première année suivant la mise en place du remblai à pente douce tronquée, la position du plafond du pergélisol a remonté considérablement (1.37 m en 2013) pour ensuite demeurer relativement stable. Actuellement, la position du plafond du pergélisol semble s'être stabilisée à quelques décimètres sous la base du nouveau remblai. Parallèlement à cette remontée du plafond du pergélisol, la température de ce dernier s'est également refroidie tout le long du profil thermique qui s'étend jusqu'à 15 m de profondeur. Ce refroidissement généralisé et graduel sur l'ensemble du régime thermique est estimé à environ 0.5°C à 3 m (\approx interface base du remblai/sol naturel) et 0.15°C à 15 m de profondeur sous la surface actuelle du remblai. Il s'agit ici d'un refroidissement assez limité, qui résulte davantage du simple ajout d'environ 2.6 m de gravier sur l'accotement initial que d'une diminution des épaisseurs de neige permettant une extraction plus efficace de la chaleur en hiver. Cette hypothèse est confirmée par les importantes épaisseurs de neige qui s'accumulent toujours sur le talus de la pente douce tronquée. Ces accumulations de neige toujours présentes

contribuent, malgré un léger refroidissement généralisé du profil thermique depuis 2021, au maintien d'un gradient thermique inverse caractérisé par des températures du pergélisol plus chaudes dans les premiers mètres qu'en profondeur. Même si la remontée du plafond du pergélisol sous le remblai et le léger refroidissement généralisé du profil du sol sont encourageants et démontrent une certaine efficacité de la pente douce tronquée, le régime thermique du pergélisol sous la pente douce tronquée demeure nettement plus chaud que celui qui prévaut en milieu naturel et sous le centre de la piste. Néanmoins, le régime thermique assez froid qui caractérise le centre de la piste constitue un avantage indéniable qui limite l'influence des conditions marginales plus chaude sur le régime thermique plus en profondeur qui prévaut sous les accotements et les pieds de remblai dans le secteur de la pente douce tronquée. La remontée significative du plafond du pergélisol qui se situe désormais à l'interface entre la base du remblai et le terrain naturel représente, à elle seule, un gain considérable qui aura pour effet de limiter la dégradation du pergélisol riche en glace présent sous l'actuel talus de remblai.

Performance mécanique

Pour l'ensemble de la piste, aucune dégradation apparente (fissures, dépression ou autres) n'a été observée depuis l'adaptation de l'infrastructure en 2012. Néanmoins, quelques fissures se sont récemment développées de part et d'autre du nouveau fossé de décharge excavé en 2016, plus spécifiquement dans les secteurs en dépôt meuble en amont et en aval de l'affleurement rocheux dynamité. Le site dispose au total de quatre plaques de tassement dont trois se retrouvent dans l'accotement de la piste du côté est et une dans l'accotement à l'extrémité de la piste côté ouest. Malheureusement, les plus récents relevés pour la période 2014-2020, soit après la mise en place des pentes douces, ne sont toujours pas disponibles, ce qui limite l'évaluation de la stabilité mécanique des accotements post adaptation de l'infrastructure. L'analyse des données jeux de données LIDAR de 2010 et 2016 permet d'observer un certain patron de déformations cohérent. Malheureusement en raison de la période d'acquisition antérieure à la mise en place des méthodes d'adaptation pour le jeu de données de 2010, il est toutefois difficile de conclure si une partie de ces tassements découle du resurfaçage (égalisation de la surface) ou qui n'ont tout simplement pas été comblés en 2012. La poursuite des relevés aux plaques de tassements et la réalisation de relevés LIDAR plus récents permettraient d'évaluer plus spécifiquement la stabilité des pentes douces et des accotements le long de la piste d'atterrissage pour la période de 2016 à aujourd'hui. Malgré les défis que représente l'interprétation des données LIDAR pour l'évaluation de la stabilité mécanique post-adaptation de la piste d'atterrissage de Salluit, deux secteurs de tassements importants sont apparus en marge des nouvelles sections adaptées de la piste. Même si ces dégradations observées dans ce secteur ne présentent aucun risque pour l'infrastructure, ces dernières confirment la sensibilité au dégel du pergélisol qui se traduirait par des tassements relativement importants.

Sommairement, la température du pergélisol sous la pente douce tronquée, selon les abaques de déformations par fluage secondaire d'un sol grossier riche en glace proposés par Verreault (2015) et Durand-Jézéquel (2016), demeure dans une zone où le taux de fluage est relativement faible. Toutefois, à noter que le taux de déformation s'accroît exponentiellement lorsque la contrainte augmente et la température s'approche de 0 °C (Verreault, 2015). Considérant une contrainte constante comprise entre 60-80 kPa sous les talus selon l'épaisseur du remblai en vigueur, les taux de déformation devraient rester relativement faibles (inférieur à 2% par année) dans la plage actuelle de températures. Advenant toutefois un réchauffement des températures sous les accotements et le centre-piste en réponse à un réchauffement du climat, les taux de fluage pourraient augmenter considérablement d'autant plus que le remblai peut atteindre plus de 10 m (200 kPa) par endroit. Par exemple, le fluage pourrait expliquer l'origine des légères déformations détectées par l'analyse des données LIDAR sur le talus côté ouest (léger affaissement) et en pied de remblai (léger soulèvement) dans la section épaisse du remblai entre les chaînages 1+920 et 2+100 m (Figure 79A). Il s'agit ici d'une préoccupation qui demeure d'actualité et qui devra faire l'objet d'un suivi, particulièrement dans le contexte des changements climatiques anticipés.

Performance du réseau de drainage

L'abaissement du niveau du lac et l'ajout d'un nouveau fossé de drainage entre les chaînages 2+380 m et 2+580 m ont permis de significativement d'améliorer les conditions de drainages de ce côté de la piste. Rappelons qu'avant la mise en place de la pente douce, quelques grandes mares d'eau étaient présentes en pied de remblai dans le secteur (L'Hérault *et al.*, 2012). Aucune nouvelle mare ne s'est formée au pied de la pente douce dans le secteur ce qui témoigne de l'efficacité de la technique mise en place afin de limiter le risque potentiel de dégradation thermique du pergélisol par l'apport de chaleur latente. Les observations du personnel du MTQ indiquent toutefois qu'une certaine quantité d'eau, somme toute très minime, demeure dans le fossé au pied de la pente douce. Il pourrait s'avérer nécessaire, d'ici quelques années, de reprofiler le fossé afin d'en améliorer l'écoulement.

Pour ce qui est du secteur du remblai à pente douce tronquée, les deux ponceaux assurent un drainage de l'eau efficace de l'autre côté de la piste en période de dégel et tout au long de l'été. La situation est tout autre du côté sud du chemin d'accès à l'anémomètre ou le ponceau qui traverse ce dernier est sujet à l'obstruction par la glace et favorise la formation d'une importante accumulation d'eau au printemps. Cette accumulation d'eau n'apparaît pas problématique pour la stabilité de l'infrastructure, mais un simple déglacage systématique du ponceau au printemps permettrait de rectifier cette situation. Ce déglacage systématique pourrait se faire à l'aide d'un câble chauffant installé en permanence dans le ponceau.

Pour le talus intérieur gauche existant de la piste (chaînage 2+570 à 2+700 m), le talus intérieur gauche de la voie de circulation (chaînage 5+023 à 5+093 m) et le talus adjacent à l'agrandissement de l'aire de trafic et de son agrandissement, l'adoucissement des pentes limite la quantité de neige pouvant s'accumuler dans le secteur. Néanmoins, de bonnes quantités de neige s'y accumulent toujours naturellement et sont bonifiées par les opérations de déneigement de l'aire de trafic. Au printemps, la fonte de cette neige et l'obstruction temporaire du fossé de décharge par la glace contribuent à la formation d'une importante mare d'eau qui persiste quelques semaines (environ 4-5 semaines) pour ensuite se drainer rapidement en quelques jours une fois le barrage de glace désagrégé. Même si la situation n'apparaît pas préoccupante pour l'intégrité de l'infrastructure, il pourrait être bénéfique de prolonger la pente douce du côté ouest de la piste d'une centaine de mètres vers le sud, soit du chaînage 2+620 m au chaînage 2+720 m. Ceci permettrait de limiter, d'une part, le volume de neige qui s'accumule naturellement dans ce creux topographique et d'autre part, de réduire la superficie de la mare d'eau qui se forme annuellement à la fonte des neiges. En ce qui concerne les accumulations d'eau qui persistent dans le fond du nouveau fossé de décharge durant l'été, il est recommandé de simplement reprofiler le fossé de manière à rétablir l'écoulement de l'eau. Pour les quelques fissures localisées de part et d'autre du fossé de décharge qui se sont développées depuis 2018, ces dernières découlent vraisemblablement de tassements au dégel engendrés par l'excavation complète de la couche active et d'une partie du plafond du pergélisol riche en glace lors de la réalisation du fossé. Ces tassements devraient ultimement se stabiliser. La distance de ces fissures par rapport au pied de remblai est actuellement d'environ 20 m, distance jugée suffisante pour ne pas affecter la stabilité du remblai, mais l'évolution de ces dernières mérite d'être surveillée.

1.6.4 LA PISTE D'ATTERRISSAGE DE TASIUAQ

1.6.4.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

L'aéroport de Tasiujaq est situé dans la zone de pergélisol continu chaud (température > 2°C) et repose à une altitude d'une trentaine de mètres sur une terrasse fluviatile qui borde la rive ouest de la rivière Bérard. Achevé en 1990, 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. La piste de Tasiujaq 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 (L'Hérault *et al.*, 2012). La surface de cette terrasse est recouverte par endroits d'un placage de dépôts fluviatiles et d'alluvions anciens (Allard *et al.*, 2007). D'après L'Hérault *et al.* (2012), la stratigraphie au site est relativement uniforme sous l'ensemble de l'infrastructure et consiste en : une couche superficielle de sédiments fluviatiles d'une épaisseur inégale comprise entre 1 et 2 m, une couche de sédiments intertidaux sensible au dégel d'une épaisseur variant entre 1 à 6 m, une couche de sable et gravier très pauvre en glace sous-jacente à un dépôt de silt argileux glaciomarin qui repose à une profondeur qui varie entre 10 à 13 m sous la surface, soit pratiquement au niveau du lit actuel de la rivière Bérard et dont l'épaisseur peut atteindre plus de 7 m.

La piste d'atterrissage de Tasiujaq présente plusieurs tassements différentiels répartis sur toute sa longueur, mais ces derniers prennent place préférentiellement dans l'accotement côté est (Beaulac et Doré, 2006), fait confirmé par les relevés effectués par le personnel du MTQ. 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 (Allard *et al.*, 2007) (Figure 85A et B). Les signes de dégradations localisés en marge de l'infrastructure confirment que le pergélisol sous les accotements est fortement dégradé. En raison de l'orientation de la piste par rapport aux vents dominants, cette dégradation accélérée du pergélisol découle principalement des importantes accumulations de neige en pied de remblai. En été, cette dégradation est d'autant plus exacerbée par l'accumulation d'eau en pied de remblai causée par le mauvais drainage des secteurs nouvellement déprimés à la suite du tassement du pergélisol dégelé (L'Hérault *et al.*, 2012) (Figure 85C). 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 dégel.

En 2007, un rechargement granulaire de la piste d'atterrissage a été effectué. Au cours de ces travaux, les dépressions recensées par Allard *et al.*, (2007) et lors des relevés effectués par le personnel du MTQ ont été corrigées. Les pentes ont également été adoucies afin de respecter les exigences de Transports Canada. Malgré ces travaux de conservation, certaines dégradations 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 (L'Hérault *et al.*, 2012). À ces endroits, les sédiments intertidaux sensibles au dégel sont presque complètement dégelés, ce qui supporte l'envergure des tassements survenus à certains endroits. En 2010, une dépression transversale a été observée et elle est probablement associée à un écoulement transversal au remblai de la piste d'est en ouest. Cette dépression était toujours visible lors des travaux de terrain réalisés par l'université Laval à l'automne 2018 (Figure 85D). Un relevé topographique de la surface de la piste réalisé par l'entrepreneur juste avant le début des travaux d'adaptation a permis de préciser l'ampleur des dégradations, dont cette dépression, dans le secteur (Figure 85E). D'après L'Hérault *et al.* (2012), de telles infiltrations porteuses de chaleur sont susceptibles de se reproduire ailleurs à mesure que les mares d'eau en marge de la piste s'agrandiront et submergeront la base du remblai et représentent, à court terme, le principal danger qui menace la piste.

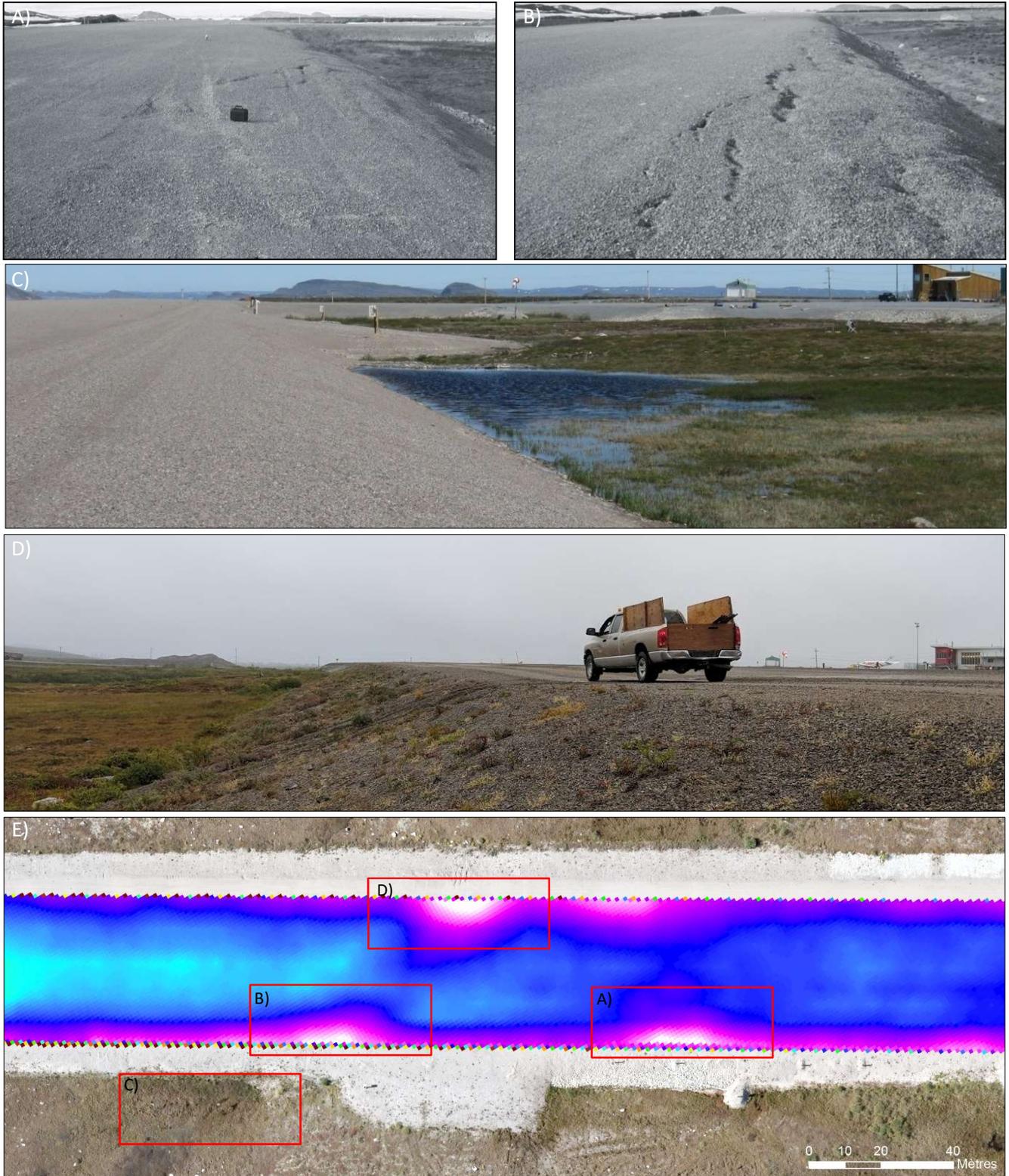


Figure 85 : A) et B) Importantes dépressions avec fissures longitudinales telles qu’observées en 2004 sur le côté est de la piste d’atterrissage de Tasiujaq entre les chaînages 5+100 et 5+140 m (Tirée de Allard et al., 2007). C) Accumulation d’eau au pied du remblai côté est au mois de juillet 2009 (Tirée de L’Hérault *et al.*, 2012). D) Dépression majeure sur le côté ouest observée à l’automne 2018 durant les travaux d’adaptations. E) Levé topographique réalisé à l’été 2018 par l’entrepreneur responsable des travaux d’adaptation et montrant les principales dépressions (teintes blanchâtres à violacées sur la figure) toujours présentes entre les chaînages 5+060 m et 5+300 m.

1.6.4.2 STRATÉGIE D'ADAPTATION MISE EN PLACE

Contrairement aux autres sites d'infrastructures aéroportuaires du Nunavik pour lesquelles des stratégies d'adaptation ont été mises en place par le MTQ, la piste d'atterrissage de Tasiujaq avait l'avantage d'avoir fait l'objet d'une vérification de la performance de trois techniques de protection du pergélisol en conditions réelles d'utilisation et d'une évaluation de la faisabilité de leur mise en place (Ficheur et Doré, 2011). Les trois techniques d'adaptation ainsi testées, sous forme de planche d'essais d'une cinquantaine de mètres de longueur chacune, étaient : l'adoucissement de la pente des talus (pente douce), le remblai à convection d'air et le remblai à drain thermique (Figure 86A). D'après les résultats obtenus des planches d'essais des techniques d'adaptation expérimentales, la technique de la pente douce s'est avérée particulièrement efficace dans le contexte de Tasiujaq (Ficheur et Doré, 2011). Outre sa performance thermique, c'est également cette technique qui présentait le plus d'avantages logistiques en raison de sa simplicité de mise en place et la disponibilité sur place des matériaux nécessaires à sa réalisation.

Pour ces raisons, la stratégie d'adaptation proposée en 2012 consistait à adoucir la pente du talus tout autour de la piste (1V:6H ou 1V:7H) (Figure 87A) afin de freiner la dégradation des accotements et éviter tout écoulement d'eau transversal éventuellement dans le remblai en favorisant une remontée du pergélisol sous les talus (Figure 87B). À noter que la stratégie d'adaptation finale mise en place à l'automne 2018 diffère légèrement de celle initialement proposée par L'Hérault *et al.* (2012). L'adoucissement des pentes des talus du remblai a été réalisé non pas sur la totalité du pourtour de la piste, mais sur un peu plus de la moitié, soit tout le côté est (côté aérogare) et une section du côté ouest comprise entre l'extrémité sud de la piste et l'ancien méandre (Figure 87C). Un exemple de résultat final de la modification de la pente des talus pour une section de la piste est présenté à la figure 87E. En plus des pentes adoucies du remblai, un fossé de drainage parallèle à la piste a été réalisé au pied du nouveau remblai, entre les chaînages 5+140 m et 5+240 m, afin de mieux drainer le secteur en le détournant vers l'est.

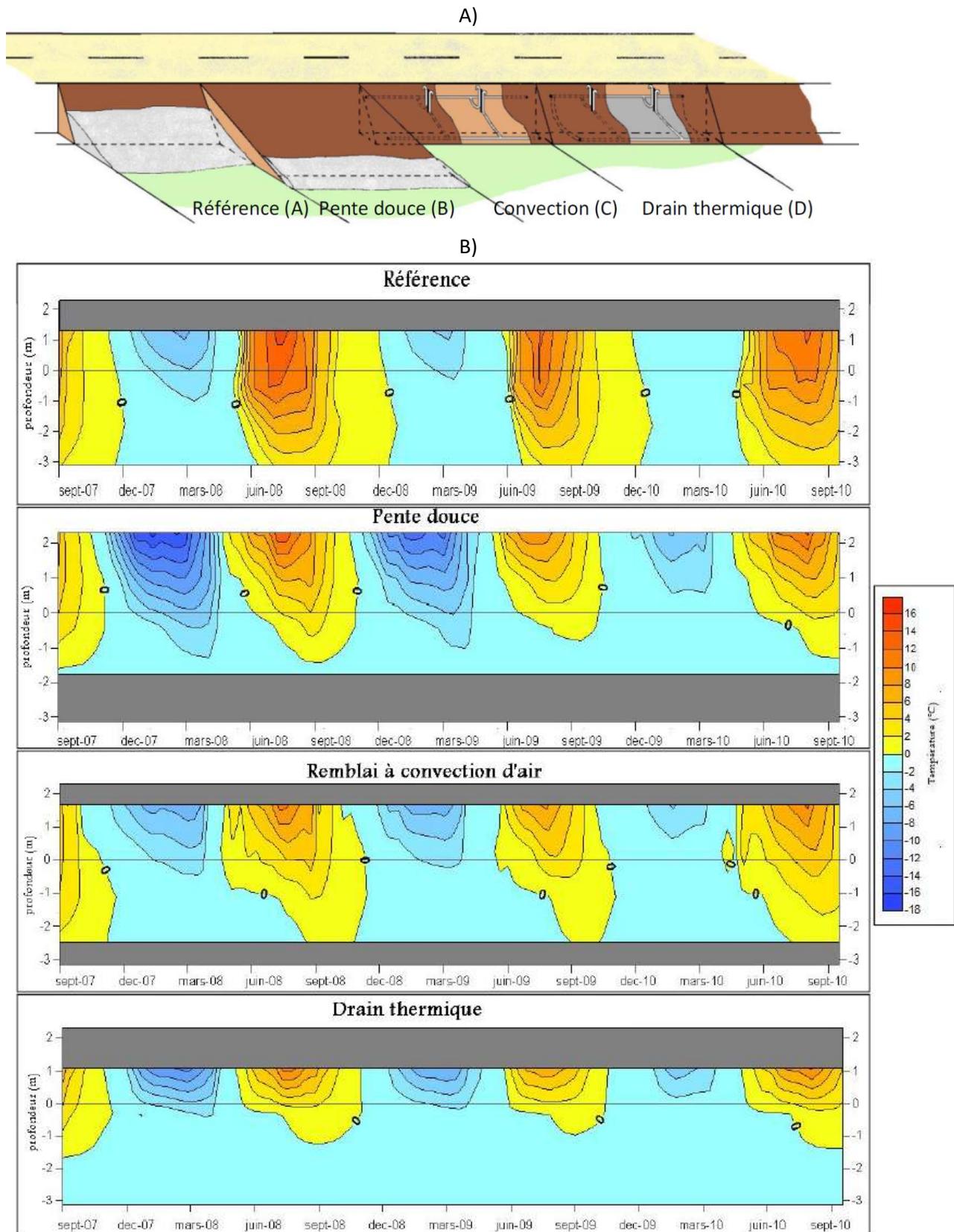


Figure 86 : A) Schéma des quatre sections des planches d'essai de Tasiujaq et B) leurs régimes thermiques mesurés en fonction de la profondeur et du temps (Tirée de Ficheur et Doré, 2011).

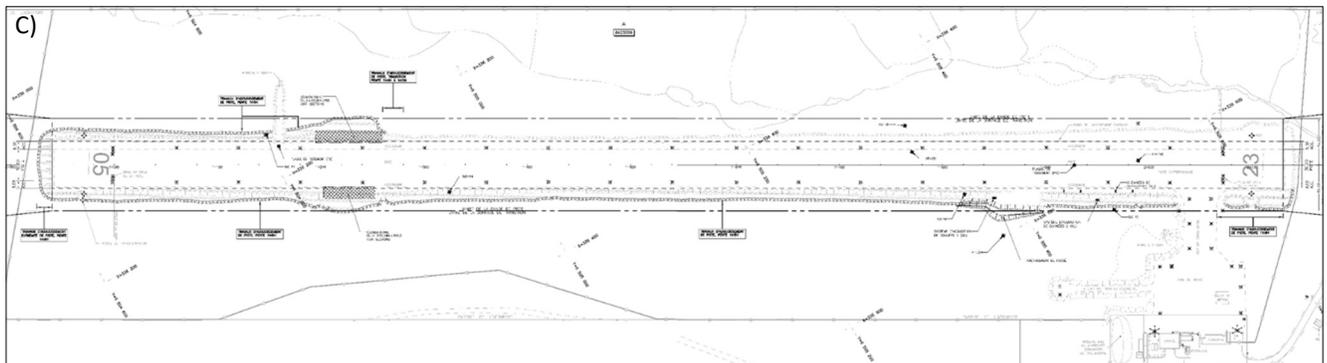
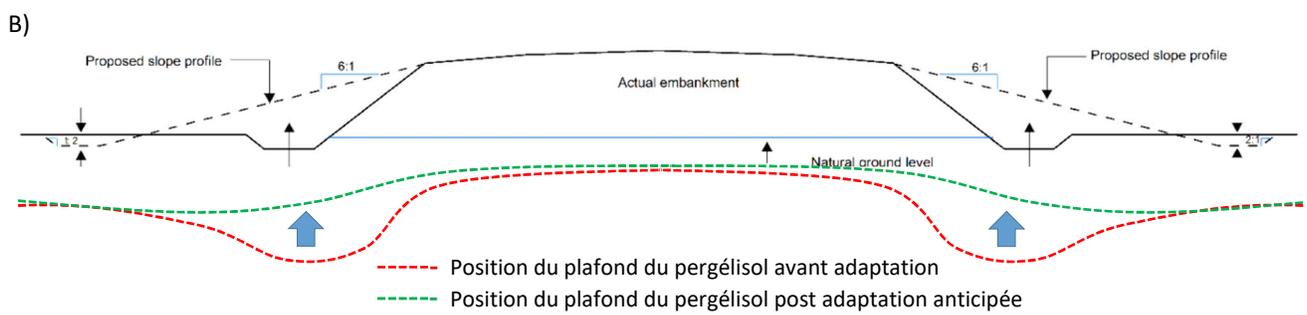
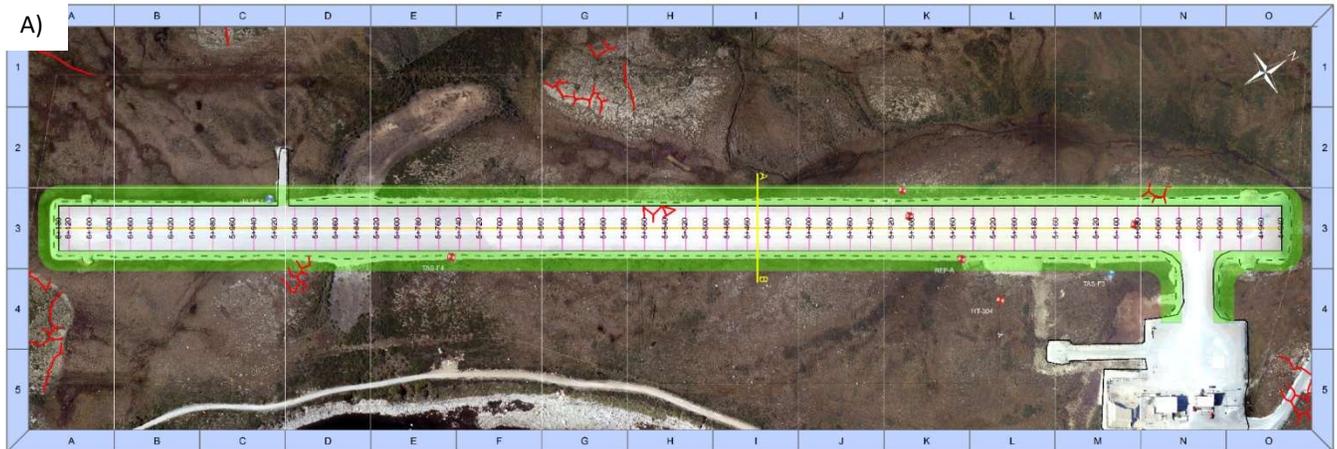


Figure 87 : A) Stratégie d'adaptation proposée qui consiste à adoucir les pentes sur l'entièreté de l'infrastructure (zone verte) (modifiée de L'Hérault et al., 2012). B) Position du front de dégel avant la mise en place de la stratégie d'adaptation et celle anticipée en réponse à l'adoucissement des talus. C) Stratégie d'adaptation finale mise en place à l'été et l'automne 2018. À noter que l'adoucissement des talus a été réalisé sur un peu plus de la moitié de la périphérie de la piste, soit tout le côté est (côté aérogare) et une section du côté ouest comprise entre l'extrémité sud de la piste et l'ancien méandre. Photo de la pente du talus de la piste D) avant et E) après son adoucissement.

1.6.4.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts de la stratégie d'adaptation mise en place le long de la piste d'atterrissage de Tasiujaq sont présentés au [tableau 19](#). À l'intérieur de ce tableau, les coûts tirés du bordereau de paiements associé au devis no. 7204-17-0902 pour les travaux exécutés en 2018 ont été regroupés selon les différentes mesures d'adaptation mises en place. D'après cette compilation, les coûts des travaux d'adaptation portant spécifiquement sur l'adoucissement des pentes, la révision du drainage et l'imperméabilisation d'une section du remblai de la piste totalisent un montant de 402 341.15\$.

Lors de la mise en place de la stratégie d'adaptation, des travaux d'entretien ont également été réalisés et consistaient à la scarification, nivellement et rechargement de 7 490 m² de piste nécessitant 1 017 m³ de MG 20b modifié et la mise en réserve de 3 356.3 m³ de MG20b modifié en prévision de l'entretien régulier. Le coût de ces travaux d'entretien est estimé à 148 758.07 \$. À noter que les deux dernières interventions portant sur l'entretien de la piste remontent à 2004 et 2007. Ces dernières interventions consistaient au rechargement de dépressions en bordure de piste requérant 300 m³ de gravier en 2004 et le rechargement et l'élargissement de la piste en 2007.

Tableau 19 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Tasiujaq.

Année	Mesures	Description	Coût (\$)
2019	Adoucissement des pentes de talus	Granulats calibre 0-300 mm	344 453.20
		Nettoyage et réglage finaux	10 000.00
		Sous-total =	354 453.20
	Imperméabilisation des talus	Imperméabilisation des talus	43 875.00
		Sous-total =	43 875.00
	Aménagement d'un fossé de drainage	Aménagement d'un fossé de drainage	4 012.95
Sous-total =		4 012.95	
Total travaux d'adaptation =			402 341.15
2019-2020	Entretien	Granulats concassés MG 20b modifié	85 224.60
		Scarification et nivellement	23 593.50
		Mise en réserve MG 20b modifié	39 939.97
		Sous-total =	148 758.07
Grand total =			551 099.22

1.6.4.4 INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DE PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION

Le site de Tasiujaq s'avère particulièrement intéressant pour le suivi de performance thermique. En raison de son historique de suivi et la diversité des recherches qui s'y sont déroulées depuis 2004, il est riche en information sur les conditions géotechniques, géothermiques et d'enneigement. Grâce à de nombreux câbles à thermistances automatisés localisés dans différentes sections de l'infrastructure et également en milieu naturel, il est possible de réaliser un suivi de la réaction du système pergélisol dès la mise en place de la stratégie d'adaptation et quantifier les impacts de cette dernière sur les régimes thermiques.

Trois câbles à thermistances ont été installés dans le périmètre de l'aéroport lors de sa construction autour des années 1990. L'un est situé dans le milieu naturel à une quarantaine de mètres de la piste (HT-304) et sert de référence en milieu naturel. Les deux autres sont situés à proximité du centre-ligne, soit au chaînage 5+300, atteignant 5 m de profondeur à travers le remblai de la piste et le terrain naturel sous-jacent (HT-181) et au chaînage 5+090 dans la section en déblai à l'emplacement d'une ancienne butte de dépôts meubles qui a été nivelée puis isolée (HT-180). Lors de la mise en place des planches d'essais pour l'évaluation des différentes techniques de mitigation (Ficheur et Doré, 2011), des câbles à thermistances ont été installés en 2007 dans chacune des trois sections à l'essai (sections B, C et D) et également dans une quatrième qui servait de référence (section A) (Lemelin et al., 2008). Dans le cadre du projet actuel, il a été convenu de préserver les câbles dans les sections A et B (référence et pente douce) et de remplacer le système d'acquisition existant pour un système plus compact. Cette migration a été réalisée à l'automne 2018. Pour ce qui est des sections C et D (remblai à convection et drain thermique), le système d'acquisition a été débranché, puis le boîtier et son support ont été démontés. Les câbles ont été sécurisés et sont toujours accessibles afin de permettre une automatisation ultérieure avec un système d'acquisition compact si jugé nécessaire.

En septembre 2014, dans le cadre d'un projet du programme Arquluk visant à documenter l'effet thermique de l'enneigement sur le pergélisol présent en pied et sous les talus de remblai du côté de l'infrastructure sous le vent (côté est), trois câbles de capteurs de températures, nommés TAC-1 (horizontal), TAC-2 (vertical) et TAC-3 (vertical) ont été installés. Un schéma de positionnement des câbles pour le site est présenté à la figure 88A et la distribution des capteurs de température le long des câbles est présentée à la figure 88B. Lors des travaux d'adaptation de la piste, les câbles ont été complètement retirés des puits afin d'éviter tout endommagement possible, puis réinstallés une fois les travaux d'adoucissement de pente terminés à l'automne 2018. Étant donné que les câbles réinstallés ne respectent plus la configuration initiale, ces derniers ont été renommés TAC-1B, TAC-2B et TAC-3B (Figure 88C et D).

À l'automne 2018, dans le cadre du présent projet, trois nouveaux câbles verticaux (TAS-F1A, TAS-F3 et TAS-F4A) ont été installés dans les puits de forage TAS-F1, TAS-F3 et TAS-F4 réalisés en pied de remblai en 2009 dans le cadre de l'étude réalisée par L'Hérault et al. (2012). Initialement situés en pied de remblai, TAS-F1A et TAS-F4A ont été récemment recouverts par des matériaux granulaires lors de la réalisation des travaux d'adoucissement de pente du remblai. Ces nouveaux câbles, stratégiquement localisés dans l'ancien pied de remblai, permettront de documenter et quantifier précisément la réponse thermique du pergélisol et ainsi évaluer la performance des pentes douces à favoriser l'aggradation du pergélisol sous les accotements fortement dégradés thermiquement.

En complément aux câbles à thermistances verticaux, des câbles horizontaux (TAS-F1B, TAS-F2B et TAS-F4B) ont été installés à la surface du sol. Orientés perpendiculairement à la piste, ces câbles à thermistances partent de l'accotement et vont jusqu'à une dizaine de mètres du pied de remblai en milieu naturel. Pour ces câbles, les thermistances ont été enterrées légèrement sous la surface (2 à 5 cm) et sont spécifiquement positionnées de manière à quantifier les différences de températures à la surface du sol en fonction du type de surface (gravier ou végétation) et les conditions d'enneigement et de drainage pour : une section du remblai avec pente adoucie (6H :1V) côté ouest (TAS-F1B), une section du remblai avec une pente normale (2H :1V) côté ouest (TAS-F2B) et

une section du remblai avec pente adoucie (6H :1V) côté est (TAS-F4B). La configuration de l'instrumentation pour les sites TAS-F1, TAS-F2, TAS-F3 et TAS-F4 est présentée dans le schéma présenté à la figure 89. Les étapes de mise en place de ces nouveaux câbles branchés sur des systèmes d'acquisition avec un aperçu final pour un site sont présentées à la figure 90. Malgré une configuration légèrement différente, les câbles TAC-1B, TAC-2B et TAC-3B, situés du côté sous le vent, permettront également de contribuer à cette analyse. L'emplacement de l'instrumentation disponible au site de l'aéroport de Tasiujaq pour le suivi thermique est présenté à la figure 91 et les caractéristiques techniques résumées au tableau 20.

L'emplacement stratégique des câbles à thermistances, 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. Plusieurs câbles, récemment recouverts par la pente douce, permettront de suivre et quantifier le réajustement thermique du pergélisol sous les accotements, les talus et pieds de remblai, tel que la remontée du plafond du pergélisol. Afin d'avoir une estimation de cette remontée anticipée du plafond du pergélisol le long de sections transversales à l'axe de la piste, des relevés de géoradar (GPR) ont été réalisés à l'automne 2018 et d'autres pourront être réalisés aux mêmes endroits quelques années plus tard. La comparaison entre les levés effectués immédiatement après la fin des travaux d'adoucissement des pentes de talus et ceux qui pourraient être effectués dans le cadre d'un suivi à long terme permettra d'évaluer les remontées attendues du plafond du pergélisol. Pour chaque profil GPR, la position du réflecteur identifié comme étant la position maximale du front de dégel (interface couche-active/plafond du pergélisol) sera validée par les lectures des câbles à thermistances situés à proximité. Les levés GPR transversaux à la piste permettront également de confirmer l'inversion du drainage dans la couche active, c'est-à-dire un écoulement de l'eau souterraine du pied de remblai vers le terrain naturel, en identifiant la position du front de dégel maximal.

Lors des travaux de terrain réalisés à l'automne 2018, deux caméras ont été installées en pied de remblai de chaque côté de la piste pour un total de quatre. L'objectif de ces caméras est d'assurer un suivi en continu de l'état d'enneigement et du drainage afin d'améliorer la compréhension de ces processus en marge de la piste, tant du côté ouest (au vent) et que du côté est (sous le vent). Plus spécifiquement, la caméra installée près du nouveau fossé de drainage sur le côté est permettra d'évaluer l'efficacité de ce dernier à drainer le secteur qui jusqu'alors, était problématique. Les emplacements des caméras sont présentés à la figure 91 et leurs spécifications techniques résumées au tableau 21.

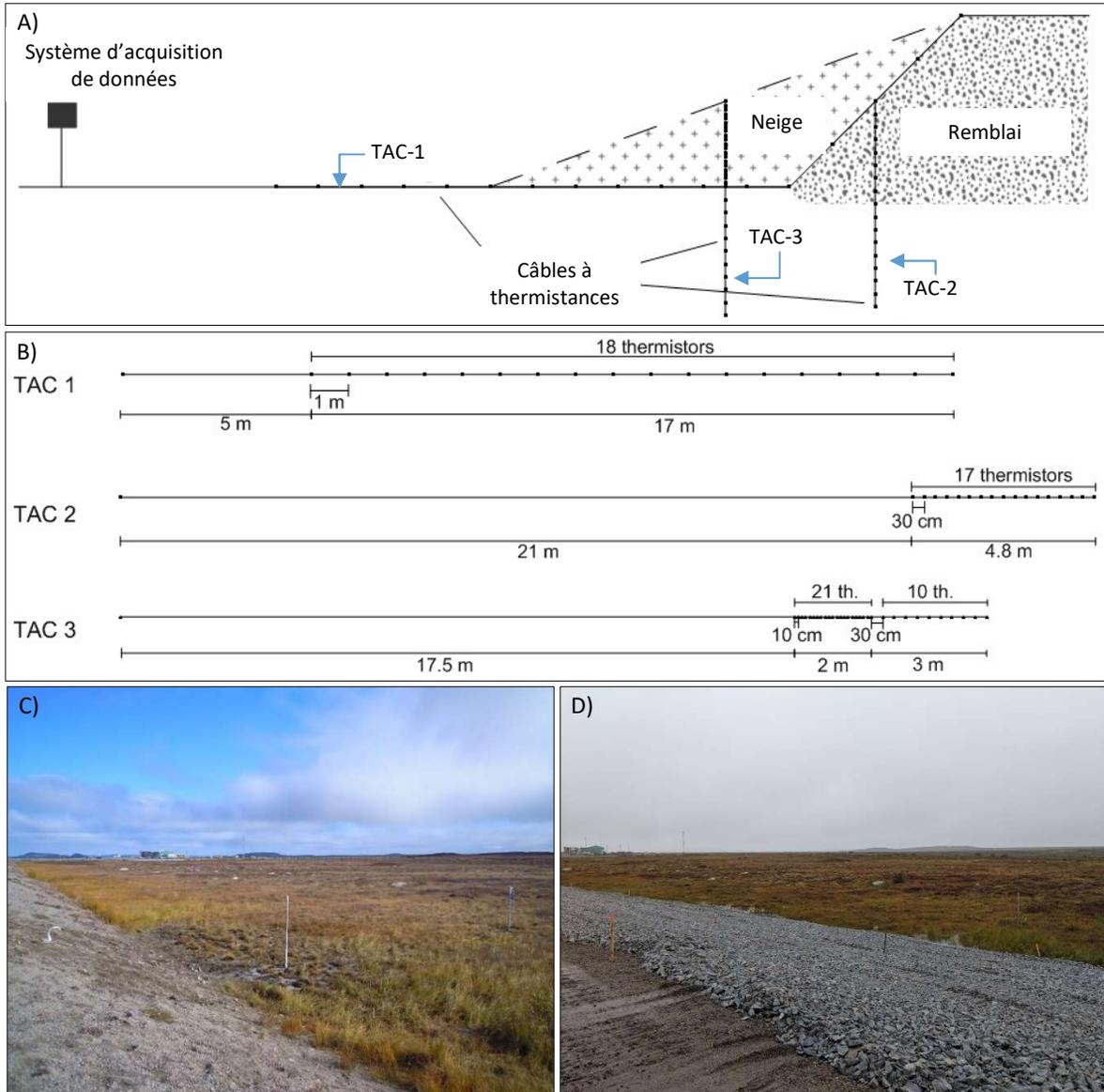


Figure 88 : A) Schéma de localisation des câbles de capteurs de températures installés en septembre 2014 pour un projet de recherche visant à documenter l'effet thermique de l'enneigement sur le pergélisol à la piste d'atterrissage de Tasiujaq (modifiée de Lanouette, 2021). B) Répartition des capteurs de températures le long des câbles TAC-1 (horizontal), TAC-2 (vertical) et TAC-3 (vertical) (modifiée de Lanouette, 2021). Aperçu du site C) avant et D) après l'adoucissement des talus du remblai complété à l'automne 2018.

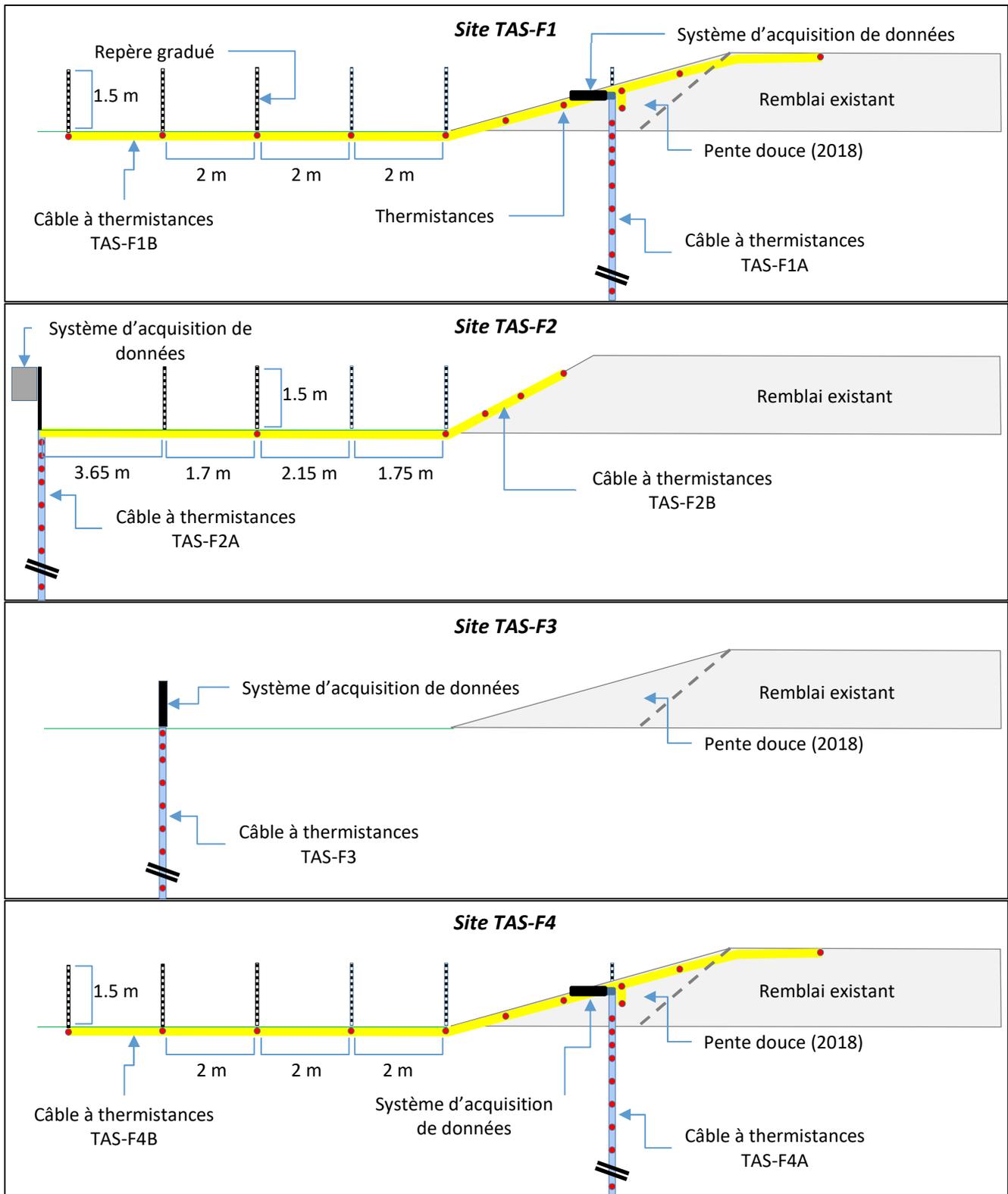


Figure 89 : Configurations des nouveaux câbles à thermistances installés à la piste d'atterrissage de Tasiujaq en 2018 pour évaluer la performance thermique des remblais à pentes adoucies et documenter l'influence des conditions de surface (type de surface, conditions d'enneigement et de drainage) sur le bilan thermique en surface pour différentes sections de l'infrastructure (accotement, talus, pied de talus et milieu naturel).



Figure 90 : A) Puits de forage TAS-F1 avant le début des travaux d'adaptation à la piste d'atterrissage de Tasiujaq. B) Installation des câbles à thermistances et repères gradués une fois l'adoucissement des pentes de talus complété en 2018. C) Branchement des câbles à l'intérieur d'un tuyau ABS contenant le nouveau système d'acquisition. D) Finalisation de l'installation des câbles à thermistances en surface (câble horizontal). E) Aperçu final du site TAS-F2 une fois les travaux d'adaptation et d'instrumentation complétés.

Piste d'atterrissage de Tasiujaq

Cartographie: E. L'Hérault, 2018
Fond de carte: Orthomosaïque 2016



Légende instrumentation

Déjà existante

- ▲ Système d'acquisition de données
- ◆ Câble à thermistances automatisé
- ⊕ Borne de tassement

Installée à l'automne 2018

- ▲ Système d'acquisition de données
- ◆ Câble à thermistances automatisé
- ▶ Caméra automatisée



Figure 91 : Localisation de l'instrumentation existante et celle nouvellement installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques de mitigation implémentées pour la piste d'atterrissage de Tasiujaq.

Tableau 20 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans l'enceinte de l'aéroport de Tasiujaq qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.

No. forage	Localisation	Orientation	Longueur (m)	Nb. thermistances	Répartition des thermistances (m)	Zéro de référence	Mise en service	Type lecture/système	Paramètres mesurés	État
HT-180	Remblai (CL)	Vertical	5.35	11	-0.6;-0.61;-1;-1.5;-2;-2.5;-3;-3.5;-4;-4.5;-5	Surface terrain	1989-06-17	Automatisée/CR1000	Température du sol	Fonctionnel
HT-181	Remblai (CL)	Vertical	5.40	11	-0.65;-0.9;-1.4;-1.9;-2.4;-2.9;-3.4;-3.9;-4.4;-4.9;-5.4	Surface terrain	1991-10-06	Automatisée/CR1000	Température du sol	Fonctionnel
HT-304	Terrain naturel	Vertical	11.00	14	0;-0.05;-0.1;-0.2;-0.5;-1;-1.5;-2;-3;-4;-5;-7;-9;-11	Surface terrain	1993-08-27	Automatisée/CR1000	Température du sol/air	Fonctionnel
Section A	Talus planche référence	Vertical	5.05	16	-0.61;-0.61;-1.18;-1.45;-1.78;-2.06;-2.38;-2.65;-2.98;-3.24;-3.57;-3.83;-4.17;-4.45;-4.78;-5.05	Surface terrain	2007-09-15	Automatisée/CR800/ULogC32	Température du sol	Fonctionnel
Section B	Talus planche pente douce	Vertical	4.06	16	-0.06;-0.06;-0.29;-0.57;-0.9;-1.16;-1.49;-1.76;-2.1;-2.35;-2.69;-2.92;-3.29;-3.53;-3.88;-4.12	Surface terrain	2007-09-15	Automatisée/CR800/ULogC32	Température du sol	Fonctionnel
Section C	Talus planche convection	Vertical	5.10	16	-0.63;-0.93;-1.24;-1.54;-1.82;-2.14;-2.42;-2.74;-3.01;-3.33;-3.57;-3.83;-4.22;-4.51;-4.81;-5.1	Surface terrain	2007-09-15	Automatisée/CR800	Température du sol	Non fonctionnel
Section D	Talus planche drain thermique	Vertical	5.26	16	-0.76;-1.06;-1.37;-1.68;-1.98;-2.28;-2.58;-2.87;-3.18;-3.52;-3.83;-4.16;-4.44;-4.72;-4.99;-5.26	Surface terrain	2007-09-15	Automatisée/CR800	Température du sol	Non fonctionnel
TAC-1A	Accotement => terrain naturel	Horizontal	17.00	18	0;-1;-2;-3;-4;-5;-6;-7;-8;-9;-10;-11;-12;-13;-14;-15;-16;-17	Haut de talus	2014-09-25	Automatisée/D405	Température du sol	Non fonctionnel
TAC-2A	Talus de remblai	Vertical	4.80	17	0;-0.3;-0.6;-0.9;-1.2;-1.5;-1.8;-2.1;-2.4;-2.7;-3;-3.3;-3.6;-3.9;-4.2;-4.5;-4.8	Surface terrain	2014-09-25	Automatisée/D405	Température du sol	Non fonctionnel
TAC-3A	Pied de remblai	Vertical	5.00	31	1.6;1.5;1.4;1.3;1.2;1.1;1;0.9;0.8;0.7;0.6;0.5;0.4;0.3;0.2;0.1;0;-0.1;-0.2;-0.3;-0.4;-0.7;-1;-1.3;-1.6;-1.9;-2.2;-2.5;-2.8;-3.1;-3.4	Surface terrain	2014-09-25	Automatisée/D405	Température du sol	Non fonctionnel
TAC-1B	Accotement => terrain naturel	Horizontal	À venir	18	À venir	Haut de talus	2018-12-09	Automatisée/D405	Température du sol	Fonctionnel
TAC-2B	Haut de talus	Vertical	À venir	17	À venir	Surface terrain	2018-12-09	Automatisée/D405	Température du sol	Fonctionnel
TAC-3B	Bas de talus	Vertical	À venir	31	À venir	Surface terrain	2018-12-09	Automatisée/D405	Température du sol	Fonctionnel
TAS-F1A	Milieu de talus	Vertical	20.20	16	-0.75;-1;-1.25;-1.5;-1.75;-2.25;-2.75;-3.25;-3.75;-4.75;-5.75;-6.75;-8.75;-10.75;-14.75;-19.75	Surface terrain	2018-09-11	Automatisée/ULogC32	Température du sol	Fonctionnel
TAS-F1B	Accotement => terrain naturel	Horizontal	n.a	11	Voir croquis à la figure 89	Haut de talus	2018-09-11	Automatisée/ULogC32	Température du sol	Fonctionnel
TAS-F2A	Terrain naturel	Vertical	13.50	16	-0.1;-0.25;-0.5;-0.75;-1;-1.5;-2;-2.5;-3;-4;-5;-6;-7;-9;-11;-13.5	Surface terrain	2010-10-11	Automatisée/CR10X	Température du sol	Fonctionnel
TAS-F2B	Accotement => terrain naturel	Horizontal	n.a	5	Voir croquis à la figure 89	Haut de talus		Automatisée/ CR10X	Température du sol	Fonctionnel
TAS-F3	Terrain naturel	Vertical	23.66	16	-0.05;-0.25;-0.5;-0.75;-1;-1.5;-2;-2.5;-3;-4;-5;-6;-8;-10;-16;-23.5	Pied de talus	2018-09-03	Automatisée/ULogC32	Température du sol	Fonctionnel
TAS-F4A	Milieu de talus	Vertical	8.05	16	-0.5;-0.75;-1;-1.25;-1.5;-1.75;-2;-2.5;-3;-3.5;-4;-4.5;-5;-5.5;-6;-7	Pied de talus	2018-09-12	Automatisée/ULogC32	Température du sol	Fonctionnel
TAS-F4B	Accotement => terrain naturel	Horizontal	n.a	11	Voir croquis à la figure 89	Haut de talus	2018-09-12	Automatisée/ULogC32	Température du sol	Fonctionnel

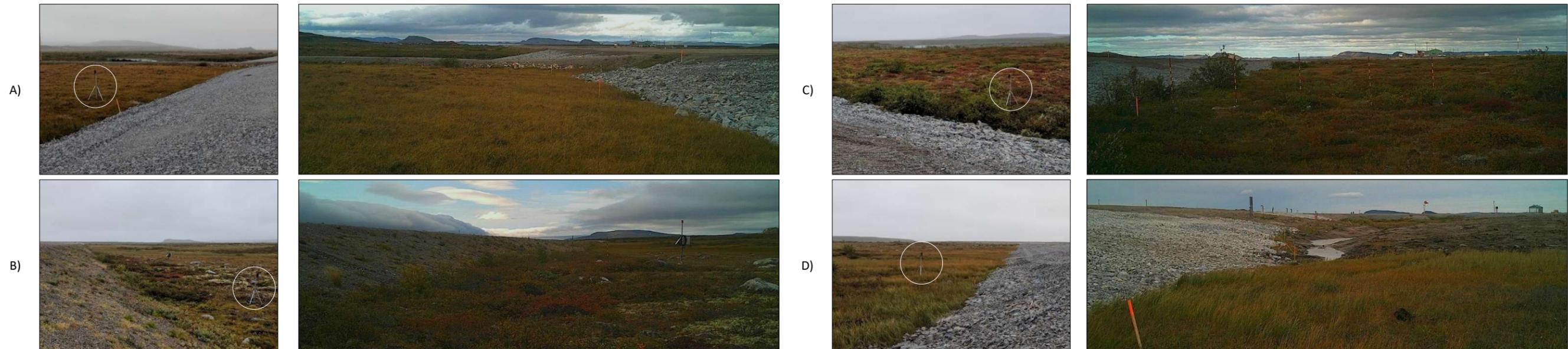


Tableau 21 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées en août 2018 le long de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.

Nom	Coordonnées MTM (m)			Chainage (m)	Distance du CL (m)	Hauteur caméra (m)		Orientation	Photos/jour	Date d'installation
	x	y	z			sol	CL			
A) TasCam-1	336 125.453	6 504 761.938	33.51	5+980	30.00	1.5	-0.45	60	4	2018-09-04
B) TasCam-2	336 477.834	6 505 369.633	27.76	5+276	34.50	1.5	-1.64	240	4	2018-09-08
C) TasCam-3	336 285.949	6 504 912.924	31.05	5+767	31.75	1.5	-0.95	60	4	2018-09-03
D) TasCam-4	336 543.008	6 505 339.643	27.77	5+270	38.23	1.5	-1.63	60	4	2018-09-03

1.6.4.5 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE POUR LA PÉRIODE 2018-2020

1.6.4.5.1 PERFORMANCE THERMIQUE

Le suivi des températures de l'air mesuré au câble HT-304 permet de documenter les fluctuations interannuelles récentes du climat dans le secteur de la piste d'atterrissage de Tasiujaq. La variabilité journalière des températures de l'air ainsi que les différentes variables climatiques calculées pour la période comprise entre 2008 et 2021 sont présentées respectivement à la figure 92 et au tableau 22. Au cours des treize dernières années, la température annuelle moyenne de l'air pour la région de Tasiujaq s'est avérée relativement stable avec une température de $-5.10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Au cours de cette période, les températures moyennes annuelles de l'air affichent, comme partout ailleurs au Nunavik, une légère tendance au refroidissement. L'année climatique de 2009-2010 est la plus chaude enregistrée au cours de cette période avec une température moyenne annuelle de $-2.37\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit plus de $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ supérieurs à la moyenne. Cette température annuelle de l'air particulièrement chaude s'explique par un hiver très doux et un été plus long que la moyenne (Tableau 22). À l'opposé, l'année climatique de 2014-2015 est la plus froide enregistrée avec une TMAA de $-7.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui s'explique par l'occurrence d'un hiver significativement plus froid que la moyenne. Depuis la mise en place des pentes douces à l'été 2018, les températures de l'air pour Tasiujaq sont à la hausse. Au cours des deux dernières années du suivi (2019-2020 et 2020-2021), les températures moyennes annuelles de l'air ont été nettement supérieures à la moyenne, particulièrement celle de 2020-2021 dont les caractéristiques climatiques sont similaires aux deux autres années les plus chaudes observées pour la période 2008-2021 (2009-2010 et 2010-2011).

Entre l'été 2018 et 2019, les profondeurs de dégel sous les nouvelles pentes adoucies (Tas-F1 et Tas-F4) ont diminué d'une soixantaine de centimètres pour ces deux sites (Figure 93). Ce réajustement coïncide sensiblement à l'épaisseur des matériaux granulaires mis en place au niveau des anciens pieds de remblai lors de l'adoucisement des talus. Il s'agirait ici d'un réajustement thermique post-adaptation. Par la suite, au cours des étés 2020 et 2021, les profondeurs maximales de dégel ont toutefois augmenté sous les nouvelles pentes douces, mais également au centre-ligne et en milieu naturel en réponse aux augmentations récentes des températures de l'air. Ces augmentations de la profondeur de dégel sont synchrones et proportionnelles aux réchauffements des températures de l'air enregistrées pour la région (Tableau 22). Les courts suivis thermiques sous les pentes douces (Tas-F1, Tas-F4, Planche A et B) montrent un approfondissement de la profondeur maximale de dégel assez notable au cours des trois dernières années. Cet approfondissement récent de la profondeur maximale de dégel sous les nouvelles pentes douces limite considérablement le bénéfice thermique obtenue lors de la première année de mise en place. À l'emplacement du câble Tas-F1, la profondeur de dégel est désormais qu'une quinzaine de centimètres moins profonde qu'avant la mise en place des pentes douces (Figure 93). Il s'agit ici d'une diminution assez négligeable de la profondeur maximale de dégel qui devrait être d'ampleur similaire aux autres sites de mesures sous les pentes douces (planche A et Tas-F4), mais pour lesquels, la non-disponibilité des données jusqu'en octobre 2021 ne permet pas d'en préciser les valeurs pour le moment. Notons que les deux dernières années de suivi affichent un climat significativement plus chaud que la moyenne, ce qui n'a certainement pas favorisé une remontée marquée du pergélisol sous les anciens pieds de remblai telle qu'anticipée (Figure 87B).

Lorsque l'on regarde l'évolution de la profondeur maximale du front de dégel pour la période de 2007-2020 pour la planche d'essais de la pente douce mise en place en 2007 (section B), on remarque que depuis la mise en place de la pente douce, le front de dégel a remonté de 1.45 m au cours de cette même période. Selon l'évolution de la profondeur maximale de dégel au site d'essais de la pente douce par rapport à celles au centre-piste qui servent de références (HT-180 et HT-181) (Figure 93), on constate que ce réajustement post adaptation a atteint l'équilibre en 2013 pour ensuite fluctuer de manière synchrone selon les variations des températures moyennes annuelles de l'air. Cette comparaison suggère que le régime thermique sous des pentes douces nouvellement aménagées va nécessiter encore quelques années avant d'atteindre un état d'équilibre reflétant les nouvelles conditions en surface (diminution de l'enneigement en hiver et diminution de l'albédo en été).

Les variations journalières des régimes thermiques mesurées au centre-piste, en milieu naturel et sous les pentes douces pour la période 2018-2021 sont présentées aux figures 94 et 95. Les régimes thermiques au centre-piste (Figure 94) démontrent clairement une extraction efficace de la chaleur dans le remblai au courant des hivers 2019, 2020 et 2021. De ces trois hivers, celui de 2021, significativement plus chaud que la moyenne a néanmoins réduit considérablement l'extraction de chaleur dans le remblai se traduisant ainsi par un régime thermique plus chaud par rapport aux hivers précédant. La comparaison des régimes thermiques mesurés au centre-piste versus ceux mesurés en milieu naturel (Tas-F2) et en pied de remblai (Tas-F3) confirme l'influence notable des conditions d'enneigement sur les régimes thermiques hivernaux. Les températures en hiver dans les premiers mètres sont nettement moins froides en milieu naturel et davantage en pied de remblai.

En comparant les régimes thermiques sous les nouvelles pentes douces (Figure 95) avec ceux en milieu naturel et pied de remblai, on constate que les températures dans les premiers mètres de la surface en hiver se rapprochent désormais de celles mesurées en milieu naturel (Tas-F2) et sont généralement plus froides que celles mesurées actuellement en pied de remblai des pentes douces (Tas-F3). Cette observation suggère alors que les conditions d'enneigement actuelles sur les pentes douces s'apparentent à celles rencontrées en milieu naturel. Notons que la section B présente, dans le remblai, des températures en hiver considérablement plus froides qu'aux sites des nouvelles pentes douces (Tas-F1 et Tas-F4). Cette différence s'explique par l'utilisation d'une pente plus douce au site de la section B (1V :8H) par rapport aux autres sites (1V :6H) qui vraisemblablement minimisent davantage l'épaisseur de neige présente sur les talus. Pour la section B, les régimes thermiques hivernaux se rapprochent de ceux très froids mesurés au centre-piste (HT-180 et HT-181) ce qui confirme l'efficacité des pentes douces 1V :8H à refroidir le sol sous les talus des remblais. Une différence notable existe toutefois entre les régimes thermiques hivernaux sous la pente douce 1V :8H de la section B et sous les nouvelles pentes douces 1V :6H (Tas-F1 et Tas-F4). Cette différence notable pourrait suggérer une meilleure efficacité des talus utilisant des pentes plus douces dans la diminution de l'enneigement, ce qui favoriserait une meilleure extraction de la chaleur en hiver. Il est néanmoins encore trop tôt pour confirmer cette affirmation.

Pour les sections instrumentées utilisant une pente douce 1V :6H (Tas-F1 et Tas-F4), les suivis des températures de surface le long de transects s'étalant de l'accotement jusqu'à une distance de 8 m des pieds de remblai viennent confirmer que la neige joue toujours un rôle isolant non négligeable (Figure 97). Par exemple, pour les deux sections instrumentées, cet effet isolant est tel que les températures annuelles moyennes de surface pour la période de septembre 2018 à octobre 2021 demeurent supérieures à 0°C. En été, la différence dans les températures de surface le long des transects est moins marquée, mais sans surprise, la température de surface des accotements et talus demeure légèrement plus chaude de 1.5°C à 3°C que la section du sol naturel avec végétation. L'absence de mesures de températures de surface similaire pour la section de la piste avec une pente douce de 1V :8H ne permet pas d'effectuer une comparaison entre les deux géométries de remblais. Toutefois, la comparaison des températures moyennes hivernales à la surface mesurées à mi talus entre les sites Tas-F1, Tas-F4 et la section B indique que la température moyennes à la surface entre les mois de novembre à avril pour la période de 2018-2021 est de -9.4°C, -7.4°C et -8.1°C respectivement. Le positionnement au vent du talus de la pente douce pour le site Tas-F1 et les plus faibles épaisseurs de neige qui s'y accumulent naturellement pourrait expliquer les températures de surface plus froides qui y sont mesurées par rapport aux talus situés sous le vent (Tas-F4 et Section B). Pour les deux sections de talus instrumentées qui se trouvent sous le vent et qui utilisent des pentes de talus différentes (Section B et Tas-F4), celle utilisant une pente 1V :8H (Section B) affiche des températures de surface légèrement inférieures à celles utilisant une pente 1V :6H (Tas-F4). À titre comparatif, la température de l'air moyenne en hiver pour la même période était de -15.2°C, celles de surface dans les accotements aux sites Tas-F1 et Tas-F4 de -12.2°C et -14°C respectivement. Les facteurs-n pour les pentes de mi-talus pour les sites de Tas-F1, Tas-F4 et la section B sont donc compris entre 0.5 et 0.6 comparativement à 0.8 et 0.9 pour les accotements. Cette comparaison permet de quantifier l'effet isolant de la neige qui s'accumule toujours sur les pentes douces, mais qui permet tout de même une certaine extraction de chaleur. Lanouette

(2021) avait calculé un facteur-n en hiver d'environ 0.3 sur la mi-talus du remblai 1V :4H pour un site situé à proximité du câble Tas-F4. À la lueur de ces résultats, l'effet isolant de la neige depuis l'adoucissement des pentes en 2018 a presque diminué de moitié sur les talus, nécessairement en raison d'une diminution de son épaisseur.

Plus en profondeur, malgré un certain refroidissement des températures à la surface du sol le long des nouvelles pentes douces, les régimes thermiques demeurent sensiblement plus chauds qu'au centre-piste et qu'en milieu naturel. La persistance d'une zone non gelée au site Tas-F4 et des retards considérables dans le regel de la couche active aux sites Tas-F1 et la Section A suggèrent la présence d'importantes quantités de chaleur latente. Notons qu'avant la mise en place des pentes douces, le pergélisol en pied de remblai et sous les accotements était fortement dégradé thermiquement avec des épaisseurs de couche active en 2018 d'environ 3.6 m, 7 m et plus de 5 m aux sites Tas-F1, Tas-F4 et Section A respectivement. Actuellement, seul les câbles au centre-piste (HT-180 et HT-181) et dans la pente adoucie 1V :8H en place depuis 2007 montrent des profils thermiques avec un gradient thermique négatif (Figure 96) qui permet le maintien d'un pergélisol à une température similaire à celle mesurée en profondeur aux câbles Tas-F1 et Tas-F3 (-2°C à plus de 20 m de profondeur). Pour tous les autres sites de suivi thermique, les profils thermiques annuels moyens montrent des gradients thermiques positifs (températures plus chaudes en surface qu'en profondeur), ce qui suggère que les conditions en surface ne permettent pas, pour le moment, de maintenir le pergélisol à sa température d'équilibre. On note également que les profils annuels moyens des températures dans le sol pour la période 2018-2021 montrent dans l'ensemble, sauf pour quelques sites au suivi incomplet, un réchauffement des températures entre les années 2018-2019 et 2020-2021. Cette augmentation est vraisemblablement le résultat direct de l'augmentation des températures annuelles moyennes de l'air au cours des dernières années, dont l'année 2020-2021 qui a été particulièrement chaude (Tableau 22).

Depuis la mise en place des pentes douces à l'été 2018, il est difficile à ce stade d'observer une amélioration significative du régime thermique sous ces dernières. Il apparaît néanmoins clair qu'en raison de la dégradation thermique avancée des pieds de remblai avant la mise en place des pentes douces, de la quantité d'eau non gelée suspectée qui y persiste, de l'influence toujours notable des conditions d'enneigement qui limitent l'extraction efficace de la chaleur en hiver et le contexte climatique récent plus chaud que la moyenne, de nombreuses années seront requises pour permettent un refroidissement significatif du sol. Par conséquent, seul un suivi à plus long terme permettra de pleinement évaluer les bénéfices thermiques des pentes douces.

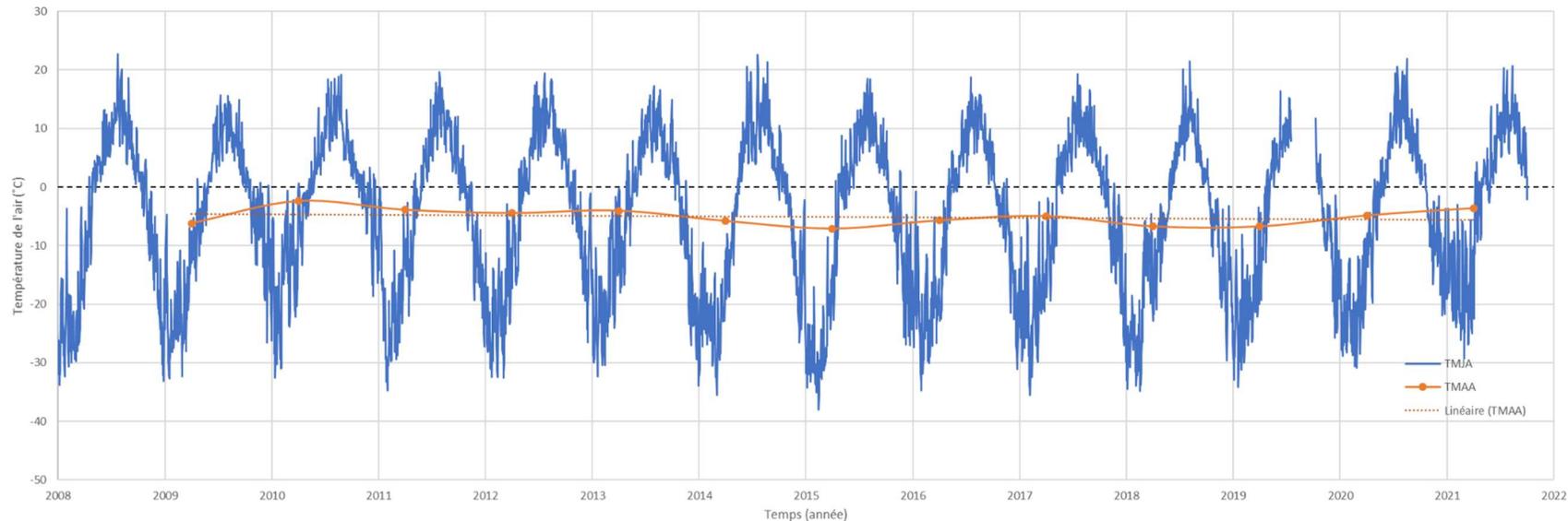
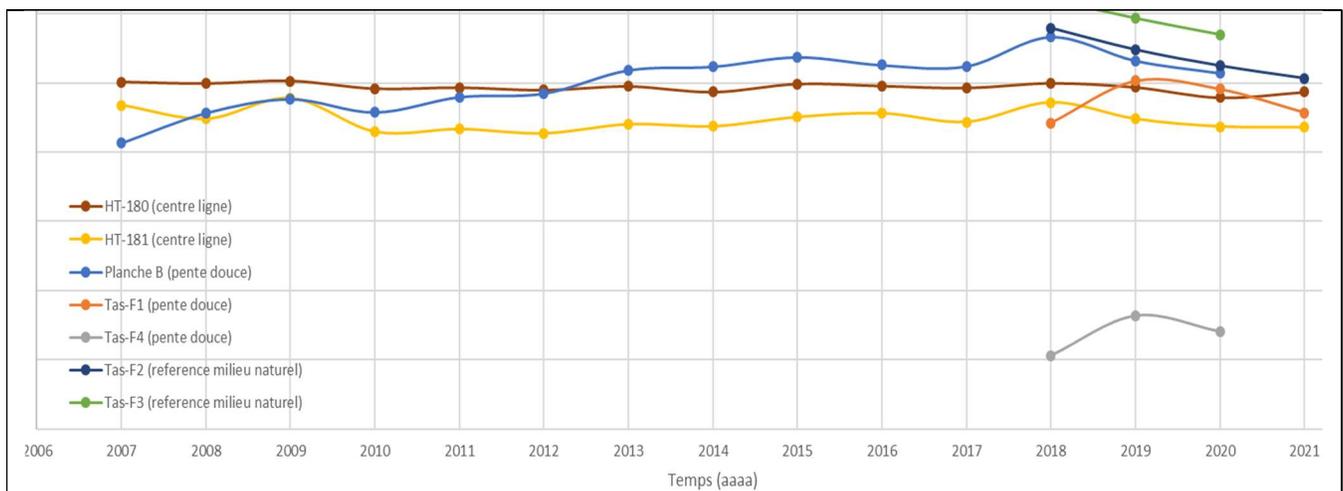


Figure 92 : Variation de la température journalière de l'air (TMJA) et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) à Tasiujaq pour la période 2008-2021. Les moyennes journalières et annuelles ont été calculées à partir des températures de l'air horaires mesurées à la station de référence HT-304.

Tableau 22 : Variables climatiques pour la période 2008-2021 calculées à partir des températures journalières de l'air (TMJA) mesurées à la station de référence HT-304, piste d'atterrissage de Tasiujaq.

Année climatique		2008-09	2009-10	2010-11	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20	2020-21	Moy
Saison de gel	Début	29-oct	20-oct	05-nov	24-oct	13-oct	25-oct	31-oct	09-oct	08-oct	26-oct	09-oct	30-oct	20-oct	21-oct
	Fin	27-mai	12-mai	26-mai	09-mai	17-mai	12-mai	21-avr	10-mai	06-mai	26-mai	05-mai	16-mai	27-avr	12-mai
	Durée	211	205	203	199	217	200	173	215	211	213	209	200	190	204
	Moyenne T°C	-14.99	-10.64	-12.37	-14.55	-12.09	-17.12	-20.24	-14.82	-14.47	-15.28	-15.05	-14.59	-12.69	-14.53
	Indice de gel	-3164	-2182	-2511	-2896	-2623	-3424	-3501	-3186	-3054	-3255	-3146	-2918	-2411	-2944
Saison de dégel	Début	28-mai	13-mai	27-mai	10-mai	18-mai	13-mai	22-avr	11-mai	07-mai	27-mai	06-mai	17-mai	28-avr	13-mai
	Fin	19-oct	04-nov	23-oct	12-oct	24-oct	30-oct	08-oct	07-oct	25-oct	08-oct	29-oct	19-oct	01-oct	18-oct
	Durée	145	176	150	156	160	171	170	150	172	135	177	156	157	160
	Moyenne T°C	6.65	7.27	7.61	8.46	6.89	7.47	6.28	7.37	6.75	6.79	3.09*	7.66	7.40	6.90
	Indice de dégel	964	1279	1142	1319	1102	1278	1068	1105	1160	917	548*	1195	1162	1095
Moyenne annuelle*		-6.18	-2.37	-3.88	-4.44	-4.03	-5.79	-7.09	-5.70	-4.94	-6.72	-6.73*	-4.84	-3.60	-5.10
Ratio (FI/TI)		3.28	1.71	2.20	2.19	2.38	2.68	3.28	2.88	2.63	3.55	5.75*	2.44	2.08	2.85
Nombre de jour		356	381	353	355	377	371	343	365	383	348	386	356	347	363

*Valeur approximative, année climatique incomplète.



	2018	2019	2020	2021	Δ 2021 versus 2018 (m) ↑remontée ↓approfondissement
HT-180 (centre-piste)	-3.01	-3.06	-3.21	-3.13	↓0.12
HT-181 (centre-piste)	-3.28	-3.52	-3.63	-3.64	↓0.36
Planche B (pente douce 1V :8H)	-2.34	-2.68	-2.86	-2.41 ²	n.d
Planche A (pente douce 1V :6H)	> 5 ¹	> 5 ¹	> 5 ¹	> 5 ¹ et ²	n.a
Tas-F1 (pente douce 1V :6H)	-3.58	-2.97	-3.09	-3.43	↑0.15
Tas-F4 (pente douce 1V :6H)	-6.94	-6.36	-6.59	-5.80 ²	n.d
Tas-F2 (milieu naturel)	-2.21	-2.52	-2.75	-2.93	↓0.72
Tas-F3 (proximité du pied de remblai)	-1.78	-2.06	-2.30	-2.31 ²	n.d

1 : Profondeur de dégel supérieure à la profondeur du câble

2 : Saison de dégel incomplète

Figure 93. Profondeurs maximales du front de dégel (épaisseurs de la couche active) en fonction du temps pour la période de 2007 à 2021 aux différents sites de suivi thermique de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.

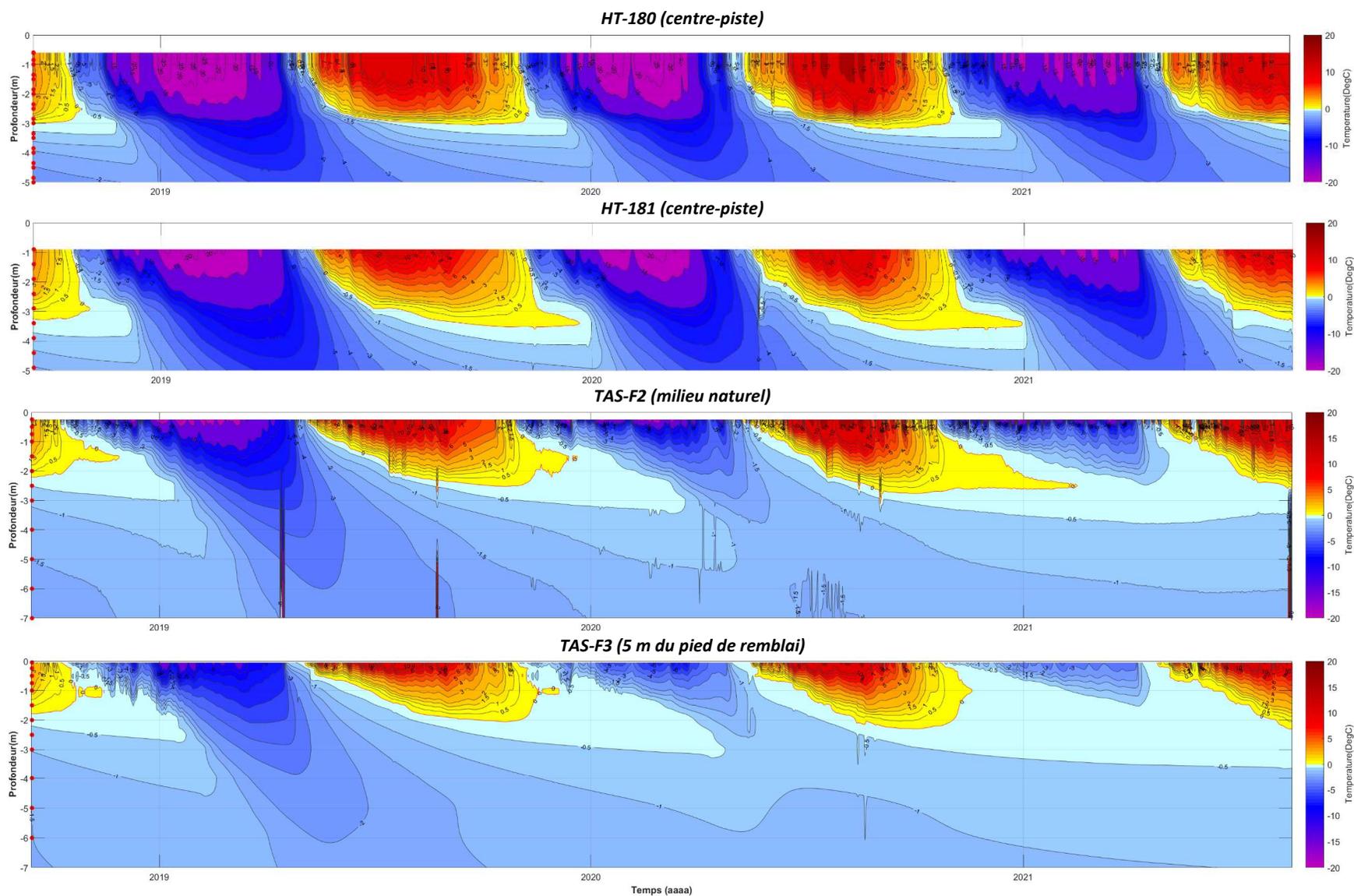


Figure 94 : Variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps sous le centre-piste (HT-180 et HT-181), en milieu naturel (Tas-F2) et en pied de remblai (Tas-F3) pour la période de septembre 2018 à août 2021, piste d'atterrissage de Tasiujaq.

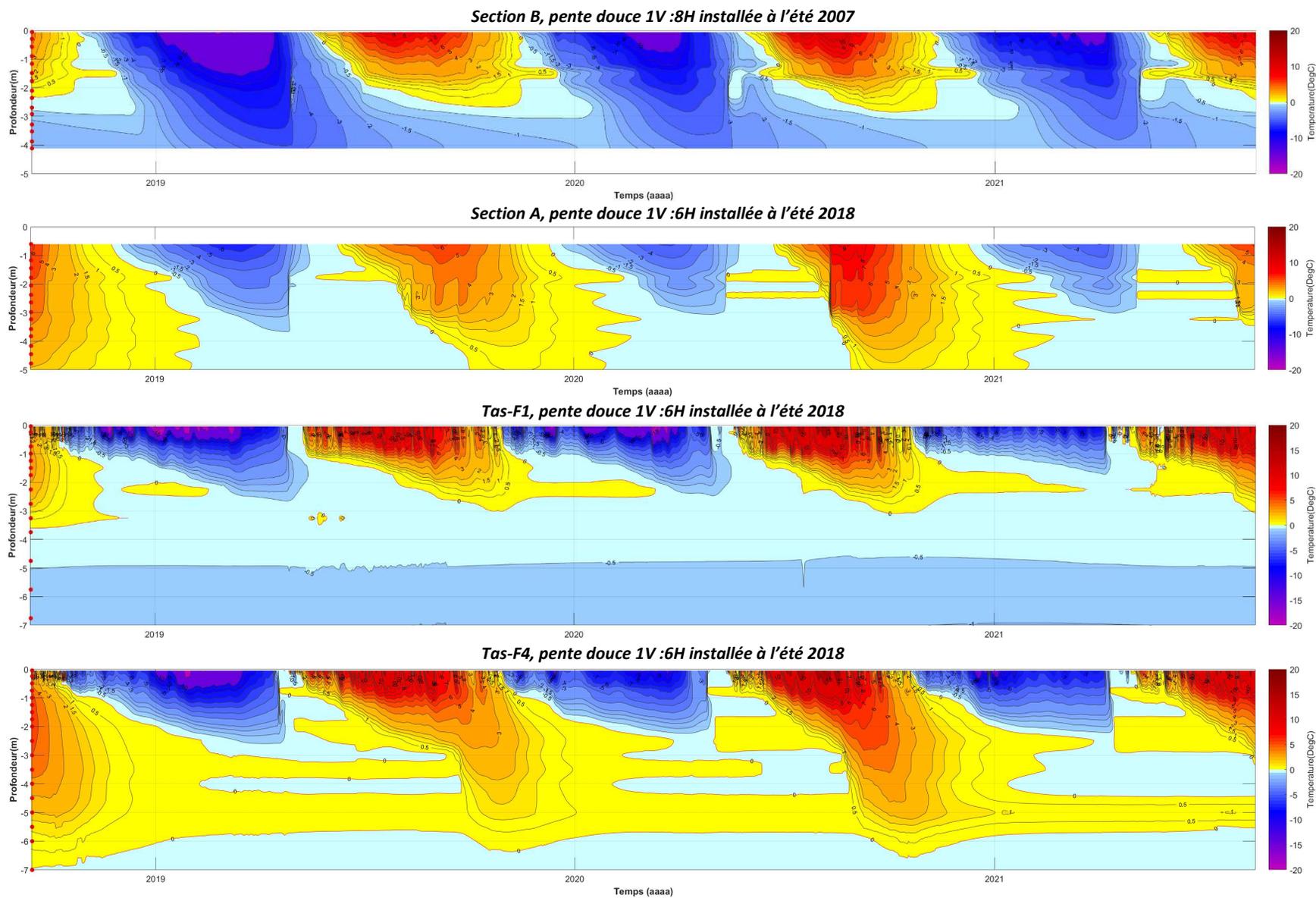


Figure 95 : Variations journalières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps pour la planche d'essai de la pente douce 1V :8H (section B) et les nouvelles pentes douces (1V :6H) (section A, Tas-F1 et Tas-F2) pour la période de septembre 2018 à août 2021, piste d'atterrissage de Tasiujaq.

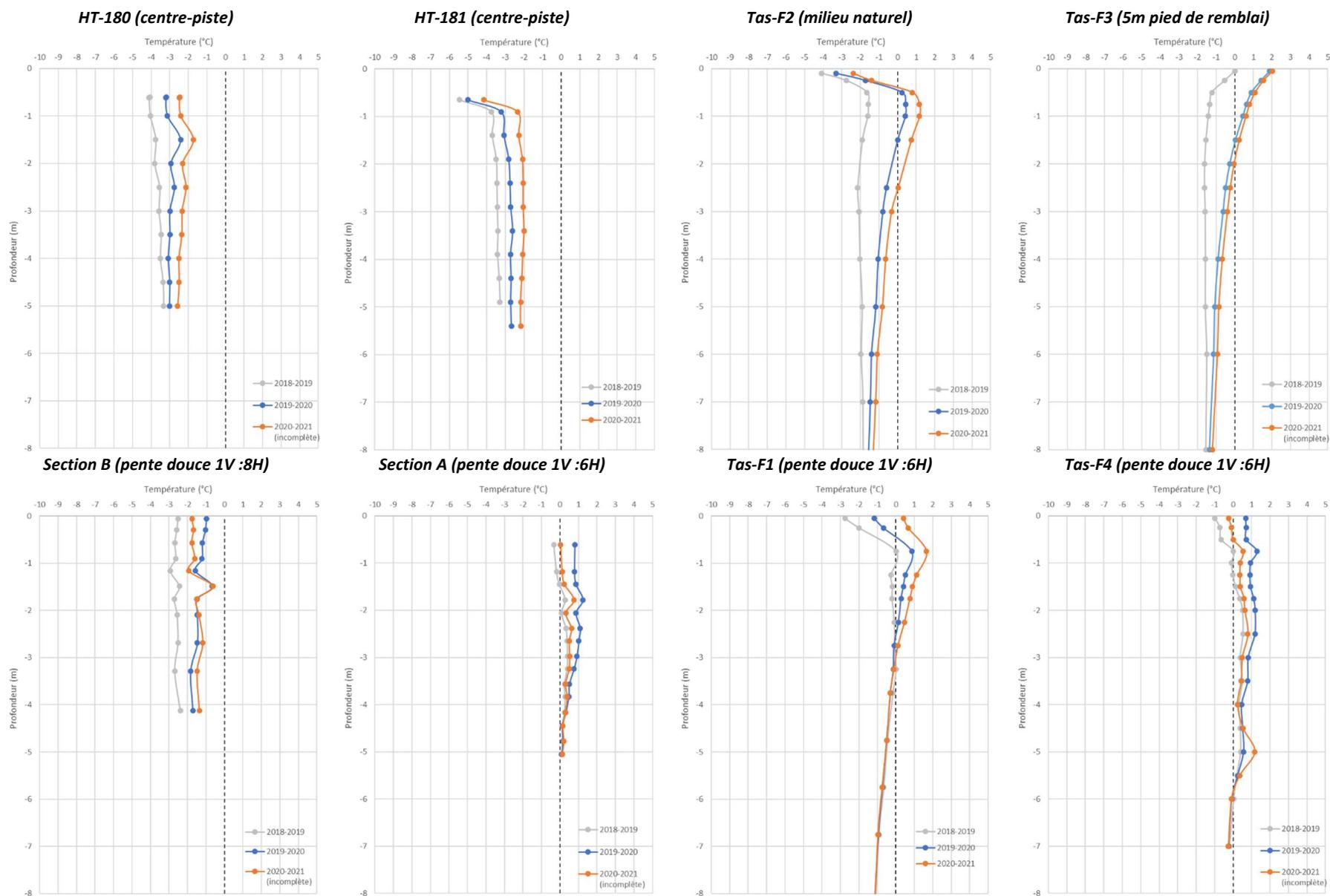


Figure 96 : Profils thermiques moyens annuels pour la période d'octobre 2018 à octobre 2021 pour les câbles à thermistances de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.

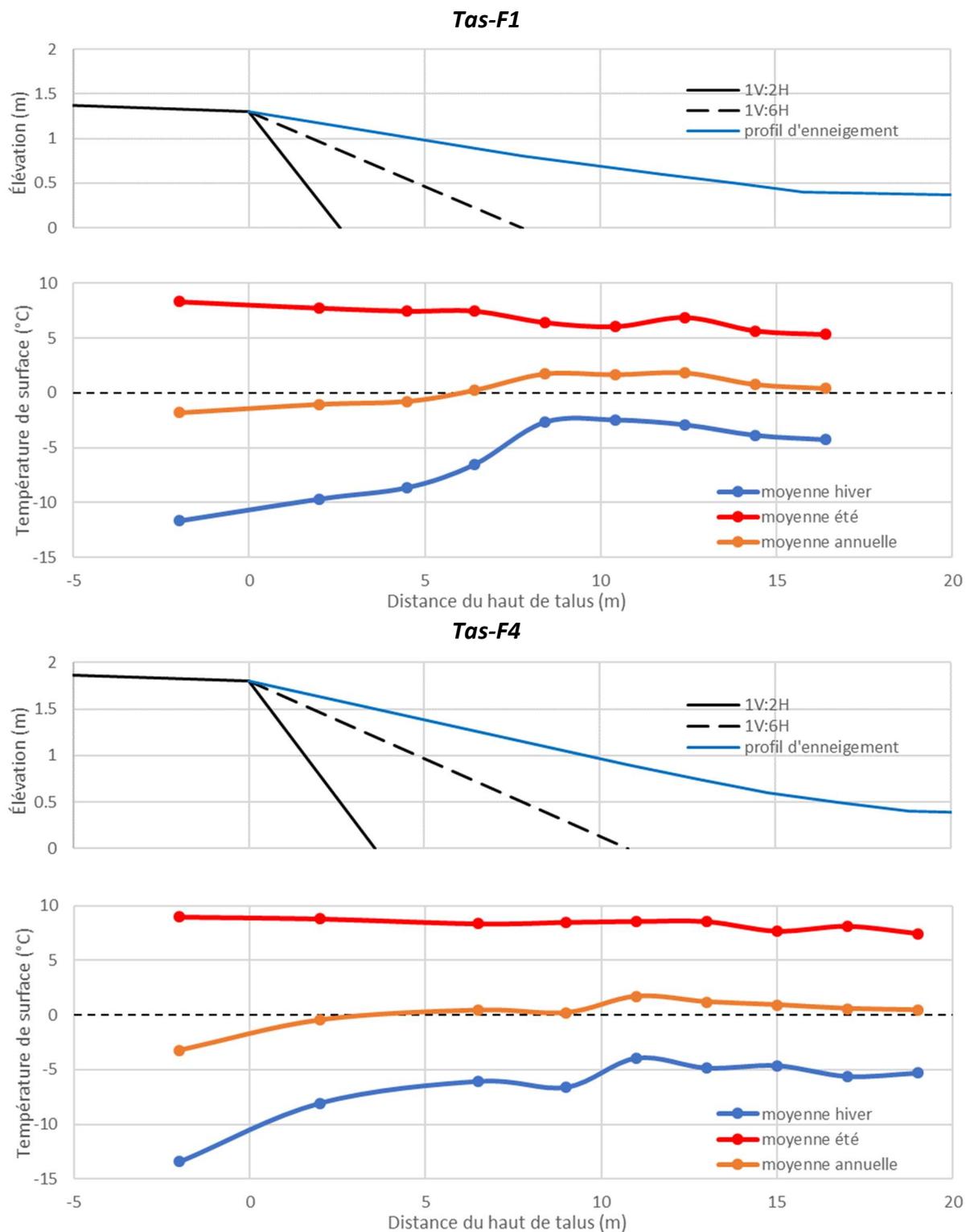
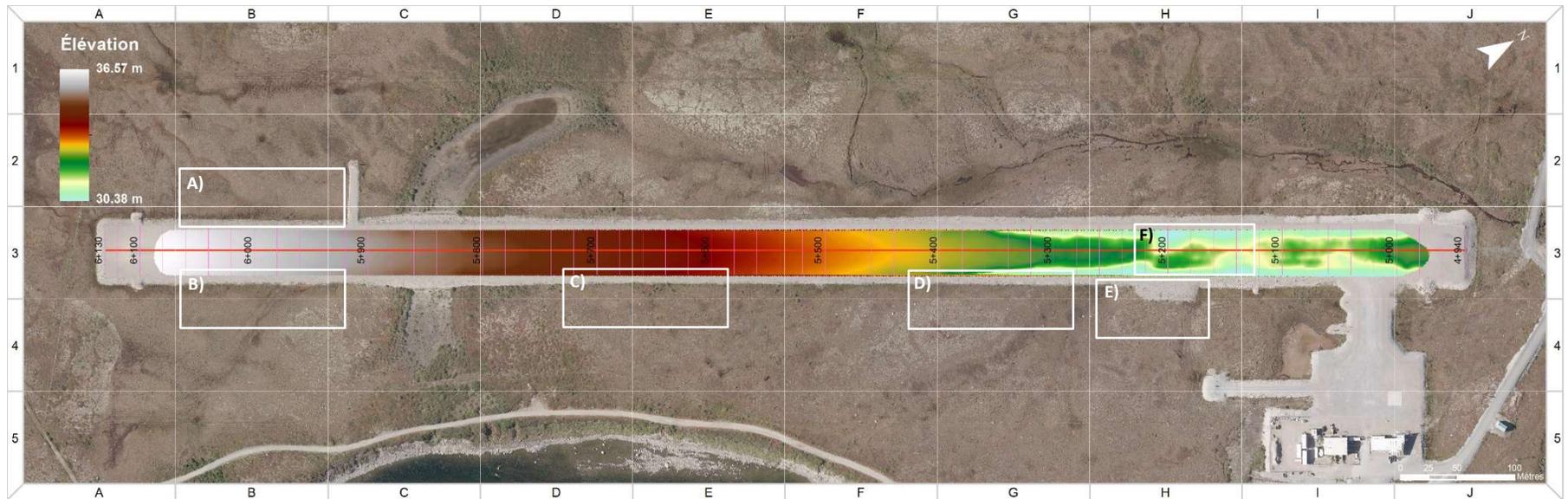


Figure 97 : Température moyenne de surface en été, en hiver et sur une base annuelle pour la période de septembre 2018 à octobre 2021 pour deux sections de pente douce instrumentées (Tas-F1 et Tas-F4). Les capteurs sont positionnés à quelques centimètres sous la surface le long d'un transect allant de l'accotement jusqu'à 8 m du pied de remblai.

1.6.4.5.2 PERFORMANCE MÉCANIQUE

Un relevé d'arpentage réalisé à l'été 2018 avant le début des travaux d'adaptations confirme que la section de la piste comprise entre les chaînages 5+000 m et 5+300 m présentait toujours d'importantes déformations qui affectent, à certains endroits, la largeur complète de la piste (Figure 98). Lors de l'adaptation de la piste en 2018, il était convenu aux plans et devis de procéder à des corrections mineures de ces dépressions sans toutefois procéder à un resurfaçage complet effaçant ainsi toute trace des déformations s'étant développées depuis le dernier rechargement qui remonte à 2007. Lors d'une visite de terrain effectuée à l'été 2021, certaines de ces déformations étaient toujours visibles, mais beaucoup moins importantes. Il est pour le moment impossible de déterminer si ces dernières ont continué de se développer après les travaux d'adaptation de 2018 ou si elles n'ont tout simplement pas été nivelées lors des corrections mineures apportées. Lors des visites de terrain à l'été 2019 et 2021, les accotements et les talus présentaient toujours des profils très rectilignes sans apparence de rotation des accotements (Figure 98A, B, C et D). En ce qui concerne les pieds de remblai, aucune accumulation d'eau n'a été observée, ce qui témoigne, pour le moment, d'une absence de dégradation du pergélisol en cours. Notons que la dégradation thermique du pergélisol, qui s'opère en pied de remblai, sous les talus et les accotements, est un processus lent et graduel. Par conséquent, seul un suivi plus long permettra de confirmer la stabilité à long terme de ces sections de l'infrastructure. D'après L'Hérault *et al.* (2012), certaines déformations, de par leurs géométries et leurs localisations adjacentes à des secteurs affectés par des problèmes de drainage, semblent découler d'une dégradation localisée du pergélisol par de possible écoulement d'eau au travers le remblai. Cette hypothèse reste toutefois à valider. Notons que l'ajout d'un fossé de drainage en pied de remblai du côté est (Figure 98E) et l'amélioration des conditions du drainage qui en résulte permettra définitivement de limiter l'influence de l'écoulement d'eau dans la dégradation du pergélisol si elle s'avère en cause.

La piste d'atterrissage de Tasiujaq dispose de quelques plaques de tassement relevées sporadiquement par le Ministère (Figure 91). Toutefois, les données de tassement qui y sont mesurées n'ont pas été comptabilisées depuis 2014. Le suivi des déformations à la plaque de tassement P-1, située dans la zone de déformations possiblement attribuables à des écoulements d'eau sous le remblai, permettra d'évaluer à long terme la stabilité de ce secteur critique de l'infrastructure.



A)

B)

C)



D)



E)



F)



Figure 98 : Patron de déformation de la surface de roulement de la piste d'atterrissage de Tasiujaq généré à partir du levé topographique réalisé par l'entrepreneur à l'été 2018 et aperçus généraux des talus à pente adoucie et surface de roulement quelques années après les travaux d'adaptation de la piste (2021).

1.6.4.5.3 EFFICACITÉ DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATIONS À LIMITER L'INFLUENCE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX DANS LA DÉGRADATION THERMIQUE DU PERGÉLISOL

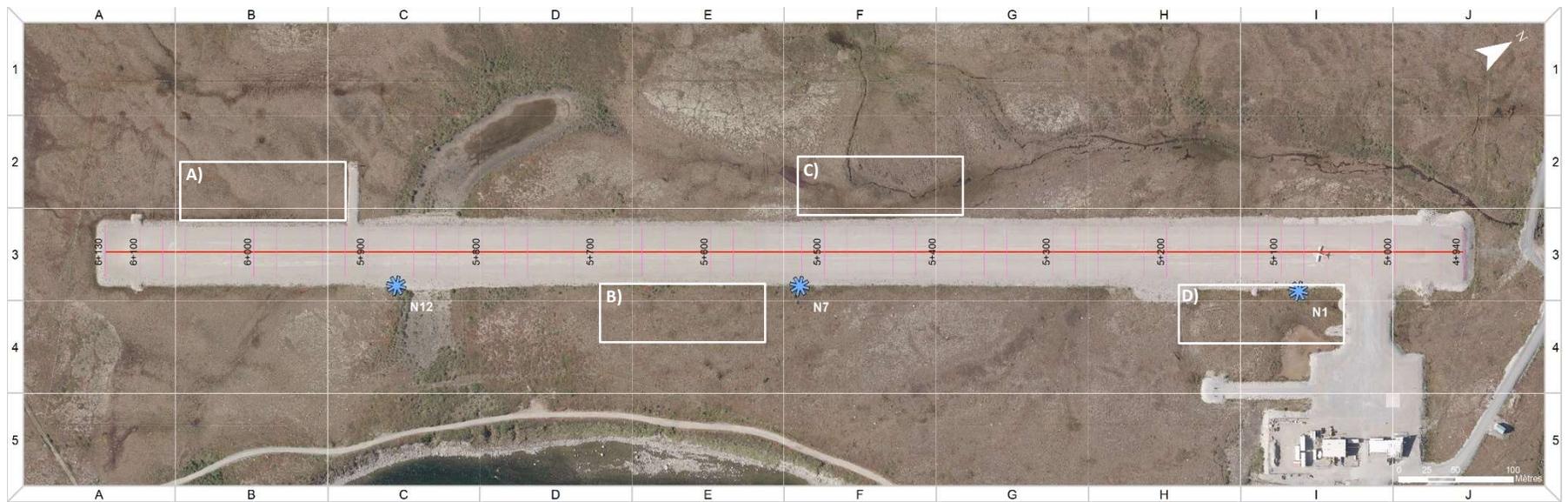
Compte tenu de l'importance du drainage et de l'enneigement dans la dégradation du pergélisol qui affecte la piste d'atterrissage de Tasiujaq, un effort considérable a été déployé afin de suivre la variation de ces conditions au cours de la période d'étude s'étalant du mois d'août 2018 au mois d'octobre 2020. Ce suivi repose essentiellement sur des observations visuelles effectuées à partir des photos prises par les quatre caméras automatisées localisées en pied de remblai, soit deux du côté ouest et deux du côté est (Figure 91). À noter que les caméras, comme celles installées aux autres aéroports, ont éprouvé de nombreux problèmes de fonctionnement. Toutefois, quoique fragmentaires, ces relevés photographiques ont permis de dresser un portrait assez juste des conditions d'enneigement en vigueur au cours de deux hivers (2018-2019 et 2019-2020) et des conditions de drainage au cours des étés 2019 et 2020. À ces observations, s'ajoutent également celles effectuées lors d'une visite sur le terrain au début de l'hiver et à la fin de l'hiver 2018-2019 et celles effectuées sur place par l'opérateur à pareille date en 2020.

La visite réalisée à la fin de l'hiver 2019 et les photos prises par l'opérateur en 2020 suggèrent que les patrons de distribution de la neige en bordure de la piste demeurent sensiblement les mêmes d'une année à l'autre. Le suivi photographique au site TasCam-1 indique que le couvert de neige atteint son épaisseur maximale assez rapidement dès la fin décembre pour ensuite se maintenir stable pour le restant de l'hiver. Les repères gradués indiquent également que l'épaisseur maximale du couvert de neige en pied de remblai atteint environ 0.8 m pour ensuite diminuer à environ 0.4 m à une distance de 8 m du pied de remblai. Pour ce même site, l'épaisseur de neige à mi-talus est d'environ 0.3 m. Un patron de distribution du couvert de neige similaire a été observé dans la section de l'infrastructure non adaptée du côté ouest (TasCam-2). Pour le côté est de la piste, les accumulations de neige au pied de la pente douce à l'emplacement de la caméra TasCam-3 sont d'environ 0.7 m à mi-talus, 1 m en pied de talus et 0.5 m à 8 m du pied de remblai. Toujours du côté est, mais pour le secteur du nouveau fossé de drainage (TasCam-4), la présence d'un creux topographique favorise d'importantes accumulations de neige en pied de remblai qui sont estimées à environ 1.4 m.

L'absence de relevé de neige aux mêmes emplacements avant la mise en place des pentes douces permet difficile de déterminer avec certitude que les conditions d'enneigement se sont améliorées suite à l'adaptation de la piste en 2018. Les patrons d'accumulation de neige observés au cours des années 2019 et 2020 semblent toutefois légèrement différer de ceux documentés par Allard *et al* (2007). Ces derniers avaient mesuré des épaisseurs de neige significativement plus importantes à l'extrémité sud de la piste du côté ouest et sur toute la longueur du côté est. Au cours des deux derniers hivers, les relevés photographiques suggèrent que les accumulations de neige sont sensiblement les mêmes autant du côté ouest que du côté est, voire légèrement plus importantes du côté ouest si l'on se fie au patron de distribution de la couverture de neige résiduelle observé à la fin de l'hiver 2019 (Figure 100). Le suivi des conditions d'enneigement effectué par le MTQ comporte seulement deux points de mesures d'épaisseur de neige faisant toujours l'objet d'un suivi actif. Il s'agit des sites de mesures N7 et N12, tous deux situés du côté est, mais positionnés respectivement aux chaînages 5+530 et 5+860 m (Figure 99). D'après les plus récentes mesures issues de ces relevés qui datent du 2 février 2020, les épaisseurs de neige mesurées atteignaient respectivement 0.6 m et 0.5 m aux sites N7 et N12. Pour la période complète du suivi des conditions d'enneigement avant la mise en place des pentes douces (2006-2018), la moyenne pour ces sites était de 1.21 m (N7) et 1.46 m (N12). À la lueur de ces observations, il semble y avoir une certaine amélioration des conditions d'enneigement aux emplacements des pentes douces, mais seul un suivi à plus long terme permettra de confirmer cette tendance. Notons que les épaisseurs de neige qui s'accumulent actuellement sur les pentes douces et aux pieds de remblai demeurent suffisantes pour entraîner un impact thermique sur le pergélisol.

En ce qui concerne le réseau de drainage, la piste ne dispose d'aucun fossé de drainage en pied de remblai à l'exception du nouveau fossé localisé du côté est entre les chaînages 5+140 m et 5+240 m. Le relevé

photographique du secteur est assuré par la caméra TasCam-4. Ce relevé confirme que les conditions de drainage, jadis très problématique dans le secteur (Figure 85C), se sont nettement améliorées. Par exemple, on remarque qu'au cours de la fonte printanière, l'eau qui s'accumule dans le secteur est rapidement drainée en l'espace de quelques jours par ce nouveau fossé. Au cours de la saison de dégel, le drainage des eaux de ruissellement est également assuré efficacement par ce fossé. Dans son ensemble, aucune évidence de formation de nouvelles mares d'eau n'a été observée au pied des pentes douces ce qui confirme, pour le moment, que les risques de dégradation thermique du pergélisol par l'eau en marge de l'infrastructure demeurent faibles.



A)

B)

C)

D)



2019



2019



2019



2019



2020



2020



2020



2020

Figure 99 : Aperçus des conditions de neige au mois de mai 2019 et 2020 le long de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.



Figure 100 : Patron de distribution de la couverture de neige résiduelle observé à la fin de l'hiver 2019, piste d'atterrissage de Tasiujaq.

1.6.4.6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Actuellement, seuls les câbles au centre-piste (HT-180 et HT-181) et dans la pente adoucie 1V :8H en place depuis 2007 montrent des profils thermiques avec un gradient thermique négatif (Figure 96) qui permet le maintien d'un pergélisol à une température similaire à celle mesurée en profondeur aux câbles Tas-F1 et Tas-F3 (-2°C à plus de 20 m de profondeur). Pour tous les autres sites de suivi thermique, les profils thermiques annuels moyens montrent des gradients thermiques généralement positifs (températures plus chaudes en surface qu'en profondeur), ce qui suggère qu'actuellement, les conditions à la surface des pentes douces ne permettent pas de maintenir le pergélisol à sa température d'équilibre. Le suivi thermique demeure néanmoins trop court pour confirmer cette tendance.

Signe toutefois encourageant pour les câbles installés au travers des nouvelles pentes douces (Section A, Tas-F1 et Tas-F4), les températures moyennes annuelles en surface, quoique variables d'une année à l'autre, ont été inférieures à 0°C à quelques reprises au cours des dernières années favorisant un certain refroidissement des profils thermiques. Notons qu'au cours des trois années de suivi post-adaptation, les deux dernières années (2019-2020 et 2020-2021) ont été significativement plus chaudes que la moyenne, particulièrement celle de 2020-2021 marquée par un hiver plus doux que la moyenne pour la période 2008-2021 (Tableau 22). Ce contexte climatique récent peut définitivement expliquer en partie la performance très modérée des pentes douces dans leur capacité à refroidir la section de sol dégelée et favoriser une reprise (remontée) du pergélisol sous les pentes douces. L'efficacité des pentes douces, en favorisant l'extraction de chaleur en hiver par la diminution de l'épaisseur de neige qui s'accumule sur les talus et pied de remblai, dépend principalement de ces températures froides en hiver, contexte climatique qui ne s'est pas présenté au cours de la dernière année de suivi (2020-2021). Il est également important de mentionner que les pieds de remblais, particulièrement aux sites de la section A et Tas-F4, étaient fortement dégradés thermiquement avant la mise en place des pentes douces. L'épaisse couche de sol dégelée pour ces sites ($> 5\text{-}6\text{ m}$ d'épaisseur) et la présence d'importantes quantités d'eau et de chaleur latente associée vont nécessiter des hivers froids, et ce, durant un certain temps avant de pouvoir montrer des signes de reprise du pergélisol plus encourageant (regel des bulbes non gelés présents en pied de remblai et désormais recouverts par les pentes douces). Le suivi thermique à long terme effectué depuis 2007 au site expérimental de la pente douce 1V :8H (section B) démontre que ce réajustement thermique peut prendre de 5 à 6 ans après la mise en place de la pente douce.

D'après les résultats de simulations numériques effectuées au site de Tasiujaq par Lanouette (2021), l'utilisation de pentes douces 1V :6H et les modifications des conditions d'enneigement anticipées suggéraient un regel complet du bulbe non gelé présent en pied de l'ancien remblai dans les quatre années suivant la mise en place des pentes douces, favorisant ainsi une remontée significative du pergélisol et un refroidissement marqué du profil de température dans le sol, sans toutefois rétablir un gradient négatif, mais plutôt légèrement positif (0.04°C/m). Le suivi thermique récent effectué au cours de la période 2008-2021 à plusieurs endroits sous les pentes douces affiche des profils thermiques sensiblement différents de ceux modélisés par Lanouette (2021). En raison de la très bonne correspondance obtenue par cette dernière entre les simulations et les mesures thermiques, il apparaît peu probable que ces différences découlent d'une mauvaise attribution des propriétés thermiques des matériaux. Il est toutefois possible que la quantité d'eau au sein de la couche dégelée ait été sous-estimée légèrement, mais demeure également peu probable en regard, encore une fois, à la très bonne correspondance entre les données de températures mesurées et celles simulées.

Actuellement, la principale hypothèse qui permet d'expliquer cette différence est une mauvaise évaluation de la distribution des épaisseurs de neige à l'intérieur du modèle numérique. Dans ses simulations, Lanouette (2021) avait estimé les épaisseurs de neige par une relation empirique développée par Tabler (1975) (Figure 101A et B). Toutefois, selon ses observations sur le terrain, cette relation semblait surestimer les épaisseurs de neige donc les valeurs de ces dernières avaient été revues à la baisse. Il est donc possible que les valeurs initialement proposées par le modèle de Tabler (1975) correspondent davantage aux conditions d'enneigement qui prévalent actuellement le long des talus à pente douce et au pied de remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq. Les observations de terrains effectuées dans le cadre du présent projet supportent cette hypothèse. En effet, les accumulations de neige observées et mesurées sur les talus 1V :6H sont plus importantes que celles estimées et utilisées dans les exercices de simulations numériques de Lanouette (2021). Les relevés de neige récents, quoique fragmentaires, démontrent qu'au cours des hivers 2019-2020 et 2020-2021, les épaisseurs de neige sur les pentes douces et les pieds de remblais, autant du côté est (Tas-F1) que du côté ouest (section A et Tas-F4), étaient suffisantes pour limiter considérablement l'extraction de chaleur en hiver comme en témoigne les mesures de températures enregistrées par les capteurs de températures positionnés le long de transect traversant l'accotement, le talus, le pied de remblai et le milieu naturel (Figure 97). Pour ces raisons, il apparaît donc très probable que les différences dans l'épaisseur et la répartition du couvert nival entre les observations et celles utilisées par Lanouette (2021) soient à l'origine de la divergence entre les régimes thermiques simulés et ceux mesurés aux emplacements des nouvelles pentes douces 1V :6H.

La très bonne performance thermique de la section de la piste ayant une pente de talus plus douce (section B, 1V :8H) par rapport à celle utilisée dans la stratégie d'adaptation (1V :6H), performance confirmée par les travaux de Ficheur (2011), de Baron-Hernandez (2019) et ceux réalisés dans la présente étude, confirme l'influence notable de la pente sur l'efficacité des pentes douces. La relation entre l'angle des pentes douces et leur capacité à refroidir le sol d'infrastructure sous celles-ci a été documentée par Lanouette (2021). De par la fonction logarithmique inverse de cette relation (Figure 101C), même si la différence entre une pente de 1V :8H et 1V :6H demeure faible, l'impact sur la capacité de refroidissement de la température à l'interface entre la base du remblai et le sol d'infrastructure est considérable et peut atteindre plusieurs degrés Celsius. Dans un contexte où le pergélisol est particulièrement chaud, les hivers doux et en présence d'une importante dégradation thermique des accotements avec une contribution probable de chaleur latente, comme c'est le cas à Tasiujaq, ces quelques degrés de différence à l'interface auraient certainement favorisé une meilleure extraction de la chaleur et conséquemment permis une reprise du pergélisol plus prononcée. Au-delà de l'augmentation de l'efficacité d'extraction de chaleur des pentes douces, l'utilisation d'une pente plus douce permet également de réduire la largeur de la zone où l'épaisseur de neige sur les talus et les pieds de remblai atteint le seuil critique de 0.4 m estimé par Lanouette (2021) (Figure 101D et E). Il s'agit ici d'un autre avantage qui découle de l'utilisation d'une pente de talus plus douce à celle de 1V :6H actuellement utilisée.

Le suivi thermique demeure actuellement trop court pour pleinement évaluer l'efficacité des pentes douces. Une succession d'années froides avec des hivers peu neigeux pourrait contribuer au regel des bulbes dégelés toujours présents sous les pentes douces. Le maintien du suivi thermique à plus long terme est donc à préconiser. La zone de transition entre les bas de talus des pentes douces et le terrain naturel représente une zone extrêmement sensible à la dégradation du pergélisol en raison de la faible épaisseur de matériau qui recouvre le sol naturel et la diminution de l'albédo attribuable à la couverture de gravier. Il sera pertinent de suivre l'évolution des nouveaux talus et pieds de remblai pour déceler tout signe de dégradation du pergélisol en cours. Parmi ces signes, une attention particulière devra être portée aux accumulations d'eau, bon indicateur d'une dégradation thermique du pergélisol.

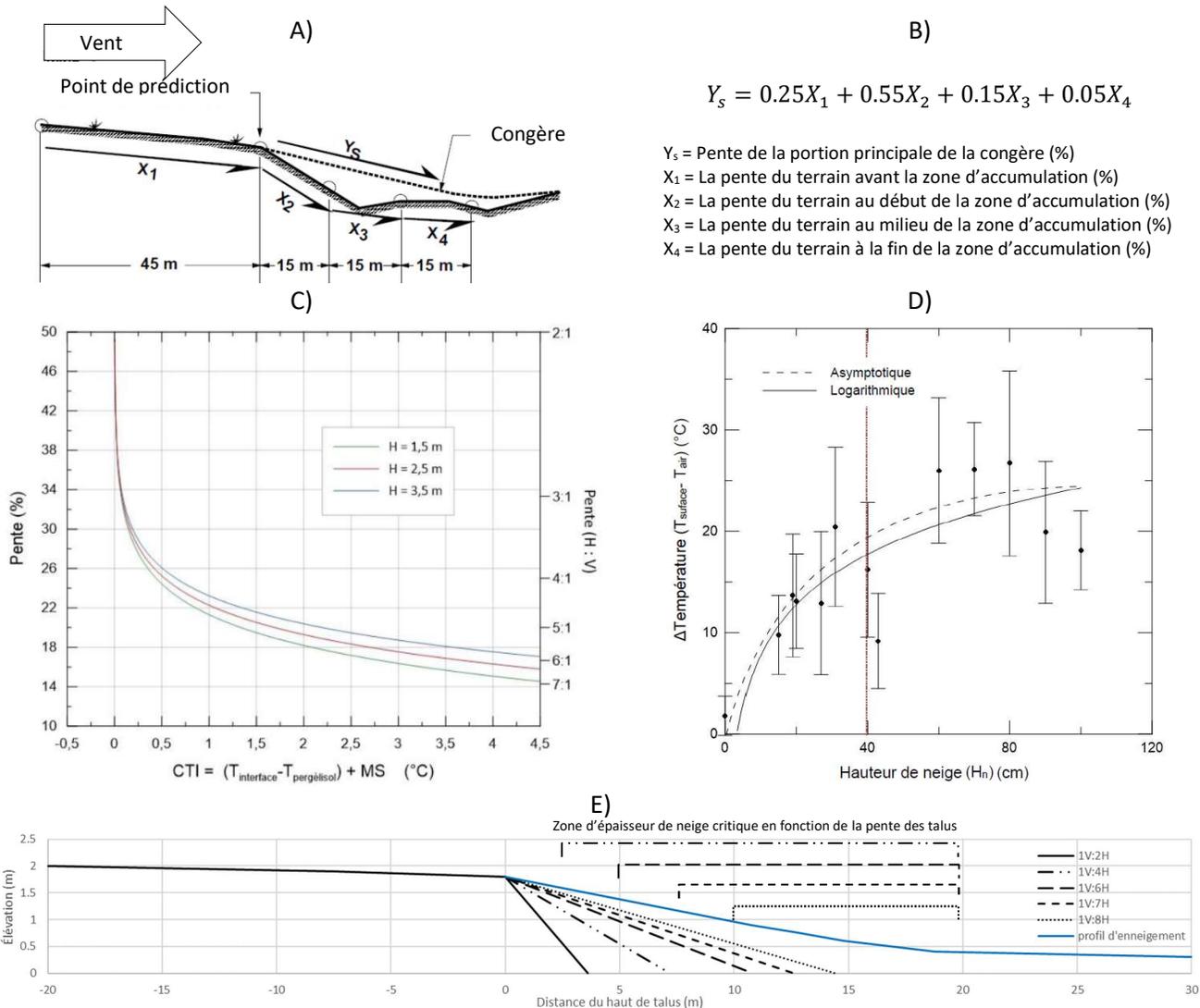


Figure 101 : A et B) Relation empirique pour estimer les épaisseurs de neige en fonction de la topographie du site développée par Tabler (1975). C) Relation empirique entre l'angle des pentes douces et leurs capacités à refroidir les températures à l'interface base du remblai/sol naturel (CTI) (tirée de Lanouette, 2021). D) Différence de température entre l'air et la surface du sol en fonction de la hauteur de neige accumulée (tirée de Lanouette, 2021). Cette relation suggère une épaisseur de neige critique évaluée à 40 cm pour la piste d'atterrissage de Tasiujaq. E) Schématisation de la réduction de cette zone d'épaisseur de neige critique en fonction de différentes valeurs de pente pour les talus.

1.6.5 LA PISTE D'ATTERRISSAGE DE QUAQTAQ

1.6.5.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

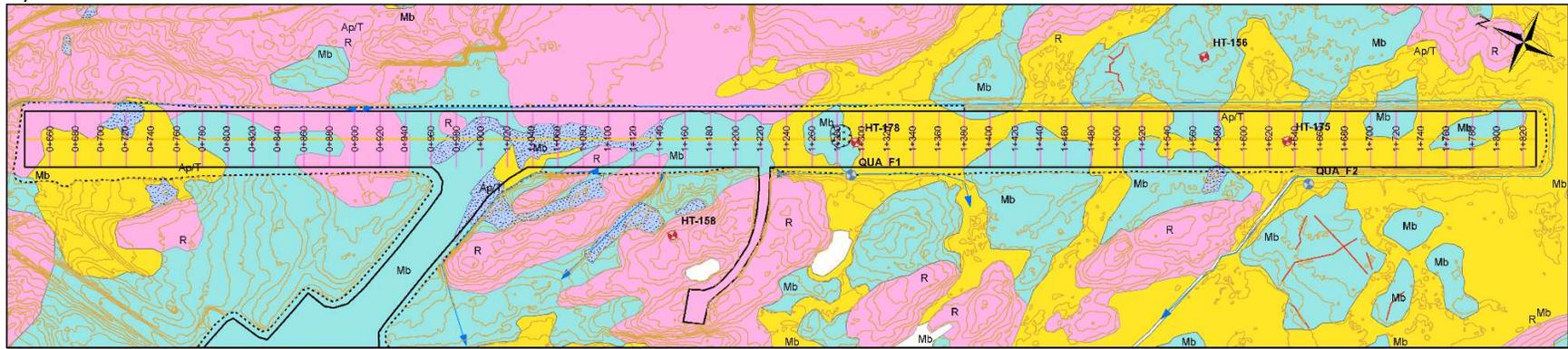
Situé dans la zone de pergélisol continu à une altitude d'environ 30 m, l'aéroport de Quaqtac a été achevé en 1989. D'après les plans « tel que construit », la piste d'atterrissage de Quaqtac est orientée dans un axe nord-ouest sud-est (155-335°) avec une longueur totale de 1190 m, du chaînage 0+640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

D'après la carte des unités géologiques de surface produite par L'Hérault et al. (2012) (Figure 102A), la piste d'atterrissage de Quaqtac repose sur trois unités qui se résument à : 1) des affleurements rocheux (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). 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 (R), 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 (Ap). Une bonne partie de la piste, entre la voie de circulation et les indicateurs de pente d'approche (PAPI), est d'ailleurs établie directement sur une surface rocheuse nivelée (R) (L'Hérault et al., 2012). À la transition entre le roc et les dépôts meubles, soit à partir du chaînage 1+120 m, la section sud de la piste repose soit sur des alluvions sur till mal drainés (Ap/T) ou sur des buttes composées de sables et graviers pré-littoraux riches en coquilles et sillonnées en surface par des fentes de gel non organisées sans présence coins de glace (Allard et al., 2007). À partir du chaînage 1+350 m jusqu'au 1+675 m, la présence d'un réflecteur localisé à une profondeur d'environ 5 m de profondeur sous le centre-piste avait été identifié par L'Hérault et al. (2012) comme étant le contact entre les dépôts meubles et le roc sous-jacent (Figure 102B). 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, donc relativement stable au dégel (L'Hérault et al., 2012). L'épaisseur de cette unité est relativement variable, mais d'après les sondages réalisés avant (Terratech, 1984), pendant (Allard et al., 1988; Allard et al., 1993) et après la construction de la piste (Allard et al., 2007; L'Hérault et al., 2012), elle est généralement comprise entre 2 et 3 m. Ces dépôts reposent sur les affleurements rocheux entre le chaînage 0+800 et 1+140 m et recouvrent le till sous-jacent à l'extrémité nord de la piste (0+640 m et 0+800 m) et dans la section sud entre les chaînages 1+140 et 1+820 m (Figure 102). Les épaisseurs du till, d'après les forages réalisés avant la construction de la piste d'atterrissage (Terratech, 1984) ainsi que ceux réalisés en 2009 (L'Hérault et al., 2012), semblent généralement comprises entre 1 et 2 m, mais vraisemblablement plus importantes à l'intérieur des dépressions qui caractérisent 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 m, des relevés de résistivité électrique et de polarisation provoquée réalisés par Lévesque et al. (1990) suggéraient la présence d'une petite cuvette d'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 que Savard (2006) nota une atténuation du signal des ondes électromagnétiques à partir de 4 m de profondeur associée à une faible résistivité électrique possiblement attribuable à la présence de dépôts fin silteux. À noter qu'avant la construction, ce secteur avait la forme d'une butte au sommet plat ou légèrement convexe et surélevée d'environ 1,8 m (butte cryogène) dont le sommet avait été nivelé à l'automne 1987, créant un secteur en déblai circonscrit entre les chaînages 1+260 m et 1+300 m. 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.

Les quelques forages réalisés en bordure de piste en 2009 (L'Hérault et al., 2012) n'ont malheureusement apporté que très peu d'information sur la sensibilité au dégel des dépôts d'alluvions et de till présent sous une bonne partie de la piste limitant ainsi une évaluation adéquate des tassements potentiels advenant un dégel du pergélisol. Néanmoins, les nombreuses études antérieures (Beaulac et Doré, 2005; Beaulac, 2006; Allard et al.,

2007) confirment l'absence de problème majeur à l'exception d'un secteur très limité entre les chaînages 1+260 et 1+320 où une légère dépression est apparue autour de 2005 et a continué d'évoluer jusqu'en 2011 pour ultimement affecter toute la largeur de la piste (Figure 103). Les connaissances sur le contenu en glace du sol et les dimensions de la zone affectée, quoique sommaires, suggéraient des tassements localisés et d'une ampleur limitée (L'Hérault *et al.*, 2012). Des infiltrations d'eau au travers du remblai dans le secteur avaient été identifiées comme étant potentiellement à l'origine de cette dépression et, selon la microtopographie de la surface du terrain naturel sous la piste entre les chaînages 1+200 m et 1+830 m, L'Hérault *et al.* (2012) avaient avancé la possibilité que d'autres voies préférentielles d'écoulement d'eau puissent se créer sous la piste advenant l'épaississement de la couche active. Pour cette raison, outre un entretien régulier à court terme consistant simplement à combler les dépressions avec du gravier au besoin, il avait été recommandé de prévenir les infiltrations d'eau sous la piste et contrôler davantage l'enneigement et le drainage à moyen terme pour préserver l'intégrité du pergélisol en périphérie et sous la piste d'atterrissage (L'Hérault *et al.*, 2012).

A)



B)

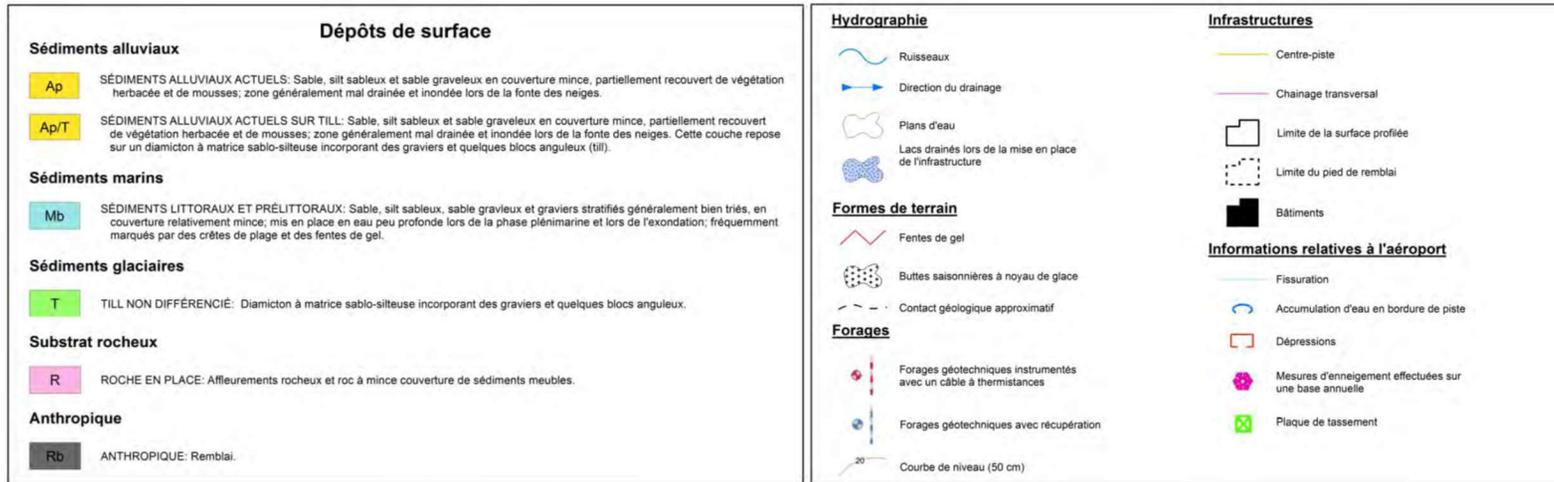
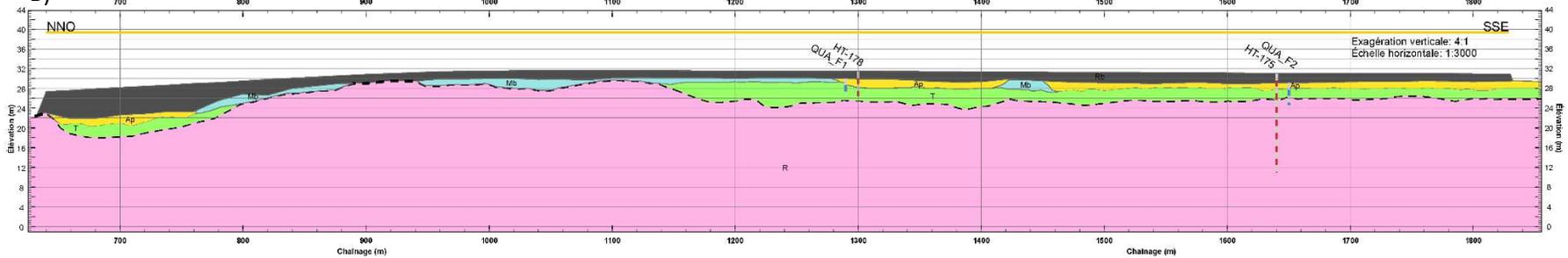


Figure 102 : A) Cartographie des dépôts de surface et B) coupe stratigraphique synthèse, piste d'atterrissage de Quaqtaq (Tirée de L'Hérault *et al.*, 2012).

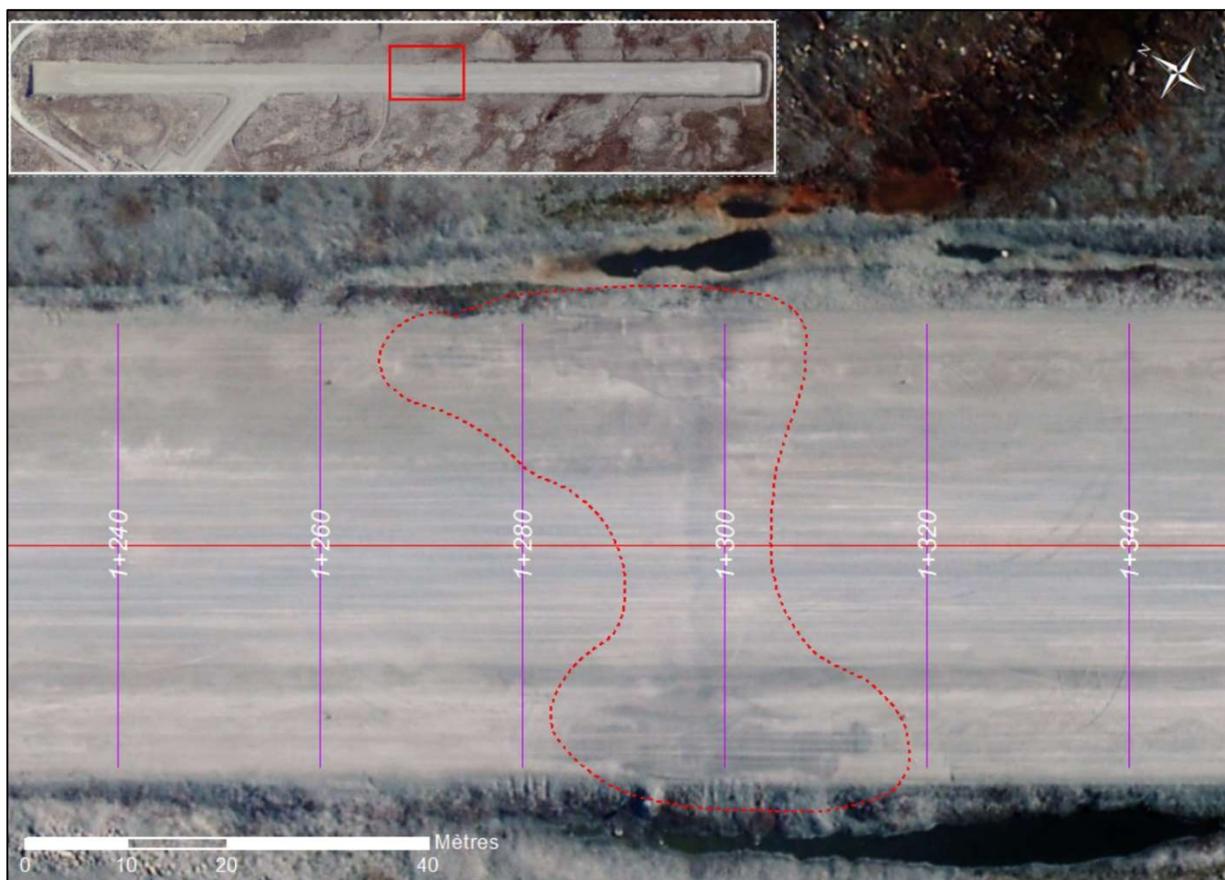


Figure 103 : Vue aérienne datant de 2010 où une légère dépression est apparue autour de 2005 et a continué d'évoluer jusqu'en 2011 pour affecter toute la largeur de la piste de Quaqtq. La superficie du secteur affecté est délimitée approximativement par la ligne pointillée rouge. La présence d'eau de part et d'autre du remblai et la morphologie linéaire de la dépression suggèrent une dégradation thermique du pergélisol causée par un écoulement d'eau très localisé.

1.6.5.2 STRATÉGIE D'ADAPTATION MISE EN PLACE

Complétée à l'automne 2012, la stratégie d'adaptation proposée pour la piste de Quaqtq et présentée à la figure 104A avait pour objectif de diminuer le risque d'une dégradation thermique du pergélisol causé par de possibles écoulements d'eau dans et sous le remblai de la piste, spécifiquement entre les chaînages 1+200 et 1+830 m. Les travaux complétés consistaient à : remblayer le fossé existant et adoucir la pente du remblai (1V :8H) côté est (Figure 104A et B) et imperméabiliser le talus sur une longueur de 75 m (1+260 à 1+335 m) (Figure 105). Au pied de la section du remblai à pente adoucie, un nouveau fossé de drainage a été excavé au sein des dépôts meubles sur une profondeur généralement comprise entre 1 à 1.5 m (Figure 105). À noter que parallèlement aux travaux d'adaptation, les accotements de la piste ont également été élargis de plus ou moins 0.5 m et les pentes du talus réajustées en conséquence, forçant un repositionnement des fossés existants sur pratiquement toute la longueur de l'infrastructure. À l'extrémité sud de la piste, un nouveau fossé de décharge a également été ajouté afin de favoriser le drainage du terrain avoisinant la piste, particulièrement lors de la fonte printanière (Figure 104A et B).

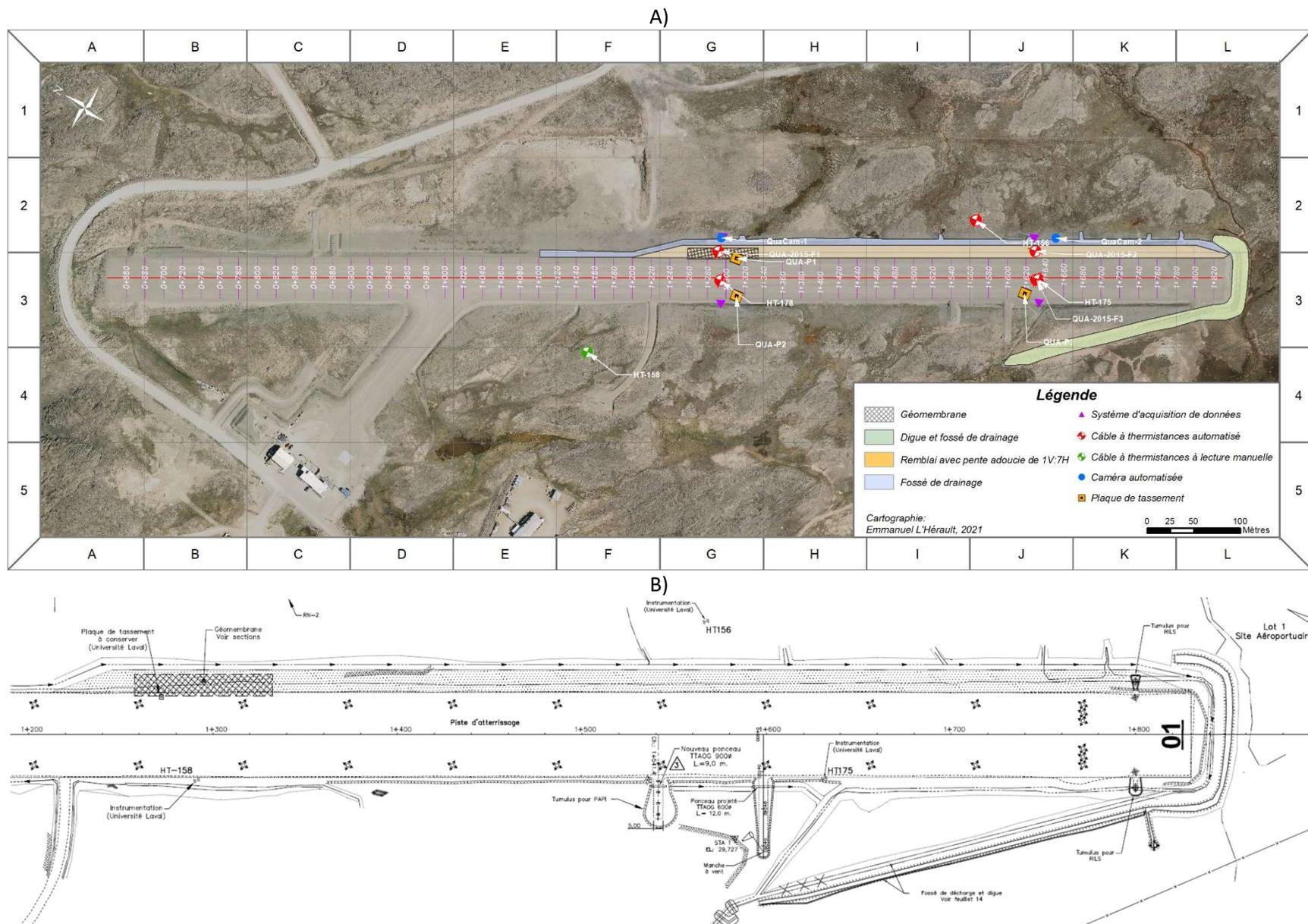


Figure 104 : A) Aperçu générale de la stratégie d'adaptation proposée pour la piste d'atterrissage de Quaqtaq. Vues en plan tirées des plans originaux tel que construit (no. :PA-7202-154-04-1162) du remblai à pente adoucie avec section munie d'une géomembrane, du nouveau fossé de drainage côté est et du fossé de décharge avec digue extrémité sud.

Description des matériaux	
①	MG-20b modifié épaisseur variable
①a	MG-20b modifié épaisseur 150mm
①b	MG-20b modifié épaisseur 300mm
②	MG-56, 250mm
②a	MG-56, 550mm
③	Matériau d'emprunt de carrière
④	Terrain naturel
⑤	Ponceau TTAOG 600ø
⑥	Empierrement calibre 100-200
⑦	Empierrement calibre 200-300

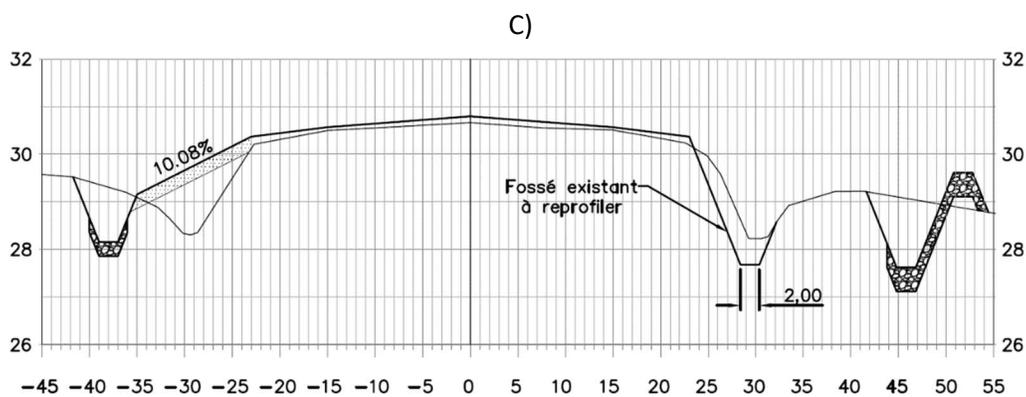
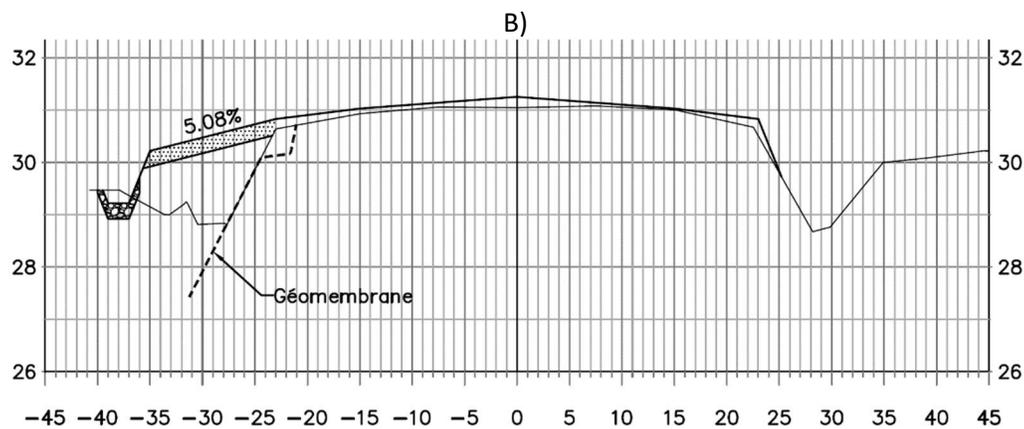
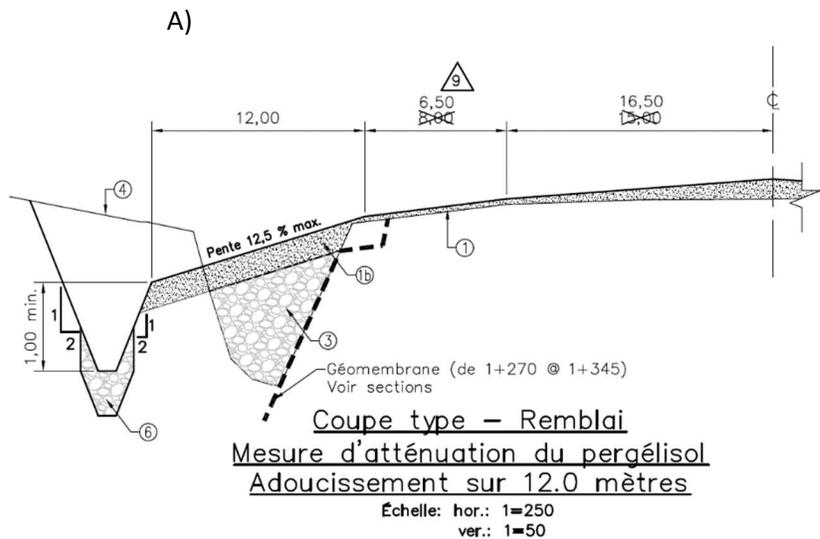


Figure 105 : A) Coupe type tirée des plans tel que construit illustrant la mesure d'atténuation contre le dégel du pergélisol (pente douce avec géomembrane) mise en place du côté est entre les chaînages 1+260 m et 1+340 m, piste d'atterrissage de Quaqtq. Sections transversales tirées des plans tel que construit aux chaînages B) 1+300 m et C) 1+760 m. (Plan no. :PA-7202-154-04-1162).

1.6.5.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts de la mise en place de la stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Quaqaq sont présentés au tableau 23. À l'intérieur de ce tableau, les coûts tirés du bordereau de paiements associé au devis no. 7202-12-3501 ont été regroupés selon les différentes mesures d'adaptation mises en place. D'après la compilation de ces coûts, les coûts des travaux d'adaptation portant spécifiquement au remblayage du fossé existant et l'adoucissement des pentes de talus du côté est, l'imperméabilisation du talus et la réalisation des fossés de drainage et de décharge totalisent un coût de 849 885.50\$. À noter que les coûts associés à l'élargissement de la piste, ne faisant pas partie de l'adaptation de la piste, ont été exclus.

Lors de la mise en place de la stratégie d'adaptation, des travaux d'entretien ont également été réalisés et consistaient à la scarification, nivellement et rechargement de 21 650 m² de piste, le nettoyage des fossés sur une longueur de 810 m et la mise en réserve de 3085 m³ de MG20b modifié. Le coût de ces travaux d'entretien est estimé à 837 580\$. À noter que la dernière intervention portant sur l'entretien de la piste remonte en 2004 et se résumait à un rapiéçage entre les lumières nécessitant environ 500 m³ de gravier.

Tableau 23 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Quaqaq.

Année	Mesures	Description	Coût (\$)
2012	Remblayage du fossé existant et adoucissement des pentes de talus	Remblayage du fossé et adoucissement des pentes	24 720.00
		Granulats concassés MG 20b modifié	175 365.00
		Sous-total =	200 085.00
	Imperméabilisation du talus (75 m)	Imperméabilisation de talus	79 800.00
		Geotextile de type III	31 930.00
		Sous-total =	111 730.00
	Fossés de drainage et de décharge	Fossés latéraux, avec fond d'excavation à 1 m	22 971.00
		Revêtement de protection fossé 1 m	129 672.00
		Fossés latéraux, avec fond d'excavation à 2 m	20 775.00
		Revêtement de protection fossé 2 m	165 514.50
		Fossé de décharge	9 300.00
Revêtement de protection fossé de décharge		189 838.00	
	Sous-total =	538 070.50	
Total travaux d'adaptation =			849 885.50
2012-2020	Entretien	Scarification et nivellement de la piste (2012)	79 420.00
		MG 20b modifié (rechargement) (2012)	553 964.00
		MG 20b modifié (mise en réserve) (2012)	191 239.00
		Nettoyage de fossés (2012)	12 956.80
		Total travaux d'entretien =	837 579.80
Grand total =			1 687 465.30

1.6.5.4 INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DE PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION

Lors de la construction de la piste d'atterrissage, quatre câbles à thermistances ont été installés dans le secteur de l'aéroport. Trois d'entre eux atteignent des profondeurs d'environ 20 m et ont été installés respectivement dans le roc (HT-158), dans les sables et graviers à 80 m à l'est du centre-piste (HT-156) et au travers du remblai et des sables et graviers dans le centre de la piste (HT-175). Un quatrième câble, plus court, traverse le remblai au chaînage 1+290 m et pénètre le dépôt de sable silteux jusqu'à une profondeur de 5 m (HT-178). En 2015, quelques années après la mise en place des pentes douces, deux câbles additionnels ont été mis en place au travers le talus de la pente adoucie. Il s'agit des câbles QUA-2015-F1 et QUA-2015-F2 qui pénètrent jusqu'à une profondeur d'une dizaine de mètres sous la surface, sensiblement vis-à-vis l'ancien pied de remblai. Lors des travaux de réfection de la piste en 2012, le câble HT-175 a été sectionné en bord de piste puis remplacé en 2015 par le câble QUA-2015-F3.

La piste d'atterrissage dispose de trois plaques de tassement installées dans les accotements le long de la piste (Figure 106). La plaque de tassement P-1 et les plaques P-2 et P-3 ont été respectivement installées en 2009 et 2014. Dans le cadre de ce projet de recherche, deux caméras ont été installées à l'été 2018 en bordure de la piste d'atterrissage. Ces deux caméras ont été spécifiquement positionnées pour assurer un suivi des conditions d'enneigement et de drainage pour la section du remblai avec pente adoucie, plus spécifiquement entre les chaînages 1+300 m à 1+660 m). Un plan de localisation de l'ensemble de l'instrumentation pour l'aéroport de Quaqtq est présenté à la figure 106 et les caractéristiques techniques des câbles à thermistances et caméras automatisées sont résumées respectivement aux tableaux 24 et 25.

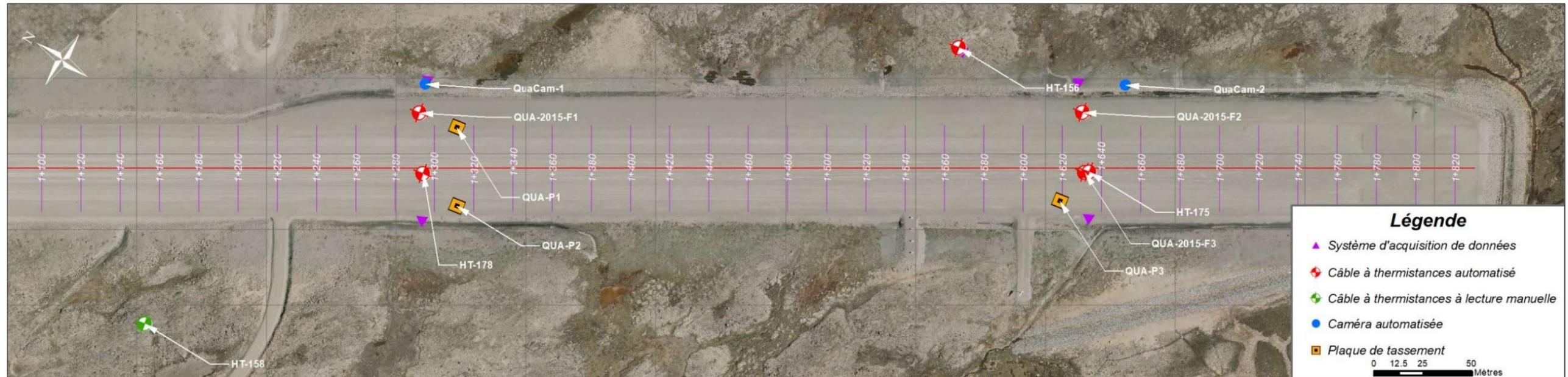


Figure 106 : Instrumentation existante et celle installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques d'adaptation mises en place à l'aéroport de Quaqtaq.

Tableau 24 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans l'enceinte de l'aéroport de Quaqtaq qui seront utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.

No. forage	Localisation	Orientation	Longueur (m)	Nb. thermistances	Répartition des thermistances (m)	Zéro de référence	Mise en service	Type lecture/système	Paramètres mesurés	État
HT-156	Terrain naturel	Vertical	19.56	11	-0.56; -1.56; -2.56; -3.56; -5.56; -7.56; -9.56; -11.56; -14.56; -17.56; -19.56	Surface terrain	1988-06-26	Automatisée/CR1000	Température du sol/air	Fonctionnel
HT-158	Terrain naturel	Vertical	20.37	11	-1.37; -2.37; -3.37; -4.37; -6.37; -8.37; -10.37; -12.37; -15.37; -18.37; -20.37	Surface terrain	1988-06-26	Lectures manuelles	Température du sol	Fonctionnel
HT-175	Remblai (CL)	Vertical	20.55	11	-1.55; -2.55; -3.55; -4.55; -6.55; -8.55; -10.55; -12.55; -15.55; -18.55; -20.55;	Surface terrain	1988-06-26	Automatisée/CR1000	Température du sol	Non fonctionnel
HT-178	Remblai (CL)	Vertical	5.00	11	-0.45; -0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3; -3.5; -4; -4.5; -5;	Surface terrain	1988-06-26	Automatisée/CR1000	Température du sol	Fonctionnel
QUA-2015-F1	Talus pente douce	Vertical	10.00	12	-0.15; -0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3.5; -4.5; -5.5; -6.5; -8; -10	Surface terrain	2015-10-11	Automatisée/CR1000	Température du sol	Fonctionnel
QUA-2015-F2	Talus pente douce	Vertical	10.00	12	-0.15; -0.5; -1; -1.5; -2; -2.5; -3.5; -4.5; -5.5; -6.5; -8; -10	Surface terrain	2015-10-11	Automatisée/CR1000	Température du sol	Fonctionnel
QUA-2015-F3	Remblai (CL)	Vertical	20.25	12	-0.25; -1.25; -2.25; -3.25; -4.25; -6.25; -8.25; -10.25; -12.25; -15.25; -18.25; -20.25	Surface terrain	2016-09-30	Automatisée/CR1000	Température du sol	Fonctionnel

Tableau 25 : Caractéristiques techniques des caméras automatisées installées en août 2018 le long de la piste d'atterrissage de Quaqtaq.

Nom	Coordonnées MTM (m)			Chainage (m)	Distance du CL (m)	Hauteur caméra (m)		Orientation (°)	Photos/jour	Date d'installation
	x	y	z			sol	CL			
A) QuaCam-1	352 530.890	6 770 286.816	31.68	1+295	43.00	1.5	0.04	300	4	2018-09-04
B) QuaCam-2	352 686.359	6 769 965.717	32.03	1+653	42.50	1.5	0.71	127	4	2018-09-08



1.6.5.5 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE THERMIQUE ET MÉCANIQUE DU REMBLAI DE LA PISTE D'ATERRISSAGE DE QUAQTAQ POUR LA PÉRIODE 2013-2020

1.6.5.5.1 PERFORMANCE THERMIQUE

À l'image de l'ensemble du Nunvaik, le climat récent pour la communauté de Quaqtac est demeuré relativement stable pour la période 2009-2020. Outre l'année 2009-2010, qui a été particulièrement chaude et qui est d'ailleurs considérée comme étant la plus chaude jamais enregistrée partout au Nunavik, le contexte climatique récent à Quaqtac a été favorable au maintien de conditions thermiques froides au sein du pergélisol. Pour la période de suivi de la performance de la stratégie d'adaptation qui s'étend de 2009 à 2020, la température moyenne annuelle de l'air est de $-5.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ et on observe une légère tendance au refroidissement (Figure 107) marquée par quelques années particulièrement froides (Tableau 7). Ce fut le cas pour les années de 2014-2015 et 2017-2018 pour lesquelles les hivers ont été plus longs et plus froids que la moyenne et les étés plus courts et plus frais.

L'absence d'un suivi thermique en pied de remblai avant la mise en place de la pente adoucie et au cours des quelques années qui ont suivi ne permet pas de pleinement quantifier les bénéfices thermiques apportés par la stratégie d'adaptation implantée en 2012. Néanmoins, depuis 2015, le suivi thermique assuré par les câbles QUA-2015-F1 et QUA-2015-F2 sous la pente adoucie indique que le plafond du pergélisol se situe respectivement à environ 2.43 et 2.25 m de profondeur sous la surface du remblai. Selon l'épaisseur des matériaux granulaires ajoutés, soit environ 1.3 m pour les deux emplacements, le front de dégel pénètre désormais tout au plus de 1 à 1.15 m dans le sol naturel sous la pente adoucie. Considérant que l'épaisseur de la couche active en milieu naturel non perturbé (câble HT-156) atteignait un peu plus de deux mètres en 2020, la position actuelle du front de dégel sous les accotements, même si elle a légèrement augmenté depuis 2016 (Tableau 27), demeure bien en deçà de ce seuil critique. La situation est d'autant plus encourageante si l'on estime que le front de dégel en pied de remblai avant l'adaptation de la piste atteignait vraisemblablement une profondeur plus importante qu'en milieu naturel en raison des accumulations de neige et des conditions de drainage. En comparaison avec les profondeurs maximales de dégel rencontrées au centre-piste (câbles HT-175 et HT-178), celles dans la section de la pente adoucie sont très similaires et montrent des fluctuations interannuelles synchrones dont l'amplitude est intimement liée au nombre de degrés-jours de dégel (Tableau 27).

Le suivi complet du régime thermique pour la période de 2011 à 2020 et pour les câbles à thermistances localisés au centre-piste (HT-175 et HT-178) et dans la pente douce (QUA-2015-F1 et QUA-2015-F2) est présenté à la figure 109. Les régimes thermiques mesurés au centre-pistes (Figure 109A et C) par les deux câbles à thermistances sont très similaires et démontrent une excellente pénétration du front de gel et un refroidissement important du remblai et du sol sous-jacent en hiver. Du côté de la pente douce, on remarque également un refroidissement des températures du remblai en surface et plus en profondeur en hiver, mais légèrement moins important qu'au centre-piste. Entre les deux sections instrumentées de la pente douce, la section au chaînage 1+295 m présente un régime thermique généralement plus froid en hiver (Figure 109B et D). Pour cette même section, un léger retard dans le regel de la couche active à l'automne suggère la présence d'une certaine quantité d'eau qui contribue au maintien d'une zone isothermique autour de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ qui persiste durant quelques semaines au début de l'hiver pour ensuite regeler complètement autour de la première semaine de janvier (Figure 109B). Ce phénomène ne se produit pas dans l'autre section de la pente douce instrumentée au chaînage 1+630 m (Figure 109D). Malgré la présence d'une certaine quantité de chaleur latente qui retarde le regel au début de l'hiver, le régime thermique sous la pente douce au chaînage 1+295 m est légèrement plus froid en hiver par rapport à celui mesuré au chaînage 1+630 m. Ceci pourrait s'expliquer par une différence d'épaisseur de neige ou, dans une moindre mesure, d'une dissimilitude au niveau des propriétés thermiques des sols entre les deux sites.

Les nombreuses périodes d'interruptions pour la période de suivi de 2015-2020 aux câbles QUA-2015_F1 et QUA-2015-F2, particulièrement fréquents dans les mois d'hiver, limitent les possibilités d'analyses. Toutefois, il est possible de confirmer que les températures à plus de 5 m de profondeur sont très similaires et sont d'environ -

2.4 °C et -2.2 °C à 10 m de profondeur pour les câbles QUA-2015-F1 et QUA-2015-F2 respectivement. Pour les deux sections de la pente douce instrumentées, les profils moyens des températures en fonction de la profondeur (Figures 110A et 111A) montrent un gradient thermique légèrement inverse. Ceci témoigne de la persistance de l'influence modérée des conditions d'enneigement sur le régime thermique. Par rapport au régime thermique mesuré en milieu naturel au câble de référence HT-156, la température à 10 m de profondeur sous la pente douce est d'environ 0.4 °C plus chaude, ce qui demeure assez négligeable. Lorsque les profils thermiques moyens sous la pente douce sont comparés à ceux mesurés au centre-piste (Figures 110 et 111), on constate que les différences sont toutefois assez notables. Les profils thermiques au centre-piste, en raison du maintien de la surface déneigée tout au long de l'hiver, présentent des conditions thermiques moyennes significativement plus froides. Par exemple, au centre-piste, les températures minimales en surface peuvent atteindre des valeurs inférieures à -25 °C tandis qu'elles sont généralement entre -13 °C et -15 °C au niveau de la pente douce et de -20 °C en milieu naturel. Cet écart d'une dizaine de degrés en surface contribue au maintien d'un régime thermique légèrement plus chaud sous la pente douce avec un profil thermique légèrement en déséquilibre (gradient thermique inverse). À une profondeur de 10 m de profondeur, la température du sol sous le centre-piste est d'environ 1.35 °C plus froid que sous la pente douce.

Actuellement, la section de la piste ayant une pente douce n'est pas déneigée. Le suivi photographique confirme qu'une faible épaisseur de neige s'y accumule dès le début de l'hiver et est suffisante pour expliquer les écarts importants entre les températures mesurées au centre-piste et sous la pente adoucie.

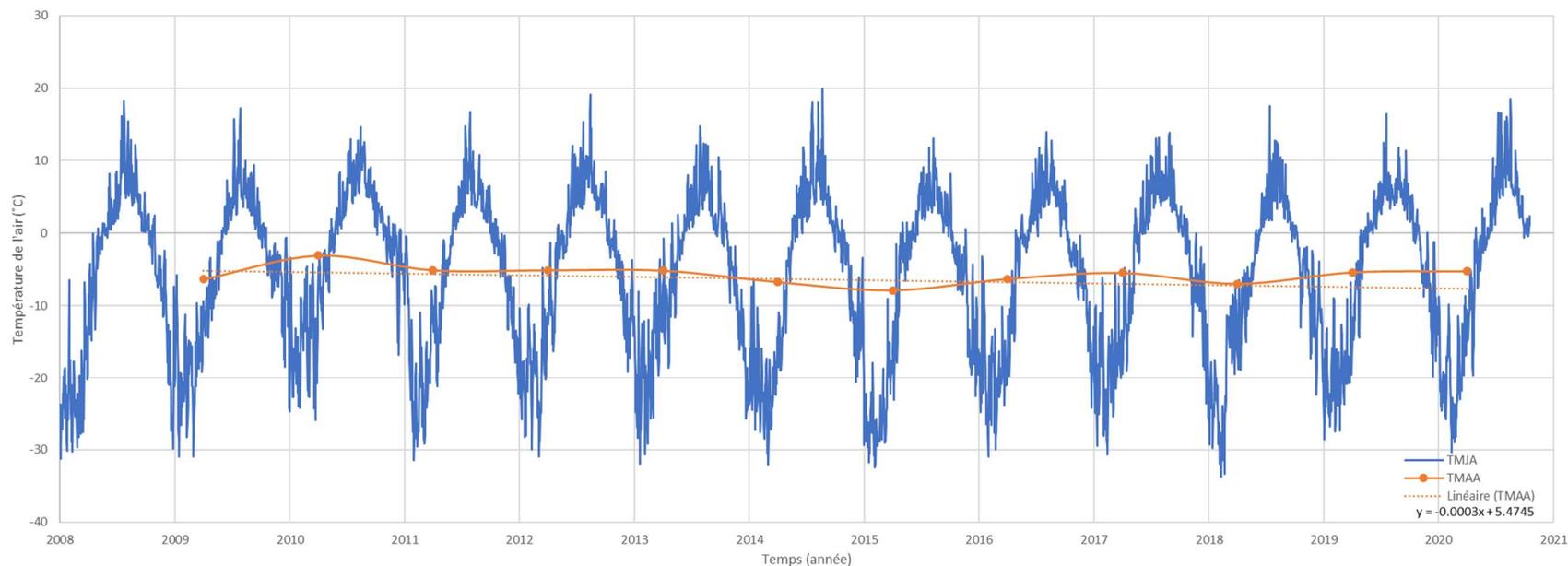


Figure 107 : Variation de la température journalière de l'air (TMJA) et de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) à Quaqtq pour la période 2008-2020. Les moyennes journalières et annuelles ont été calculées à partir des températures de l'air horaires mesurées à la station de référence HT-156.

Tableau 26 : Variables climatiques pour la période 2008-2020 calculées à partir des températures journalières de l'air (TMJA) mesurées à la station de référence HT-156, piste d'atterrissage de Quaqtq.

Année climatique		2008-09	2009-10	2010-11	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20	Moyenne
Saison de gel	Début	11-oct	13-oct	05-nov	11-oct	05-oct	23-oct	10-oct	05-oct	07-oct	17-oct	07-oct	31-oct	14-oct
	Fin	02-juin	24-mai	02-juin	30-mai	06-juin	17-mai	13-juin	07-juin	25-mai	08-juin	20-mai	03-juin	31-mai
	Durée	235	224	210	233	245	207	247	247	231	235	226	217	230
	Moyenne T°C	-12.42	-9.24	-11.27	-11.31	-10.40	-15.01	-13.49	-11.94	-11.83	-12.76	-12.45	-12.04	-12.01
	Indice de gel (FI)	-2918	-2069	-2367	-2635	-2548	-3107	-3333	-2949	-2732	-3000	-2814	-2612	-2757
Saison de dégel	Début	03-juin	25-mai	03-juin	31-mai	07-juin	18-mai	14-juin	08-juin	26-mai	09-juin	21-mai	04-juin	01-juin
	Fin	12-oct	04-nov	10-oct	04-oct	22-oct	09-oct	04-oct	06-oct	16-oct	06-oct	30-oct	17-oct	14-oct
	Durée	132	164	130	127	138	145	113	121	144	120	163	136	136
	Moyenne T°C	4.45	5.34	4.88	6.31	4.18	5.12	4.45	5.25	4.75	4.40	4.41	5.64	4.93
	Indice de dégel (TI)	588	877	634	801	577	742	502	635	684	527	719	767	671
Moyenne annuelle*		-6.35	-3.07	-5.10	-5.09	-5.15	-6.72	-7.86	-6.29	-5.46	-6.96	-5.39	-5.23	-5.72
Ratio (FI/TI)		4.97	2.36	3.73	3.29	4.42	4.19	6.64	4.64	4.00	5.69	3.91	3.40	4.27
Nombre de jour		367	388	340	360	383	352	360	368	375	355	389	353	366

*Valeur approximative, année climatique incomplète.

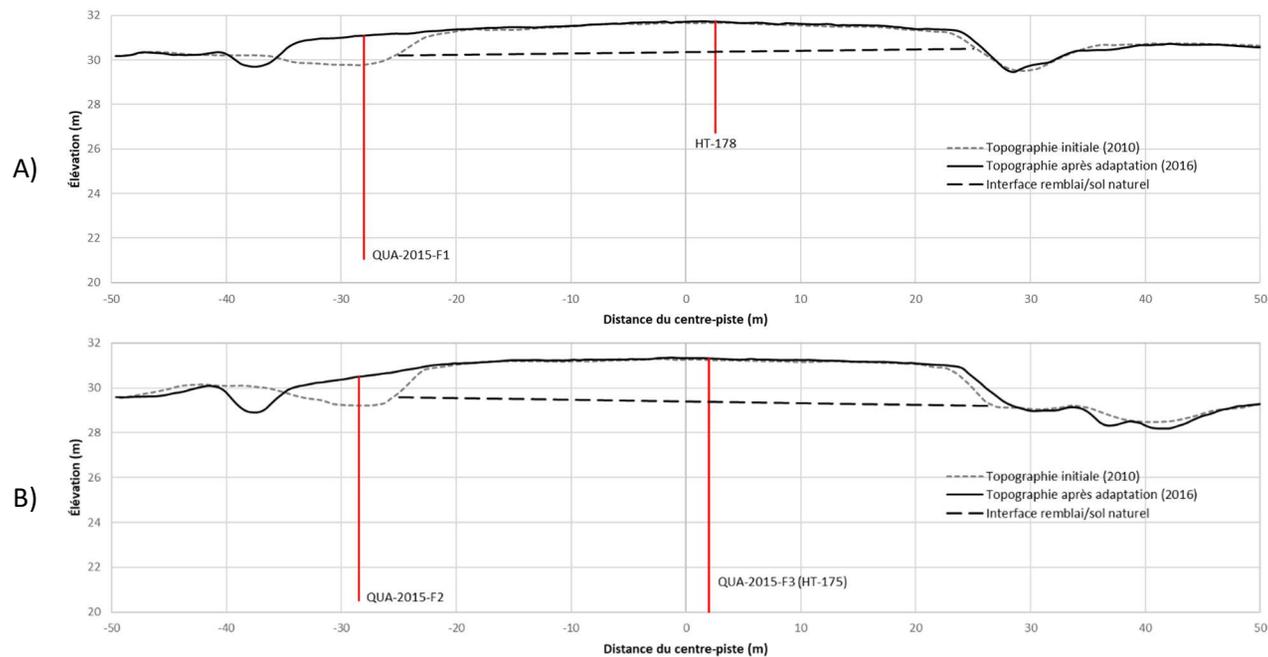


Figure 108 : Vue en plan transversal de la configuration des câbles à thermistances A) HT-178 et QUA-2015-F1 et B) HT-175 et QUA-2015-F2, piste d'atterrissage de Quaqaq.

Tableau 27 : Profondeurs maximales atteintes par le front de dégel au cours de la période 2008-2020 au centre-piste (HT-175 et HT-178) et sous les pentes douces (QUA-2015-F1 et QUA-2015-F2), piste d'atterrissage de Quaqaq.

	HT-175 (2 m)		HT-178 (1.6 m)		QUA-2015-F1 (1.3 m)		QUA-2015-F2 (1.3 m)	
	Z (m)	Δ (m)	Z (m)	Δ (m)	Z (m)	Δ (m)	Z (m)	Δ (m)
2008	-2.27	n.a	-2.39	n.a				
2009	-2.27	↑0.01	-2.39	↑0.01				
2010	-2.36	↓0.09	-2.52	↓0.13				
2011	-2.24	↑0.11	-2.43	↑0.09				
2012	-2.31	↓0.07	-2.55	↓0.12				
2013	n.d	n.a	-2.43	↑0.12				
2014	n.d	n.a	-2.51	↓0.08				
2015	n.d	n.a	-2.32	↑0.19				
2016	-2.20	↑0.11	-2.33	↓0.01	-2.24	n.a		
2017	-2.26	↓0.05	-2.39	↓0.06	-2.39	↓0.15	-2.18	n.a
2018	-2.19	↑0.06	-2.36	↑0.03	-2.22	↑0.17	-2.00	↑0.18
2019	-2.26	↓0.07	-2.40	↓0.04	-2.37	↓0.15	-2.09	↓0.09
2020	-2.37	↓0.10	-2.50	↓0.09	-2.43	↓0.06	-2.25	↓0.16
		↓0.10 m		↓0.10 m		↓0.19 m		↓0.07 m

↑remontée ↓aprofondissement

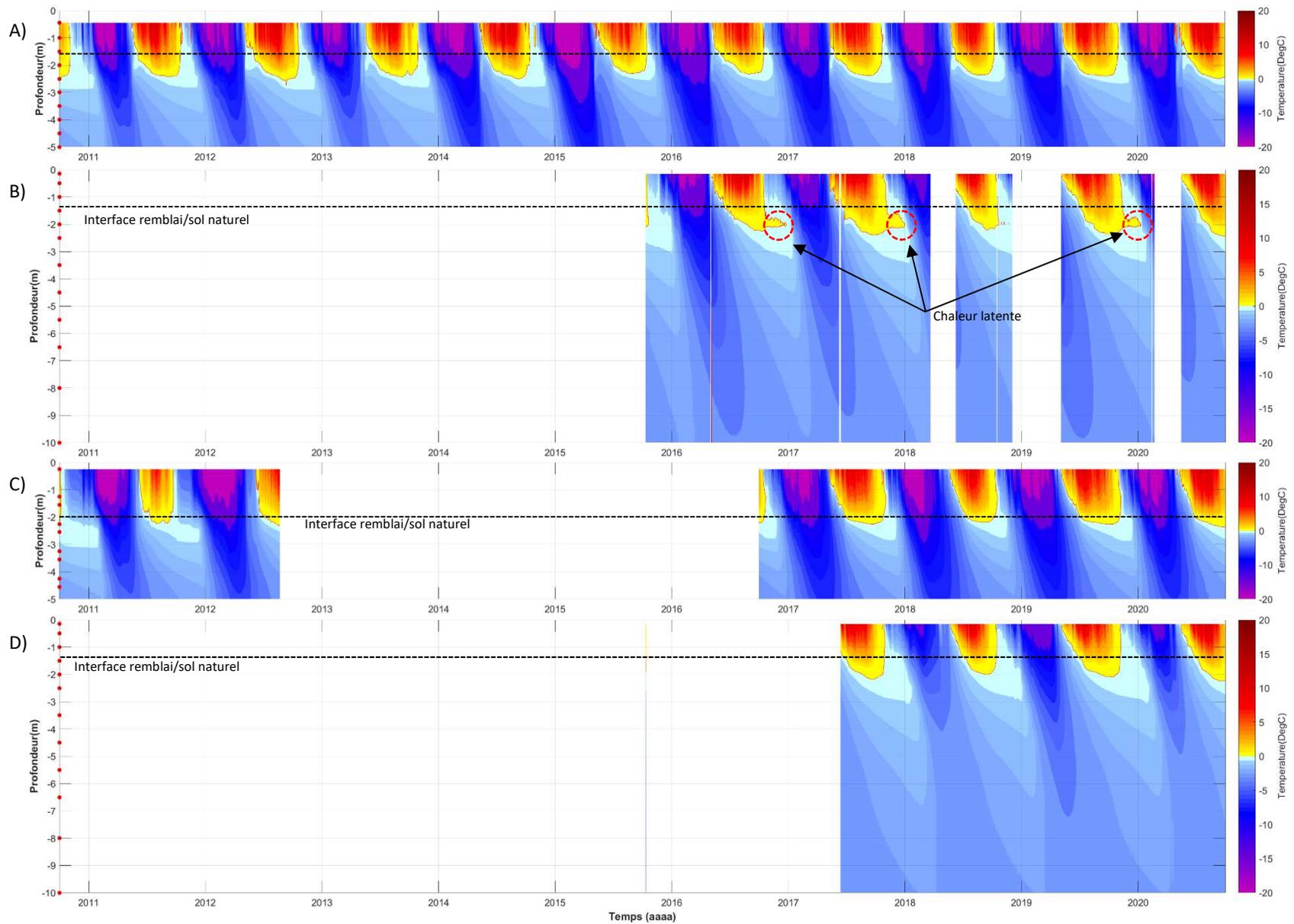


Figure 109 : Variation journalière de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps A) au centre-piste de la piste (HT-178) et B) dans la pente douce (QUA-2015-F1 et C) au centre-piste de la piste (HT-175) et D) dans la pente douce (QUA-2015-F2), octobre 2010 à octobre 2020, piste d'atterrissage de Quaqaq.

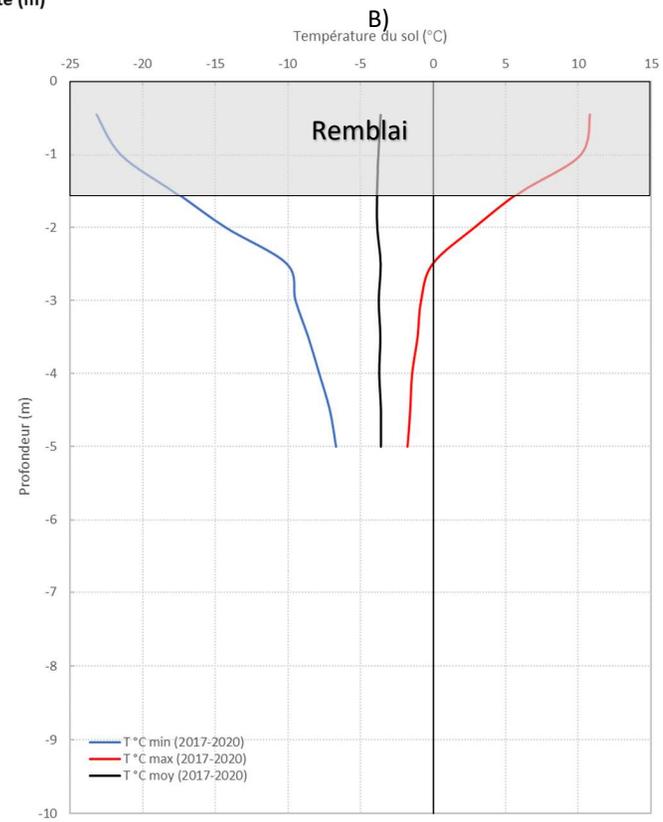
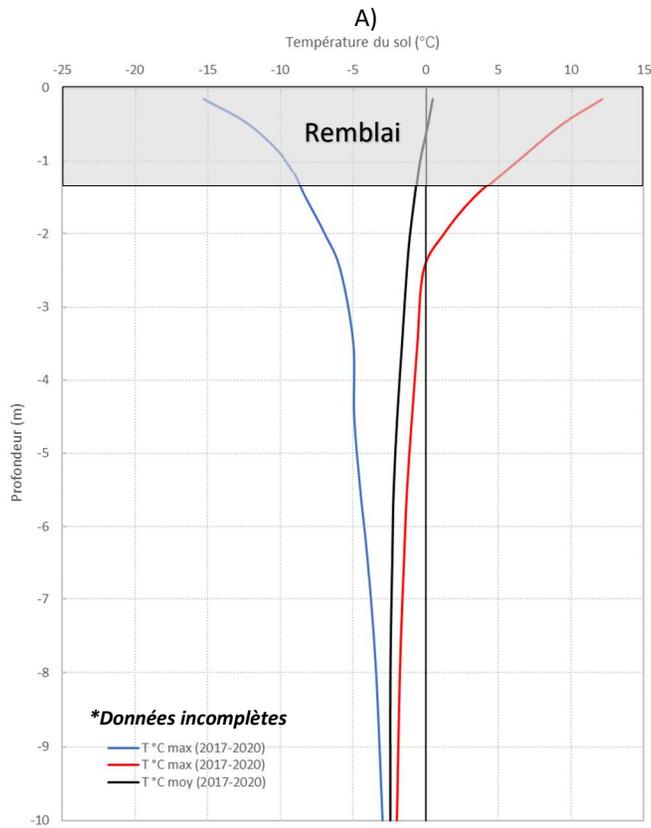
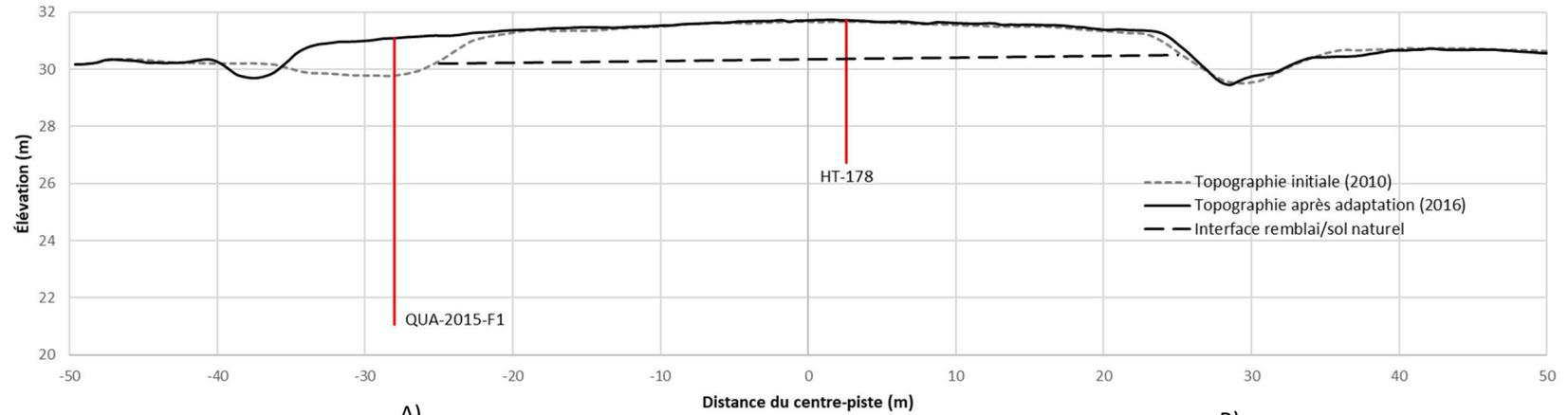


Figure 110 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales au chaînage 1+295 m pour la période 2017-2020 au niveau A) de la pente douce et B) du centre-piste.

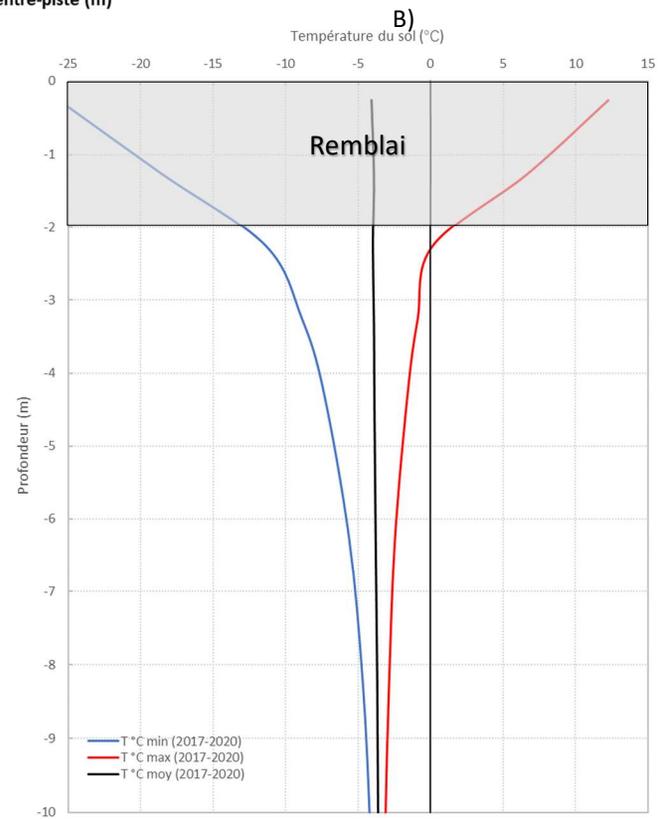
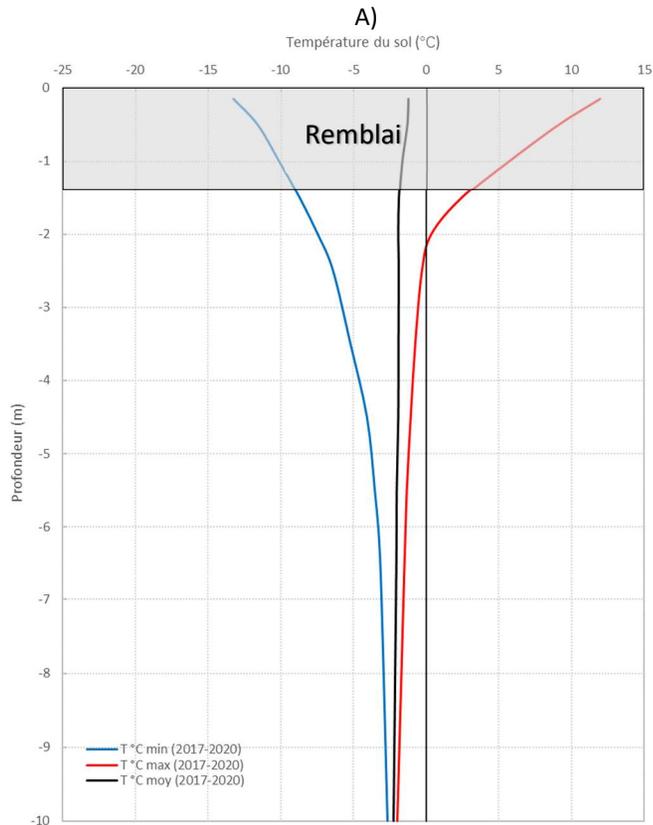
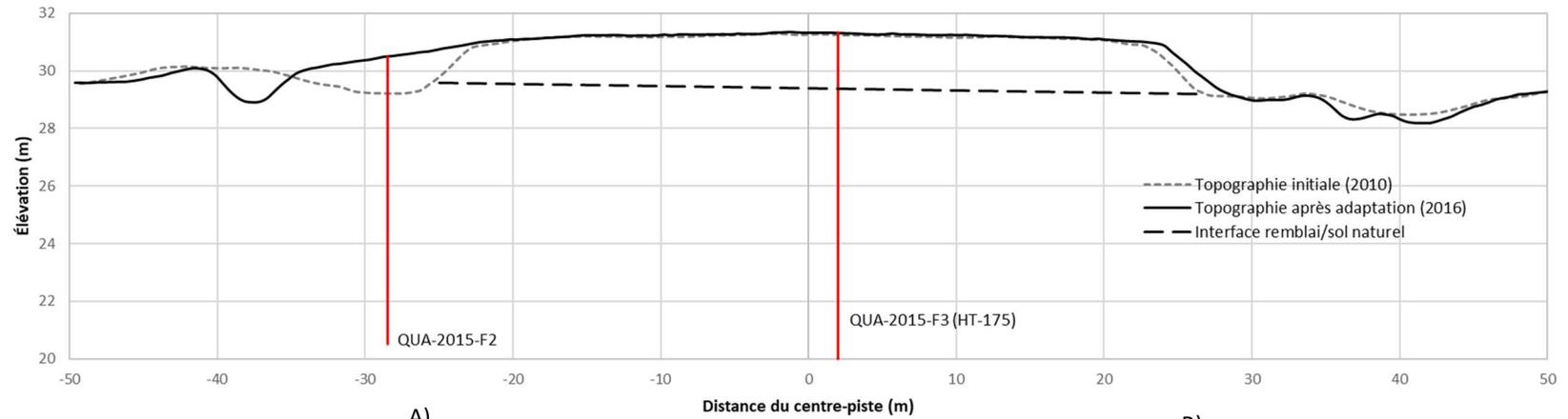


Figure 111 : Profils des températures minimales, moyennes et maximales au chaînage 1+630 m pour la période 2017-2020 au niveau A) de la pente douce et B) du centre-piste.

1.6.5.5.2 PERFORMANCE MÉCANIQUE

La piste d'atterrissage de Quaqtq dispose de trois plaques de tassements, une installée en 2010 et deux installées en 2014. Leurs localisations sont présentées à la figure 112. Comme pour l'ensemble des sites aéroportuaires du MTQ au Nunavik, les données provenant des relevés des déficiences effectués par le Ministère ne sont pas disponibles pour la période récente de 2015 à 2021. Cette indisponibilité des données à jour limite la capacité à évaluer la stabilité mécanique de la piste depuis la mise en place de la stratégie d'adaptation.

La disponibilité d'un seul jeu de données après l'adaptation ne permet pas de procéder à une analyse de déformation différentielle à partir des données LIDAR comme celle réalisée pour la piste d'atterrissage de Puvirnituk. Néanmoins, le relevé LIDAR de 2016 permet d'avoir un aperçu des variations topographiques de la surface de la piste quatre ans après la mise en place des pentes douces et du resurfaçage (Figure 112). Basé sur la prémisse que toutes les dépressions ont été comblées et la couronne de la piste restaurée lors du resurfaçage effectué en 2012, le modèle numérique d'élévation à haute résolution permet de détecter les déformations qui se sont développées au cours de la période 2012-2016.

Le modèle numérique d'élévation haute résolution présenté à la figure 112 montre une topographie vaguée des accotements qui suggère l'apparition de quelques nouveaux tassements différentiels depuis le rechargement de la piste en 2012. De manière générale, il s'agit de légères dépressions (profondeur < 10 cm) qui s'étendent d'environ 5 m de part et d'autre des feux de bord de piste. Certaines de ces dépressions se retrouvent sensiblement aux mêmes endroits que celles recensées en 2011 par le personnel du Ministère, avant le rechargement de la piste effectué l'année suivante. La dépression QUA-Dp-2 est un bon exemple du type de dépression récurrente qui ne cesse de réapparaître malgré son comblement (Figure 112A). Rechargée à plusieurs reprises (2010 et 2012) et demeurée non perceptible jusqu'en 2014 lors des inspections du MTQ, cette dépression est réapparue vraisemblablement autour de 2014-2015 et persiste toujours à ce jour. À rappeler que les dépressions QUA-Dp-1 et QUA-Dp-2 (Figure 112) se retrouvent dans un secteur de la piste construit sur un dépôt fin de sable silteux contenant possiblement de la glace en excès et où une butte surélevée d'environ 1,8 m avait été nivelée à l'automne 1987 avant la construction de la piste (L'Hérault *et al.*, 2012). Il s'agit donc d'un secteur construit en partie en déblai et caractérisé par une faible épaisseur du remblai (< 1.6 m) ce qui explique sa susceptibilité aux tassements au dégel. Outre les quelques dépressions, quelques fissures ont été observées en haut de talus entre les chaînages 1+260 m à 1+660 m. Ces mêmes fissures avaient également été observées en 2015 lors de l'installation des câbles à thermistances dans le talus de la pente douce. L'excavation des fossés lors de la mise en place des pentes douces et le réajustement thermique subséquent sont vraisemblablement à l'origine de ces fissures. Actuellement, ces quelques signes de dégradations (dépressions et fissures) ne constituent pas de risques majeurs pour l'infrastructure.

Suivi des déformations, Aéroport de Quaqaq

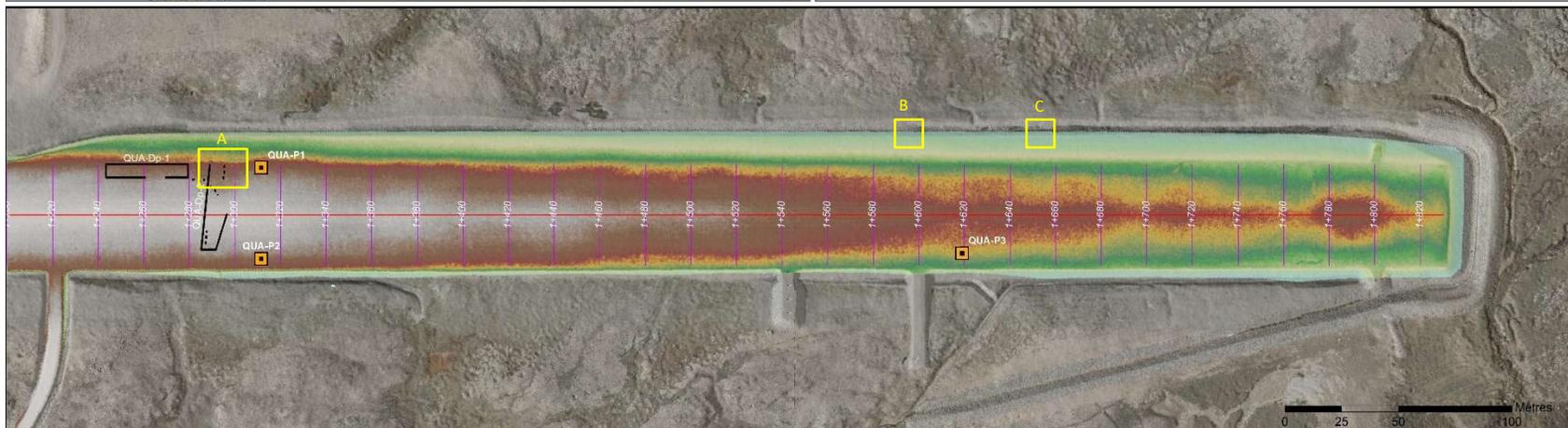


Légende

- Plaque de tassement
- ⋯ Anciennes fissures (2009-2010)
- Anciennes dépressions (2005-2012)
- Centre ligne
- Chaînage transversal



Cartographie: E. L'Héroult, 2021
Fond de carte: Orthomosaïque de 2016



A)

B)

C)

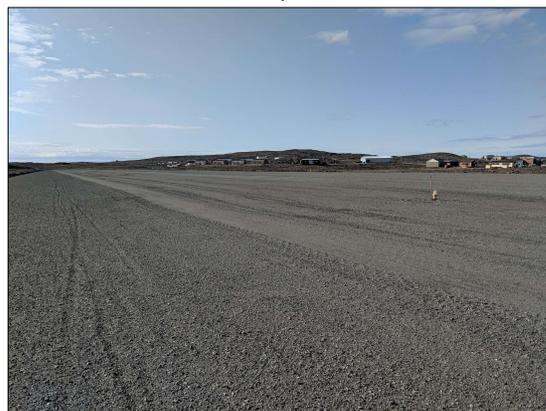


Figure 112 : Emplacements des plaques de tassements, anciennes dépressions et fissures localisées pour la période (2004-2012) sur fond topographique généré à partir des données LIDAR de 2016, piste d'atterrissage de Quaqaq. A) Nouvelle dépression réapparue sensiblement au même endroit que l'ancienne dépression QUA-Dp-2. Fissures longitudinales en haut de talus aux environs des chaînages B) 1+600 m et C) 1+660 m. Les photos A, B et C ont été prises à l'été 2019.

1.6.5.5.3 EFFICACITÉ DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATIONS À LIMITER L'INFLUENCE DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX DANS LA DÉGRADATION THERMIQUE DU PERGÉLISOL

Selon L'Hérault *et al.* (2012), un épaissement de la couche active, en raison de la microtopographie du terrain naturel sous la piste, était susceptible de favoriser l'occurrence d'écoulements d'eau sous le remblai et ainsi accroître le risque de dégradation thermique. Pour cette raison, la mise en place d'une pente douce entre les chaînages 1+140 et 1+830 m avait un double objectif, d'une part contrôler l'enneigement, mais surtout éloigner le fossé du pied de remblai afin de minimiser le risque de dégradation thermique par l'eau.

Les récentes mesures d'épaisseurs de neige effectuées par le MTQ couplées avec le suivi photographique de 2019-2020 confirment l'efficacité des pentes douces à minimiser les accumulations de neige avec des épaisseurs variant entre 10 et 30 cm. Les pentes douces ne sont pas déneigées et le suivi photographique confirme que le couvert nival atteint son épaisseur maximale dès le début décembre. Sans toutefois s'y accumuler des épaisseurs considérables de neige, cette faible accumulation de neige est suffisante pour maintenir des températures sensiblement plus chaudes sous la pente douce qu'au centre-piste. Advenant une nécessité de refroidir davantage le pergélisol, le simple fait de maintenir déneigé la section en pente douce permettrait de se rapprocher des conditions froides rencontrées au centre-piste.

Les conditions de drainage autour de la piste de Quaqaq ont toujours été problématiques en raison de la faible topographie autour de la piste et de l'entrave au drainage locale que constitue cette dernière. Pour drainer efficacement le terrain entre les chaînages 1+100 m à 1+830 m, le fossé n'a d'autre choix que de longer vers le sud le côté est de la piste et de contourner son extrémité. Plus bas que le terrain avoisinant et la piste, le fossé se retrouve rapidement comblé au début de l'hiver par la neige soufflée favorisant la formation de culots de glace et l'occurrence d'embâcles au printemps. Lors de la fonte printanière, le risque d'inondation du terrain avoisinant et possiblement la piste demeure très élevé. C'est pour cette raison que L'Hérault *et al.* (2012) recommandaient de procéder annuellement au dégagement des fossés à chaque printemps ou au besoin afin d'éviter l'inondation de la piste. Le suivi photographique de 2019 et de 2020 permet de confirmer l'efficacité de cette opération préventive. Par exemple, en 2019, l'excavation de la neige et la glace dans les fossés (Figure 113A) a certainement contribué à éviter la formation embâcle et l'inondation du secteur lors de la fonte printanière. Au printemps 2020, l'eau de fonte a rapidement inondé temporairement le terrain avoisinant la piste au début mai. L'eau dans les fossés ont atteint des niveaux assez hauts entre le 12 et 18 mai pour ensuite se drainer rapidement en l'espace de quelques jours à la suite d'une opération de désobstruction des fossés (Figure 113B, C, D et E).

Tout au long de l'été, le suivi photographique ainsi que les observations de terrain confirment qu'une certaine quantité d'eau demeure dans le fond des fossés entre les chaînages 1+600 m et 1+830 m (Figure 114). Il s'agit ici de quelques mares peu profondes n'ayant, pour le moment, aucun impact sur la stabilité thermique et mécanique de la piste. Le suivi thermique au câble QUA-2015-F1 indique qu'une certaine quantité d'eau persiste à la base de la couche active et ralentie légèrement son regel, mais sans plus. Quant au régime thermique observé au câble QUA-2015-F2, ce dernier ne présente aucune évidence d'apport de chaleur latente. À la lueur de ces observations et puisque la pente douce éloigne considérablement le fossé du centre-piste, le risque potentiel de dégradation du pergélisol par écoulement d'eau demeure extrêmement faible. Il pourrait s'avérer nécessaire, par simple précaution, de reprofiler les fossés à court terme.

A)



B)



C)



D)



E)



Figure 113 : A) Désobstruction du fossé de décharge au printemps 2019. Suivi photographique des conditions de drainage au printemps 2020 assuré par la caméra automatisée QuaCam-1, piste d'atterrissage de Quaqtq.



Figure 114 : Accumulations d'eau qui persistent dans les fossés au courant de l'été entre les chaînages 1+600 m et 1+830 m. A) Vue vers le nord et B) vue vers le sud.

1.6.5.6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Performance thermique

En raison de l'absence de données thermiques disponible dès la mise en place des pentes douces en 2012, il est difficile d'évaluer avec précision l'ampleur de la remontée du pergélisol sous les accotements et du refroidissement du sol. Toutefois, dès la mise en service des câbles à thermistances localisés dans les pentes douces (QUA-2015-F1 et QUA-2015-F2) en 2015, les mesures thermiques qui couvrent la période 2015-2020 démontrent que la profondeur de dégel se situe sensiblement à la même profondeur qu'au centre-piste. Ceci permet de confirmer que la mise en place de la pente douce entre les chaînages 1+200 m et 1+830 m a contribué à stabiliser thermiquement ce secteur de la piste. Avec une profondeur de dégel qui pénètre au plus d'environ 1 m dans le terrain naturel sous la pente douce et considérant que l'épaisseur de la couche active en milieu naturel non perturbé atteint un peu plus de 2 m, l'infrastructure dispose d'une bonne marge de manœuvre avant que le front de dégel atteigne la position du plafond du pergélisol avant l'adaptation de la piste.

Malgré cette diminution considérable de la profondeur du front de dégel, les températures demeurent sensiblement plus chaudes sous les pentes douces qu'au centre-piste. Cette situation s'explique par le fait que les pentes douces ne sont pas déneigées en hiver. Même si l'épaisseur de la neige demeure négligeable à cet endroit (≈ 30 cm), celle-ci est suffisante pour expliquer cette différence. Advenant une nécessité de refroidir le pergélisol, il pourrait être envisagé de déneiger la pente douce, ce qui permettrait au régime thermique de s'approcher des conditions froides rencontrées au centre-piste.

Fait intéressant, à l'emplacement du câble QUA-2015-F1, le regel de la couche active au début de l'hiver est ralenti par rapport au câble QUA-2015-F2. Ce ralentissement semble attribuable à une certaine quantité d'eau qui persiste dans la section du sol naturel qui dégèle sous la pente douce. Rappelons que c'est dans ce secteur que L'Hérault *et al.* (2012) avaient identifié l'écoulement d'eau au travers du remblai comme étant un facteur ayant potentiellement contribué au développement d'une dépression linéaire (Figure 103). C'était d'ailleurs pour éviter toute possible infiltration dans le secteur qu'une membrane a été adossée le long de l'ancien talus et ancrée dans le pergélisol sur une longueur de 75 m avant la mise en place de la pente douce. Actuellement, le suivi thermique au centre-piste (câble HT-178) ne permet pas de déceler un possible apport de chaleur par l'eau. Dans un tel contexte, d'autant plus que le front de dégel pénètre au-delà de la base du remblai, l'ajout d'une membrane semble avoir contribué à éviter l'écoulement au travers du remblai dans le secteur.

Performance mécanique

L'analyse des données LIDAR met en évidence une topographie vaguée des accotements entre les chaînages 1+220 m et 1+820 m qui suggère l'apparition récente de quelques nouveaux tassements différentiels depuis le rechargement de la piste en 2012. Il s'agit de légères dépressions (profondeur < 10 cm) qui s'étendent d'environ 5 m de part et d'autre des feux de bord de piste. Certaines de ces dépressions se retrouvent sensiblement aux mêmes endroits que celles recensées en 2011 par le personnel du Ministère avant le rechargement de la piste l'année d'après. Mis à part ces quelques dépressions, un nombre limité de fissures sont apparues dès 2015 en haut de talus entre les chaînages 1+260 m à 1+660 m. Le réajustement thermique subséquent à l'excavation des nouveaux fossés au pied de la pente douce est vraisemblablement à l'origine de ces fissures. Actuellement, ces quelques signes de dégradations (dépressions et fissures) ne constituent pas un risque majeur pour l'infrastructure.

Au cours de la dernière décennie, le front de dégel au centre de la piste de Quaqtq n'a pas dépassé le niveau maximal atteint en 2010 en raison d'un climat plus froid que la moyenne. La section de la piste construite en déblais entre les chaînages 1+260 m et 1+300 m demeure la section la plus sensible de l'infrastructure. En raison du déblai lors de la construction de la piste, cette dernière repose directement sur le pergélisol et toute avancée du front de dégel au-delà du seuil de 2010 risque d'engendrer des tassements supplémentaires. Pour les sections de la piste plus au sud qui ne sont pas en déblai et où l'épaisseur du remblai est supérieure à 2 m, ces dernières devraient demeurer relativement stable pour encore de nombreuses années. Toutefois, la profondeur du front de dégel sous la piste se rapproche du niveau du plafond du pergélisol avant construction (environ 1.2 m sous la base du remblai). Par conséquent, le développement de tassements différentiels au cours des prochaines décennies n'est pas à exclure advenant un réchauffement des températures de l'air.

Le manque de connaissance sur la répartition, les épaisseurs et la sensibilité au dégel des dépôts d'alluvions et de till présent sous une bonne partie de la piste rend impossible une évaluation plus précise des tassements potentiels advenant un dégel du pergélisol. Néanmoins, tout porte à croire que ces tassements seront très limités. De simples rechargements périodiques de la surface de roulement et le reprofilage des fossés permettront de maintenir la piste en bon état.

Performance du réseau de drainage

Les conditions de drainage autour de la piste de Quaqtq ont toujours été problématiques en raison de la faible topographie du secteur et de l'entrave qu'exerce la piste sur l'écoulement d'eau de surface. En raison des conditions d'enneigements, le fossé se retrouve rapidement comblé au début de l'hiver par la neige soufflée favorisant ainsi la formation de culots de glace et l'occurrence d'embâcles au printemps. La formation d'embâcle lors de la fonte printanière accroît le risque d'inondation d'une partie de la piste. Il avait alors été recommandé de procéder au dégagement des fossés chaque printemps ou au besoin afin d'éviter la formation d'embâcle. Le suivi photographique de 2019 et de 2020 permet de confirmer l'efficacité de cette opération préventive dans la gestion du drainage printanier. En période estivale, une certaine quantité d'eau demeure dans le fond des fossés entre les chaînages 1+600 m et 1+830 m, mais étant donné que la pente douce éloigne considérablement le fossé du centre-piste, le risque potentiel de dégradation du pergélisol par écoulement d'eau sous la piste demeure extrêmement faible. Même si actuellement l'état du drainage dans le fossé ne constitue pas une préoccupation pour la stabilité thermique du pergélisol, il est recommandé, par souci de précaution, de procéder au reprofilage du fossé à court terme.

1.6.6 LA PISTE D'ATTERRISSAGE DE KANGIRSUK

1.6.6.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

Achévé en 1987, la piste d'atterrissage de Kangirsuk, juchée à une altitude de plus de 95 m, est orientée selon un axe nord-nord-est sud-sud-ouest, mesure 1190 m de long (du chaînage 0+540 m au chaînage 1+730 m) et 44 m de large. La piste de Kangirsuk est l'une des rares pistes au Nunavik ayant requis une excavation par dynamitage du pergélisol afin de niveler le terrain. Il s'agit en fait de la plus longue et épaisse section en déblai, section qui totalise une longueur de 280 m et 5 m d'épaisseur entre les chaînages 0+760 et 1+040 m. À l'exclusion de ce secteur en déblai qui repose directement sur le till, la piste repose essentiellement sur une couverture superficielle de sables et graviers d'une épaisseur généralement comprise entre 1 et 2 m (Figure 115A). Cette unité stratifiée correspond à un faciès de dépôts littoraux et pré-littoraux (Mb) et recouvre par endroits soit un diamicton à matrice fine sablo-silteuse identifié comme un till (Mm/Tr ou Mb/Tr) ou directement la roche en place sous forme de minces placages (Mm/R) (Figure 115B). Dans la moitié nord de la piste, le roc (R) affleure 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 à l'intérieur des dépressions topographiques au sein de la roche en place seulement dans la section sud de la piste d'atterrissage comprise entre les chaînages 0+630 et 1+280 m. À partir d'observations par forages et levés géophysiques, l'épaisseur de till varie entre 2 et 9 m et présente une glace essentiellement sous forme interstitielle et à l'occasion ségréguée qui excède rarement plus de 10-15 % en volume (L'Hérault *et al.*, 2012). D'après les nombreux essais de tassement et consolidation au dégel réalisés par L'Hérault *et al.* (2012), le potentiel de tassement du till est inférieur à 15 % et peut atteindre des valeurs presque nulles. Ces valeurs permettent difficilement d'expliquer l'ampleur des tassements qui se sont produits dans la section en déblai depuis la construction. Selon 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 provoqué des tassements irréguliers d'environ 15 cm en moyenne et pouvant atteindre localement 23 cm. La couche de till pergélisolée soumise au dégel aurait ainsi tassé d'environ 25 à 40 %, soit bien au-delà des résultats obtenus lors des essais de consolidation réalisés par L'Hérault *et al.* (2012). En 2005, Allard *et al.*, (2007) ont procédé à une excavation au centre-piste 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. En 2004, le tassement cumulé dans cette section depuis la construction de la piste avait été évalué à 46 cm par Beaulac (2005), correspondant à des valeurs de tassements et consolidation d'environ 35 %. Ces différences entre les coefficients de consolidation mesurés en laboratoire (L'Hérault *et al.*, 2012) et ceux estimés indirectement par des mesures de nivellement (Tremblay et Doré, 1988) ou d'épaisseur de MG-20 (Beaulac, 2005 ; Allard *et al.*, 2007) 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 lors des essais en laboratoire. Chose certaine, le till présent sous la piste demeure sensible au dégel.

Pour cette raison, la stratégie d'adaptation mise en place en 2016 visait essentiellement à améliorer les conditions de drainage afin d'éviter tout risque de dégel accéléré du pergélisol induite par l'écoulement d'eau sous le remblai comme ce fut le cas au chaînage 1+120 m. Dans ce secteur, une berme perpendiculaire à l'écoulement devait forcer l'eau à emprunter un ponceau pour être évacuée de l'autre côté de la piste du côté ouest. Toutefois, lors de l'auscultation géotechnique effectuée en 2009, 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 donnant naissance à une dépression d'une quarantaine de mètres de longueur, dans l'accotement, entre le chaînage 1+075 m et 1+115 m (Figure 116) (L'Hérault *et al.*, 2012). Plus au sud, le fluage du versant côté est semblait avoir également déformé le profil du fossé limitant ainsi sa capacité à drainer efficacement l'eau le long de l'infrastructure.

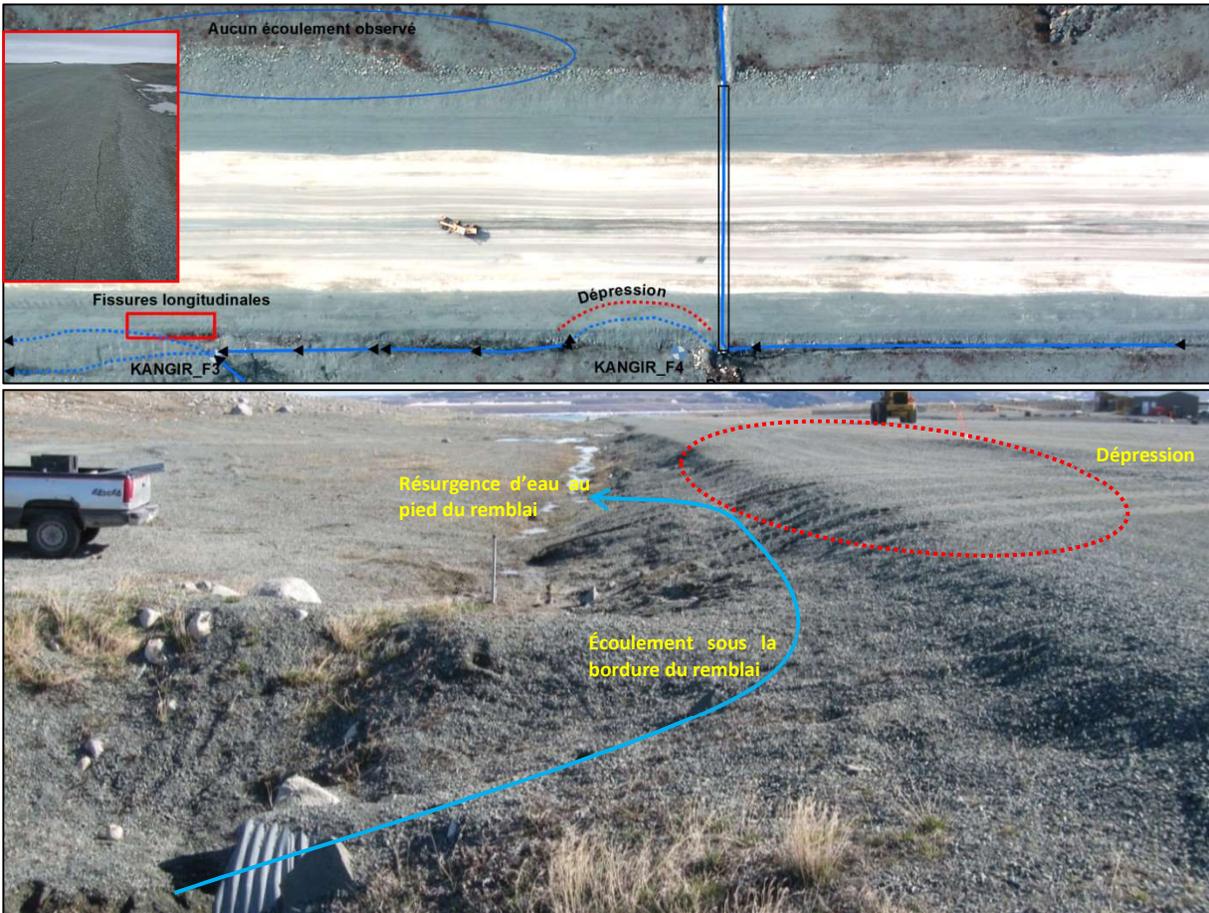


Figure 116: Problème de drainage et signes de dégradation tels qu’observés en juin 2009 le long de piste de Kangirsuk (tirée de L’Hérault *et al.*, 2012).

1.6.6.2 DESCRIPTION DE LA STRATÉGIE D’ADAPTATION MISE EN PLACE

Afin de freiner la dégradation des accotements et éviter tout écoulement d’eau transversal éventuel dans le remblai, la stratégie d’adaptation proposée par L’Hérault *et al.* (2012) consistait essentiellement à apporter quelques améliorations mineures au réseau de drainage concentrées sur le côté est de la piste.

Basés sur ces recommandations, les travaux d’adaptation effectués en 2016 et présentés à figure 117 se résumaient à :

- Reprofiler les fossés latéraux côté est (droit) entre les chaînages 0+690 à 0+810 m, 1+274 à 1+317 m et 1+679 à 1+722 m;
- Nettoyer les fossés latéraux côté est (droit) entre les chaînages 0+810 à 1+110 m et 1+220 à 1+600 m;
- Imperméabiliser le fossé avec un géocomposite bentonitique du côté est entre les chaînages 1+114 et 1+220 m;
- Ajouter un nouveau fossé de drainage imperméabilisé sur le versant de till en déblai du côté est, entre les chaînages 1+010 et 1+110 m;
- Ajouter un revêtement de protection en pierre de calibre 0-200 mm dans le fossé côté est avec géotextile entre les chaînages 0+690 à 1+222 m, 1+274 à 1+317 m et 1+679 à 1+722 m;

- Aménager une berme et imperméabiliser l'extrémité du ponceau du côté est au chaînage 1+114 m.

À noter que deux aspects de la stratégie d'adaptation proposée initialement par L'Hérault *et al.* (2012) ont été exclus lors des travaux d'adaptation de la piste en 2016. L'un de ces aspects proposait d'éloigner le drainage et minimiser les accumulations de neige en pied de remblai côté est entre les chaînages 0+700 m et 1+110 m par l'utilisation d'un remblai à pente adoucie (1V :6H) avec fossé de drainage peu profond. L'autre aspect portait sur la stabilisation du versant opposé à la piste dans la zone en déblai par l'utilisation d'un empierrement sur une épaisseur d'environ 50 cm entre les chaînages 0+780 m et 1+040 m.

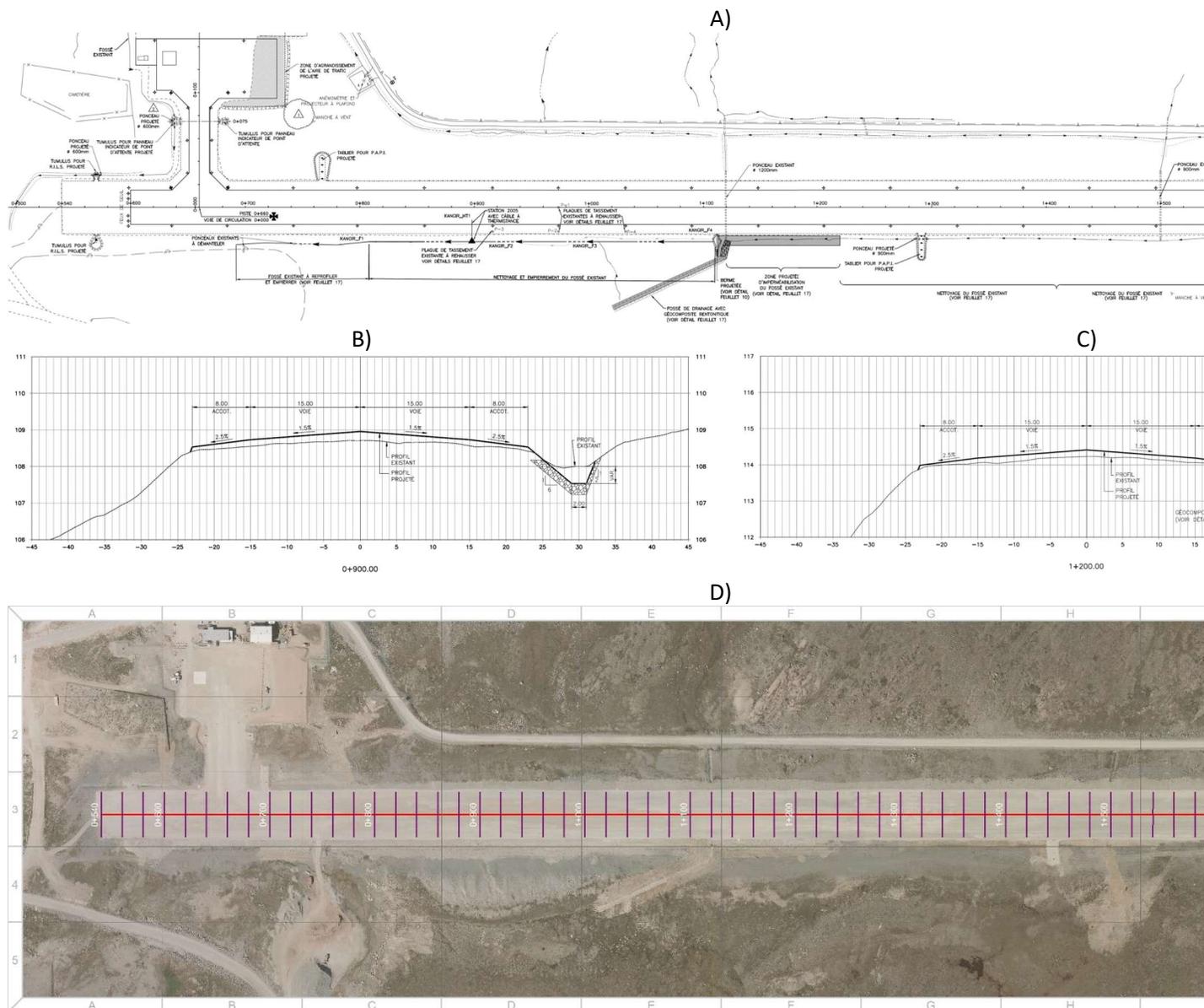


Figure 117 : A) Aperçu générale de la stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Kangirsuk tirés des plans originaux tel que construit (no. en plan pour une section de nivellement de la piste et reprofilage de fossé B) sans et C) avec une membrane géocomposite. D) Vue aérienne de la piste et des travaux d'adaptation complétés.

1.6.6.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts de la mise en place de la stratégie d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Kangirsuk sont présentés au tableau 28. À l'intérieur de ce tableau, les coûts tirés du bordereau de paiements associé au devis no. 7202-15-3501 ont été regroupés selon les différentes mesures d'adaptation mises en place. D'après la compilation de ces coûts, les travaux d'adaptation portant spécifiquement à l'amélioration du drainage totalisent un coût de 167 685.40\$.

Lors de la mise en place de la stratégie d'adaptation, des travaux d'entretien ont également été réalisés et consistaient à la scarification, nivellement et rechargement de 23 578 m² de piste, le nettoyage des fossés sur une longueur de 621 m et un reprofilage de ces derniers sur une longueur de 155 m. Une mise en réserve de MG20b modifié d'environ 3 512 m³ a également été effectuée au cours des travaux 2016, dont le coût a été inclus dans la production globale de MG20b modifié nécessaire au rechargement de la piste. Le coût de ces travaux d'entretien est estimé à 802 862 \$. À noter que la dernière intervention portant sur l'entretien de la piste remonte en 2004, mais aucune information n'est disponible quant à la superficie de la piste rechargée et la quantité de gravier nécessaire.

Tableau 28 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la piste d'atterrissage de Kangirsuk.

Année	Mesures	Description	Coût (\$)
2016	Améliorations du drainage	Imperméabilisation de fossé avec géocomposite	30 630.00
		Nouveau fossé de drainage avec géocomposite	13 650.00
		Aménagement d'une berme	25 000.00
		Imperméabilisation de l'extrémité du ponceau	2 000.00
		Revêtement de protection en pierre 0-200mm et géotextile	96 405.40
Total travaux d'adaptation =			167 685.40
2016-2020	Entretien	Scarification et nivellement de la piste (2016)	58 945.00
		MG 20b modifié (2016)	712 163.00
		Nettoyage des fossés (2016)	18 630.00
		Reprofilage des fossés (2016)	13 124.00
		Total travaux d'entretien =	802 862.00
Grand total =			970 547.40

1.6.6.4 INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DE PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Kangirsuk comprenait initialement deux câbles à thermistances, un situé au centre-piste et en fonction depuis 2005 (KANGIR-HT1) et un autre en pied de remblai en opération depuis 2010 (KANGIR-F2). Ces deux câbles étaient connectés au même système d'acquisition de données situé en bordure de piste au chaînage 0+900 m. À noter que le câble KANGIR-F2 n'a fonctionné que durant quelques mois avant de cesser complètement de fonctionner en 2012 en raison de nombreux problèmes d'infiltration d'eau dans le boîtier contenant le multiplexeur. En 2016, lors des travaux d'adaptation et de rechargement de la piste, le câble KANGIR-HT1 a été sectionné lors de la réfection du système d'éclairage de la piste. Quant au câble KANGIR-F2, le tubage ainsi que le câble en place ont été fortement endommagés lors de l'excavation du fossé de drainage par l'entrepreneur les rendant inutilisables. Quelques mois après l'endommagement de l'instrumentation, une réinstallation complète de ces deux câbles à thermistances a été réalisée par L'Héroult et Allard (2016). Cette réinstallation a nécessité la réalisation de nouveaux forages à proximité des anciens câbles. Les nouveaux câbles, nommés respectivement KANGIR-HT1B et KANGIR-F2B, comportent 16 thermistances situées entre 0,25 et 8 m de profondeur. Un plan de localisation de l'ensemble de l'instrumentation pour l'aéroport de Kangirsuk est présenté à la figure 118 et les caractéristiques techniques des anciens et des nouveaux câbles à thermistances sont résumées au tableau 24. Outre ces deux câbles à thermistances, la piste d'atterrissage dispose de quatre plaques de tassement installées en 2005 dans la section de la piste en déblai. Trois de ces plaques de tassement sont situées dans l'accotement côté est et la dernière est localisée dans le centre de la piste (Figure 118).

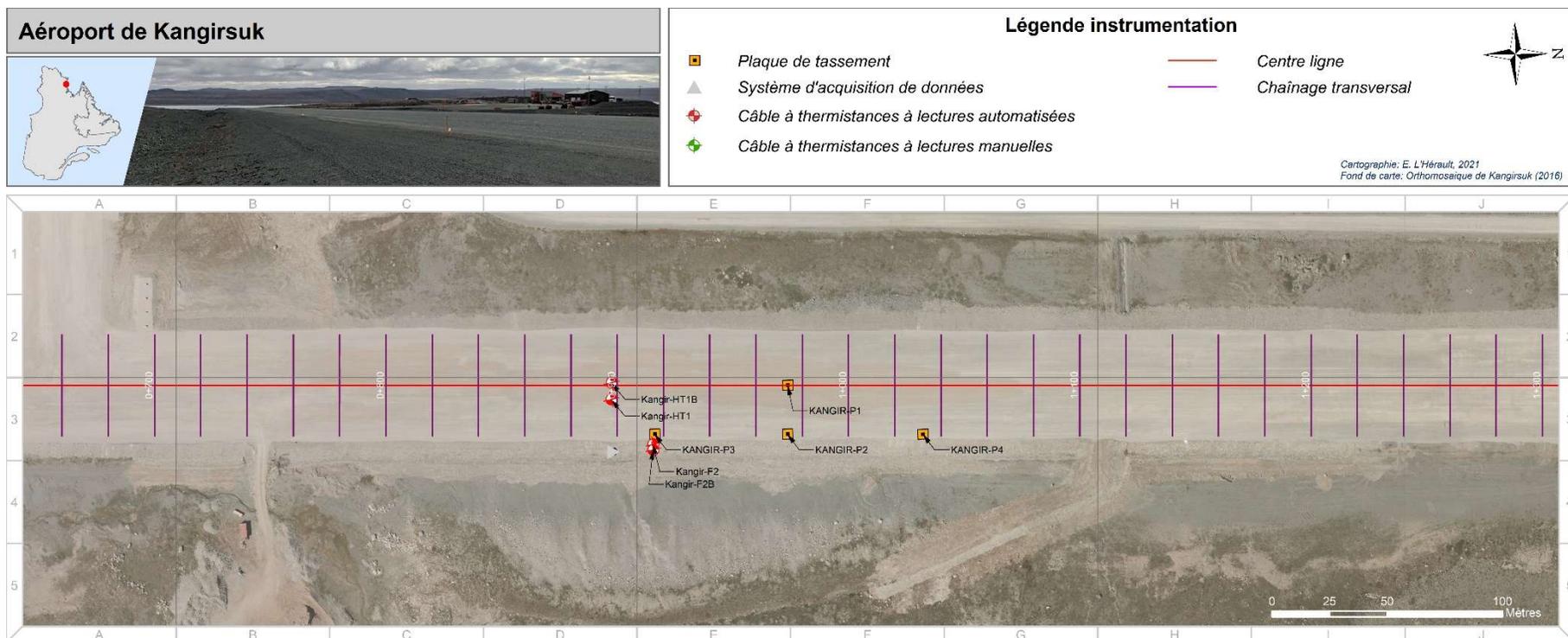


Figure 118 : Instrumentation existante et celle installée à l'automne 2018 pour évaluer la performance des techniques d'adaptation mises en place à l'aéroport de Quaqtaq.

Tableau 29 : Caractéristiques techniques des câbles à thermistances installés dans l'enceinte de l'aéroport de Kangirsuk utilisés pour évaluer la performance thermique des techniques de mitigation implémentées.

No. forage	Localisation	Orientation	Longueur (m)	Nb. thermistances	Répartition des thermistances (m)	Zéro de référence	Mise en service	Type lecture/système	Paramètres mesurés	État
KANGIR-HT1*	Remblai	Vertical	2.91	9	0.66; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75; 2; 2.5; 2.91	Surface terrain	2005-06-21	automatisée/CR1000	température de l'air et du sol	Non fonctionnel
KANGIR-F2*	Pied de remblai	Vertical	6.50	9	0.5; 1; 1.5; 2; 2.5; 3.5; 4.5; 5.5; 6.5	Surface terrain	2010-10-15	automatisée/CR1000	température du sol	Non fonctionnel
KANGIR-HT1B	Remblai	Vertical	8.00	16	0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75; 2; 2.25; 2.5; 3; 4; 5; 6; 7; 8	Surface terrain	2016-08-17	automatisée/CR1000	température de l'air et du sol	Fonctionnel
KANGIR-F2B	Pied de remblai	Vertical	8.00	16	0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75; 2; 2.25; 2.5*; 3*; 4*; 5*; 6*; 7*; 8*	Surface terrain	2016-08-19	automatisée/CR10	température du sol	Fonctionnel

*thermistances non branchées au système d'acquisition de données

1.6.6.5 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION POUR LA PISTE D'ATERRISSAGE DE KANGIRSUK POUR LA PÉRIODE 2016-2020

Puisque que les travaux d'adaptation effectués en 2016 à l'aéroport de Kangirsuk visaient exclusivement l'amélioration du réseau de drainage, une analyse des données thermiques mesurées aux câbles KANGIR-HT1B et KANGIR-F2B ne s'avère pas pertinente dans l'évaluation de la performance de la stratégie d'adaptation mise en place.

En ce qui concerne l'évaluation de la performance mécanique de la section adaptée de la piste d'atterrissage, l'absence d'un relevé LIDAR récent, comme pour la majorité des pistes d'atterrissage du Nunavik, ne permet pas de procéder à une analyse des déformations suivant une approche cartographique. Pour ce qui est du suivi des déformations réalisé à l'aide des quatre plaques de tassements (Figure 118), les données récentes qui couvrent la période 2015-2021 ne sont toujours pas disponibles. Cette absence de données limite la capacité à évaluer adéquatement la performance mécanique de la stratégie d'adaptation mise en place. Toutefois, lors des visites sur le terrain en 2018 et 2019, l'infrastructure ne présentait toujours pas de signes de dégradation majeure à l'exception de quelques fissures localisées ici et là sur la pente du talus côté est aux environs du chaînage 1+080 m (Figure 119A). Aucune dépression n'est réapparue à la suite du resurfaçage de la piste de 2016, pas même celle qui était présente au sud de la berme entre les chaînages 1+060 et 1+100 m et qui était liée à un écoulement d'eau. Par conséquent, malgré les données limitées, tout semble indiquer que l'imperméabilisation du fossé et des extrémités des ponceaux ainsi que l'aménagement d'une berme légèrement plus large que celle initialement en place permettent actuellement de prévenir toutes infiltrations d'eau susceptibles de dégrader thermiquement le pergélisol particulièrement sensible aux tassements qui est présent dans le secteur. Lors des visites sur le terrain en 2018 et 2019, aucune accumulation d'eau n'a été observée au fond des fossés et ces derniers présentaient toujours un profil rectiligne (Figure 119B). Ces observations témoignent donc d'une performance satisfaisante de la stratégie d'adaptation.



Figure 119 : A) Quelques fissures présentes sur les talus du remblai à une dizaine de mètres au sud de la berme côté est. B) Absence d'accumulation d'eau au fond des fossés qui témoigne de leur bonne efficacité à drainer l'infrastructure.

Pour le moment, la situation du drainage aux abords du ponceau qui était responsable de la dégradation du pergélisol sous les accotements entre les chaînages 1+060 et 1+100 m a été nettement améliorée par l'imperméabilisation du fossé et des extrémités du ponceau ainsi que l'ajout d'une berme beaucoup plus large que celle initialement construite dans le secteur. Lors des quelques visites sur le terrain, l'absence de dégradations majeures permet de déduire que le pergélisol le long de l'accotement du côté est est thermiquement et mécaniquement stable. Toutefois, même si l'amélioration des conditions de drainage du côté est semble avoir enrayé le processus de dégradation thermique du pergélisol induit par l'eau, il est important de mentionner que la piste doit demeurer sous surveillance. En raison de sa longue section en déblai pour laquelle le remblai relativement mince repose directement sur un pergélisol composé de till, la piste est sujette à des déformations. Ces déformations se développeront à court terme entre les chaînages 0+760 m et 1+040 m et seront susceptibles d'affecter la piste sur toute sa largeur et non pas seulement ses accotements. Ceci constitue actuellement le principal risque auquel fait face l'infrastructure. À juste titre, le relevé de défauts effectué par le Ministère en 2014 relate l'agrandissement de certaines dépressions et l'apparition de nouvelles entre les chaînages 0+700 et 1+120 m. Le climat relativement froid au cours de la dernière décennie a contribué à maintenir la profondeur de dégel autour de 2.15 m. Ce n'est qu'à l'été 2020 que la profondeur de dégel maximale historique de 2.29 m, atteinte à l'été 2010, a été surpassée de quelques centimètres (Dufour *et al.*, 2020).

Les sections de la piste construites en remblai et qui reposent sur une fine couche de dépôts littoraux et pré-littoraux sur till (Mm/Tr ou Mb/Tr) (chaînages 0+620 à 0+760 m et chaînages 1+040 à 1+260 m) sont actuellement toujours préservées d'une éventuelle dégradation du pergélisol. Dans ces sections, l'épaisseur de remblai supérieure à 2.5 m, la préservation de l'ancienne couche active et l'absence de glace en excès dans les dépôts pré-littoraux qui recouvrent le till assurent une stabilité de la section centrale du remblai pour encore plusieurs années. En ce qui concerne les accotements, quelques signes de dégradation tels que des dépressions et des fissures longitudinales suggèrent que le front de dégel atteint le till dont le dégel partiel entraîne localement un basculement des épaulements. Graduellement, ces dépressions devraient continuer de se développer advenant une pénétration du front de dégel à des profondeurs plus importantes. Néanmoins, comme ce fut le cas dans le secteur en déblai, un rechargement régulier devrait permettre de maintenir un fonctionnement sécuritaire de l'infrastructure.

1.7 PERFORMANCE DES STRATÉGIES D'ADAPTATION MISE EN PLACE AUX SITES SECONDAIRES

1.7.1 LA ROUTE D'ACCÈS À L'AÉROPORT D'IVUJIVIK

1.7.1.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

La route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik a été complétée en 1986, soit en même temps que la piste d'atterrissage. La route mesure 764 m de longueur du chaînage 0+950 m (entrée du village) au chaînage 1+714 m (stationnement de l'aérogare). Construite avec une géométrie des talus standard (1V : 2H), la route d'accès consiste en un remblai pouvant atteindre près de 4 m d'épaisseur par endroit déposé directement sur la surface du terrain naturel sauf entre les chaînages 1+480 m et 1+660 m où cette dernière a été construite en déblai sur le roc. Avant la réalisation des travaux d'adaptation, quatre sondages ont été réalisés par le MTQ dans les accotements vis-à-vis les dépressions le long de la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik. Tous ces forages ont atteint le roc à des profondeurs variant entre 7 et 10 m de profondeur. En raison de la technique de forage utilisé (forage pneumatique à percussion), aucun échantillon intact n'a été récupéré. Lors de la réalisation de ces forages, de la boue (sol très riche en eau) était expulsée ce qui suggère la présence d'un sol à grains fins (silt et argile) extrêmement riche en glace.

Selon le rapport d'un projet de caractérisation du pergélisol dans le village d'Ivujivik (Carbonneau *et al.*, 2015; Allard *et al.*, 2020), la route repose sur trois unités géologiques de surface : des affleurements rocheux (R), des dépôts littoraux et pré-littoraux (Mn) ainsi que des dépôts marins d'eau profonde (Mb). La répartition spatiale de ces unités géologiques de surface est intimement liée à la topographie régionale où les vallées ainsi que les petites dépressions sont comblées par des dépôts marins tandis que les sommets consistent essentiellement en des affleurements rocheux recouverts ici et là de placage de sable et gravier (Mn). Des puits d'explorations réalisés par Journeaux, Bédard et Assoc. Inc. (2002) et par Carbonneau *et al.* (2015) ont démontré que la partie basse de la vallée dans laquelle a été construit le village est principalement composée de sable et gravier avec coquilles sur les premiers mètres de la surface. Toutefois, sous ce dépôt grossier stable au dégel se trouvent des sédiments marins fins d'eau profonde (Mb) riches en glace. En effet, plusieurs forages peu profonds avec récupération réalisés dans les environs du village (Allard *et al.*, 2020), dont deux situés à proximité de la route d'accès, ont confirmé la présence de ces sédiments marins fins d'eau profonde riche en glace à environ un mètre de profondeur.

Actuellement, il existe très peu d'information concernant les déformations qui prévalaient le long de la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik avant son adaptation en 2013. Le Ministère avait toutefois identifié deux secteurs problématiques soit : un secteur entre les chaînages 1+020 à 1+120 m et un secteur localisé dans la courbe entre les chaînages 1+320 à 1+420 m. Une analyse sommaire des photos aériennes prises en 2010 démontre en effet que les deux secteurs présentaient des évidences d'une dégradation du pergélisol en pied de remblai (Figure 120). Parmi ces évidences, on remarque des accumulations d'eau en pied de remblai de chaque côté de la route, la présence de fissures transversales et un effet d'ombrage qui suggère d'importantes dépressions plus spécifiquement localisées au chaînage 1+060 m et 1+390 m. Le relevé topographique avant construction, tel qu'il apparaît sur les plans tel que construit (plan no : CH-7202-154-04-1163) confirme la présence et l'emplacement de ces déformations importantes. D'après ces relevées, une longue dépression affectait la largeur complète du remblai entre les chaînages 1+420 et 1+340 m et atteignait une profondeur maximale d'une trentaine de centimètres au chaînage 1+390 m (Figure 121A). Pour ce qui est de la dépression au chaînage 1+060 m, cette dernière mesurait environ une trentaine de mètres de longueur et une profondeur comprise entre 30 et 40 cm (Figure 121B).



Figure 120 : Évidences de dégradation du pergélisol et défauts observés à partir des photos aériennes prise en 2010, route d'accès à l'aéroport d'Iqaluit.

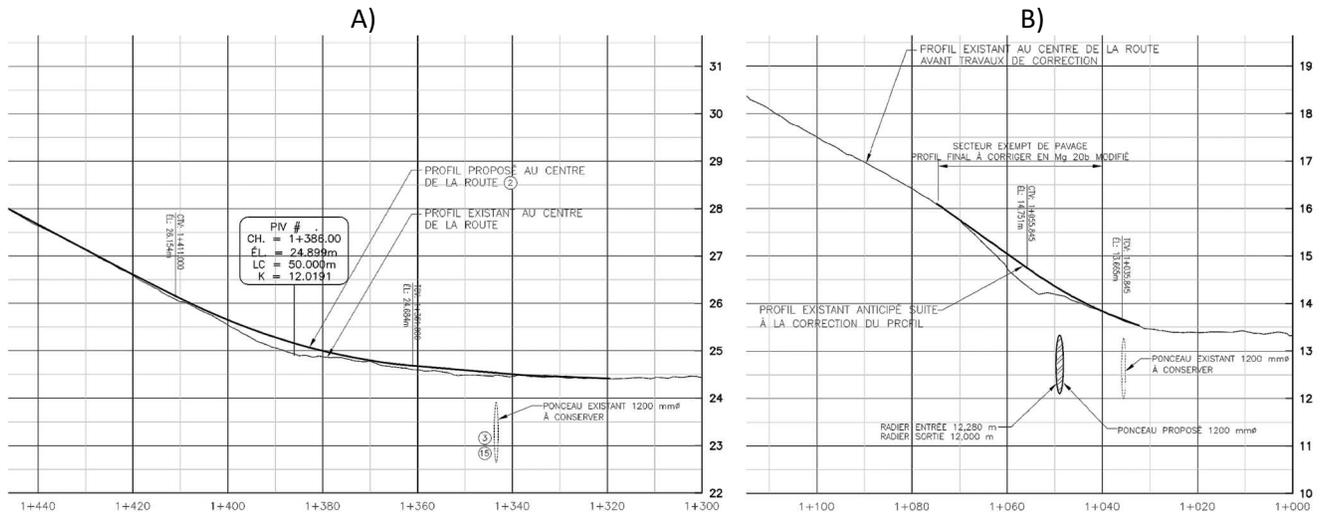


Figure 121 : Profils topographiques existants relevés au centre de la route avant les travaux d'adaptation pour les deux secteurs présentant des déformations importantes. A) Secteur entre les chaînages 1+320 et 1+420 m et B) secteur entre les chaînages 1+020 et 1+120 m.

1.7.1.2 STRATÉGIE D'ADAPTATION MISE EN PLACE

Telle que documenté par Fortier *et al.* (2011) et L'Hérault *et al.* (2012), la simple accumulation de neige en marge d'une infrastructure étroite telle qu'une route suffit pour réchauffer les températures du sol non seulement en pied de remblai mais également sous le centre de la route. Par conséquent, il en résulte bien souvent de longues dépressions qui affectent la largeur complète de l'infrastructure. Dans le cas de la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik, l'origine des déformations observées, sans toutefois avoir fait l'objet d'une étude approfondie visant à en déterminer les causes, semble vraisemblablement associée à une dégradation localisée du pergélisol en lien avec les accumulations de neige de part et d'autre du remblai de route. À cette situation d'enneigement problématique s'ajoute celle du drainage qui est nécessaire, mais qui favorise également une dégradation thermique du pergélisol.

Afin d'améliorer la stabilité thermique et en l'occurrence la stabilité mécanique de la route, la stratégie d'adaptation mise en place en 2013 visait à améliorer le drainage afin de canaliser et d'éloigner l'eau qui, avec le temps, avait commencé à s'accumuler en pied de remblai et minimiser l'enneigement en adoucissant les talus avec des pentes (1V :7H). Deux secteurs étaient particulièrement visés par les travaux : soit le secteur 1 entre les chaînages 1+020 et 1+120 m et le secteur 2 entre les chaînages 1+320 m et 1+420 m. Un aperçu des mesures d'adaptations mises en place en 2013 pour ces deux secteurs est présenté à la figure 122A.

Spécifiquement les mesures appliquées consistaient à :

- Enlever la couche de terre végétale à l'endroit des zones de remblai et la mettre en réserve;
- Remblayer les talus de la route suivant les pentes et les matériaux spécifiques aux plans (pentés 1V :7H);
- Creuser de nouveaux fossés de chaque côté de la route d'accès dans les secteurs 1 et 2;
- Installer un empierrement 0-200 mm dans le fond des fossés proposés;
- Installer un nouveau ponceau de 1 200 mm, incluant isolation du fond dans le secteur 1;
- Prolonger les extrémités aval et amont du ponceau existant dans le secteur 2;
- Installer une géomembrane de type bentonite protégée par des géotextiles sur la partie inférieure du talus amont adoucie (côté nord) et le fond du fossé;
- Recouvrir les talus avec la couche de terre végétale mise en réserve;
- Creuser deux fossés de décharge avec empierrement 0-200 mm dans le fond dans les secteurs 1 et 2.

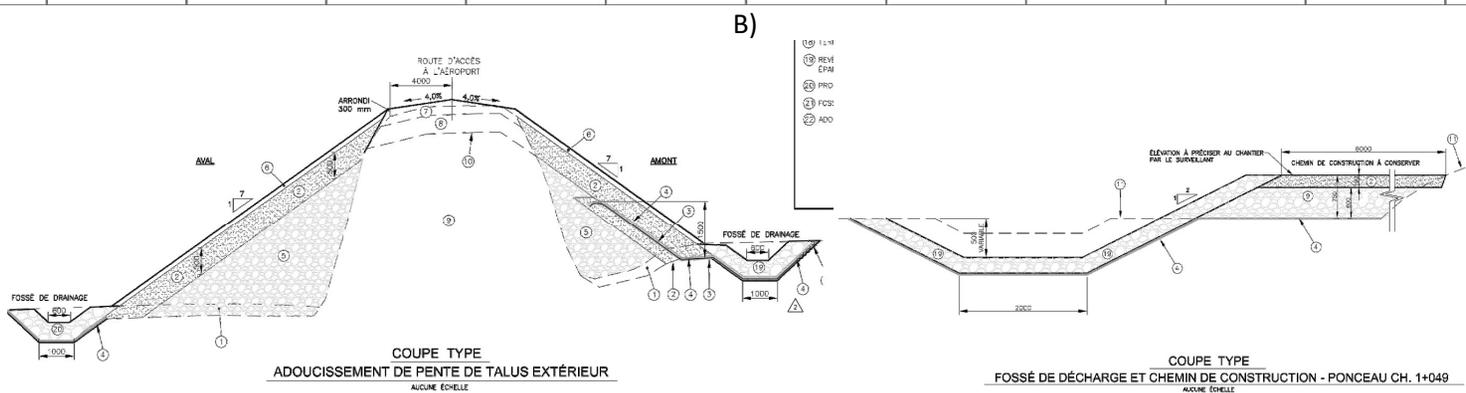
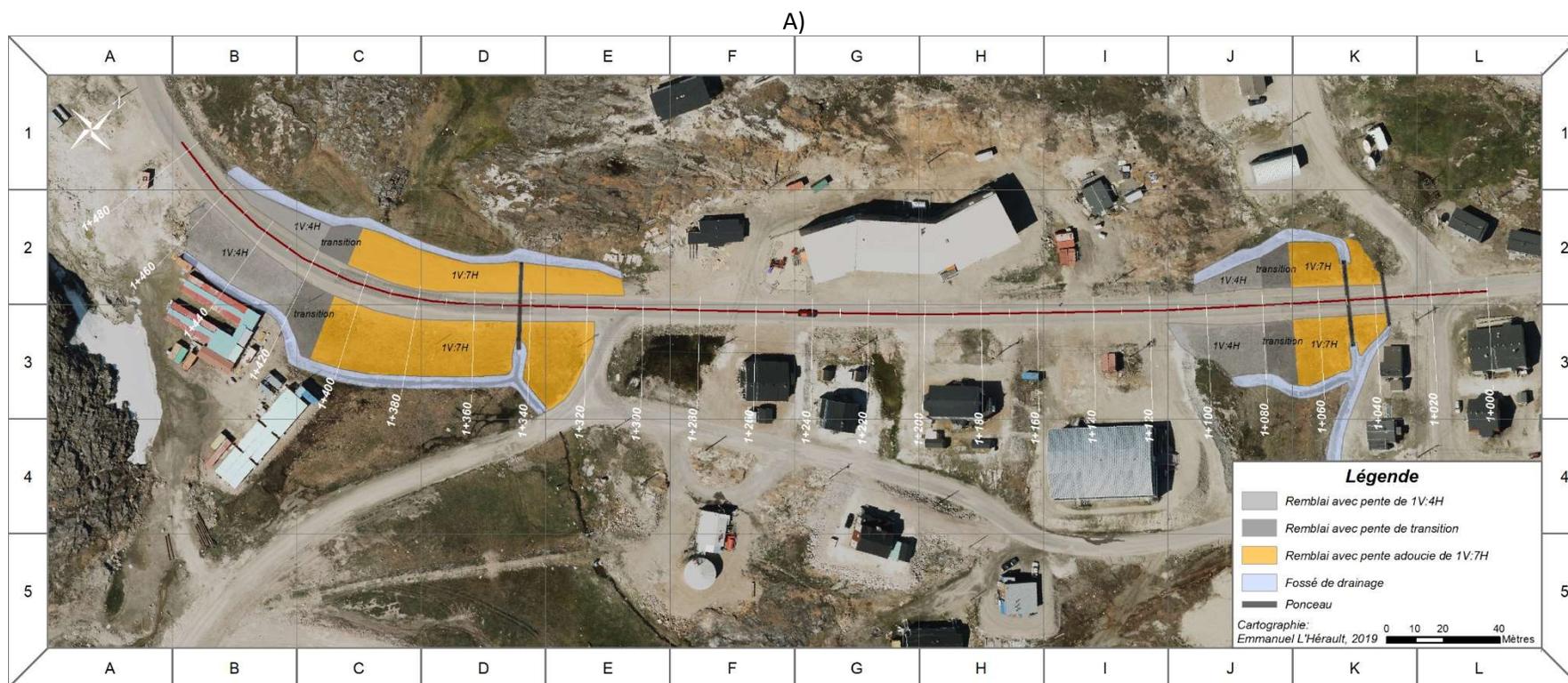


Figure 122 : A) Aperçu générale de la stratégie d'adaptation mise en place le long de la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik. B) Coupes types tirées des plans originaux tel que construit (no. CH-7202-154-04-1163) du remblai à pente douce et des fossés de drainage.

1.7.1.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts de la mise en place de la stratégie d'adaptation pour la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik sont présentés au tableau 28. À l'intérieur de ce tableau, les coûts tirés du bordereau de paiements associé au devis no. 7202-13-3502 ont été regroupés selon les différentes mesures d'adaptation mises en place. Selon cette compilation, les coûts des travaux d'adaptation totalisent un montant de 370 842.31\$.

Lors de la mise en place de la stratégie d'adaptation, des travaux d'entretien ont également été réalisés et consistaient à la scarification, nivellement et rechargement des deux secteurs présentant des dépressions importantes. Selon le bordereau de paiement, les coûts associés à ces travaux d'entretien sont assez négligeables et totalisent 9 900\$. À noter que la dernière intervention portant sur l'entretien de la route remonte à 2011 et consistait à effectuer des travaux d'urgence, mais dont la nature demeure inconnue. Au cours de ces travaux d'entretien, la quantité de MG 20b requise a été prélevée directement à même la réserve de l'aéroport.

Tableau 30 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.

Année	Mesures	Description	Coût (\$)
2013	Enlèvement du pavage	Enlèvement du pavage	2 660.00
		Sous-total =	2 660.00
	Adoucissement des pentes de talus	Matériaux d'emprunt de carrière (tout venant)	50 817.00
		Granulat concassé MG 56	128 100.00
		Récupération de la terre végétale et recouvrement des talus	15 000.00
		Sous-total =	193 917.00
	Imperméabilisation de la base des talus et des fossés	Géocomposite bentonitique	43 410.00
		Geotextile de type V	4 114.00
		Sous-total =	47 524.00
	Fossés de drainage et de décharge	Fossés de drainage	16 480.00
		Fossés de décharge	3 280.00
		Revêtement de protection fossé en pierre calibre 0-200 mm	60 420.00
		Nouveau ponceau 1200 mm	21 000.00
		Isolant thermique, polystyrène type A, épaisseur de 50 mm	3 318.40
Prolongement de ponceau existant		18 000.00	
Sous-total =		122 498.00	
Autres	Avenant au dossier no.05	4 242.91	
	Sous-total =	4 242.91	
Total travaux d'adaptation =			370 842.31
2013-2020	Entretien	Scarification et nivellement de la route	n.d
		Granulat concassé MG 20b modifié (rechargement)	9 900.00
		Nettoyage de fossés	n.a
		Total travaux d'entretien =	9 900.00
Grand total =			380 742.31

1.7.1.4 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE POUR LA PÉRIODE 2013-2020

Lors de la réalisation des forages d'exploration effectués par le Ministère juste avant les travaux d'adaptation, il avait été envisagé d'instrumenter quelques-uns des puits, deux sous les talus et un au centre-ligne, afin de suivre la réponse thermique du pergélisol après la mise en place des talus végétalisés à pentes adoucies. Malheureusement, le plan d'instrumentation proposé par le CEN n'a pas été retenu ce qui rend impossible l'évaluation de la performance thermique des pentes douces. À ce manque de données thermiques s'ajoute également l'absence d'un suivi spécifique aux conditions d'enneigement et de drainage avant et après l'adaptation de l'infrastructure. Cette absence de suivi ne permet pas de documenter si les nouvelles pentes douces sont efficaces pour minimiser les accumulations de neige et les fossés de drainage et de décharge pour drainer efficacement l'eau loin de l'infrastructure. Malgré cette carence en termes de données thermiques et de suivis, les quelques visites sur le terrain effectuées après l'adaptation de la route d'accès en 2013 démontrent, somme toute, une excellente performance. Cette évaluation se base sur des observations visuelles effectuées entre 2013 et 2019 soit lors de tournées organisées par le MTQ, de passages improvisés dans le cadre d'autres projets de recherche ou des campagnes de terrain planifiées dans la présente étude.

L'un des aspects intéressants concernant la mise en place des pentes adoucies et qui distingue les travaux effectués le long de la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik de ceux effectués ailleurs au Nunavik (ex. route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq et de Kangiqsualujuaq) est la récupération du couvert organique à l'endroit des zones de remblai pour ensuite recouvrir la surface des pentes adoucies. Cette pratique a permis une végétalisation de la surface en seulement quelques années (Figures 123 et 124). Les bénéfices thermiques d'une telle mesure, même s'ils n'ont été pas validés par des mesures sur le terrain, sont nécessairement considérables pour plusieurs raisons. D'une part, en raison des propriétés thermiques de cette couche de matière organique à l'état dégelé qui limitent la pénétration du front de dégel en été et qui, à l'état gelé, favorisent l'extraction de chaleur en hiver. D'autre part, cette couche organique permet une végétalisation de la surface, ce qui augmente significativement l'albédo de surface en été ce qui réduit l'absorption de chaleur par rayonnement solaire. Définitivement, il s'agit ici d'une pratique à conserver lors d'adaptation future utilisant les pentes douces ou simplement lors de la construction de nouvelles infrastructures linéaires de transports.

Au point de vue mécanique, aucune fissures et dépressions majeures n'ont été observées le long de la route d'accès. En ce qui concerne les conditions d'enneigement, une visite à l'hiver 2016 avait permis d'observer de très faibles accumulations de neige le long des pentes douces dans les deux secteurs (Figure 125). Hormis quelques amoncellements de neige ici et là associés aux opérations de déneigement, les pentes douces semblent définitivement limiter les accumulations de neige. Pour ce qui est des conditions de drainage, les fossés semblent drainer efficacement l'eau de part et d'autre de l'infrastructure, eau qui est dirigée plus loin de l'infrastructure par les fossés de décharges. À noter que le fossé côté droit (nord) dans le secteur 2 présente quelques déformations sur une cinquantaine de mètres avant le ponceau (Figure 126). Ces déformations favorisent de petites accumulations d'eau stagnante qui demeurent assez restreinte pour le moment. Un simple reprofilage du fossé par comblement permettrait de rétablir le profil du fossé et ainsi résoudre cette déficience.

Côté droit (nord)
2013



2015



Côté gauche (sud)
2013



2015



Figure 123 : État des lieux durant la mise en place des mesures d'adaptation et deux ans après (2015), secteur 1, route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.

Côté droit (nord)
2013



2015



2019



Côté gauche (sud)
2013



2015



2019



Figure 124 : État des lieux durant la mise en place des mesures d'adaptation, deux ans après (2015) et 6 ans après (2019), secteur 2, route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.

Côté droit (nord)

A)



Côté gauche (sud)

B)



C)



D)



Figure 125 : Conditions d'enneigement à la fin de l'hiver 2016 (13 mai 2016) du côté nord (droit) et du côté sud (gauche) de la route pour le secteur 1 (photos A et B) et le secteur 2 (photos C et D).

A)



B)



C)



Figure 126 : Conditions de drainage dans le secteur 2 telles qu'observées le 20 juillet 2019. A) vue d'ensemble du côté droit (nord), B) fossé de drainage du côté droit (nord) et C) fossé de drainage du côté gauche (sud), route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.

1.7.2 LA ROUTE D'ACCÈS À L'AÉROPORT DE KANGIQSUALUJUAQ

1.7.2.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

Situé sur la côte est de la baie d'Ungava à 160 km au nord-est de Kuujuaq et à 100 km à l'ouest des monts Torngat, Kangiqsualujuaq (58.69 °N ; 65.97 °O) est une communauté de plus de 874 habitants. Positionnée au fond d'une anse de la rivière George à près de 25 km en amont du littoral de la baie d'Ungava, la communauté de Kangiqsualujuaq se situe dans la zone de pergélisol discontinu et abondant à la limite de la zone de pergélisol continu (Figure 1). Comme les 13 autres villages du Nunavik, l'intercommunication entre les communautés ainsi qu'avec le reste du Canada repose exclusivement sur les voies maritimes et aériennes. Dans ce contexte, l'aéroport ainsi que ses infrastructures connexes, achevées en 1989, constituent des infrastructures indispensables qui doivent assurément être maintenues opérationnelles.

Le long de la route d'accès, les défauts en lien avec la dégradation du pergélisol sont localisés essentiellement entre les chaînages 0+000 m et 1+075 m, soit dans un secteur mal drainé où le pergélisol, de par les caractéristiques du dépôt meuble en place et de la dynamique hydrogéologique locale, est riche en glace donc sujet aux tassements au dégel. En effet, la récupération de plusieurs échantillons de pergélisol dans ce secteur indique que le dépôt sous cette section de la route est très riche en glace. L'interprétation des relevés de géoradar transversaux suggère également une dégradation avancée du pergélisol en pied de remblai qui peut atteindre plus de 3 m par endroits. La présence d'une zone déprimée d'une dizaine de mètres de largeur de part et d'autre de la route où s'accumule de l'eau formant à l'occasion d'imposantes mares témoigne de cette dégradation. Les ponceaux le long de la route sont localisés dans des endroits sensibles où les risques de dégradation thermique du pergélisol par flux de chaleur convectif (écoulement d'eau) sont très élevés. En effet, à l'emplacement de certains ponceaux, l'eau stagnante qui s'accumule dans les dépressions contribue au réchauffement du pergélisol et le problème prendra de l'ampleur lorsque les mares d'eau déjà existantes s'agrandiront et inonderont la base du remblai. Les signes de dégradation observés actuellement le long de cette section de la route sont le résultat d'une détérioration lente, mais constante du pergélisol, favorisée probablement par l'accumulation de neige et d'eau en pied de remblai et accentuée par la présence d'une surface pavée augmentant considérablement l'absorption de chaleur en été. D'après le contexte topographique de la vallée et comme le suggèrent de nombreux relevés géophysiques réalisés par le passé, l'épaisseur des dépôts meubles, particulièrement celles des sédiments silteux, atteint probablement plus d'une dizaine de mètres. Comme l'épaisseur du pergélisol dans la région est estimée à environ 20 m, il reste encore plusieurs mètres de pergélisol potentiellement riche en glace à dégeler. Avec un réchauffement simulé de 2°C des températures de l'air, les conditions thermiques vont considérablement se réchauffer de chaque côté et également sous la route. Pour la période 2013-2050, les exercices de simulation numérique suggèrent que le front de dégel en pied de remblai atteindra une profondeur d'environ 6,7 m d'ici 2050, ce qui correspond à une augmentation de la couche de sol dégelé de près de 4,2 m par rapport à l'actuel (≈2,5 m). Pour le centre-ligne, la profondeur du front de dégel devrait atteindre près de 10,6 m d'ici 2050, soit une augmentation d'environ 8,7 m par rapport à l'actuel (≈1,9 m) (L'Hérault *et al.* (2014)). Avec une valeur moyenne de tassement total pour le pergélisol d'environ 20 %, le réchauffement du régime thermique projeté pour l'horizon 2050 provoquerait des tassements de plus de 1.7 m sous le centre-ligne et 0.8 m en pied de remblai, ce qui rendrait très difficile le maintien de la route (L'Hérault *et al.* (2014)).

Dans leur étude, L'Hérault *et al.* (2014) avaient conclu qu'en raison de la géométrie du front de dégel, telle qu'observée sur certains profils géoradar, ainsi que des caractéristiques du terrain en bordure de la route (zone déprimée et présence de mares), la neige et les accumulations d'eau en pied de remblai ainsi que l'absorption de chaleur en surface par le revêtement bitumineux étaient les principales causes responsables de la dégradation thermique du pergélisol. À la lumière de ces observations, ces mêmes auteurs avaient proposé une stratégie d'adaptation visant à contrôler le drainage et l'enneigement le long de la route en vue de freiner la dégradation du pergélisol sous les accotements et minimiser tout écoulement d'eau transversal potentiel dans le remblai.

Essentiellement, cette stratégie consistait à mettre en place un remblai à pente adoucie (1V :6H ou 1V :7H) pour la section de la route comprise entre les chaînages 0+000 et 1+075 avec une amélioration du drainage essentiellement du côté sud par l'ajout d'un fossé de drainage évasé et à fond plat à une certaine distance du pied de remblai (Figure 127A). Une stratégie d'adaptation optimale avait également été proposée par ces mêmes auteurs et suggérait, en plus des pentes adoucies, l'application d'un revêtement de surface pâle pour la section de la route comprise entre les chaînages 0+000 et 1+075.

1.7.2.2 STRATÉGIE D'ADAPTATION MISE EN PLACE

Afin d'améliorer la stabilité thermique et en l'occurrence la stabilité mécanique de la route, la stratégie d'adaptation mise en place en 2016 visait à améliorer le drainage afin de canaliser et d'éloigner l'eau qui, avec le temps, avait commencé à s'accumuler en pied de remblai tout en minimisant l'enneigement en adoucissement les talus. Basée sur la stratégie d'adaptation initialement proposée par L'Hérault *et al.* (2014), l'utilisation de pentes douces de 1V :6H a été retenue et appliquée uniformément, sans distinction, des deux côtés de la route entre les chaînages 0+680 m à 1+700 m.

Spécifiquement, les mesures appliquées consistaient à :

- Enlever le revêtement d'asphalte dans certaines sections spécifiques (0+760 à 0+820, 0+920 à 1+190 et 1+340 à 1+600);
- Remblayer les talus de remblai de la route entre les chaînages 0+680 m et 1+700 m ;
- Aménager les fossés latéraux de la route;
- Prolonger l'extrémité des ponceaux existants;
- Aménager des fossés de décharge;
- Remplacer les extrémités de ponceaux existants.
- Installer des câbles chauffant à l'intérieur d'un ponceau

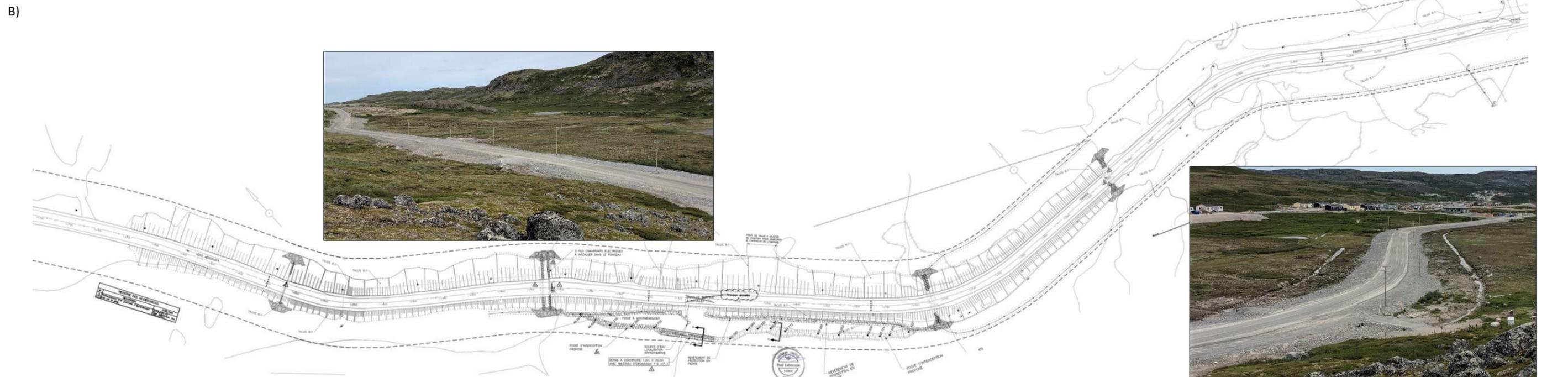
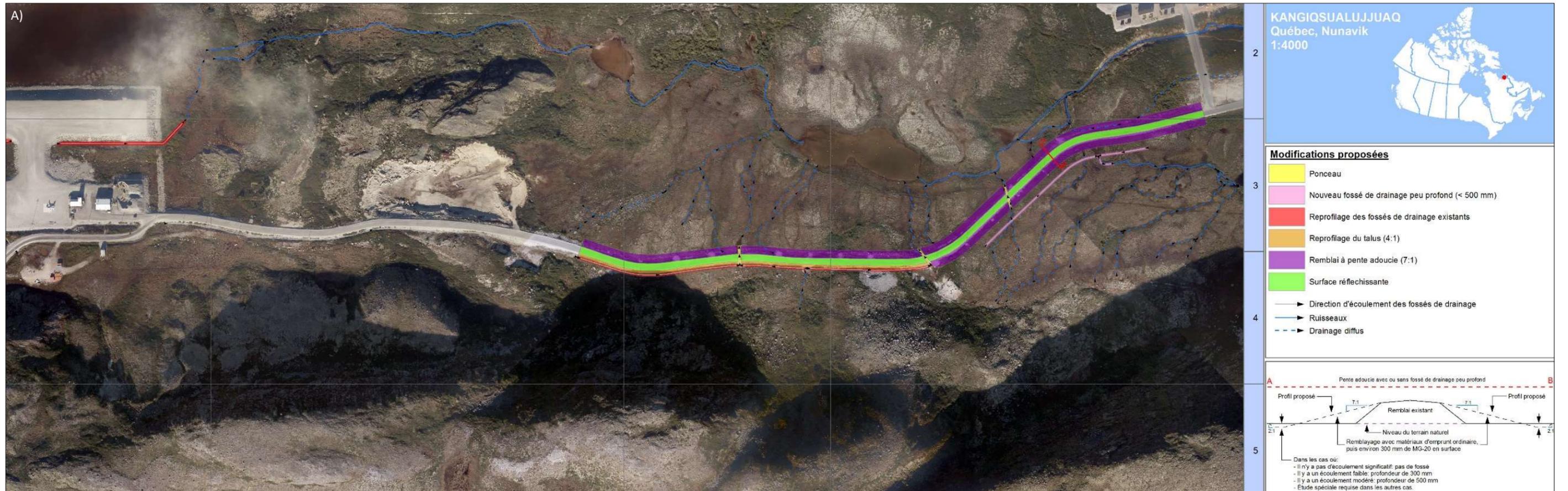


Figure 127 : A) Stratégie d'adaptation telle que proposée par L'Hérault et al. (2014) et B) vue en plan tirée des plans tel que construit no. :CH-7204-154-15-0002(TC), route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq. À noter que sur le plan tel que construit, les pentes douces n'apparaissent pas entre les chaînages 0+680 m et 1+000 m, mais ont bel et bien été mises en place.

1.7.2.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts de la mise en place de la stratégie d'adaptation pour la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq sont présentés au tableau 28. À l'intérieur de ce tableau, les coûts tirés du bordereau de paiements associé au devis no. 7204-16-3504 ont été regroupés selon les différentes mesures d'adaptation mises en place. Selon cette compilation, les coûts des travaux d'adaptation totalisent un montant de 812 094.86\$.

Lors de la mise en place de la stratégie d'adaptation, des travaux d'entretien ont également été réalisés et consistaient à la scarification, au nivellement et au rechargement d'une bonne section de la route comprise entre les chaînages 0+680 et 1+700 m et le nettoyage de quelques ponceaux. Selon le bordereau de paiement, les coûts associés à ces travaux d'entretien totalisent 63 952.40\$. À noter qu'aucune intervention portant sur l'entretien de la route n'est documentée depuis sa construction en 1988.

Tableau 31 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq.

Année	Mesures	Description	Coût (\$)
2016	Enlèvement du pavage	Traits de scies	3 939.14
		Enlèvement du pavage	13 520.23
		Sous-total =	17 459.37
	Adoucissement des pentes de talus	Matériaux d'emprunt de carrière (tout venant) (0-300 mm)	536 170.86
		Redevance applicable à l'exploitation de la carrière	31 729.00
		Sous-total =	567 899.86
	Fossés de drainage et de décharge	Géocomposite bentonitique	13 688.40
		Aménagement de fossés latéral (drainage source)	1 837.60
		Aménagement de fossés latéral (rétablissement de l'écoulement)	17 972.01
		Fossé de décharge (déblais)	733.54
		Revêtement de protection en pierre calibre 0-200 mm; geotextile; bentonitique	42 452.19
		Câble chauffant	4 387.50
		Drain de surface	3 772.80
		Déblai 2 ^e classe	10 708.56
	Sous-total =	95 552.60	
Autres	Avenant au dossier no.01, 04, 05 et 06	131 183.03	
	Sous-total =	131 183.03	
Total travaux d'adaptation =			812 094.86
2016-2020	Entretien	Granulat concassé MG 20b modifié (rechargement)	53 579.90
		Nettoyage de fossés/ponceau	10 372.45
		Total travaux d'entretien =	63 952.4
Grand total =			876 047.21

1.7.2.4 INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DE PERFORMANCE DE LA STRATÉGIE D'ADAPTATION

La route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq ne dispose d'aucune instrumentation permettant de mesurer le régime thermique (câbles à thermistances) ou les déformations (plaques de tassement ou inclinomètre). Dans le cadre de ce projet, deux caméras ont été installées afin de faire le suivi de la dynamique d'enneigement aux abords des pentes adoucies et celle du drainage au niveau des fossés de drainage. L'emplacement de ces deux caméras est présenté à figure 128A.



Figure 128 : A) Localisation des caméras automatisées installées à l'été 2018 le long de la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujuaq. B) Vue d'ensemble du site de la caméra GrCam-1 et C) la prise de vue. D) Vue d'ensemble du site de la caméra GrCam-2 et E) la prise de vue.

1.7.2.5 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE POUR LA PÉRIODE 2016-2019

En raison de l'absence de câbles à thermistances stratégiquement localisés le long de la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq, l'évaluation de la performance thermique des pentes douces mises en place entre les chaînages 0+680 et 1+700 ainsi que le retrait du pavage dans certaines sections n'est malheureusement pas possible.

Quelques visites sur le terrain, dont une réalisée en 2017 dans le cadre d'un autre projet de recherche (Allard *et al.*, 2020) et une effectuée en 2019 dans le cadre du présent projet, permettent toutefois de fournir une appréciation factuelle de la performance récente de l'infrastructure. Au cours de ces visites, aucun signe de dégradation majeure n'a été observé autant du côté des talus, des pieds de remblai et de la surface de roulement pour les sections où le pavage avait été retiré et la surface nivelée. En ce qui concerne les sections toujours pavées, ces dernières présentaient quelques déformations en 2019 localisées essentiellement entre les chaînages 0+680 et 0+920 m (Figure 129). Il est toutefois difficile de déterminer si ces dernières étaient présentes lors de l'adaptation de la route ou sont apparues récemment.

Un aspect important de la stratégie d'adaptation visait à améliorer les conditions de drainage déficientes dans plusieurs secteurs tel que reporté par L'Hérault *et al.* (2014). Pour ce faire, la route d'accès est l'une des seules routes où le MTQ a utilisé des fossés de drainage latéraux positionnés à une certaine distance du pied de remblai entre les chaînages 0+680 et 1+160 m. Excavés directement dans un pergélisol riche en glace, d'importantes dégradations du terrain aux abords de ces fossés étaient alors anticipées malgré leurs faibles profondeurs. Lors des visites sur le terrain en 2017 et 2019, de telles dégradations ont été observées sans toutefois présenter une évolution inquiétante (Figure 130). Malgré la formation de quelques mares et la persistance d'une certaine quantité d'eau au fond de ces fossés (Figure 131F et J), les parois semblent s'être stabilisées. À noter que l'exutoire du fossé latéral situé du côté droit (nord-est) de la route n'est pas connecté au ruisseau avoisinant et crée une mare d'eau relativement importante (Figure 131J). En raison de la distance importante de ce fossé par rapport au pied de remblai de la route, cette situation, quoique non souhaitable, n'a pas d'incidence sur la stabilité de la route dans le secteur.

Les conditions de drainage dans la section de la route où les fossés sont situés directement en pied de remblai du côté amont présentent, quant à elles, de nombreuses problématiques (Figure 131). Parmi ces problématiques, on dénombre de nombreuses dépressions du côté amont qui favorisent la formation de mares d'eau en pied de remblai (Figure 131A, C, D et E). Une section du fossé d'interception latéral avec berme située entre les chaînages 1+340 et 1+380 m, excavé à même le versant et non revêtu d'une protection en pierre, montre des signes avancés de détérioration liés à l'érosion et autres processus gravitaires. Une importante quantité de sédiments se retrouve alors mobilisée et vient combler le fond du fossé et altère ainsi le profil d'écoulement initial. Une brèche dans la berme a même été observée aux environs du chaînage 1+370 m (Figure 131D). Dans cette même section de la route, le profil d'écoulement du fossé de drainage au bas du fossé d'interception est quelque peu obstrué ce qui favorise la formation de petites accumulations d'eau.

Afin de limiter le risque de débordement en période de dégel provoqué par l'obstruction des ponceaux par la glace, des câbles chauffants ont été installés à l'intérieur du ponceau situé au chaînage 1+408 m, mais mis en fonction qu'en 2020 (source MTQ). En conséquence, cette section de la route a subi d'importants dommages associés à un débordement, mais qui se limitent essentiellement au côté aval du remblai. L'obstruction du ponceau principal par la glace a forcé l'eau à emprunter le ponceau de débordement sus-jacent localisé à quelques décimètres sous la surface du remblai et le fort débit à l'exutoire a entraîné une forte érosion du talus jusqu'à exposer le ponceau principal sur une bonne longueur (Figure 131H). Possiblement en lien avec ce débordement, le fond du ponceau principal est désormais recouvert d'une bonne couche de sédiment tandis que le ponceau de débordement est partiellement rempli de gravier (Figure 131I). Au chaînage 1+590 m, des évidences de

débordement en amont du ponceau ont également été observées (Figure 131B). À noter que ce ponceau, comme tous ceux présents le long de la route d'accès à l'exception du ponceau situé au chaînage 1+408 m, ne dispose pas de système de déglacage (câbles chauffants) ce qui le rend sujet à l'obstruction par la glace. D'autres ponceaux semblent également enclins à ce type d'obstruction. Par exemple, lors de la visite sur le terrain au mois de juillet 2019, des masses de glace résiduelles ont été observées dans plusieurs ponceaux. Étant donné le positionnement d'une bonne section de la route au pied d'un imposant versant, il pourrait s'avérer nécessaire de munir tous les ponceaux de câbles chauffants afin de permettre le déglacage rapide des ponceaux au printemps et ainsi éviter les risques de débordements. De tels systèmes devront toutefois être accompagnés d'une procédure d'utilisation permettant un fonctionnement optimal, particulièrement en ce qui concerne la période de mise en marche. À noter que l'installation des câbles chauffants au ponceau 1+408 m n'a pas été effectuée conformément aux plans et devis avec un branchement du côté amont du ponceau au lieu d'un branchement du côté aval. Advenant l'ajout de câbles chauffants supplémentaires, une attention particulière devra être portée afin de respecter la méthode d'installation exigée par le fabricant.

Le suivi photographique des conditions d'enneigement et de drainage relativement complet assuré par la caméra GrCam-1 au cours de la période s'étalant de 2018 à 2020 permet de confirmer que les pratiques de déneigement en vigueur le long de la route d'accès vont à l'encontre de l'objectif premier de la mise en place des pentes douces. L'empilement de la neige par les opérations de déneigement forme actuellement d'importantes accumulations de neige de part et d'autre de la route dès la fin décembre (Figure 132C) et elles persistent jusqu'à la fin avril (Figure 132G). Du côté gauche, la hauteur et la largeur de ces accumulations de neige sont estimées à plus de 2 et 10 mètres respectivement. Du côté droit de la route, le mauvais fonctionnement de la caméra GrCam-2 permet difficilement d'évaluer l'ampleur de ces accumulations de neige, mais ces dernières apparaissent moins imposantes d'après les images captées par la caméra GrCam-1 (Figures 132C, D, E et F). Des accumulations d'ampleur similaire ont également été observées à l'hiver 2019-2020. Rappelons que l'objectif de la mise en place des pentes adoucies est de minimiser les accumulations de neige d'une part, et d'autre part, d'éloigner du centre-ligne de possibles dégradations en lien avec l'écoulement d'eau dans les fossés et aux abords des ponceaux. Pour cette raison, les conditions d'enneigement le long de la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq, qui découlent essentiellement des opérations de déneigement actuelles, s'avèrent néfastes à la performance des pentes douces. En l'absence d'un suivi thermique approprié, cette évaluation demeure toutefois subjective.

En résumé, la présence de déformations relativement importantes dans certaines sections de la route pour lesquelles le pavage n'avait pas été retiré en 2016 pourrait justifier à court terme son retrait et un nivellement subséquent des sections endommagées. Chose certaine, ces dégradations témoignent de la sensibilité au dégel du pergélisol présent sous la route. En raison de la faible épaisseur du remblai, particulièrement dans la section de la route comprise entre les chaînages 0+680 m et 1+140 m, et également de l'absence de technique de mitigation limitant l'absorption de chaleur dans la section centrale de la route outre le retrait du pavage, de telles déformations continueront de se développer advenant une éventuelle augmentation de la profondeur de dégel. Les sections de la route avec revêtement en gravier ne présentent pas de déformations significatives. Les principaux problèmes le long de la route sont essentiellement liés au drainage, particulièrement liés à l'obstruction des ponceaux par la glace qui crée des débordements dans certains secteurs. En ce qui concerne les profils d'écoulement des fossés, certaines sections des fossés latéraux qui longent directement le pied de remblai du côté gauche (chaînage 1+140 à 1+700 m) présentent quelques petites déformations qui favorisent la formation de mares persistantes. Pour le moment, ces dernières ne constituent pas un enjeu à court terme, mais un reprofilage éventuel serait à considérer. Une section du fossé d'interception présente des signes de dégradation avancée associés à l'érosion. Les sédiments ainsi mobilisés s'accumulent au fond du fossé réduisant ainsi sa capacité à intercepter l'écoulement de surface le long du versant. L'absence d'un revêtement de protection en pierre en est principalement la cause. Sans contredit, les pratiques de déneigement devront être revues afin qu'elles puissent s'arrimer avec l'objectif initial de la mise en place des pentes douces.



Figure 129 : Déformations affectant les sections de la route toujours pavées entre les chaînages 0+680 et 0+920 m telles qu'observées lors d'une visite sur le terrain effectuée à l'été 2019, route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujuaq.

2017



2019



Figure 130 : État des fossés latéraux localisés à une distance des pieds de remblai du côté droit (nord-est) et gauche (sud-ouest) un an après (2017) et trois ans après (2019) leur mise en place.

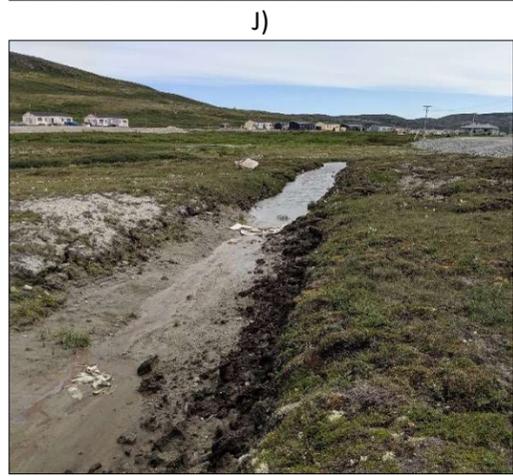
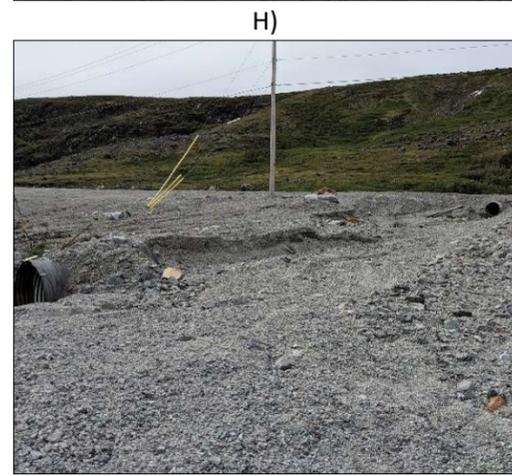
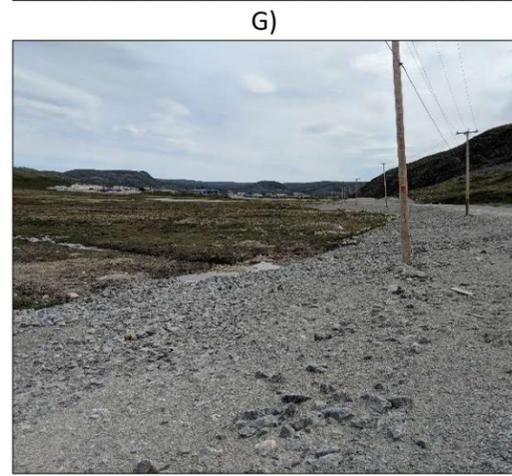
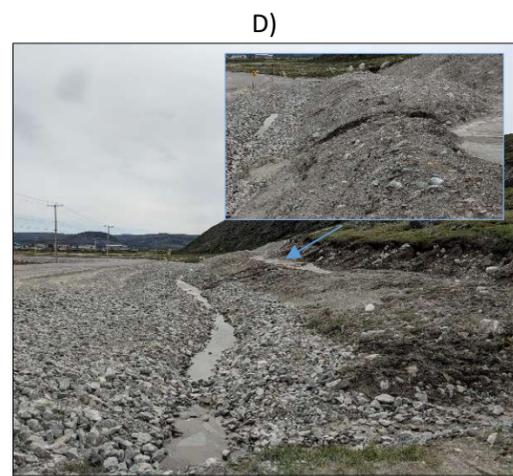
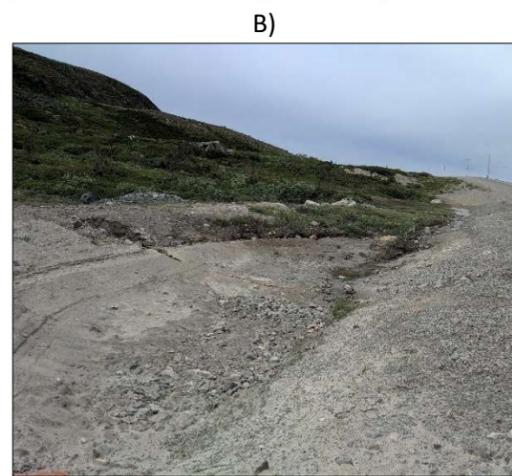
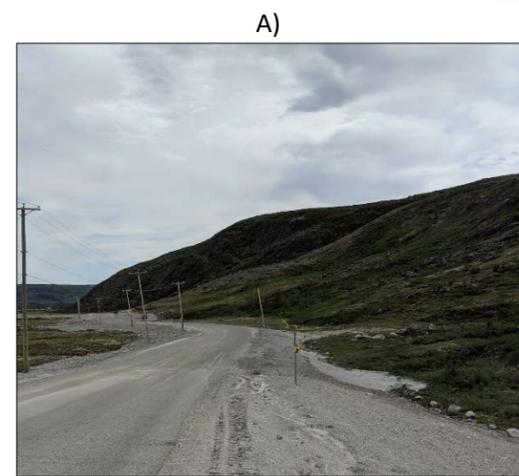
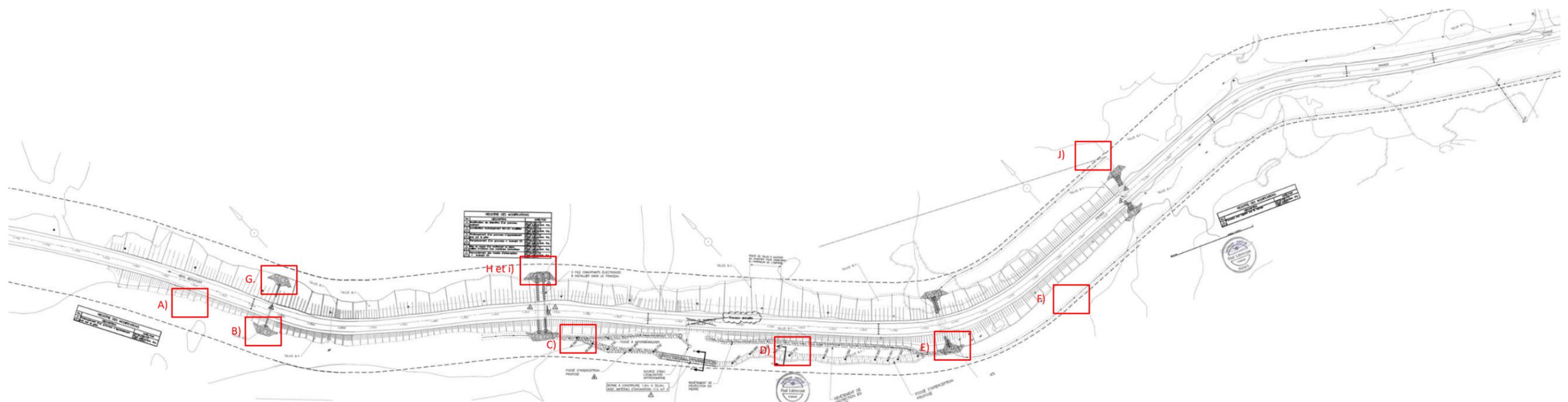


Figure 131 : Aperçu des déficiences le long de la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujuaq associées au réseau de drainage et recensées lors de la visite sur le terrain effectuée à la mi-juillet 2019.

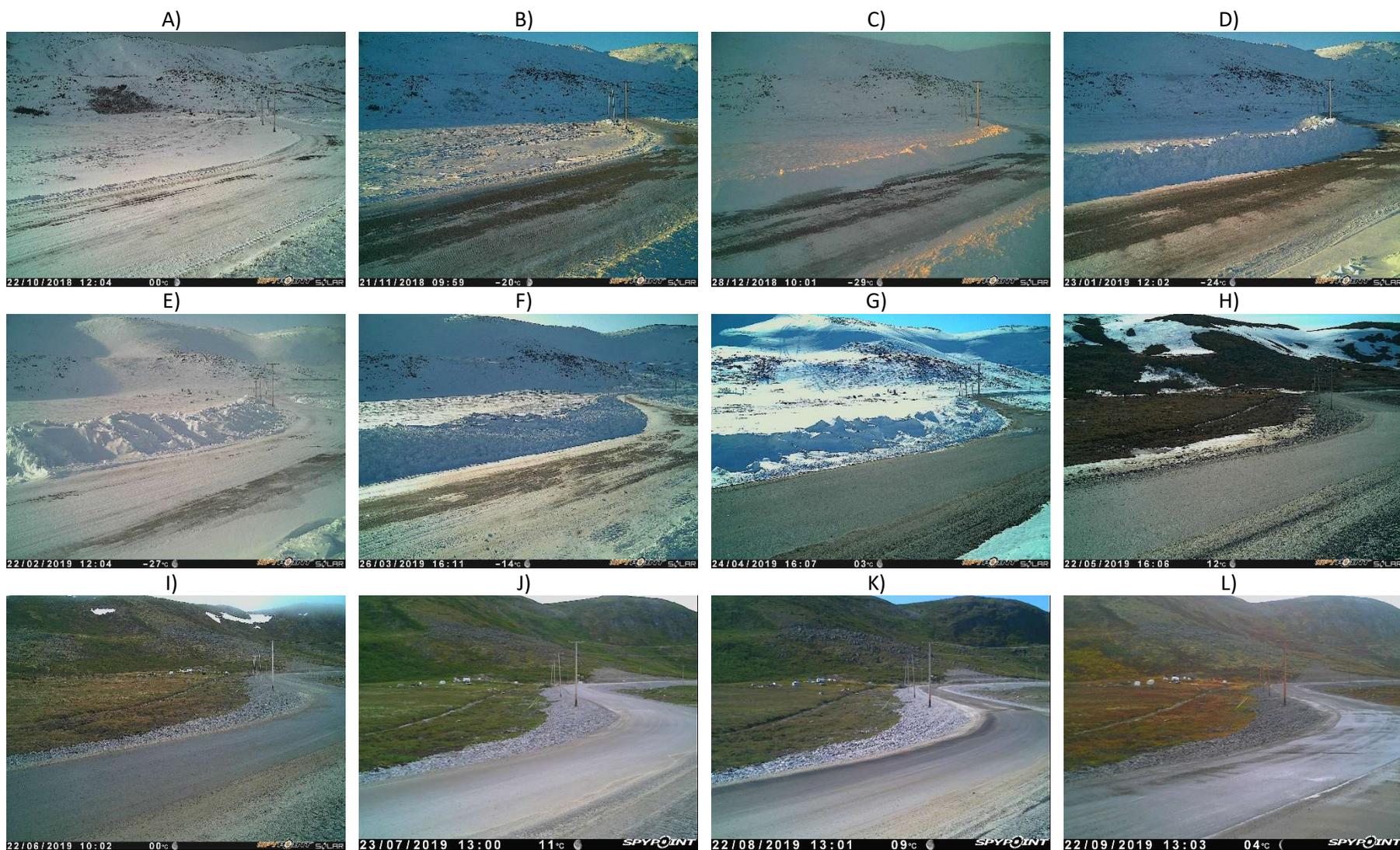


Figure 132 : Évolution des conditions d'enneigement entre les mois d'octobre 2018 à avril 2019 (images A à G) et de drainage entre les mois de mai et septembre 2019 (images H à L), caméra GrCam-1, route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq.

1.7.3 LA ROUTE D'ACCÈS À L'AÉROPORT DE TASIUJAQ

1.7.3.1 MISE EN CONTEXTE, PROBLÉMATIQUES ET ENJEUX LIÉS AU DÉGEL DU PERGÉLISOL

La route d'accès qui relie le village de Tasiujaq à l'aéroport mesure 8 m de largeur et 3410 m de longueur, initialement du chaînage 2+610 m (extrémité sud-ouest, aéroport de Tasiujaq) jusqu'au chaînage -0+800 m (extrémité nord-est, village) (Figure 133A). À noter que dans l'étude réalisée par L'Hérault *et al.*, (2015), le chaînage apparaissant sur les plans « tel que construit » initiaux a été remplacé par un chaînage arbitraire. Ce chaînage arbitraire débute à 0+000 m, soit l'extrémité nord-est du stationnement du terminal anciennement 2+450 m et se termine à 3+270 m, soit l'intersection de la route d'accès avec la première rue perpendiculaire du village anciennement -0+820 m.

L'épaisseur du remblai de la route d'accès n'excède pas 2 mètres en général à l'exception de quelques endroits où celui-ci peut atteindre plus de 5 mètres d'épaisseur. Aucune section de la route ne repose sur une zone en déblai, toutefois, à certains endroits, le remblai y est très mince (< 1 m). Malgré que la route d'accès soit généralement orientée perpendiculairement au drainage de surface, cette dernière ne dispose d'aucun fossé de drainage à l'exception d'une toute courte section d'une soixante de mètres de longueur entre les chaînages 0+320 m et 0+380 m. Cette particularité ne semblait pas poser de problème sauf pour une petite section comprise entre les chaînages 1+520 m et 1+820 m. Pour permettre à l'écoulement de surface de traverser en aval de l'infrastructure et de rejoindre la rivière Bérard, quelques ponceaux ont été stratégiquement localisés ainsi qu'un pont.

De nombreuses déformations causées par une dégradation soutenue du pergélisol sous et en périphérie du remblai sont rapidement apparues dans les quelques années qui ont suivi son pavage en 2006. Ces signes de détérioration prématurés se concentraient essentiellement dans trois sections de la route (0+360 m à 0+500 m, 1+520 m à 2+000 m et 2+240 m à 2+920 m). Les deux dernières sections de la route se distinguaient par la fréquence et l'amplitude des tassements observés. Dans le cadre de leurs travaux, L'Hérault *et al.* (2015) avaient mesuré une dizaine de ces dépressions majeures et déterminé une longueur et une profondeur moyennes d'environ 17 m et 23 cm respectivement. Selon L'Hérault *et al.*, (2015), plusieurs petites dépressions linéaires, de faibles amplitudes et transversales à la route à partir du chaînage 2+580 m seraient attribuables à la présence d'un réseau de coins de glace (Figure 133).

Spatialement hétérogène et diversifiée, la géologie de surface de la région présente une complexité qui résulte d'une succession d'environnements sédimentaires au sein d'une vallée soumise à des conditions macrotidales au cours de la régression marine postglaciaire. Plusieurs observations de terrain, sondages superficiels, forages profonds et levés géophysiques lors de récentes études ont permis de réaliser la grande hétérogénéité spatiale des conditions de terrain (Savard, 2006; Allard et al. ; 2007a; 2007b; Vinet, 2008; L'Hérault et al., 2012; 2013; 2015). Cette hétérogénéité est typique de la sédimentation en zone intertidale nordique où les courants de marée apportent les sédiments fins alors que les glaces flottantes charrient les blocs et les cailloux et que les vagues mélangent et redistribuent le tout. Ainsi, des lentilles de silt riches en glace de quelques mètres carrés de superficie et quelques mètres d'épaisseur alternent avec des sols pierreux et sableux (Allard et al., 2007b). Cette complexité constitue un défi de taille dans l'élaboration d'une cartographie précise des dépôts de surface, assise essentielle dans la détermination des conditions du pergélisol et l'évaluation du risque d'instabilité au dégel.

La carte initialement dressée par Vinet (2008), puis mise à jour par L'Hérault *et al.* (2012; 2013), a été modifiée par L'Hérault *et al.* (2015) afin de tenir compte des nouvelles observations de terrain et connaissances stratigraphiques et géotechniques acquises dans le cadre de leur étude (Figure 134). Basé sur un recensement d'informations géoscientifiques exhaustif, un effort de cartographie des dépôts meubles et de nombreuses observations de terrain incluant des forages et relevés géophysiques, L'Hérault et al. (2015) distinguent ainsi quatre principaux secteurs le long de la route en fonction des conditions géologiques et stratigraphiques

rencontrées soit : le secteur 1 (0+000 m à 0+720 m), le secteur 2 (0+720 m à 1+500 m), le secteur 3 (1+500 m à 2+100 m) et le secteur 4 (2+100 m à 3+270 m).

Dans le secteur 1, la route repose essentiellement sur une couverture discontinue de sédiments fluviatiles sablo-graveleux stratifiés pauvres en glace d'une épaisseur inégale comprise entre 1 et 2 m (unité : Ax) et qui recouvrent des sédiments intertidaux (unité : Ax/MiT) qui consiste en un mélange de sables et de particules fines (silts et argiles) de faible plasticité (USCS : CL ou SC-CL). Ce dépôt présente un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées et des teneurs en eau moyenne d'environ 33 % (L'Hérault et al., 2015). D'après Allard *et al.* (2007), l'eau interstitielle y est saumâtre avec des concentrations en sel dissous de 4,6 à 18,2 g Na Cl/L, pour une moyenne de 8 g/L. Des essais de consolidation au dégel réalisés par L'Hérault et al. (2012;2015) sur ce type de sédiment indiquaient des valeurs de tassement total généralement inférieures à 15 %. Les faibles valeurs de résistivité électrique, généralement inférieures à 102,5 ohm-m, confirment l'étendue de ce dépôt silteux sous l'entièreté de cette section de la route où certaines poches de très faibles résistivités (< 101.5 ohm-m) ont été clairement identifiées (ex. chaînage 0+100 m et 0+350 m) (Figure 134). Pour cette même section de la route, la position du front de dégel inférée par levé géoradar atteignait des profondeurs comprises entre 3.5 et 4.25 m. Quelques coins de glace avaient également été identifiés sur ces levés dont la présence de certains, confirmée en surface entre les chaînages 0+050 et 0+100 m.

Dans le secteur 2, le remblai repose pratiquement en totalité sur un dépôt de sable et gravier épais très résistif (103,9 à 104,3 ohm-m) identifié comme des sédiments littoraux et pré-littoraux (unité : Mn) (L'Hérault *et al.*, 2015). Sous cette unité de sables et graviers, les relevés de résistivité électrique suggéraient la présence d'un diamicton intertidal discontinu similaire à celui rencontré dans le secteur de la piste d'atterrissage. Selon L'Hérault et al., (2015), l'épaisseur importante de sable et gravier non gélif qui recouvre le diamicton expliquerait en partie pourquoi la route dans ce secteur ne montre aucun signe de dégradation pour le moment. À noter que deux zones de faible résistivité comprises respectivement entre les chaînages 0+850 m à 0+900 m et 1+150 m à 1+200 m avaient été interprétées comme étant des poches isolées composées de matériau diamictique potentiellement gélif plus près de la surface. D'après L'Hérault *et al.* (2015), aucun sillon de coins de glace n'avait été observé dans cette section, ce qui n'excluait pas la possibilité que la route en chevauche à certains endroits. La position du front de dégel avait alors été identifiée sur les levés géoradar à des profondeurs comprises entre 4 et 6 m sous le centre de la route.

Dans le secteur 3, la route traverse un secteur mal drainé marqué par la présence de coins de glace dans le milieu environnant. Des forages réalisés dans le secteur confirment la présence d'un sable fin silteux (USCS : SM) en surface dont le contenu en glace semble moyennement élevé sans toutefois montrer une cryostructure complexe. L'un de ces forages a traversé un coin de glace, confirmant hors de tout doute la présence de coins de glace sous le remblai de la route (L'Hérault *et al.*, 2015). Sous cette couche de sable fin et de silt, tous les forages ont atteint une couche de sable et gravier assez grossier qui présentait, étonnamment, certaines zones riches en glace. Sur le levé de résistivité, l'épaisseur de cette couche superficielle aux valeurs de résistivité relativement élevées avait été estimée à environ 2 à 4 m. Plus en profondeur, la diminution des valeurs de résistivités suggérait la présence du diamicton intertidal retrouvé dans le secteur 1 et échantillonné à l'aéroport par L'Hérault *et al.* (2012). Une coupe stratigraphique réalisée dans une ancienne gravière située un peu en retrait à l'est de la route corroborait en ce sens. La position du front de dégel avait été identifiée à une profondeur d'environ 4 m sous le centre ligne de la route, soit bien au-delà du remblai et de l'ancienne couche active, ce qui expliquerait l'ampleur des tassements observés dans le secteur. D'après les nombreux essais de consolidation qui ont été réalisés par L'Hérault *et al.* (2015), le pergélisol affiche des valeurs de tassement total mesurées comprises entre 23 % et 73 % (valeur moyenne de 42 %).

La section de la route qui traverse le secteur 4 repose sur une ancienne terrasse intertidale qui surplombe les rives de la baie Profonde à l'embouchure de la rivière Bérard. Derrière l'estran actuel, cette terrasse intertidale est recouverte de dépôts intertidaux anciens (unité : Mit) qui forment plusieurs petites buttes sablo-graveleuse séparées entre elles par des alluvions littorales silto-sableuses déposées à marée haute (Figure 134). Des excavations réalisées dans le secteur ont révélé la présence d'un silt argileux grisâtre gelé (Mit) recouvert d'environ 2,5 m de sable et gravier (unité: At) (Journeaux, Bédard et Associés, 1990, L'Hérault et al., 2013; 2015). Les levés de résistivité électrique effectués ont permis de confirmer la présence de ces sédiments silto-argileux sous l'ensemble de la route. Le comportement de ces sédiments intertidaux s'apparentait à celui d'une argile inorganique de faible plasticité (USCS : CL ou SC-CL) avec des teneurs en eau généralement inférieures à 25 % et une cryostructure poreuse non visible avec quelques lentilles de glace millimétriques. Lors d'un forage dans le secteur, la firme Journeaux, Bédard et associées Inc. (1990) a observé sensiblement les mêmes caractéristiques géotechniques et mesuré une teneur en sel de 3,369 ppm. Des essais de consolidation réalisés sur ce type de sédiment et sous une contrainte de 100 kPa indiquaient des valeurs de tassement total toutes inférieures à 12 % (L'Hérault et al., 2015). La profondeur du front de dégel identifiée sur le profil géoradar était généralement inférieure à 4 m à l'exception d'une petite section de la route entre les chaînages 2+350 à 2+450 m où cette dernière atteignait environ 5 m.

D'après les conclusions de l'étude réalisée par L'Hérault *et al.* (2015), les diamictons intertidaux et sédiments glaciomarins fins sensibles au dégel présent à plusieurs endroits sous la route continueraient à dégeler et engendrer des tassements dans les années à venir, particulièrement dans les secteurs 3 et 4. Afin de ralentir le dégel du pergélisol et prolonger la durée de l'infrastructure le long de la route, la stratégie d'adaptation développée en collaboration avec le MTQ visait essentiellement à contrôler le drainage et l'enneigement en bordure du remblai le plus possible, augmenter l'albédo de surface en retirant le pavage et rehausser le remblai au besoin dans les sections plus minces. Sur l'ensemble des secteurs, seul le secteur 2 ne requérait pas d'intervention particulière outre le maintien d'un suivi des défauts.

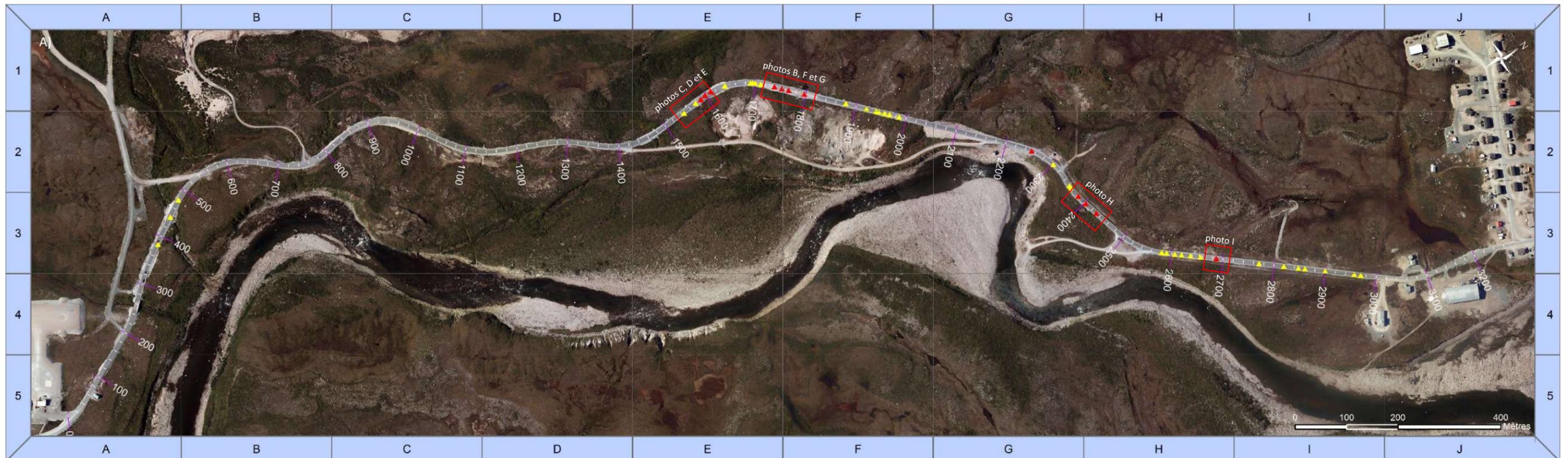


Figure 133: A) Aperçu général de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq. B), C) et D) Tassements différentiels et déformation subséquente de la surface pavée. E) Coin de glace qui traverse sous le remblai de la route. F) Fissures longitudinales qui suggèrent une fatigue de la chaussée par tassement. G) Accumulation d'eau aux abords d'un ponceau. H) Série de dépressions de grande amplitude. I) Dépressions linéaires dont le patron géométrique semble attribuable à la présence d'un réseau de coins de glace (Tirée de L'Héroult *et al.*, 2015).

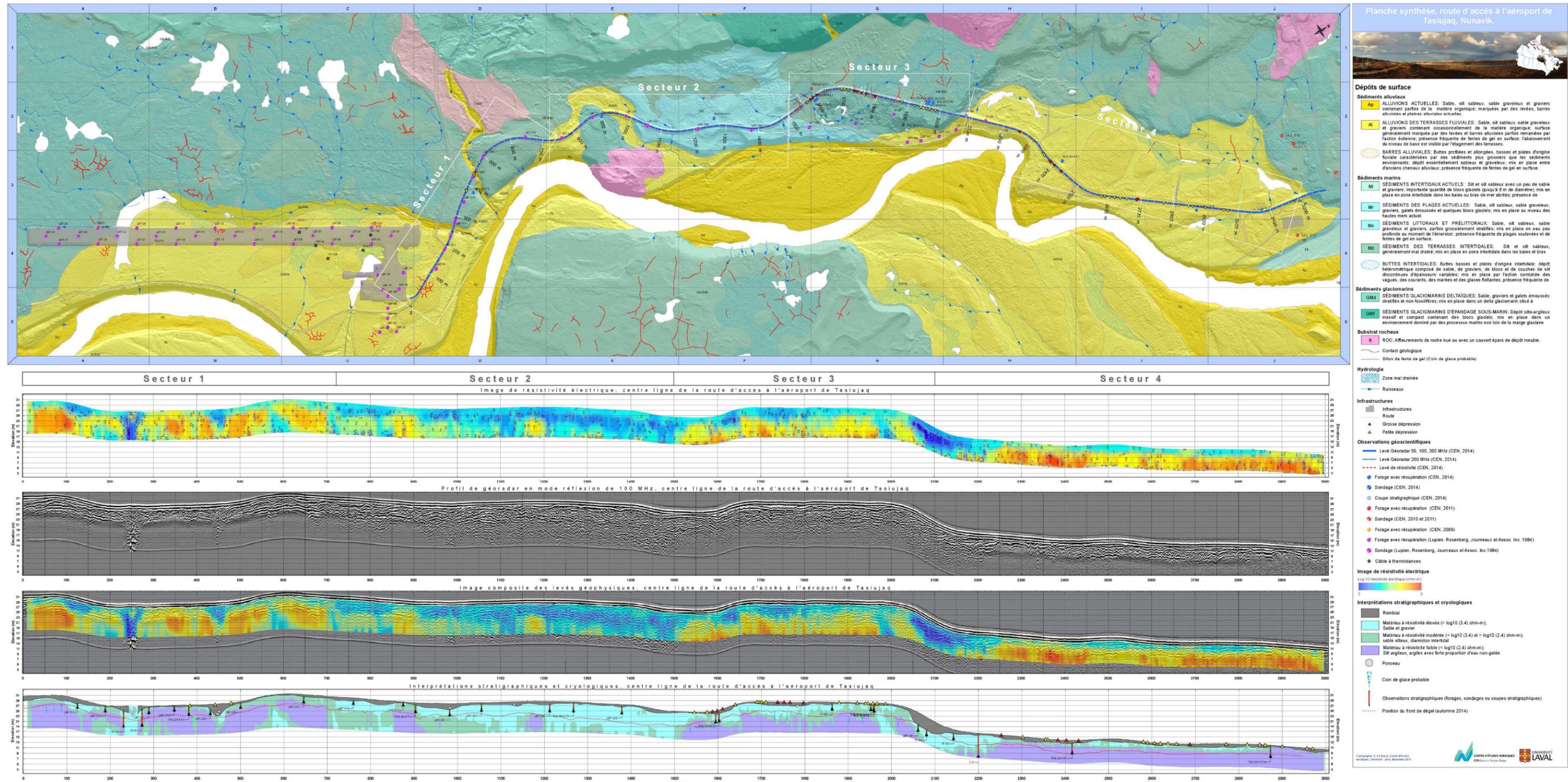


Figure 134 : Planche synthèse présentant la répartition des dépôts de surface, les interprétations stratigraphiques et propriétés cryologiques du pergélisol le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq (Tirée de L'Héroult et al., 2015).

1.7.3.2 STRATÉGIE D'ADAPTATION MISE EN PLACE

Afin d'améliorer la stabilité thermique et en l'occurrence la stabilité mécanique de la route pour certains secteurs problématiques, la stratégie d'adaptation mise en place en 2018 visait à améliorer essentiellement le drainage afin de canaliser et d'éloigner l'eau qui, avec le temps, avait commencé à s'accumuler en pied de remblai, minimiser l'enneigement en adoucissement les talus avec des pentes (1V :6H) et augmenter l'albédo de surface en retirant le pavage. Afin de structurer la réalisation des plans et devis, la description des mesures qui composent la stratégie d'adaptation pour la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq a été subdivisée en quatre secteurs. À noter que les chaînages qui délimitent ces secteurs diffèrent de ceux utilisés par L'Hérault *et al.* (2015). Un aperçu des mesures d'adaptations mises en place en 2018 pour ces secteurs est présenté à la figure 135.).

Spécifiquement, les mesures appliquées par secteur consistaient à :

Secteurs 1 (chaînages 0+240 et 1+740) et 3 (chaînages 2+520 et 2+960)

- Enlever le pavage;
- Enlever la couche de terre végétale à l'endroit des zones de remblais et mettre en réserve les matériaux excavés;
- Remblayer des talus extérieurs de la route en respectant les pentes et les matériaux prévus aux plans et devis;
- Recouvrir les talus de la route avec la couche de terre végétale mise en réserve;
- Corriger le profil de la route;
- Creuser des fossés de drainage en amont de la route d'accès et installer des empierrements 0-200 dans le fond des fossés proposés;
- Installer une géomembrane de type bentonite protégée par un géotextile de type V sur la partie inférieure du talus en amont de la route et aux fossés de drainage et sous l'empierrement du lit du cours d'eau en amont et en aval de chaque ponceau
- Remplacer certains ponceaux double par un seul ponceau et creuser un bassin de dissipation d'énergie (seulement dans le secteur 3);
- Installer des matelas anti-érosion (en amont et en aval) sur les talus adoucis et adjacents aux fossés de drainage, sauf pour les zones d'empierrement des ponceaux.

Secteur 4 (chaînages 2+960 et 3+040)

- Nettoyer les unités de fondation du pont P-11930 situé au chaînage 2+990;
- Protéger les talus des culées du pont P-11930.

À noter qu'aucuns travaux n'étaient projetés pour le secteur 2 (chaînages 1+740 et 2+520).



Secteurs 3 et 4

Secteur 1

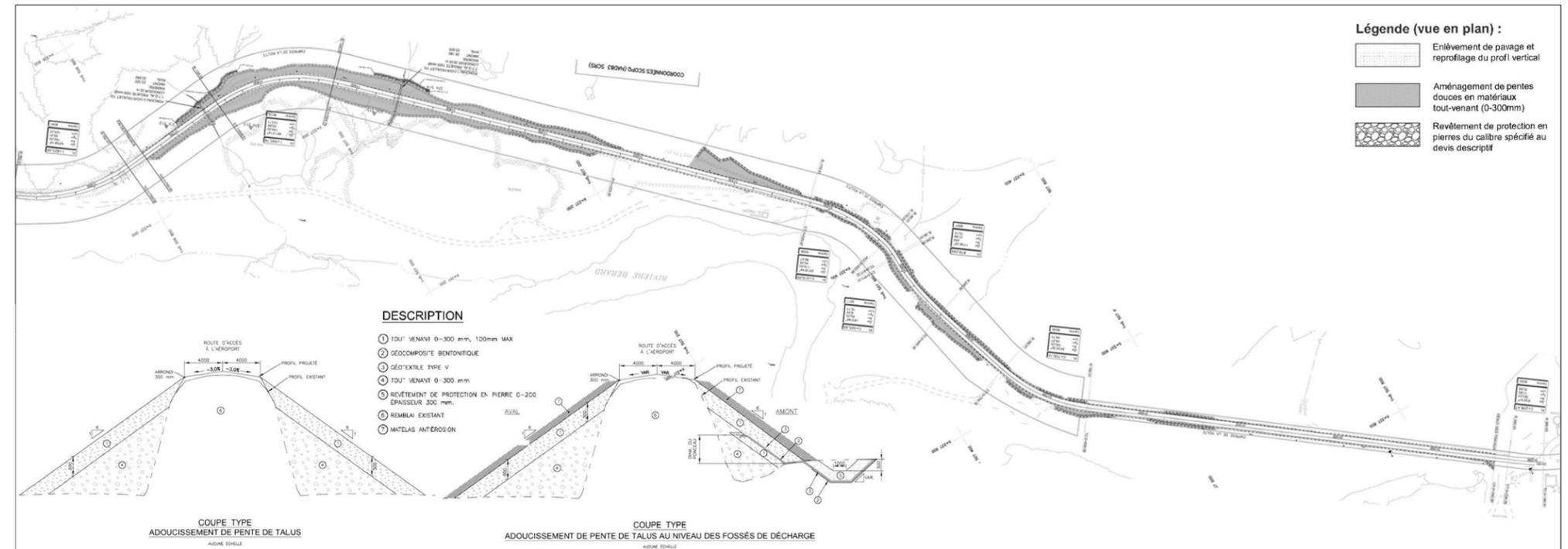


Figure 135 : Aperçu général de la stratégie d'adaptation mise en place le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq par secteur d'interventions accompagné de coupes types des remblais à pente douce et des fossés de drainage tirées des plans produits pour soumission et construction (plan no. CH-7204-154-10-0071).

1.7.3.3 COÛTS DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE ET D'ENTRETIEN

Les coûts de la mise en place de la stratégie d'adaptation pour la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq sont présentés au [Tableau 32](#). À l'intérieur de ce tableau, les coûts tirés du bordereau de paiements associé au devis no. 7204-17-0902 ont été regroupés selon les différentes mesures d'adaptation mises en place. Selon cette compilation, les coûts des travaux d'adaptation totalisent un montant de 463 477.30\$.

Lors de la mise en place de la stratégie d'adaptation, des travaux d'entretien ont également été réalisés et consistaient à la scarification, au nivellement et au rechargement des sections problématiques de la route. Selon le bordereau de paiement, les coûts associés à ces travaux d'entretien totalisent 71 623.81\$. À noter qu'aucune intervention portant sur l'entretien de la route n'est documentée depuis sa construction en 1988.

Tableau 32 : Coûts des travaux en lien avec la mise en place des mesures d'adaptation pour la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq.

Année	Mesures	Description	Coût (\$)
2018	Enlèvement du pavage	Traits de scies	572.00
		Enlèvement du pavage	26 700.00
		Sous-total =	27 272.00
	Adoucissement des pentes de talus	Déboisement	10 000.00
		Matériaux d'emprunt de carrière (tout venant) (0-300 mm)	111 190.80
		Sous-total =	121 190.80
	Ponceaux et fossés de drainage	Ponceau circulaire, tuyau en tôle d'acier ondulé, 1500 mm de diamètre	30 800.00
		Ponceau circulaire, tuyau en tôle d'acier ondulé, 1000 mm de diamètre	17 600.00
		Ponceau circulaire, tuyau en tôle d'acier ondulé, 2700 mm de diamètre	115 000.00
		Isolant thermique, polystyrène type A, 50 mm	31 795.50
		Géocomposite bentonitique	19 210.50
		Géotextile de type V	7 857.00
		Enrobage de ponceaux avec coussin en MG 20b modifié	37 841.10
		Creusage des fossés de drainage amont	3 501.60
		Revêtement de protection en pierre	43 788.00
		Matelas anti érosion en fibre de bois	7 620.80
	Sous-total =	315 014.50	
Autres		n.a	
	Sous-total =	n.a	
Total travaux d'adaptation =			463 477.30
2018-2020	Entretien	Pierre concassée MG-56 (sous-fondation de chaussée)	15 001.90
		Granulat concassé MG 20b modifié (rechargement)	33 885.11
		Reprofilage des hauts de talus	10 736.80
		Nettoyage et réglage final	12 000.00
		Total travaux d'entretien =	71 623.81
Grand total =			535 101.11

1.7.3.4 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE POUR LA PÉRIODE 2018-2021

En raison de l'absence de câbles à thermistances stratégiquement localisés le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq, l'évaluation de la performance thermique des pentes douces mise en place ainsi que le retrait du pavage dans les secteurs 1 et 3 n'est malheureusement pas possible.

Les quelques visites sur le terrain réalisées à l'été 2019 et 2021 dans le cadre du projet permettent toutefois de fournir une appréciation factuelle de la performance récente de l'infrastructure. Au cours de ces visites, aucun signe de dégradation majeure n'a été observé autant du côté des talus adoucis, des pieds de remblai et de la surface de roulement pour les sections où le pavage avait été retiré et la surface nivelée (Figure 136). La section toujours pavée et n'ayant pas fait l'objet de travaux d'adaptation (secteur 2), semblait toujours en bon état à

l'exception d'une petite section affectée par une fissure longitudinale d'une trentaine de mètres de longueur positionnée sur l'accotement (Figure 136B).

L'absence de suivi ciblé sur les conditions d'enneigement avant et après la mise en place de la stratégie ne permet pas de déterminer avec certitude si cette dernière a permis d'améliorer les conditions d'enneigement. Une visite tardive à la fin de l'hiver 2019 a toutefois permis de constater que les conditions d'enneigement dans les secteurs adaptés étaient favorables au maintien du pergélisol. En effet, les photos aériennes prises en mai 2019 démontrent une absence de neige ou de très faibles accumulations sur pratiquement l'ensemble de la route (Figure 137). Le secteur 2 (Figure 137B, C et D), soit le secteur non adapté, présentait de plus grandes accumulations de neige par rapport aux autres secteurs, mais somme toute assez négligeables. D'après ces observations, les conditions d'enneigement le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq semblent actuellement favorables au maintien d'un pergélisol froid. En l'absence d'un suivi des conditions d'enneigement avant et après l'adaptation de la route, il est toutefois impossible de conclure avec certitude que les faibles accumulations de neige observées à la fin de l'hiver 2019 découlent directement de l'utilisation des pentes douces. Un suivi plus régulier permettrait de confirmer cette observation. Chose certaine, les conditions d'enneigement, telles qu'observées à la fin de l'hiver 2019, sont favorables au maintien d'un pergélisol froid.

Un aspect important de la stratégie d'adaptation visait à améliorer les conditions de drainage déficientes dans plusieurs secteurs tel que rapportées par L'Hérault *et al.* (2015). Pour ce faire, plusieurs fossés de drainage et ponceaux ont été ajoutés dans les secteurs 1 et 3. Malgré la faible profondeur des fossés, l'excavation nécessaire pour leurs réalisations au sein d'un pergélisol riche en glace parsemé de coins de glace laissait présager le développement de quelques tassements dus au dégel. Lors des visites sur le terrain en 2019, de telles dégradations ont été observées le long des fossés entre les chaînages 1+600 m et 1+680 m (Figure 139A et B) et les chaînages 1+440 m et 1+500 m (Figure 139D et E). Entre les chaînages 1+440 m et 1+500 m, le fossé ne présente pas un profil concave standard, mais plutôt plat avec une très faible pente vers le ponceau (Figure 139D). La base du ponceau quant à elle apparaît légèrement plus haute que le terrain avoisinant (Figure 139E). Ces deux particularités semblent limiter la capacité du réseau de drainage à drainer efficacement l'eau de ce secteur. Pour ces deux secteurs, la présence d'eau dans les exutoires situés du côté amont (Figure 139C et F) indique toutefois qu'un certain drainage s'effectue malgré les déformations qui altèrent les profils d'écoulement des fossés du côté aval. La pente des exutoires aurait pu être légèrement plus accentuée, ce qui aurait probablement permis d'éviter la stagnation de l'eau au fond des fossés. Étant du côté aval du remblai de la route, ces accumulations d'eau aux exutoires, quoique non souhaitables, n'ont pas d'incidence sur la stabilité de la route dans le secteur.

Considérant l'absence de défauts majeures observées le long de la route d'accès lors de visites sur le terrain effectuées au cours des deux années suivant son adaptation, il est possible de confirmer que la stratégie en place performe bien jusqu'à maintenant. Les sections de la route avec revêtement en gravier ne présentent pas de déformations significatives. Les principaux problèmes le long de la route sont essentiellement liés au drainage. Les quelques fossés mis en place présentent des profils d'écoulement légèrement altéré par de petits tassements localisés qui favorisent la formation de mares d'eau en pied de remblai. Pour le moment, ces dernières ne constituent pas un enjeu à court terme, mais témoignent de la sensibilité au dégel du pergélisol accentuée par endroit par la présence de quelques coins de glace qui traversent la route. Un reprofilage des fossés devra être considéré à court terme afin d'éviter que les conditions de drainage, toujours sous contrôles actuellement, n'entraînent une dégradation thermique sous la route.

Il est important de mentionner que cette évaluation de performance se base exclusivement sur des observations visuelles sporadiques réalisées sur le terrain et que la période de suivi demeure à ce jour très courte. De plus, le contexte climatique récent dans la région a certainement contribué au maintien de températures froides au sein du pergélisol et à la bonne performance de l'infrastructure. Par conséquent, un suivi plus méthodique et régulier

à long terme serait à privilégier afin de bien documenter l'évolution des signes de dégradation qui se développent dans certains secteurs (exemple : section comprise entre les chaînages 1+400 m et 1+740 m), mais qui se limitent actuellement qu'aux fossés. À ce suivi mécanique, il serait pertinent également de procéder à des relevés de conditions de drainage et d'enneigement réguliers dans les sections adaptées de la route afin de mieux évaluer la performance à long terme des pentes douces dans le contrôle de ces deux variables responsables en grande partie de la dégradation du pergélisol le long d'infrastructures linéaires de transport au Nunavik (Allard *et al.*, 2007, L'Hérault *et al.*, 2012; 2014; 2015). En raison de la faible épaisseur du remblai dans la section de la route comprise entre les chaînages 0+240 m et 1+100 m, des déformations sont susceptibles de réapparaître advenant une éventuelle augmentation de la profondeur de dégel, et ce malgré un adoucissement des pentes, un rehaussement du remblai et le retrait du pavage. L'absence de câbles à thermistances stratégiquement positionnés dans les secteurs sensibles limite toutefois notre capacité à pleinement quantifier les bénéfices thermiques engendrés par la mise en place de telles mesures de mitigation et ultimement leurs capacités à contrer les effets du réchauffement des températures de l'air anticipé au cours des prochaines décennies.



A)

B)

C)



D)

E)

F)



Figure 136 : Aperçus généraux de l'état du remblai de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq, juillet-septembre 2019. A) Secteur 4. B) Secteur 2. C) à F) Secteur 1.



A)

B)

C)



D)

E)

F)



Figure 137 : Aperçus des conditions de neige au mois de mai 2019 le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq. A) Secteurs 3 et 4. C, B et D) Secteur 2. E) et F) secteur 1.

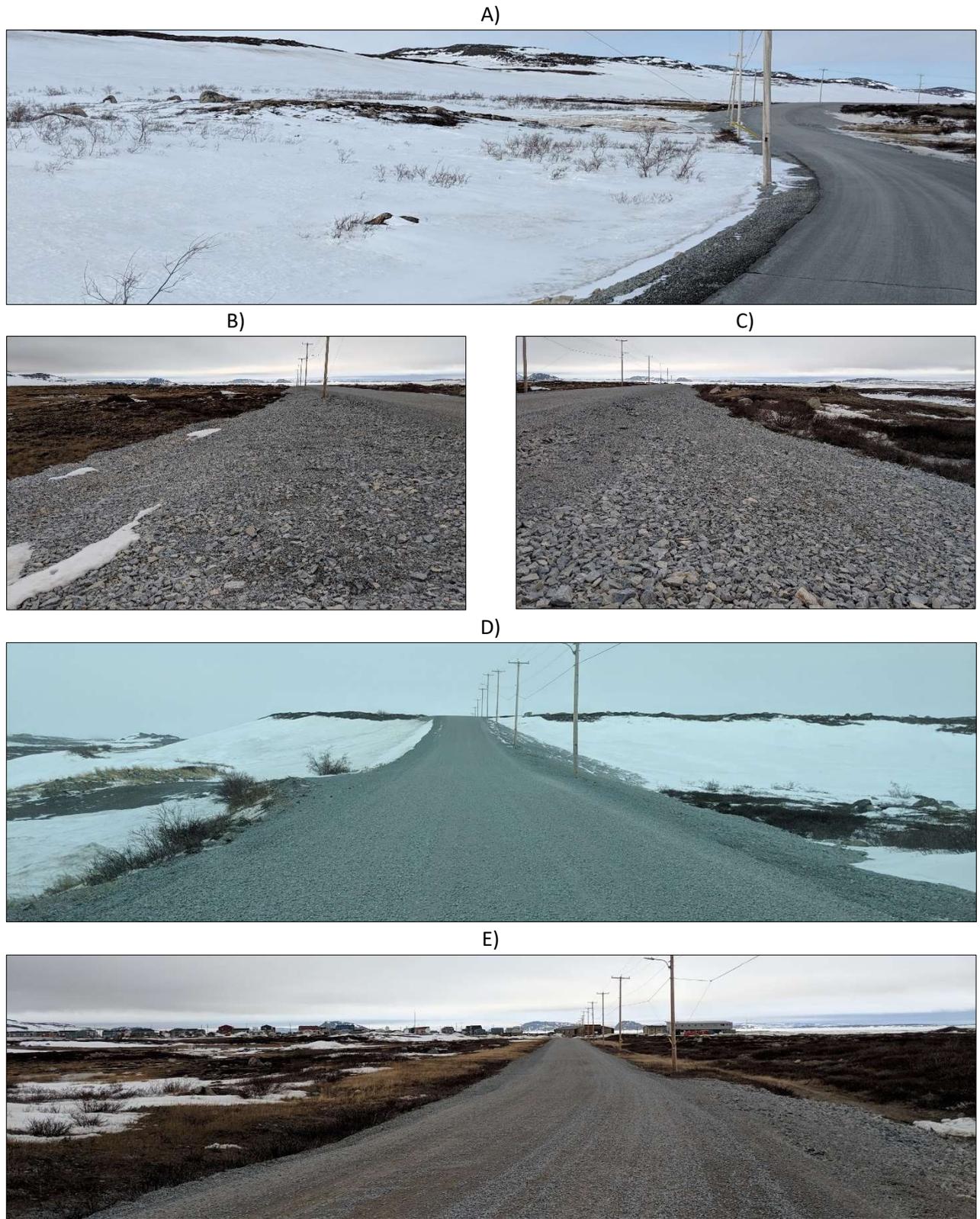


Figure 138 : Aperçus au sol des conditions de neige au mois de mai 2019 le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq. A) Secteurs 2. B) et C) Secteur 1 chaînage 1+500 m. D) Secteur 1 chaînage 1+200 m. E) Secteur 1 chaînage 0+700 m.



A)

B)

C)



D)

E)

F)



Figure 139 : Conditions de drainage le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq, juillet-septembre 2019. Fossés (A et D) et embouchures ponceau côté amont (B et E) et aval (C et F).

1.8 ANALYSES COÛTS-BÉNÉFICES-EFFICACITÉ DES MESURES/TECHNIQUES D'ADAPTATION

1.8.1 DESCRIPTION DE L'APPROCHE CONCEPTUELLE UTILISÉE

Une évaluation des coûts-bénéfices-efficacité a été réalisée pour les infrastructures aéroportuaires qui ont fait l'objet de travaux d'adaptation et pour lesquels des données sur les coûts et sur l'efficacité sont disponibles. Une représentation schématique de cette analyse est présentée à la figure 140.

Toutefois, en raison des données fragmentaires liées aux coûts, aux bénéfices et à l'efficacité des diverses stratégies d'intervention pour les infrastructures de transport du Nunavik, l'analyse coûts-bénéfices-efficacité a été réalisée suivant trois approches :

1. Une approche basée sur l'information disponible dans la littérature. Plusieurs études ont été réalisées au Yukon et au Nunavik et la synthèse de cette information permet d'évaluer sommairement les coûts-bénéfices-efficacité de différentes stratégies.
2. Une approche basée sur les volumes de matériaux granulaires et le nombre d'interventions requis pour trois pistes d'atterrissage du Nunavik considérées stables et trois autres considérées instables.
3. Une approche basée sur la méthodologie proposée par Ficheur (2011) pour certains cas bien documentés. Cette méthode servira de fondement à l'outil d'analyse coûts-bénéfices-efficacité proposé.

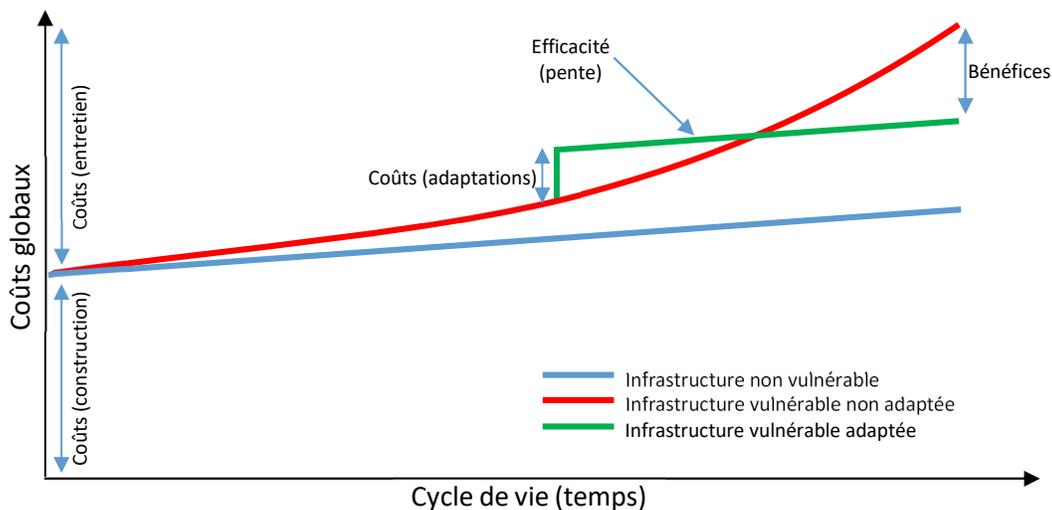


Figure 140 : Schéma conceptuel de l'analyse coûts-bénéfices-efficacité.

1.8.2 ANALYSE DES INFORMATIONS DISPONIBLES DANS LA LITTÉRATURE

Certaines publications réalisées au cours des dernières années permettent de quantifier de façon objective les coûts et les avantages de différentes stratégies d'intervention sur des routes ou pistes d'atterrissage affectées par la dégradation du pergélisol, incluant la stratégie la plus utilisée, l'entretien intensif.

Burn et Dominie (en préparation, 2021) ont récemment repris l'analyse faite par Reimchen *et al.* (2009), sur les coûts additionnels d'entretien du Yukon Highways and Public Works pour les sections de la route de l'Alaska

construites sur pergélisol sensible au dégel. L'analyse est plus exhaustive et conclue que les coûts liés à l'entretien des sections construites sur pergélisol sensible sont 5 fois plus élevés que ceux des sections construites sur pergélisol stable ou sans pergélisol.

L'étude réalisée par Reimchem *et al.* (2009) a démontré que pour la période de 2005 à 2008, les coûts additionnels d'entretien du Yukon Highways and Public Works étaient de 22 000\$/km/année pour les sections de la route de l'Alaska construites sur pergélisol sensible au dégel. Selon les coûts publiés, le coût d'entretien de ces sections est donc 8 fois plus élevé que pour les sections stables équivalentes. Toutefois, si ces coûts étaient fonction des besoins plutôt que du budget, ils seraient plutôt de 36 000\$/km/année. L'étude spécifiait que la durée de vie moyenne des traitements de surface (BST) sur les sections construites sur pergélisol sensible est de 3 ans alors qu'elle varie entre 12 et 15 ans pour les sections construites sur pergélisol non-sensible ou sans pergélisol.

Malenfant-Lepage (2016) a repris les données de Reimchem *et al.* (2009) et a ajouté la performance relative sur la base du bilan thermique observé durant trois ans sur les sections du site d'essai. Le tableau 33 et la figure 141 présentent la synthèse des résultats de ces analyses.

Il ressort de cette analyse que les coûts de mise en place de la plupart des méthodes d'adaptation peuvent difficilement être justifiés sur la simple rentabilité économique. Il est cependant important de considérer que les coûts de mise en œuvre souvent improvisée de plusieurs systèmes complexes ne peuvent pas être considérés représentatifs d'une application à grande échelle. Il faut néanmoins noter la bonne performance relative du traitement de surface à albédo élevé (granulats clairs) et de la technique de déneigement des talus.

Au Nunavik, Ficheur (2011) a évalué le coût-bénéfice-efficacité des méthodes de mitigation du pergélisol mises en place à la piste d'atterrissage de Tasiujaq en utilisant le refroidissement apporté par chaque technique, la durée de vie des systèmes installés ainsi que le coût de mise en place des méthodes d'adaptations. Une comparaison a été faite avec un entretien sans adaptation. Cette analyse a été faite pour des sections d'essai et les coûts d'adaptation et d'entretien par mètre linéaire sont nécessairement plus élevés pour de courtes sections comparativement à un projet à échelle réelle. Toutefois, Ficheur a basé son analyse sur les tassements anticipés dont l'ampleur est réduite en fonction de l'efficacité des méthodes, diminuant ainsi la quantité de gravier utilisé lors des entretiens. Le coût d'entretien lié aux tassements a été établi comme étant le volume matériaux requis pour combler une dépression, multiplié par le coût de 1 m³ de matériau placé (estimé à 100\$/m³). L'analyse a été faite pour un mètre linéaire de piste en considérant différentes largeurs de piste affectées à partir de l'épaulement du remblai. L'analyse a été faite pour des largeurs de 3.5 m, 7 m et 14 m.

L'importance de la réduction des tassements est quantifiée à l'aide des efficacités calculées à l'aide du flux de chaleur (chapitre 5) et des corrections calculées suite à une modélisation (chapitre 6). Tenant compte du fait que les sections à pente douce et à drain thermique maintiennent approximativement la température stable à 1,7 m de profondeur, l'hypothèse d'une réduction des tassements de 90% est faite.

Les coûts de construction et les hypothèses sur la durée de vie des systèmes de protection utilisés dans l'étude de Ficheur sont donnés au tableau 34. La figure 142 illustre les résultats de l'analyse pour le cas où la largeur affectée est de 14 m.

Selon cette étude, l'installation d'une pente douce devient donc rentable à partir de 3 cm/an de tassement et celle d'un drain à partir de 4 cm/an, ce qui correspond à des tassements plus grands que ce qui est généralement observé au Nunavik.

Tableau 33 : Coûts de mise en place des méthodes d'adaptation mises en place au site de Beaver Creek et estimation des coûts d'entretien à long-terme en considérant le bilan thermique (Malenfant-Lepage, 2016)

Mitigation technique	Design cost (\$)	Construction cost per km (\$)	Design life (years)	Total cost per km (\$)	Maintenance costs (year/km)	Maintenance costs (\$) (30 years/km)	Costs related to users (\$) (30 years/km)	TOTAL (\$)
ACE on full embankment	13 000	11 840 000	30	11 853 000	46% x \$36 000 = \$16 560 *	496 800	0	12 366 360
HD on full embankment	21 000	5 680 000	20	8 541 000	\$36 000 + \$2 500 = \$38 500	1 155 000	540 000	10 236 000
ACE slopes covered	21 000	7 800 000	20	11 721 000	(37% x \$36 000) + \$2 500 = \$15 820	474 600	540 000	12 735 600
HD on side slopes	13 000	2 720 000	20	4 093 000	\$36 000 + 2 500\$ = 38 500\$	1 155 000	540 000	5 788 000
Control	7 000	540 000	30	547 000	\$36 000	1 080 000	540 000	2 167 000
Snow/sun shed	14 000	4 492 800	15	8 999 600	0	0	0	8 999 600
Longitudinal culverts	26 000	4 440 000	20	6 686 000	\$0 + \$2 500 = \$2 500	75 000	0	6 761 000
HD with insulation	15 000	4 300 000	20	6 465 000	\$36 000 + \$2 500 = \$38 500	761 000	540 000	7 766 000
ACE slopes uncovered	9 000	5 760 000	30	5 769 000	0	0	0	5 769 000
Snow clearing technique	4 000	120 000	30	124 000	\$36 000 + \$10 000 = \$46 000	1 380 000	540 000	2 044 000
Grass-covered embankment	5 000	560 000	30	565 000	\$36 000	1 080 000	540 000	2 185 000
Light colored BST	9 000	500 000	30	509 000	0	0	0	509 000

* Example of the estimated maintenance cost for the ACE full embankment:

$$\frac{\text{heat balance for the side slope of the ACE full embankment (2011)}}{\text{heat balance for the side slope of the control section (2011)}} = \frac{8\,022\text{ KJ/m}^2}{17\,498\text{ KJ/m}^2} \times 100 = 46\%$$

46% × cost of maintenance of the control section (\$36,000/yr/km) = \$16,560/yr/km

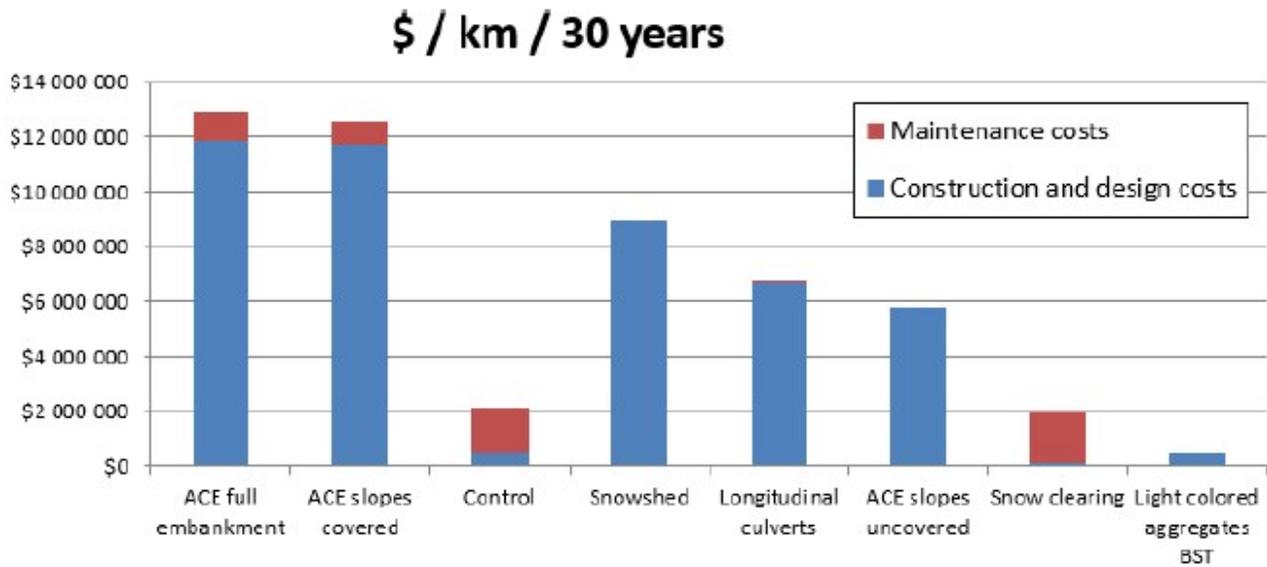


Figure 141 : Analyse économique des méthodes d'adaptation du site expérimental de Beaver Creek basée sur le coût de construction et sur l'entretien estimé à partir de l'efficacité thermique des méthodes (Malenfant-Lepage, 2016)

Tableau 34 : Coûts de construction pour une section de 50 m et hypothèses sur la durée de vie des systèmes de protection utilisés par Ficheur (2011)

	Référence	Adoucissement de pente	Remblai à convection d'air	Drain thermique
Coût de construction (\$)	46640	75125	112560	74140
Durée de vie (années)	40	40	30	30
Coût par an (\$)	1166	1878	3752	2471

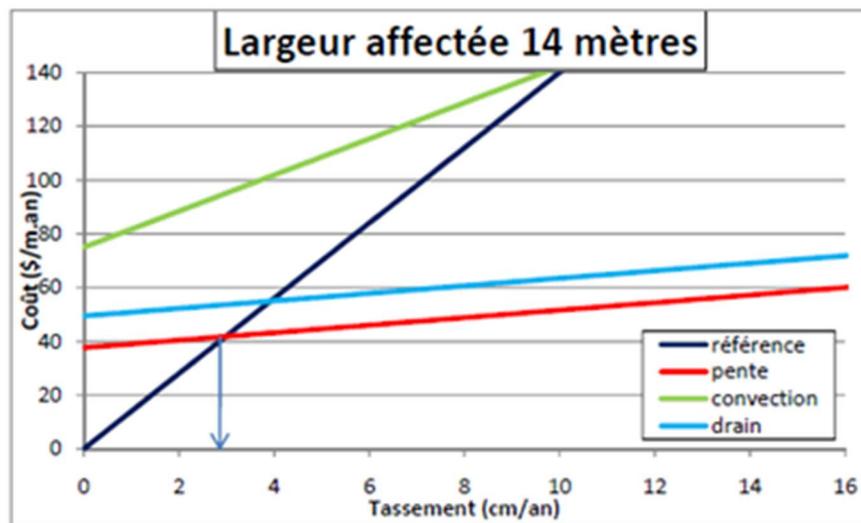


Figure 142 : Évolution des coûts totaux annuels pour les différentes techniques en fonction du tassement annuel pour une largeur affectée de 14 m

1.8.3 ANALYSES DES VOLUMES DE MATÉRIAUX ET DU NOMBRE D'INTERVENTIONS REQUIS POUR L'ENTRETIEN DE PISTES CHOISIES AU NUNAVIK

Dans le cadre de cette analyse, les infrastructures aéroportuaires qui ne présentent pas de problématique d'instabilité liée au dégel du pergélisol servent de sites de référence afin d'estimer notamment les coûts moyens d'entretien courant (courbe bleue sur la figure 140) pour la durée de vie utile de l'infrastructure. Une analyse comparative est alors effectuée entre les infrastructures qui subissent un endommagement prématuré lié au dégel du pergélisol (courbe rouge sur la figure 140) et celles servant de références. L'analyse couvre la période qui s'étend de la construction jusqu'à aujourd'hui. Cela permet d'estimer globalement les coûts d'entretien et de réhabilitation attribuables aux interventions en adaptation qui sont par la suite extrapolés dans le temps afin d'estimer les coûts globaux sur le cycle de vie de ces infrastructures selon la stratégie envisagée. Pour les infrastructures qui ont fait l'objet de travaux d'adaptation, la date de mise en place des stratégies d'adaptation indiquera le début de l'analyse coûts-bénéfices-efficacité. Cette évaluation est effectuée à partir de différents critères, incluant : la stabilité de l'ouvrage (performance thermique et mécanique), la fréquence et l'ampleur des interventions d'entretien (rechargement) et les coûts associés à l'entretien des stratégies d'adaptation mises en

place. Les bénéfices liés aux stratégies mises en œuvre sont notamment calculés en faisant la différence entre les coûts globaux à la fin de vie utile d'une infrastructure vulnérable non adaptée versus ceux pour une infrastructure qui a fait l'objet d'interventions en adaptation.

Après discussion avec le ministère, l'absence de suivi des dépenses liées spécifiquement à l'entretien complexifie la réalisation d'une telle analyse. Toutefois, pour pallier à ce manque, il a été proposé d'utiliser le tonnage de gravier produit à chaque aéroport à des fins de rechargement comme indicateur de coût d'entretien. Ainsi, en analysant le volume total de gravier produit pour chaque site aéroportuaire depuis la construction de la piste d'atterrissage, les dates des interventions et le volume résiduel approximatif, il est possible de tracer les courbes des coûts d'entretien en fonction du temps pour les infrastructures non vulnérables et les infrastructures vulnérables en vue de quantifier les bénéfices obtenus par la mise en place des stratégies d'adaptation (Figure 140). À partir des données transmises par le MTQ, qui couvrent la période d'entretien des pistes depuis leur construction jusqu'à 2019, la quantification a été limitée au volume de matériel utilisé sur les pistes sans égard au coût de production spécifique à chaque site.

Les informations tirées des volumes de gravier utilisés permettent une comparaison indicative entre les infrastructures vulnérables et non vulnérables. Cette comparaison est faite entre deux groupes de quatre pistes. Un certain nombre de pistes ont été exclues de l'analyse pour diverses raisons. Par exemple, les pistes de Puvirnituk et de Kuujuarapik sont plus longues et ont des tolérances sur les déformations plus faibles en raison de l'utilisation de Boeing 737 sur ces pistes. Les pistes d'Inukjuak et d'Akulivik sont considérées comme des cas intermédiaires. Finalement, le cas de la piste d'Umiujaq est considéré comme non fiable en raison de la très grande quantité de gravier utilisée sur une piste stable. Le tableau 35 présente la compilation des quantités approximatives de gravier produites, restantes (réserve) et utilisées pour chaque piste depuis la construction (1984-1991) jusqu'à 2019. Les deux groupes d'infrastructures utilisés pour effectuer la comparaison sont encadrés en rouge pour les vulnérables et en vert pour les non-vulnérables. Les résultats de cette compilation sont également illustrés à la figure 143. La moyenne calculée pour chaque groupe indique que les pistes construites sur pergélisol sensible au dégel ont nécessité près de 1,5 fois plus de gravier depuis leur construction comparativement aux pistes dont l'entretien n'est pas lié au pergélisol. La différence entre les moyennes des deux groupes peut être considérée comme l'effet de la dégradation du pergélisol. En faisant l'hypothèse d'un coût de \$100 par m³ de gravier en place, le coût additionnel d'entretien lié à la dégradation du pergélisol serait de l'ordre de \$10 000 par année par piste. La valeur obtenue paraît faible, mais semble compatible avec le chiffre de \$22 000/an/km obtenu pour la route de l'Alaska au Yukon, considérant que cette dernière est revêtue avec un traitement de surface qui augmente significativement les coûts de réhabilitation. Cette évaluation est évidemment très imprécise et incomplète considérant la qualité et la quantité d'information disponible. La capacité du ministère à analyser le rapport avantage/coût de futurs projets d'adaptation dans le Nunavik dépend très largement d'une base de données fiable sur les quantités de matériaux et les coûts des opérations d'entretien sur les infrastructures de transport du Nunavik.

Le nombre d'interventions de reprofilage sur les pistes est également comparé pour les deux groupes de pistes d'atterrissage. Selon les données fournies par le MTQ, une intervention consiste en un apport en gravier, un rechargement, ou un rapiéçage. Le tableau 36 présente la compilation des interventions effectuées pour chaque piste depuis la construction (1984-1991) jusqu'à 2019, et la figure 144 illustre ces résultats. La moyenne calculée pour chacun des deux groupes comparés indique que les pistes construites sur pergélisol sensible au dégel ont nécessité 3,8 fois plus d'interventions depuis leur construction comparativement aux pistes dont l'entretien n'est pas lié au pergélisol. Il est important de noter que la moyenne du groupe de pistes vulnérables est fortement influencée par le cas de la piste de Kangirsuk. Ce cas est cependant un cas sévère bien réel et bien documenté qu'il nous paraît important de considérer dans l'analyse.

Cette première tentative de faire l'analyse des coûts liés à la dégradation du pergélisol permet de conclure, avec beaucoup de réserves, que les coûts additionnels liés à la dégradation du pergélisol sont de l'ordre de \$10 000 par année par piste (considérant un coût de gravier mis en place de \$100/m³) et que les interventions requises sont près de 4 fois plus fréquentes. Il est important de rappeler que ces conclusions sont fondées sur les données disponibles de volume de matériaux produits et de nombre d'interventions.

Tableau 35 : Quantités approximatives de gravier produit, restant et utilisé pour chaque piste durant la période d'entretien, de l'année de construction (1984-1991) à 2019.

	Gravier produit	Gravier restant	Gravier utilisé depuis la construction	Nombre d'années d'entretien	Quantité moyenne de gravier utilisé par année d'entretien (m ³ /an)	Moyenne par groupe de piste
	(m ³)	(m ³)	(m ³)			(m ³ /an)
Ivujivik	9500	3000 (2019)	6500	35	186	211
Kangisualujuaq	9500	3500 (2018)	6000	31	194	
Aupaluk	6000	1800 (2019)	4200	30	140	
Kangiqsujuaq	12400	2000 (2017)	10400	32	325	
Kangirsuk	19220	3000 (2018)	16220	34	477	307
Tasiujaq	12350	3600 (2019)	8750	31	282	
Quaqtaq	6000	900 (2019)	5100	32	159	
Salluit	12550	2000 (2019)	10550	34	310	
Akulivik	11750	2150 (2019)	9600	29	331	
Puvirnituq	21400	5300 (2018)	16100	29	555	
Inukjuak	10200	1200 (2018)	9000	33	273	
Umiujaq	12500	3160 (2018)	9340	28	334	
Kuujuarapik	12100	3000 (2019)	9100	39	233	

Quantité de gravier utilisé (m³/an)

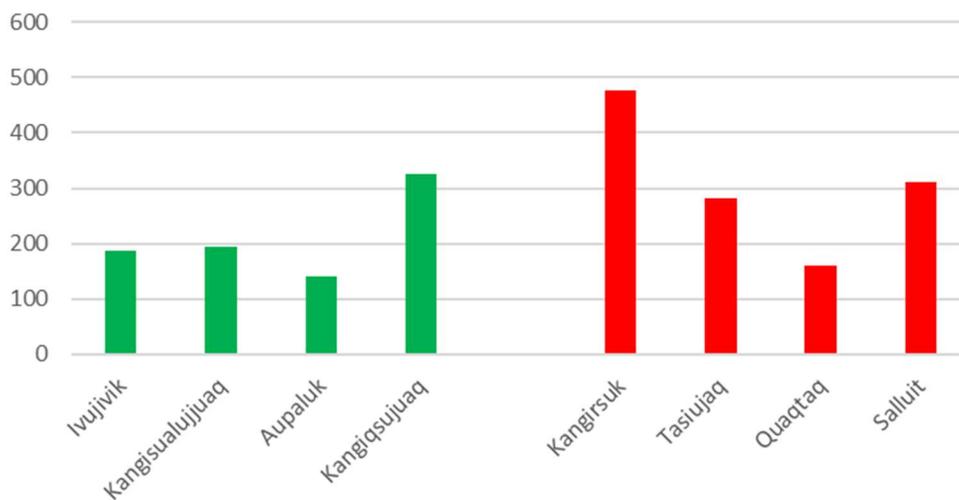


Figure 143 : Quantité moyenne annuelle de gravier utilisé depuis la construction pour les infrastructures non vulnérables (vert) et vulnérables (rouge) au dégel du pergélisol.

Tableau 36 : Nombre d'interventions (apport en gravier, rechargement, rapiécage) effectuées pour chacune des infrastructures durant la période d'entretien, de l'année de construction (1984-1991) à 2019.

	Nombre total d'interventions	Age moyen du groupe	Moyenne par groupe de piste
Ivujivik	2	32	1,5
Kangisualujuaq	1		
Aupaluk	1		
Kangiqsujuaq	2		
Kangirsuk	13	32,75	5,75
Tasiujaq	3		
Quaqtaq	3		
Salluit	4		
Akulivik	3		
Puvirnituaq	2		
Inukjuak	3		
Umiujaq	3		
Kuujuarapik	5		

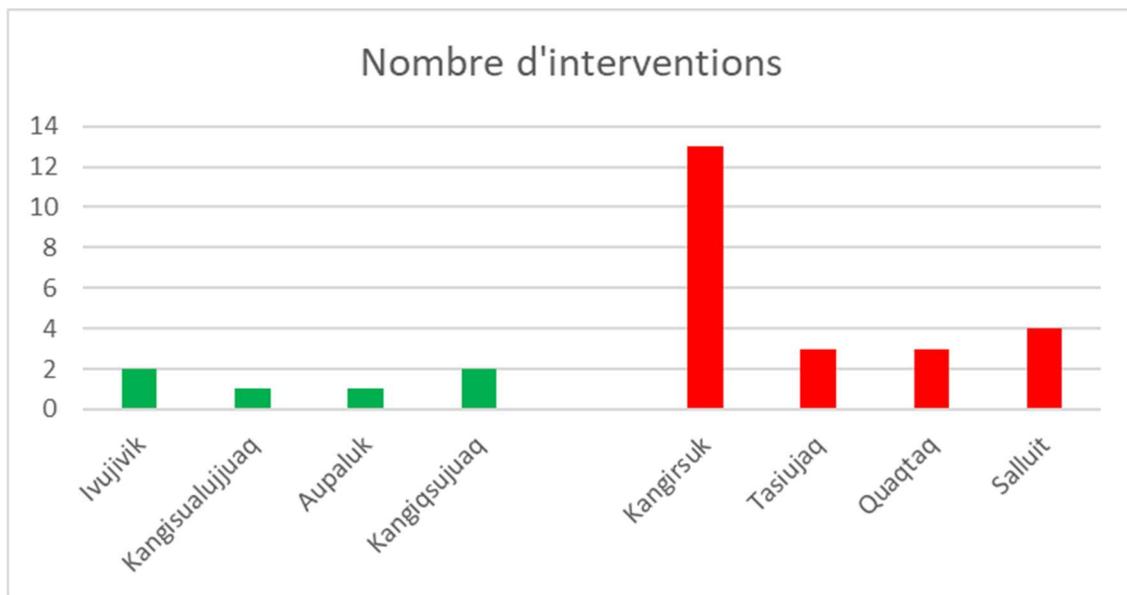


Figure 144 : Nombre d'interventions effectuées depuis la construction pour les infrastructures non vulnérables (vert) et vulnérables (rouge) au dégel du pergélisol.

1.8.4 MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE PAR FICHEUR (2011)

À défaut de pouvoir faire l'analyse du rapport coût/bénéfice en utilisant une information fiable sur les coûts d'entretien additionnels liés à la dégradation du pergélisol, il nous semble que l'approche proposée par Ficheur (2011) demeure la meilleure façon de faire cette analyse.

Le principe directeur de cette analyse est donné par l'équation :

$$CC + (EA_R \times P) \leq EA \times P$$

Où : CC est le coût de construction de l'adaptation

EA est l'entretien annuel de la piste sans adaptation

EA_R est l'entretien réduit de la piste suite à la mise en place de l'adaptation

P est la période d'analyse ou de conception

1.8.4.1 COÛT DE CONSTRUCTION DE L'ADAPTATION (CC)

Les données disponibles sur le coût de construction d'une technique d'adaptation sont très rares. Deux des principales sources d'information sont les projets expérimentaux de Beaver Creek (Yukon) et de Tasiujaq (Nunavik). La compilation des coûts par Reimchen et al. (2009) pour Beaver Creek et par Ficheur (2011) pour Tasiujaq permet une première approximation des coûts de construction. Cependant, la faible longueur des sections d'essai rend hasardeuse l'application de ces coûts à des projets à grande échelle. Trois projets d'application à grande échelle réalisés à Salluit (drain thermique dans la route d'accès), Puvirnituaq (remblai à convection) et Tasiujaq (pente douce sur les talus de la piste d'atterrissage) permettent d'enrichir la qualité de l'information disponible sur les coûts d'application de ces techniques. L'information disponible est synthétisée au Tableau 37.

Tableau 37 : Compilation des coûts unitaires de construction de techniques d'adaptation pour différents sites expérimentaux et sites d'application de ces techniques.

Technique	Site	Coût (par mètre linéaire de traitement)
Pente douce	Tasiujaq (expérimental)	1 500\$ (Ficheur, 2011)
	Tasiujaq (application)	n.d
Drain thermique	Tasiujaq (experimental)	1 480\$ (Ficheur, 2011)
	Beaver Creek (experimental)	1 360\$ (Reimchen, 2009)
	Salluit (application)	1 000\$
Remblai à convection	Beaver Creek (pleine largeur, expérimentale)	11 840\$ (Reimchen, 2009)
	Beaver Creek (épaulement, expérimental)	2 880\$ (Reimchen, 2009)
	Tasiujaq (épaulement, expérimental)	2 250\$ (Ficheur, 2011)
	Puvirnituaq (épaulement + berme, application incluant recouvrement et ventilation)	2 394\$ (Gravel-Gaumond, 2014)

1.8.4.2 ENTRETIEN ANNUEL DE LA PISTE SANS ADAPTATION (EA)

Les données disponibles analysées dans la section 1.8.3 suggèrent des coûts d'entretien annuels moyens pour les pistes affectées par la dégradation du pergélisol de l'ordre de \$10 000/année. À l'échelle de la piste, ces coûts

peuvent paraître modestes, mais ils sont importants si on considère que ces coûts additionnels sont attribuables à des superficies restreintes de la piste qui peuvent mettre en péril son état fonctionnel.

La méthode proposée par Ficheur (2011) est fondée sur le calcul de la quantité de gravier requise pour combler des dépressions causées par le tassement au dégel. La méthode requiert la mesure ou l'estimation du tassement ainsi que de la superficie affectée. Dans la mesure où les secteurs affectés par des tassements sont documentés dans le cadre du programme de suivi du ministère, le volume annuel à combler est facile à déterminer. L'analyse est faite sur une base unitaire, soit par mètre linéaire de piste affectée. La figure 145 donne un exemple de données collectées sur les pistes et routes d'accès du Nunavik. Les superficies affectées par le tassement sont délimitées par des rectangles sur la carte de la piste. Les taux de tassement sont mesurés sur des plaques de tassement placées dans la piste aux endroits où des instabilités sont observées (P1 et P2 sur la figure). Les tassements sont mesurés annuellement à l'aide d'un niveau d'arpentage et peuvent être rapportés sur des graphiques de tassement en fonction du temps tel qu'illustré sur la vignette dans la figure.

Si on prend l'exemple des tassements mesurés aux plaques P1 et P2 durant la première année du suivi, soit respectivement de 20 mm et 70 mm, on obtient un tassement moyen de 45 mm pour une dépression qui affecte les deux tiers de la piste soit environ 20 m. La quantité de gravier requise pour combler cette dépression pour une longueur unitaire de 1 m sera donc de :

$$20m \times 1m \times 0,045m \cong 0,9m^3$$

Considérant que le prix du MG-20 en place est d'environ \$100/m³, le coût annuel d'entretien associé à cette dépression est de l'ordre de \$90 par mètre linéaire de piste. Si on applique ce coût unitaire à la dépression de 15 m de longueur, on obtient un coût annuel d'entretien de l'ordre de \$1 350 pour la dépression et si on considère l'ensemble des dépressions de la piste, on obtient un chiffre qui est de l'ordre du \$10 000/an obtenu dans la section 1.8.3.

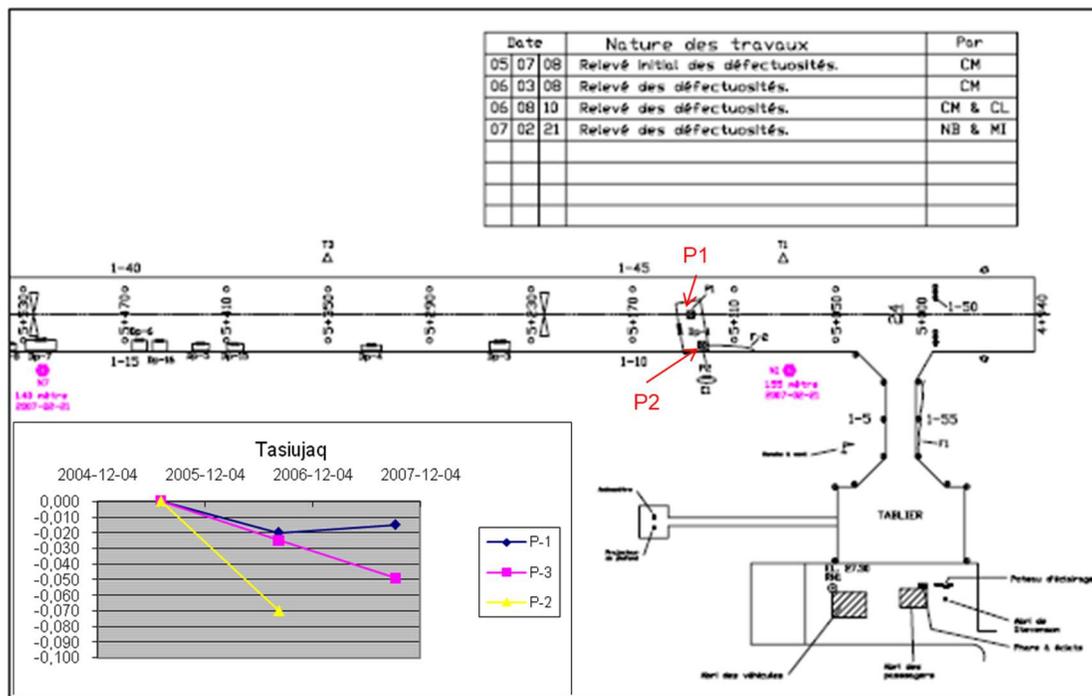


Figure 145 : Données de tassement et de superficie affectées collectées par le Ministère sur les infrastructures de transport du Nunavik (exemple de la piste de Tasiujaq).

1.8.4.3 ENTRETIEN RÉDUIT DE LA PISTE SUITE À LA MISE EN PLACE DE L'ADAPTATION (EA_R)

L'estimation du coût d'entretien d'une piste est établie en faisant l'hypothèse que l'entretien lié à la dégradation du pergélisol requis sera inversement proportionnel à l'efficacité de la technique d'adaptation. On pose donc qu'une technique 100% efficace entraînera des coûts nuls d'entretien (0% EA) liés à la dégradation du pergélisol alors qu'à l'inverse, une technique totalement inefficace (0% efficacité) entraînerait des coûts d'entretien liés à la dégradation du pergélisol = 100% EA. Afin de déterminer le plus objectivement possible l'efficacité des techniques d'adaptation, nous proposons d'utiliser le bilan thermique à l'interface sol – remblai ou l'indice de correction de température à l'interface comme indicateur de performance. Tel que décrit dans la section 2.3.4, la correction de température à l'interface est définie comme étant :

$$CTI = T_{Interface} - T_{Pergélisol} + MS$$

L'indicateur de performance (P%) serait donc égal à :

$$P = \frac{T_{interface} - T_A}{CTI} \times 100$$

Où : T_A est la température atteinte à l'interface après adaptation et stabilisation

$T_{interface}$ est la température à l'interface avant adaptation

Si on prend l'exemple du projet expérimental de Tasiujaq dont les résultats sont repris à la Figure 146, sachant que la température du pergélisol est de $-2,1^{\circ}\text{C}$ et si on pose une marge de sécurité de $0,5^{\circ}\text{C}$, on peut calculer le CTI à partir des données de la section de référence :

$$CTI = T_{Interface} - T_{Pergélisol} + MS$$

$$CTI = 2,5 - (-2,1) + 0,5 = 5,1^{\circ}\text{C}$$

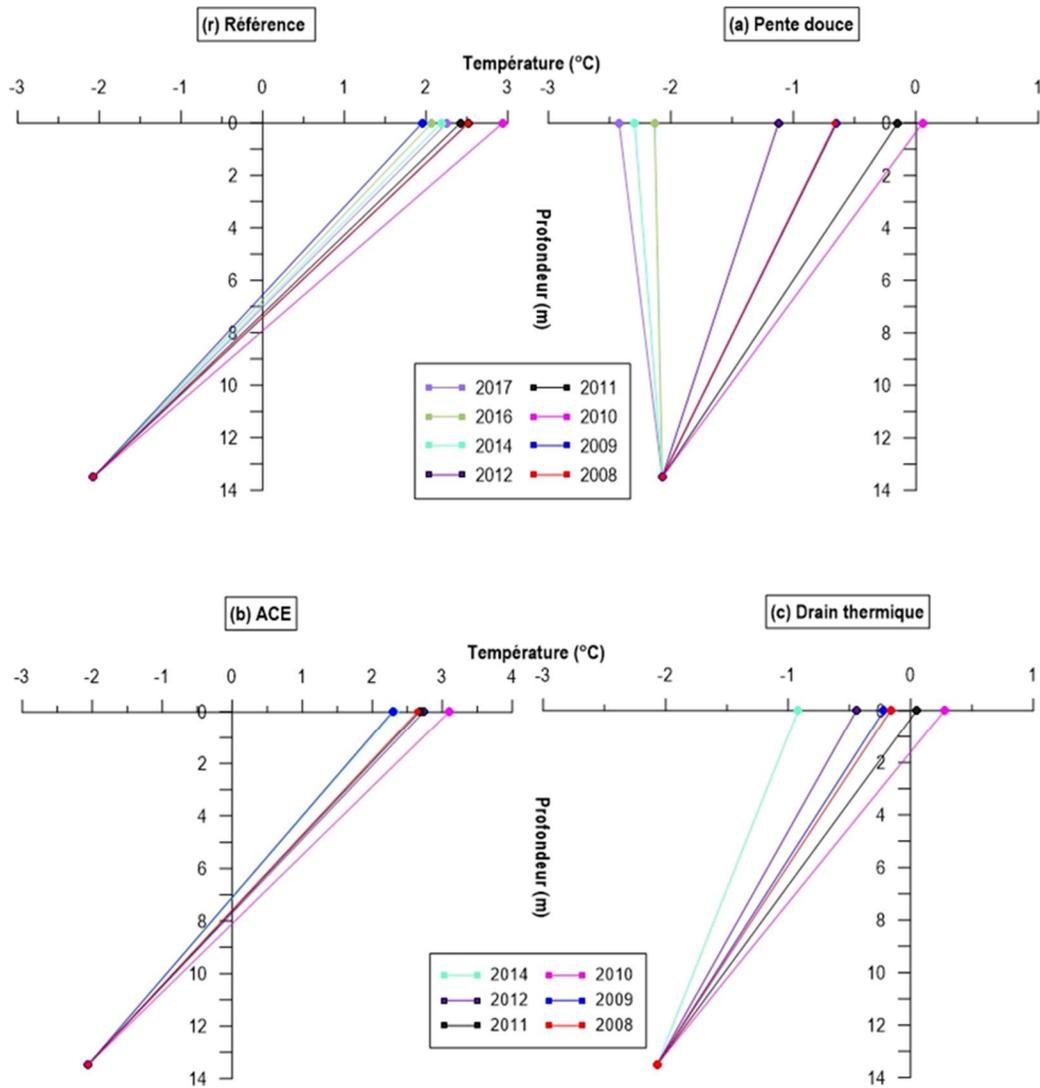


Figure 146 : Gradients thermiques mesurés sous les différentes sections du site expérimental de Tasiujaq.

On peut donc déterminer la performance des méthodes d'adaptation :

Pour la pente douce :

$$P = \frac{2,5 - (-2,45)}{5,1} \times 100 = 97\%$$

Pour le remblai à convection :

$$P = \frac{2,5 - 2,3}{5,1} \times 100 = 4\%$$

Et pour le drain thermique :

$$P = \frac{2,5 - (-0,95)}{5,1} \times 100 = 68\%$$

Alternativement, la performance peut être obtenue à partir du bilan thermique calculé pour les méthodes d'adaptation.

L'indicateur de performance (P%) serait donc égal à :

$$P = \frac{EX}{EX_{design}} \times 100$$

Où : EX est la chaleur extraite égale au bilan thermique avant adaptation moins le bilan thermique après adaptation

EX_{design} est l'extraction de chaleur requise incluant une marge de sécurité pour compenser l'effet du réchauffement climatique

Si on prend l'exemple de l'analyse de la performance des sections expérimentales de Beaver Creek au Yukon réalisée par Malenfant-Lepage (2016) et illustré à la Figure 147, on peut voir que la section non adaptée (référence) a un bilan thermique moyen d'environ 15 000 kJ/m² pour les trois années de suivi. C'est donc la quantité minimale de chaleur à extraire pour adapter la section. Si on pose une marge de sécurité de 5000 kJ/m² pour faire face au réchauffement climatique, l'extraction de chaleur requise (EX_{design}) est donc de 20 000 kJ/m².

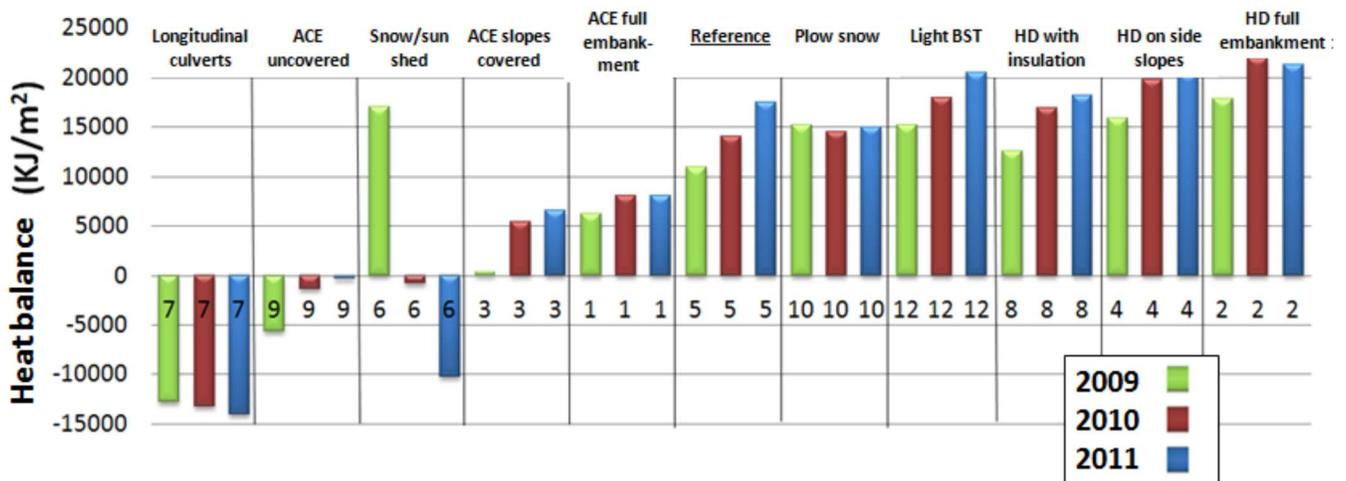


Figure 147 : Bilan thermique calculé pour les sections expérimentales de Beaver Creek, Yukon, pour les années 2009 à 2011.

On peut donc déterminer la performance de quelques méthodes d'adaptation choisies :

Pour le remblai à convection sur le talus (section 9) :

$$P = \frac{15\,000 - (-2000)}{20\,000} \times 100 = 85\%$$

Pour le remblai à convection pleine largeur :

$$P = \frac{15\,000 - 7\,500}{20\,000} \times 100 = 37,5\%$$

Les sections de drain thermique à Beaver Creek n'ont pas fonctionné en raison de problèmes importants de mise en place. Ils ne sont donc pas calculés dans les exemples. Il est intéressant de noter que les conduites de ventilation (section 7) et les abris solaires (section 6) obtiendraient des indices de performance de 100%. Dans le cas de l'abri solaire, seule la dernière année peut être considérée dans l'analyse puisque les abris ont été construits en 2010.

Le tableau fait la compilation des informations disponibles à partir de différentes sources indiquées dans le Tableau 38:

Tableau 38 : Performance estimée de différents systèmes d'adaptation pour quelques sites expérimentaux et projets d'adaptation

Technique d'adaptation	Localisation	Méthode	Performance	Commentaires
Pente douce	Site expérimental de Tasiujaq	CTI	97%	Dimensionnement adéquat Marge de sécurité supposée égale à 0,5°C
Drain thermique	Site expérimental de Tasiujaq	CTI	68%	Système sous-dimensionné. Marge de sécurité supposée égale à 0,5°C
	Application route de Salluit	CTI	100%	Dimensionnement adéquat Problème de conception des cheminées Résultat basé sur modélisation et température mesurée à A6. Plus ou moins fiable. Marge de sécurité supposée égale à 0,5°C
ACE (épaulement du remblai)	Site expérimental Beaver Creek	Bilan de chaleur	85%	Conception non optimisée Marge de sécurité supposée égale à 5000 kJ/m ²
	Site expérimental de Tasiujaq	CTI	4%	Problème de conception des cheminées Système sous-dimensionné Marge de sécurité supposée égale à 0,5°C
	Application Puvirnitug		60%	Conception adéquate L'équilibre thermique n'a pas été atteint Marge de sécurité supposée égale à 0,5°C
ACE (pleine largeur)	Site expérimental Beaver Creek	Bilan de chaleur	37,5%	Conception non optimisée Marge de sécurité supposée égale à 5000 kJ/m ²

1.8.5 EXEMPLE D'APPLICATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE COÛT-BÉNÉFICE PROPOSÉE

La section précédente a permis de décrire et documenter les intrants de la méthode proposée par Ficheur. Rappelons que selon cette méthode, la somme des coûts liés à la construction d'un système d'adaptation (CC) et de l'entretien réduit (EA_R) de la surface en fonction de l'efficacité de la technique sur la période d'analyse (P), doit être égale ou inférieure aux coûts cumulatifs d'entretien de l'ouvrage non adapté (EA) sur la même période. L'équation suivante résume la fonction qui sert de fondement à l'analyse.

$$CC + (EA_R \times P) \leq EA \times P$$

L'analyse requiert de connaître la largeur affectée par la dégradation du pergélisol et le taux de tassement. Le tassement moyen annuel peut être utilisé pour l'analyse, mais le tassement maximum permet de faire une analyse conservatrice du rapport coût-bénéfice d'une solution d'adaptation.

L'analyse requiert également de connaître ou d'estimer de façon réaliste le coût par m³ du gravier MG-20b mis en place pour corriger les dépressions. Lors des travaux de réhabilitation de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, qui ont été l'objet des travaux de Ficheur, le coût du MG-20 en place étaient de \$100/m³. L'information disponible

pour les travaux plus récents d'adaptation suggère que le coût du gravier pourrait être plus élevé et possiblement atteindre \$200/m³.

Un utilitaire de calcul simple a été développé sur une feuille de calcul EXCEL pour faciliter l'analyse coût-bénéfice. L'analyse proposée est simplifiée et omet plusieurs aspects d'une analyse économique complète qui considérerait notamment l'actualisation des coûts et une valeur résiduelle de l'ouvrage à la fin de sa vie utile. De plus, l'analyse considère une évolution linéaire des coûts d'entretien dans le temps. Nous considérons tout de même que la méthode proposée constituera un outil de décision valable à court terme et pourra être améliorée dans le futur au fur et à mesure que les données sur les paramètres économiques à considérer pour les investissements en infrastructures nordiques deviendront disponibles.

Pour illustrer la méthode, on utilise le cas de l'aéroport de Salluit documenté dans ce rapport. La Figure 148 illustre les zones de déformation mesurées à partir de relevés LIDAR ainsi que les tassements observés sur quatre plaques de tassement installées dans la piste. On peut constater qu'avant l'adaptation de 2012, des tassements importants affectaient la piste principalement le long de son épaulement est. Les relevés des plaques de tassement indiquent des tassements cumulatifs depuis 2005 variant entre 100 et 160 mm et des taux de tassement variant entre 10 et 70 mm/an.

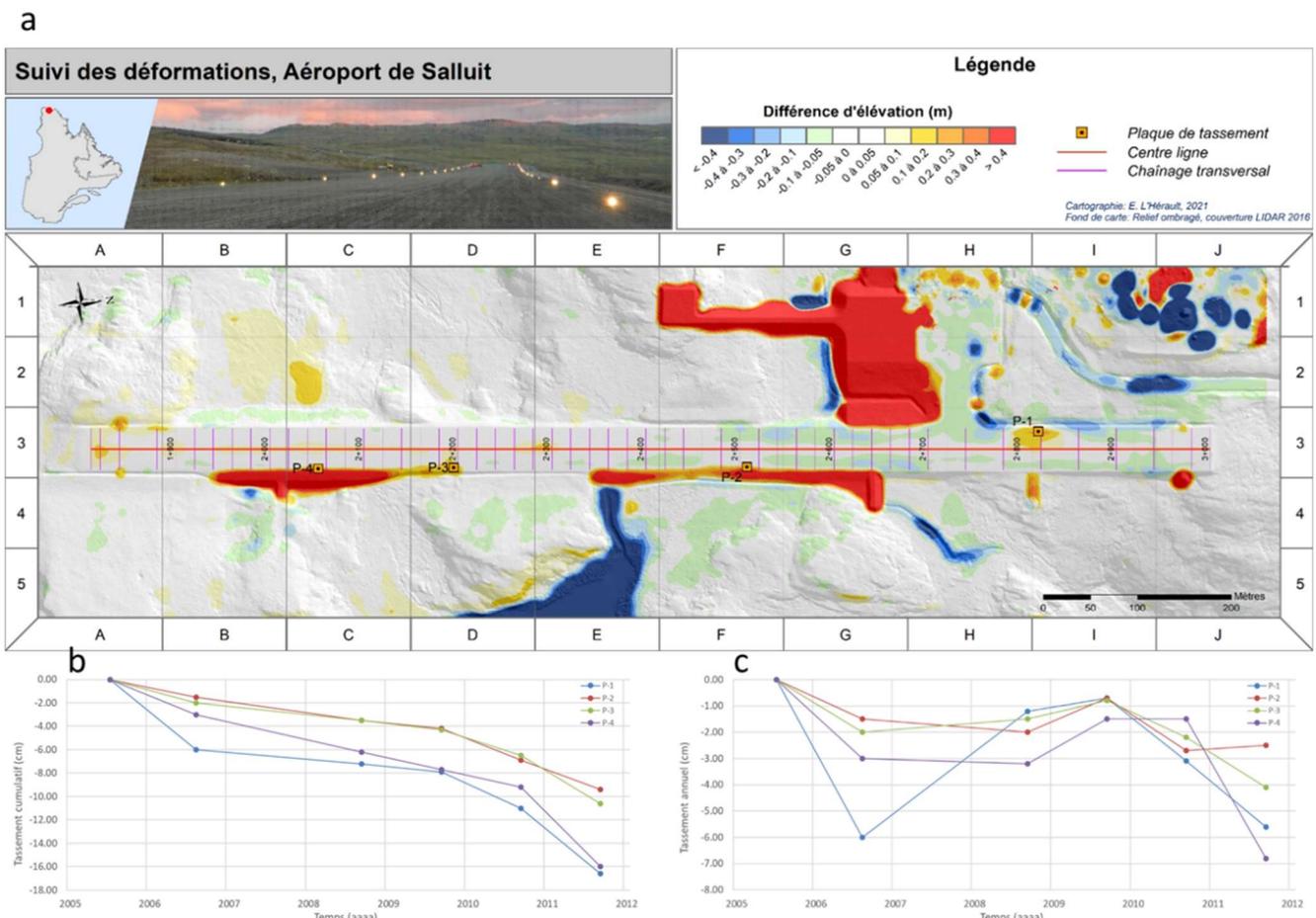


Figure 148 : Tassements observés sur la piste de Salluit : a) cartographie basée sur les relevés LIDAR, b) tassements cumulatifs observés sur les plaques de tassement, c) taux de tassement annuel observé sur les plaques de tassement.

Si on analyse le cas de la dépression correspondant à la plaque P1, on note que la largeur affectée est d'environ 15 m et que le taux maximum de tassement observé à la plaque P1 est de 60 mm/an. Si on suppose qu'un remblai à convection peut être mis en place dans cette section de piste et considérant un coût unitaire de \$2300/m linéaire (Tableau 37) et une efficacité de 80% (Tableau 38), la technique du remblai à convection deviendrait rentable après un peu plus de 30 ans d'exploitation (Figure 149)

Analyse coût-bénéfice d'une adaptation pour les infrastructures de transport du Nunavik

Coût du MG-20 en place (\$/m ³)	100,00 \$ /m ³
Tassement annuel (mm/an)	60 mm/an
Largeur affectée (m)	15 m
Coût de construction de l'adaptation (\$/mlinéaire)	2 300,00 \$ /m linéaire
Efficacité de l'adaptation (%)	80 %
Vie utile de l'ouvrage	30 ans
Coût d'entretien annuel (SA)	90,00 \$ /m lin./an
Coût d'entretien sur la vie utile de l'ouvrage (SA)	2 700,00 \$ /m lin.
Coût de l'adaptation incluant entretien (AA)	2 570,00 \$ /m lin.

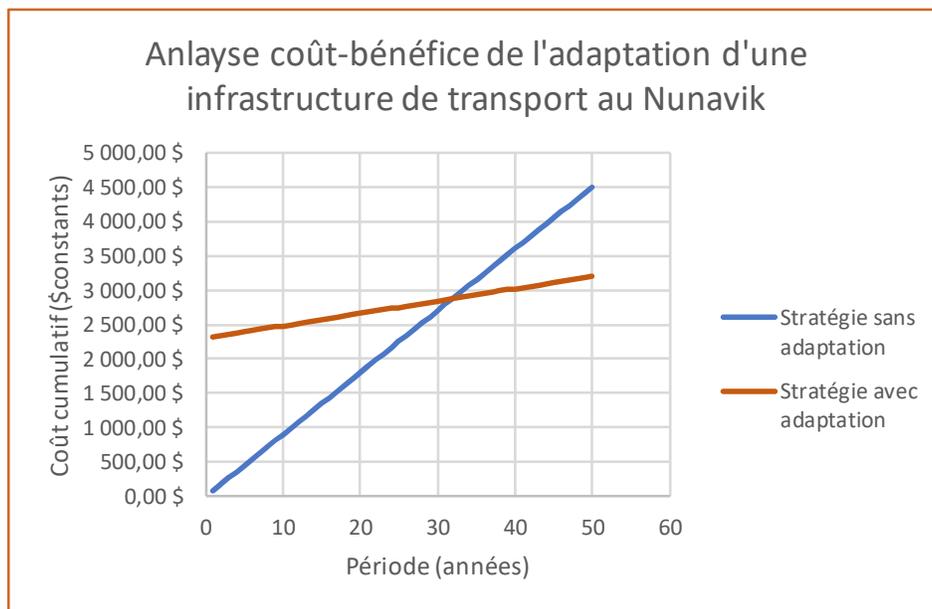


Figure 149 : Analyse coût-bénéfice de l'utilisation d'un remblai à convection pour stabiliser la dépression « P1 » de la piste d'atterrissage de Salluit

Si on reprend la même analyse avec une solution basée sur l'utilisation d'un drain thermique ayant un coût unitaire de \$1400/m linéaire et une efficacité de 80%, on obtient que la stratégie d'adaptation se rentabilise dans une période d'environ 20 ans (Figure 150).

Il doit être noté que cette analyse est hypothétique puisque l'épaisseur du remblai à proximité de la plaque P1 ne permettrait pas l'installation d'un remblai à convection ni d'un drain thermique.

Analyse coût-bénéfice d'une adaptation pour les infrastructures de transport du Nunavik

Coût du MG-20 en place (\$/m ³)	100,00 \$	/m ³
Tassement annuel (mm/an)	60	mm/an
Largeur affectée (m)	15	m
Coût de construction de l'adaptation (\$/mlinéaire)	1 400,00 \$	/m linéaire
Efficacité de l'adaptation (%)	80	%
Vie utile de l'ouvrage	30	ans
Coût d'entretien annuel (SA)	90,00 \$	/m lin./an
Coût d'entretien sur la vie utile de l'ouvrage (SA)	2 700,00 \$	/m lin.
Coût de l'adaptation incluant entretien (AA)	1 670,00 \$	/m lin.

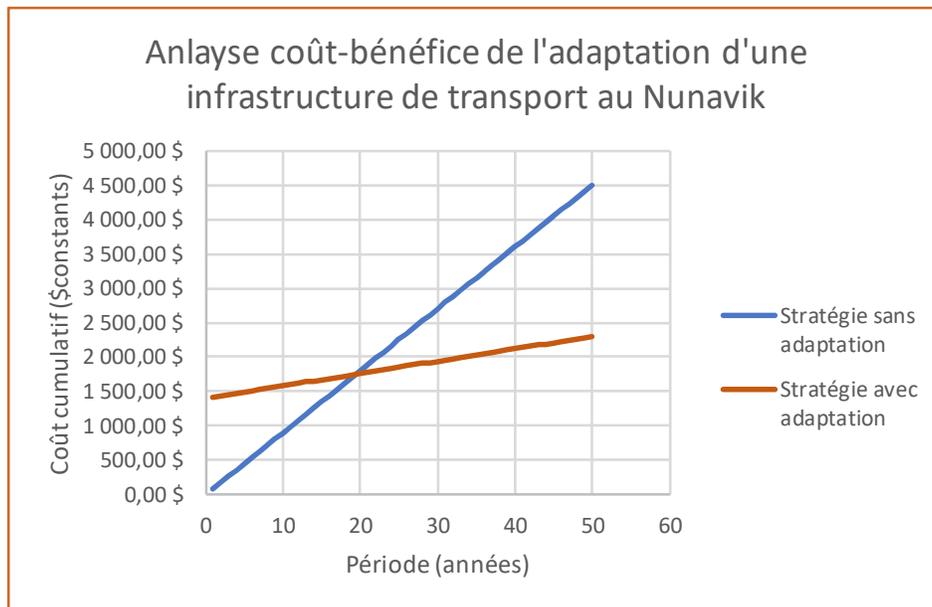


Figure 150 : Analyse coût-bénéfice de l'utilisation d'un drain thermique pour stabiliser la dépression « P1 » de la piste d'atterrissage de Salluit

Dans le cas de la plaque P4, on observe un taux de tassement maximum de 70 mm/année et une largeur affectée d'environ 10 m. Considérant que la bordure est de la piste est probablement fortement affectée par l'accumulation de neige, nous ferons donc l'analyse d'une stratégie d'adaptation basée sur l'utilisation d'une pente adoucie dont le coût est de l'ordre de \$1500/m linéaire et l'efficacité est d'environ 95%. Dans ce cas, la stratégie d'adaptation deviendrait rentable après 22 ans d'exploitation de l'infrastructure (Figure 151).

Analyse coût-bénéfice d'une adaptation pour les infrastructures de transport du Nunavik

Coût du MG-20 en place (\$/m ³)	100,00 \$ /m ³
Tassement annuel (mm/an)	70 mm/an
Largeur affectée (m)	10 m
Coût de construction de l'adaptation (\$/mlinéaire)	1 500,00 \$ /m linéaire
Efficacité de l'adaptation (%)	95 %
Vie utile de l'ouvrage	30 ans
Coût d'entretien annuel (SA)	70,00 \$ /m lin./an
Coût d'entretien sur la vie utile de l'ouvrage (SA)	2 100,00 \$ /m lin.
Coût de l'adaptation incluant entretien (AA)	1 710,00 \$ /m lin.

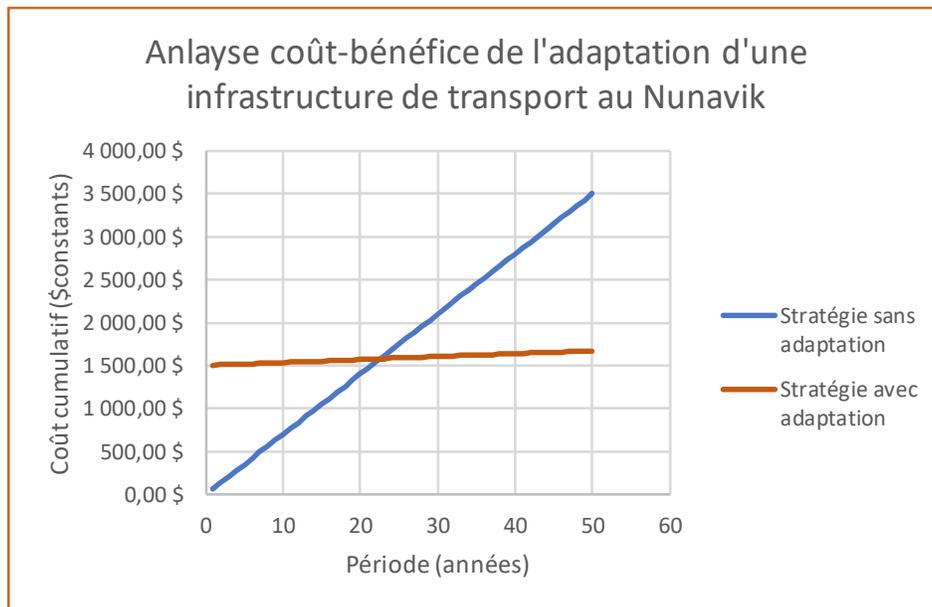


Figure 151 : Analyse coût-bénéfice de l'utilisation d'une pente douce pour stabiliser la dépression « P4 » de la piste d'atterrissage de Salluit

1.8.6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Tel qu'anticipé au début du projet, les données requises pour une analyse économique pour les infrastructures de transport du Nunavik sont très rares, ce qui limite considérablement les possibilités de faire une analyse coût-bénéfice pour les adaptations réalisées jusqu'à maintenant. Il nous apparaissait tout de même important de faire l'exercice de documenter les coûts et l'efficacité des techniques d'adaptation utilisées jusqu'à maintenant et de développer un outil d'analyse pour assister les gestionnaires dans la prise de décision pour l'adaptation des infrastructures.

Il y a très peu d'information disponible dans la littérature sur le sujet. Des analyses faites sur la route de l'Alaska au Yukon ont permis de déterminer qu'une section de route affectée par la dégradation du pergélisol coûte entre 22 000 et 36 000 \$/km de plus en entretien chaque année qu'une route construite sur sol stable. Cela représente une augmentation des coûts d'entretien par un facteur variant entre 5 et 8 (Burn et Dominie, 2021; Reimchen et al., 2009).

Une première analyse a été faite pour comparer les coûts d'entretien entre les pistes du Nunavik réputées stables et celles considérées instables. La comparaison entre deux groupes de 4 pistes a permis de déterminer que les pistes instables nécessitaient en moyenne 4 fois plus d'interventions et requerraient 100 m³ de gravier de plus par année pour leur entretien. Si on considère un coût de \$100/m³ pour le gravier produit et mis en place, le coût additionnel d'entretien des pistes sur pergélisol instable serait alors de l'ordre de \$10 000/an. Si on tient compte du fait que la route de l'Alaska est revêtue d'un traitement de surface bitumineux, les valeurs obtenues pour les pistes du Nunavik semblent compatibles avec celles du Yukon, tant pour le coût que pour la fréquence des interventions. Bien que sommaire et imprécise, cette analyse suggère que le coût du gravier concassé produit et mis en place permet une estimation réaliste des coûts d'entretien d'une piste ou d'une route sur pergélisol instable.

Finalement, une méthode fondée sur celle développée par Ficheur (2011) est proposée pour l'analyse coût-bénéfice des stratégies d'adaptation pour les infrastructures de transport du Nunavik. La méthode considère les coûts unitaires typiques d'une adaptation, son efficacité et les coûts d'entretien (pour une infrastructure non-adaptée) ou d'entretien réduit (pour une infrastructure adaptée) dans l'analyse coût-bénéfice sur la période de vie utile de l'ouvrage. À partir de l'information limitée disponible, les valeurs typiques de coûts unitaires pour les techniques d'adaptation et de leur efficacité ont été documentées dans la section. Des exemples d'analyse ont également été donnés.

La méthode d'analyse coût-bénéfice proposée n'est certainement pas robuste, mais constitue un bon point de départ qui s'améliorera avec l'usage. L'information essentielle à l'analyse lors des études avant-projet sont le taux de tassement au dégel et la superficie affectée. Le programme de suivi du ministère permet d'obtenir cette information à partir des inspections et des lectures de niveau des plaques de tassement. À défaut d'avoir cette information, les taux de tassement peuvent être estimés à partir des taux de dégel modélisés et la teneur en glace dans la partie supérieure du pergélisol. Le coût du gravier MG-20b mis en place est un entrant important pour faire l'analyse. Selon l'information disponible, une valeur typique de \$100/m³ semble être une bonne première approximation, mais les données disponibles pour certains projets d'adaptation suggèrent que cette valeur peut atteindre \$200/m³. Les coûts liés à la production et à la mise en place du MG-20b devraient être établis à toutes les occasions possibles pour enrichir la base de données et préciser cette information. Finalement, il est recommandé de profiter de toutes les occasions permettant de documenter le coût unitaire et l'efficacité des techniques d'adaptation pour permettre d'enrichir la base de données et la fiabilité de la méthode d'analyse.

1.9 DISCUSSION GÉNÉRALE PORTANT SUR LE VOLET 1

1.9.1 EFFICACITÉ DES SYSTÈMES CONVECTIFS (REMBLAI À CONVECTION ET DRAIN THERMIQUE)

Deux types de systèmes ont été mis en place dans le cadre de l'adaptation des pistes d'atterrissage et routes d'accès pour contrer la dégradation du pergélisol. Il s'agit des remblais à convection avec système de ventilation dans un secteur de la piste d'atterrissage de Puvirnituq et de l'utilisation de drains thermiques le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit. Quoique considérablement différent en termes de configuration, ces deux techniques de mitigation reposent sur le même principe physique établie qui permet l'extraction de chaleur accumuler dans les remblais par l'usage de la convection d'air. Bien que l'utilisation de ces systèmes ait démontré des signes encourageant en ce qui concerne le refroidissement du pergélisol sous les talus et les accotements des remblais, leur performance demeure mitigée pour plusieurs raisons.

Selon les études réalisées à ce jour portant sur l'efficacité des remblais à convection (Gravel-Gaumond et Doré, 2013) et du drain thermique (Périer *et al.*, 2016) et celle en cours, peu d'évidences permettent de confirmer hors de tout doute la présence de mouvements convectifs au sein de ces systèmes. Sans exclure le développement de mouvements convectifs, ces études suggèrent que ces derniers ne sont pas suffisamment forts pour modifier le gradient à l'intérieur du remblai et être ainsi mesurés par l'instrumentation en place. Par exemple, les analyses thermiques récentes effectuées à partir des deux sections du drain thermique à Salluit instrumentées dans le cadre de ce projet confirment l'absence de mouvements convectifs apparents. Basé sur une circulation d'air théorique dans le drain, une différence de température entre les cheminées d'entrées (températures de l'air plus froides) et de sorties (températures de l'air plus chaudes) en hiver était anticipé afin de démontrer une certaine extraction de chaleur dans le sol sous le drain thermique. Malheureusement, l'analyse des températures de l'air enregistrées dans les différentes composantes du système de drain thermique a plutôt démontré des températures de l'air dans les cheminées d'entrée et à la base du système égales ou légèrement plus chaudes que celles de l'air, des températures de l'air dans le drain plus chaudes que celles mesurées à l'entrée et à la base du système, mais plus froides que celles accumulées dans le système de captation au sommet du système et dans les cheminées de sorties. Périer *et al.* (2016) avaient noté un comportement thermique similaire en comparant les différences de température entre le sol et l'air dans le drain et avaient attribué cette incohérence du comportement thermique à un mauvais fonctionnement des systèmes de mesure ou une erreur dans la manipulation des données, ce qui n'apparaît pas être le cas.

En l'absence de démonstrations claires sur l'efficacité des remblais à convections, ces signes encourageants qui indiquent une restauration partielle du pergélisol marquée par un léger refroidissement des températures sous les remblais et la diminution de la profondeur du front de dégel pourraient être attribuables en partie à une combinaison de facteurs externes au mécanisme d'échange de chaleur par convection. Parmi ces facteurs, les plus probants sont l'ajout d'une épaisseur considérable de matériau granulaire au-dessus du sol naturel au niveau des pieds de remblai lors de la mise en place de ces systèmes forçant un réajustement thermique par conduction en réponse aux changements apportés à l'infrastructure et les conditions météorologiques froides qui ont caractérisé le climat du Nunavik au cours de la dernière décennie. Le suivi climatique assuré par les stations météorologiques du CEN à Puvirnituq et Salluit au cours des dix dernières années a démontré que la température annuelle moyenne de l'air est demeurée relativement stable montrant même une légère tendance au refroidissement. Ce contexte climatique récent a été très bénéfique dans la performance thermique globale des remblais convectifs mise en place, autant pour le remblai de la piste de Puvirnituq que pour celui de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, pour lesquels les températures du sol naturel sous les talus convectifs se sont légèrement refroidies accompagnées d'une remontée globale du plafond du pergélisol.

L'analyse approfondie a révélé une contribution néfaste de certains facteurs autant naturels que techniques dans la performance globale de ces deux types de systèmes convectifs. Plus spécifiquement, l'étude de cas de

Puvirnitua a révélé l'importance de contrôler plus efficacement le drainage en vue d'assurer une performance adéquate des remblais à convection. Tel que présenté dans cette étude, l'importante quantité d'eau confirmée par forage et sur les levés géoradar, qui se retrouve piégée en pied de remblai du côté ouest (amont) permet d'expliquer une certaine perte d'efficacité du remblai à convection à extraire suffisamment de chaleur sous les accotements. Toujours pour le cas de Puvirnitua, mais dans une moindre mesure, l'exposition au rayonnement solaire pourrait avoir également joué sur la performance des systèmes entre les deux côtés du remblai et expliquer les différences de températures sous les remblais convectifs entre le côté ouest (températures généralement plus chaudes) et le côté est (températures généralement plus froides). Dans la littérature, un tel effet de l'exposition des épaulements aux radiations solaires sur les températures du pergélisol et la position de son sommet sous un remblai convectif a été rapporté par Mu *et al.* (2018). Une possible contribution d'apport estivale de chaleur par le vent qui s'infiltré dans le remblai à convection n'est pas à exclure également.

Sur le plan technique, plusieurs causes ont été avancées pour expliquer les performances non optimales des systèmes convectifs mis en place au Nunavik à commencer par le non-respect des configurations prescrites dans les plans et devis. Le cas de Puvirnitua ne fait pas mention de non-conformité dans l'installation des remblais à convection, ce qui n'est malheureusement pas le cas pour le drain thermique installé à Salluit. Dans le cas de Salluit, une erreur d'arpentage s'est traduite par une installation non conforme de la pente du drain le long des accotements sur presque toute la longueur de l'infrastructure adaptée à l'exception des 70 premiers mètres. Les exercices de modélisation numériques effectués par Chataigner (2008) suggéraient une efficacité accrue du drain, lorsque positionné près du sol et suivant une configuration optimale des angles ϕ_1 et ϕ_2 autour de 0° et 45° respectivement (Figure 71A). Dans sa configuration actuelle, le drain repose parallèlement à la surface du talus sans distinction particulière entre les angles ϕ_1 et ϕ_2 (Figure 71B) ce qui réduirait son efficacité d'environ 30 % selon Périer *et al.* (2016). Dans la présente étude, d'autres aspects susceptibles de réduire la performance du drain thermique ont été identifiés, aspects portant davantage sur la conception et le dimensionnement du système que sur son installation non conforme. Ces aspects se résument à : un différentiel de hauteur insuffisant entre l'entrée et la sortie des systèmes, un espacement trop élevé entre les cheminées, une faible épaisseur du drain thermique, le calfeutrage par le givre du drain et des cheminées d'entrée et de sortie d'air et la trop grande restriction dans la circulation d'air induite par les pertes de charge cumulées du réseau de ventilation. Certains de ces aspects de conception et dimensionnement pourraient également expliquer la performance non optimale du remblai à convection avec système de ventilation observée à Puvirnitua. Pour le cas spécifique de Puvirnitua, le nombre, le diamètre et la hauteur des cheminées d'entrée et de sortie apparaissent sous-dimensionnés, ce qui ajoute des restrictions supplémentaires à la circulation d'air et accroît le risque d'obstruction par le givre et la neige. L'impact du recouvrement par la neige des cheminées sur la performance du remblai à convection à extraire la chaleur n'a malheureusement pas été évaluée dans le cadre du présent projet, toutefois, l'instrumentation récente à l'été 2019 de quatre cheminées situées sur le côté amont (deux cheminées d'entrée et deux cheminées de sortie d'air) et quatre cheminées situées sur le côté aval permettra d'apporter des précisions dans le futur, si jugées pertinentes.

Rappelons que malgré la performance non optimale du drain thermique, ce dernier offre certains bénéfices thermiques par rapport aux remblais à convection. L'analyse des données à Salluit a permis de documenter l'effet isolant du drain permettant de freiner considérablement la pénétration de chaleur plus en profondeur au courant de l'été. Il s'agit ici d'un effet secondaire positif du drain thermique qui s'ajoute à la performance générale de cette technique de mitigation. Chataigner (2008), dans ses exercices de simulation numériques, avait également observé la capacité du drain thermique à limiter considérablement la pénétration du front de dégel en période estivale.

Les raisons d'un fonctionnement non optimal des systèmes à convection sont nombreuses et il demeure difficile de déterminer avec certitude la ou les causes pouvant expliquer une telle performance. Basés sur un principe de

fonctionnement fondé sur des lois et processus physiques indéniables, une multitude de facteurs environnementaux (conditions de drainage, d'enneigement, d'exposition solaire) et paramètres de conception et de dimensionnement (configuration, diamètre, épaisseur, hauteur des composantes, etc.) sont susceptibles d'affecter la performance de tels systèmes, il est donc juste de supposer que les causes sont multifactorielles, complexes et difficilement dissociables. Il n'en demeure pas moins que l'évaluation des systèmes convectifs, par la complexité à mesurer efficacement la convection, demeure très difficile à établir. Même si de nombreux essais en laboratoire (Beaulac, 2004; Voyer, 2009), exercices de simulation numériques (Chataigner, 2009; Kong, 2019) et essais sur le terrain (Ficher et Doré, 2011) ont démontré l'efficacité du drain thermique et des remblais à convection comme technique de mitigation visant à limiter le dégel du pergélisol, leurs conceptions actuelles et les défis d'installation qu'elles impliquent devraient faire l'objet d'une optimisation. Tel qu'observé aux sites de Puvirnituk et Salluit, un sous-dimensionnement ou une mauvaise installation de quelques composantes peuvent considérablement diminuer la performance anticipée.

En dehors de l'influence de ces différents facteurs sur la performance globale des systèmes à convection, les conditions d'enneigement en bordure demeurent un enjeu notable sur la stabilité à long terme de ces systèmes. L'utilisation des remblais à convection, dont l'application est préconisée en présence de remblais épais pour des raisons de performance, mais aussi de limitation des quantités de matériaux requise, ne vient pas modifier la géométrie des remblais. Pour cette raison, les accumulations de neige demeurent sensiblement les mêmes qu'avant leur mise en place. Dans leur configuration actuelle, la zone d'influence des remblais à convection se limite aux talus et aux accotements et n'ont aucune efficacité à refroidir les pieds de remblai. En raison de cette limitation, le pergélisol en pied de remblai ne bénéficie pas de l'effet refroidissant du remblai à convection et demeure sensiblement plus chaud en hiver et continue de se dégrader (Figure 39). Rappelons que l'importance du rôle de l'enneigement dans le processus de dégradation des pistes d'atterrissage (Allard et al, 2007; L'Hérault et al., 2012; Lanouette, 2020; Mathon et al, 2021) et routes d'accès (Fortier et al, 2011; L'Hérault et al., 2012; 2014; 2015) a été largement documentée. Pour l'instant, cette hypothèse semble la plus probable pour expliquer le développement des tassements et des fissures qui affectent les bas de talus tels qu'observés aux sites de Puvirnituk (Figure 30) et Salluit (Figures 59 et 60). Il s'agit d'un processus de dégradation lent et graduel qui s'instaure dès la mise en place des remblais à convection, processus similaire à celui qui s'est instauré lors de la construction initiale des remblais des pistes dans les années 1990 (L'Hérault et al., 2012). À juste titre, les suivis récents des températures de surface et du sol en pied de remblai aux sites de Puvirnituk et Salluit confirment cette tendance. Dans le cas précis de la piste de Puvirnituk, un tel processus de dégradation du côté amont contribuera à l'épaississement de la couche active en pied de remblai accentuant davantage les accumulations d'eau piégé contre le remblai. Ultiment, cette rétroaction positive réduira davantage la capacité du remblai à convection à extraire suffisamment de chaleur afin de refroidir efficacement le sol sous l'accotement. Dans le cas de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, la limitation du drain thermique à refroidir le sol au-delà des talus et des accotements est confirmée par des températures plus chaudes mesurées aux pieds des remblais côté drain. Ces températures plus chaudes semblent favoriser certains processus de déformations actuellement en cour et qui suscitent des inquiétudes quant à la stabilité mécanique à court terme des accotements du côté du drain thermique.

Cette situation amène des questionnements quant à l'importance de préserver des conditions thermiques marginales froides pour le pergélisol situé en pied de remblai afin de limiter les risques de fluage voire même ultimement de tassement et consolidation advenant son dégel. Cette situation justifie la pertinence, dans une conception future, de considérer l'intégration d'éléments de renforcement mécanique au sein du remblai par l'encapsulation des matériaux de remblai ou par l'utilisation de renforts géosynthétiques, techniques présentement à l'étude au Manitoba (Kurz et al., 2018).

1.9.1.1 RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES POUR LES SYSTÈMES CONVECTIFS (REMBLAI À CONVECTION ET DRAIN THERMIQUE)

Dans le contexte du Nunavik, la mobilisation de la neige par le vent se traduit par la formation d'importantes couches de neige très denses sur les talus et aux pieds des remblais. La présence de ces couches de neige très compactes limite considérablement les échanges thermiques dans un système à convection de type ouvert (ex. : remblai à convection standard sans système de ventilation). Ces conditions d'enneigement forcent donc un système à convection initialement de type ouvert à se comporter davantage comme un système de type fermé (ex. : drain thermique). L'ajout de cheminées de ventilation, en facilitant la circulation de l'air malgré ces épaisses couches de neige, permet en partie de contourner ce problème ce qui en fait une composante essentielle pour assurer une performance adéquate des systèmes à convection. Il s'avère donc important de s'assurer que ces cheminées de ventilation soient d'une hauteur, d'un diamètre et en nombre suffisant.

L'évaluation de la performance effectuée dans la présente étude sur les systèmes à convection munis de système de ventilation permet de confirmer que leurs efficacités s'avèrent particulièrement sensibles à la formation de bouchons de glace au niveau des cheminées, des drains ou des collecteurs par la condensation de l'eau sur les parois des tuyaux. Afin de réduire ces risques, une augmentation du diamètre des composantes du système de ventilation, autant au niveau du drain que des cheminées, serait à préconiser. Cette augmentation des diamètres/épaisseurs des composantes permettrait également, tout comme le différentiel de hauteur entre les cheminées d'entrée et de sortie d'air, d'augmenter la capacité extractive de ces systèmes (Châtaigner, 2008) (Figure 152). Dans tous les cas, une attention particulière doit être portée afin de s'assurer que les cheminées demeurent au-dessus du couvert de neige.

Sans toutefois avoir fait l'objet d'une analyse approfondie, la configuration des systèmes de ventilation, particulièrement dans le cas précis du drain thermique à Salluit, doit être révisée. La figure 55 met en évidence que, pendant l'hiver, les différentiels de température entre les cheminées d'entrée d'air et le collecteur (TTOG) d'entrée est du même ordre de grandeur que le différentiel de température entre le drain et le collecteur de sortie. Dans ces conditions, la pression s'exerçant sur l'air chaud est sensiblement la même dans les deux cheminées et l'air chaud cherche à sortir par les deux cheminées qui se compétitionnent au lieu de se compléter. Il est aussi avancé dans la présente étude qu'un système de ventilation complexe, comme celui installé sur le drain thermique à Salluit (Figure 152C) ajoute une certaine restriction dans la circulation de l'air dans le système attribuable à une perte de charge linéaire liée au frottement des molécules d'air sur les parois des composantes telles que les conduits, les collecteurs et le drain thermique ainsi qu'une perte de charge singulière induite par des restrictions dans l'écoulement de l'air imposées par l'utilisation de coudes et réduits. En somme, une simplification du système de ventilation dans le remblai, en plus de réduire les coûts des matériaux et simplifier l'installation, permettrait de réduire cette perte de charge cumulée (linéaire et singulière) et nécessairement améliorer la performance des techniques de mitigation qui en font usage. Une telle simplification est proposée à la figure 152D. Le cas spécifique du drain de Salluit pourrait être considérablement amélioré en coupant en obstruant la cheminée actuelle d'entrée d'air et en la remplaçant par une cheminée qui alimente le collecteur d'entrée par en dessous (Figure 152E). De cette façon, la chaleur du système ne pouvant que s'évacuer que par le haut, elle s'écoulera par le drain et par la cheminée de sortie.

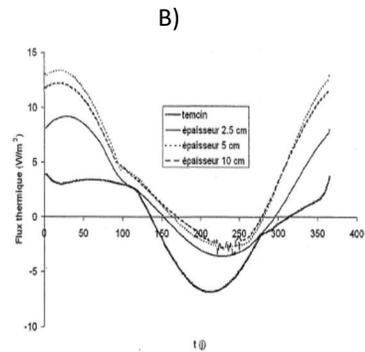
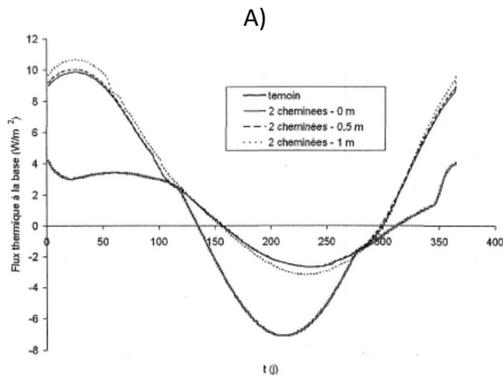


Figure 5.11 : Variation du flux thermique extrait du sol selon l'épaisseur du drain

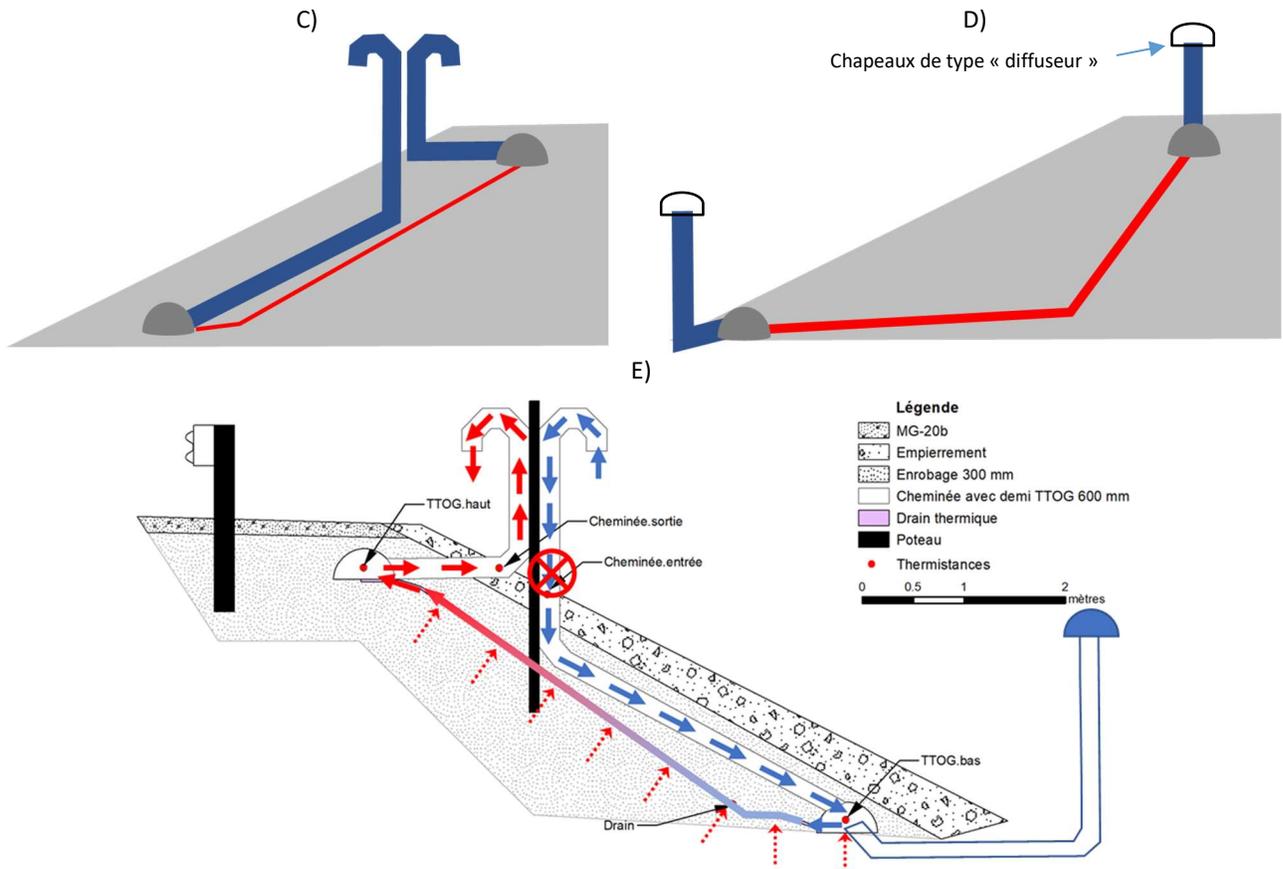


Figure 152 : A) Impact de la hauteur entre les cheminées et B) de l'épaisseur du drain thermique sur la capacité d'extraction de la chaleur dans les remblais (tirées de Châteigner, 2008). C) Configuration actuelle du drain thermique installé le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit et D) corrections proposées pour améliorer la performance des drains thermiques lors d'éventuelles implantations. E) Modifications spécifiques au drain thermique de Salluit qui pourraient considérablement améliorer sa performance.

Pour les systèmes à convection de type fermé, une certaine perte d'efficacité en fonction de la longueur de la boucle convective ou la longueur du drain a été documentée par Kong (2019). En résumé, la capacité d'extraction de chaleur diminue en fonction de la longueur du système en raison de l'accumulation graduelle de chaleur à mesure que l'on se rapproche de la sortie de la boucle convective. Cette accumulation de chaleur s'exprime par une diminution du différentiel de température entre l'air et le sol au sein du système, paramètre influençant directement sa capacité à extraire de la chaleur supplémentaire (potentiel d'extraction de chaleur). Dans le cas de Puvirnituk, des considérations de stabilisation mécanique justifiaient l'utilisation d'une berme convective, augmentant ainsi significativement la longueur de la bouche convective et diminuant en l'occurrence le potentiel d'extraction de chaleur (Figure 153A). Pour contrebalancer ce phénomène, l'efficacité du système à Puvirnituk

aurait certes bénéficié d'un nombre plus élevé de cheminées et de plus grand diamètre, voire simplement une ouverture complète du remblai à convection dans l'accotement, couplé avec une plus grande porosité du matériau. En l'absence de considérant de stabilisation mécanique particulière, des systèmes courts sont à privilégier.

À noter que le calfeutrage graduel des remblais à convection par du gravier soufflé lors des opérations de déneigement avait été avancé par Gaumond et doré (2013) à titre de facteur pouvant réduire l'efficacité du système en place. Dans la littérature, une étude récente (Liu et al., 2021) propose l'ajout d'une couche protectrice de sol avec géotextile sur les talus des remblais convectif pour limiter les apports estivaux de chaleurs par le vent, mais surtout éviter le calfeutrage du matériau convectif par des sédiments (Figure 153B). Leurs résultats suggèrent des bénéfices thermiques considérables (Figure 153C). Dans le contexte des changements climatiques, le raccourcissement des hivers (\downarrow période de fonctionnement) et le réchauffement des températures de l'air anticipé (\downarrow intensité) risquent de compromettre l'efficacité à long terme des systèmes convectifs. Pour contrer cette perte d'efficacité, il pourrait être envisagé de considérer l'ajout de composantes mécaniques aux cheminées d'entrées et de sorties afin de forcer la convection. Dans les deux cas, de tels ajouts pourraient se faire à posteriori pour adapter les remblais à convection existants ou être intégrés d'emblée dans la conception de nouveaux remblais. Il s'agit ici de pistes d'optimisation à explorer dans le futur.

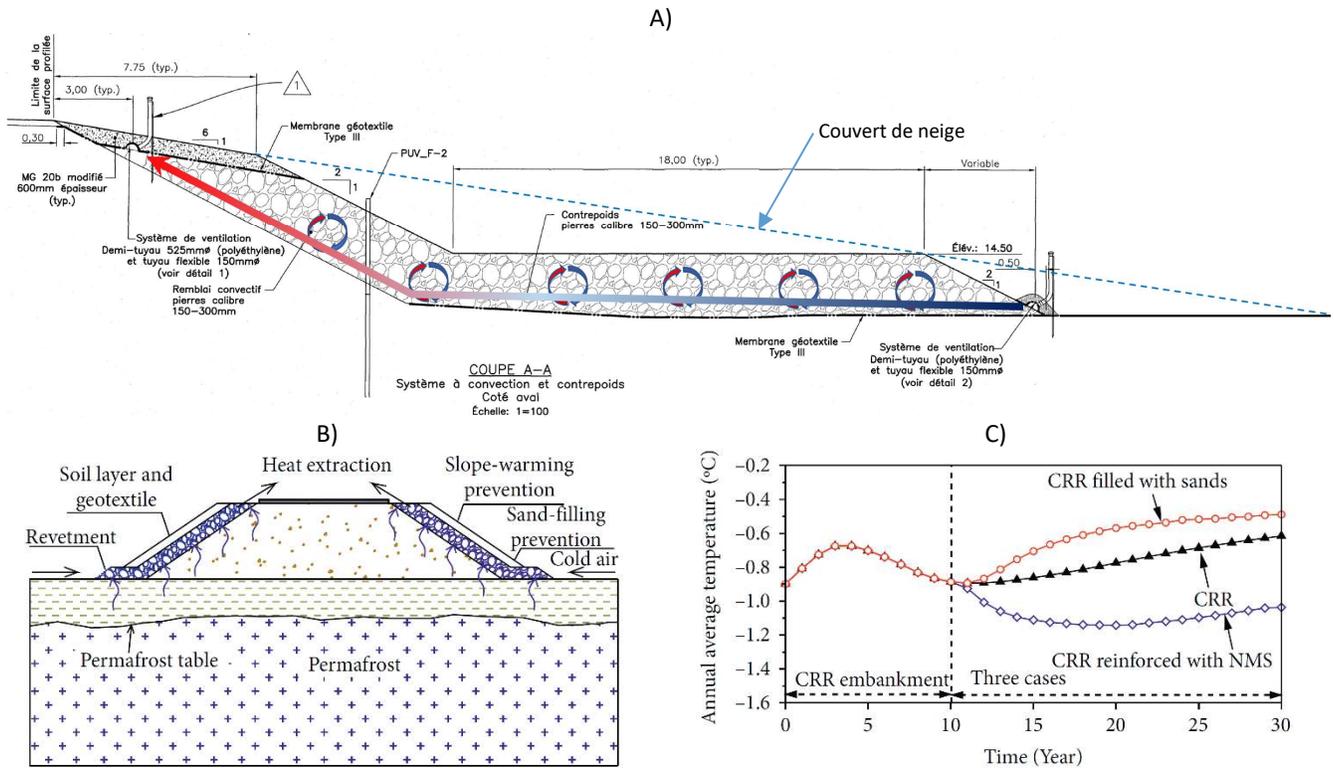


Figure 153 : A) Diminution du potentiel d'extraction de la chaleur dans un remblai à convection de type fermé en fonction de la longueur. B) Couche protectrice (soil layer and geotextile : NMS) pour prévenir le calfeutrage des remblais convectif et C) bénéfices thermiques modélisés d'un tel ajout (CRR reinforced with NMS) (tirées de Liu et al, 2021).

En résumé, pour toutes nouvelles conceptions de systèmes convectifs avec systèmes de ventilation, une attention particulière devra être portée sur les aspects suivants :

- Pour les systèmes utilisant des drains thermiques, s'assurer de la conformité des angles afin de positionner ces derniers le plus près possible de l'interface base du remblai/sol naturel ;
- Diminuer au minimum la largeur des remblais à convection ou la longueur des drains ;
- Augmenter le nombre de cheminées de ventilation et s'assurer de maintenir un bon différentiel de hauteur entre les cheminées d'entrées et de sorties ;
- Augmenter le diamètre/épaisseur des composantes des systèmes de ventilation (cheminées, collecteurs, drain, etc.) ;
- Soigneusement évaluer la hauteur des cheminées d'entrées d'air fin qu'elles demeurent au-dessus du couvert de neige;
- Simplifier au maximum la configuration des systèmes de ventilation pour minimiser l'utilisation de coudes et réduits (minimiser les pertes de charge cumulées) ;
- S'assurer de bien maîtriser les écoulements de surface et dans la couche active en marge de l'infrastructure afin de limiter les apports de chaleur convective ou la persistance d'importantes quantités de chaleur latente qui ralentissent le refroidissement des accotements ;
- Prévoir une certaine dégradation thermique des pieds de remblai aux endroits où s'accumulent d'importantes quantités de neige. Localisés en dehors de la zone d'influence du remblai à convection, les pieds de remblai demeureront des endroits sensibles sujets à la dégradation thermique et aux problèmes de stabilité mécanique.

1.9.2 EFFICACITÉ DES REMBLAIS À PENTE ADOUCIE

L'angle des pentes douces s'avère un facteur primordial qui influence l'efficacité de cette technique. Au Nunavik, des pentes douces 1V :6H ont été couramment utilisées dans les récentes adaptations des routes d'accès et pistes d'atterrissage. Dans le cas de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, l'utilisation des pentes douces, lorsque couplée avec un système de drainage adéquat, permet de maintenir des conditions favorables au refroidissement du pergélisol en marge et sous les accotements du remblai. Des performances thermiques similaires ont également été observées pour les sections utilisant les pentes douces aux pistes d'atterrissage de Quaqtak et Salluit. Le manque de suivi thermique sous les pentes douces utilisées ailleurs au Nunavik le long des routes d'accès aux aéroports d'Ivujivik, Tasiujaq et Kangiqsualujjuaq ne permet pas d'évaluer l'efficacité thermique de ces dernières, toutefois, l'absence de dégradation majeure depuis leurs mises en place suggère quelles sont efficaces. L'efficacité des pentes douces dépend toutefois de l'inclinaison de ces dernières qui influence leur capacité à minimiser les accumulations de neige. Les relations empiriques développées par Tabler (1974; 1984; 2004) dictant la relation entre l'angle des pentes douces et les profils d'accumulation de neige suggèrent en effet que plus l'angle des pentes diminue, plus les épaisseurs de neige qui s'y accumulent diminuent. Les travaux récents de Lanouettes (2021) réalisés au site de Tasiujaq ont permis, par exercices de modélisation numérique validés par des observations de terrain, d'établir un abaque de conception mettant en relation la hauteur des remblais, l'angle des pentes douces et la capacité à refroidir l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure au niveau des accotements (Figure 101C). La relation logarithmique inverse ainsi déterminée entre la pente et la capacité de refroidissement des températures à l'interface (CTI) suggère une augmentation significative de l'efficacité des pentes douces à refroidir le sol lorsque l'angle de la pente passe de 1V :6H à 1V :8H.

L'évaluation de la performance des pentes douces 1V :6H mises en place à Tasiujaq réalisée dans la présente étude révèle toutefois une efficacité très modérée de la capacité de ces dernières à refroidir les zones dégradées thermiquement (talik) s'étant formées aux pieds et sous les accotements du remblai avant l'adaptation de l'infrastructure en 2018. L'ampleur des zones dégelées (épaisseurs et largeurs) présentent en pieds de remblai

avant la mise en place des pentes douces, le contenu élevé en eau suspecté à l'intérieur de ces zones non gelées ainsi que le contexte climatique récent plus chaud que la moyenne font partie des hypothèses avancées pour expliquer cette faible performance. Néanmoins, rappelons que les travaux de Ficheur et Doré (2011) avaient pourtant documenté une très bonne efficacité des pentes douces 1V :8H mises à l'essai à Tasiujaq, et ce, dans un contexte climatique similaire à celui qui a succédé à la mise en place des pentes douces en 2018 (année froide suivie de deux années plus chaudes). Cette mise en relation entre les deux études suggère alors que le contexte climatique récent, quoique n'ayant certainement pas favorisé la performance de cette technique, ne peut être tenu exclusivement responsable. Les récentes observations des conditions d'enneigement assurées par un suivi photographique automatisé confirment qu'actuellement, des épaisseurs de neige bien au-delà du seuil critique de 40 cm établie par Lanouette (2021) s'accumulent toujours sur les talus et les pieds de remblai. Bien que ces épaisseurs de neige semblent inférieures à celles mesurées dans des études antérieures (Allard et al, 2007; Lanouette, 2021), elles demeurent suffisantes pour limiter l'extraction de chaleur en hiver. À la lueur de ces observations, la valeur de 1V :6H utilisée pour les pentes douces à Tasiujaq apparaît pour le moment insuffisante.

Tel que mentionné précédemment, l'ampleur des zones non gelée sous les accotements et les réservoirs de chaleur latente qu'elles représentent requièrent l'extraction d'une quantité importante de chaleur. Le suivi à long terme pour la planche d'essai de la pente douce 1V :8H mise en place en 2007 démontre que la stabilisation thermique post-adaptation prend plusieurs années (6 à 8 ans) avant de s'équilibrer avec la nouvelle géométrie du remblai, les conditions de surface (enneigement et albédo) et le climat. Pour le moment, la poursuite du suivi thermique à Tasiujaq permettra d'avoir le recul nécessaire afin de bien évaluer la performance à long terme des pentes douces pour ce site. Tout récemment, la piste d'atterrissage d'Inukjuak a été adaptée et fait l'usage de pente douce 1V :6H sur une bonne partie de sa longueur à l'exception de son extrémité nord-ouest en raison de l'épaisseur trop importante du remblai. Pour cette piste, plusieurs sites d'instrumentation situés aux pieds de l'ancien remblai ont été maintenus opérationnels afin de documenter l'efficacité des pentes douces à refroidir le sol sous les talus adoucis. Il s'agira d'un autre site d'étude qui permettra de contre valider la performance des pentes douces 1V :6H en présence d'importantes zones non gelées au pied des anciens remblais, mais dans un contexte où le pergélisol et le climat régional sont légèrement plus froids qu'à Tasiujaq.

Pour l'ensemble des routes d'accès pour lesquelles le déneigement se fait par grattage et non soufflage, les pratiques de déneigement actuelles ne favorisent pas le bon fonctionnement des pentes douces. Actuellement, le long des sections des routes d'accès aux aéroports de Salluit et Kangiqsualujjuaq qui utilisent des pentes adoucies, le déneigement s'effectue en grattant la neige et en l'empilant d'un côté ou de l'autre de la route, ce qui forme d'importants monticules de neige qui favorisent à leur tour l'accumulation de neige. Étant donné que l'efficacité même des pentes douces repose sur leurs capacités à diminuer les accumulations de neige afin de permettre une meilleure extraction de la chaleur au courant de l'hiver, de telles pratiques de déneigement viennent nettement diminuer la performance de cette méthode. Malheureusement, peu de routes d'accès disposent de mesure thermique dans les sections des pentes douces où de la neige se trouve empilée à l'exception de la route d'accès à Salluit. Il s'avère donc difficile de généraliser les conséquences d'une telle pratique à l'ensemble des sites, mais selon les analyses effectuées à Salluit, l'impact demeure significatif. À court terme, l'instauration de pratiques de déneigement qui favorisent soit le soufflage en milieu naturel ou le ramassage serait à préconiser. Notons qu'il a été documenté dans la littérature que l'utilisation des pentes adoucies, en dehors des avantages thermiques qu'elle apporte au pergélisol, permet également de limiter les accumulations de neige au sommet du remblai, donc ultimement de diminuer la fréquence des opérations de déneigement (Figure 154). Selon Tabler (2003) une pente de talus d'environ 1V :9H (11%) permettrait d'éliminer les dépôts en haut de talus. Il s'agit ici d'un bénéfice au niveau opérationnel des pistes ou routes d'accès qui demeure non négligeable en milieu nordique. L'augmentation des coûts de mise en place associée à l'usage de pentes plus douces que 1V :6H pourrait, à ce titre, être absorbée à long terme par la diminution des fréquences de déneigement et les coûts opérationnels associés.

Advenant une perte d'efficacité des remblais à pente douce dans un contexte où le climat se réchaufferait considérablement, il pourrait être envisagé de déneiger les pentes douces à quelques reprises au courant de l'hiver. Cependant, une telle procédure entraîne des coûts d'opération et des défis logistiques considérables. Néanmoins, si l'on se base sur l'excellent comportement thermique actuel des centres-pistes, section de l'infrastructure qui fait l'objet d'un déneigement rigoureux, une telle pratique favorisait une extraction de la chaleur accrue en hiver et favorisait ainsi le refroidissement des régimes thermiques. De telles procédures de déneigement ont été mises à l'essai en Alaska (Zarling et Braley, 1986) avec un certain succès ainsi qu'au long d'une section test de l'autoroute de Beaver Creek au Yukon (Malenfant-Lepage, 2016). Toutefois, l'expérience au Yukon a démontré une efficacité assez mitigée, voire même néfaste. D'après Malenfant-Lepage (2016), l'accumulation d'importante quantité de neige mélangée avec du gravier en pied de remblai provoquée par le déneigement des talus peut accentuer le risque de dégradation du pergélisol en pieds de remblai. Cette auteure a également observé une absorption précoce des radiations solaires à la fin de l'hiver pour les talus déneigés se traduisant par des températures de surface généralement plus élevées comparativement aux sections non déneigées. En raison de la période de fonte des neiges qui dure généralement un mois au Nunavik d'après nos observations effectuées à partir des suivis photographiques, nous estimons que l'augmentation des températures de surface pour les talus déneigés par rapport à ceux non déneigés serait très limitée et durerait environ deux semaines tout au plus. La section de la piste de Quaqtq qui utilise les pentes douces pourrait, sans demander des efforts considérables et présenter des défis logistiques importants, bénéficier à court terme d'une telle pratique d'entretien.

1.9.2.1 RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES POUR LES REMBLAIS À PENTE ADOUCIE

De par leur simplicité de conception et de mise en place, les remblais à pentes adoucies s'avèrent une technique de mitigation efficace pour ralentir le dégel du pergélisol en pied de remblai causé par des accumulations de neige qui limitent l'extraction de chaleur en hiver, comme c'est le cas pour la plupart des remblais munies d'une pente conventionnelle de 1V :2H. Les différences de coûts entre un remblai traditionnel et un remblai à pente adoucie découlent majoritairement de la quantité de gravier nécessaire. Cette quantité de gravier sera proportionnelle à l'épaisseur initiale du remblai. Par conséquent, il s'agit ici d'un facteur important qui permet d'orienter le choix de cette méthode au détriment d'une autre qui ne requiert pas une modification de la géométrie du remblai comme c'est le cas avec des remblais à convection ou avec drains thermiques. Il pourrait également s'avérer pertinent de procéder à une analyse paramétrique afin de déterminer l'épaisseur maximale justifiant l'utilisation des pentes douces considérant le coût versus l'efficacité estimée. Également, si une méthode visant à augmenter l'albédo de surface est intégrée à la stratégie d'adaptation, par exemple en enlevant le pavage ou en ajoutant un revêtement à albédo élevé, l'épaisseur du remblai pourrait être diminuée tout en assurant une isolation et capacité portante suffisante. Ce type de stratégie en combinant l'effet de plusieurs méthodes de mitigation serait à privilégier dans l'adaptation ou la construction d'infrastructures linéaires de transport. L'utilisation des pentes douces nécessite la mise en place de ponceaux plus longs que sous un remblai traditionnel. Par exemple, lors de l'adoucissement des talus de la route d'accès Ivujivik et Kangiqsualujjuaq, plusieurs ponceaux ont dû être rallongés ce qui a entraîné une légère augmentation des coûts de mise en place de la stratégie d'adaptation. Néanmoins, ces coûts demeurent marginaux.

De toute évidence, pour les remblais à pente douce, au même titre que pour les remblais à convection ou ceux utilisant le drain thermique, mais dans une moindre mesure, les pieds de talus et de remblai demeurent des secteurs sensibles à la dégradation thermique du pergélisol. Cette sensibilité s'explique par le faible albédo du gravier et la faible épaisseur de matériau granulaire lors de la transition entre l'infrastructure et le terrain naturel. Dans de telles circonstances, un recouvrement des pentes douces par de la matière organique permet de contrer cet effet négatif et permet ainsi d'optimiser la performance thermique de cette technique de mitigation. Actuellement, seule la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik fait usage d'une végétalisation des talus en récupérant

la matière organique dans la section du sol d'infrastructure recouverte par les talus adoucis. Même si l'absence de suivi thermique à Iuvjivik ne permet pas de quantifier les bénéfices thermiques issus d'une telle mesure, plusieurs études effectuées ailleurs dont celle de Malenfant-Lepage (2016) au Yukon indiquent une diminution des températures à la surface du remblai ce qui peut qu'améliorer la performance globale de la conception. Même si des bénéfices thermiques découlent nécessairement d'un recouvrement de la surface des talus par de la matière organique, il peut s'avérer toutefois difficile d'en prélever une quantité suffisante. Minimale, le pied de la pente douce devrait être priorisé par un tel recouvrement. À savoir que l'excavation de la matière organique dans les zones de recouvrement par les talus et même sous le remblai n'est pas sans conséquence. Même si un tel retrait améliore les propriétés mécaniques du sol de fondation en évitant la compression de la tourbe à long terme (Berg and Aitken, 1973), il a été documenté que de laisser le couvert organique en place sous les remblais assurait une isolation optimale limitant la pénétration de la chaleur dans le sol d'infrastructure (Esch, 1996). Une étude d'optimisation serait toutefois pertinente afin d'évaluer le comportement thermique des différentes configurations telles que celles illustrées à la figure 155. Une situation idéale serait de préserver la matière organique sous le remblai et de prélever la matière organique nécessaire au recouvrement des talus ailleurs ou d'utiliser un matelas organique de type « coco mat » ou similaire. Par exemple, l'utilisation de tels matelas organiques s'avère très efficace pour contrer une dégradation thermique éventuelle dans les secteurs d'intervention en milieu naturel où une certaine perturbation du couvert organique par le passage de la machinerie est anticipée. Par contre, l'utilisation d'un tel matériau n'est pas très répandue actuellement au Nunavik. À ce jour, seule la stratégie d'adaptation le long de la route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq en fait usage aux abords de certains exutoires de fossé. La pertinence d'utiliser ce type de matériau dans le recouvrement des talus, en l'absence de matière organique suffisante, serait donc à évaluer.

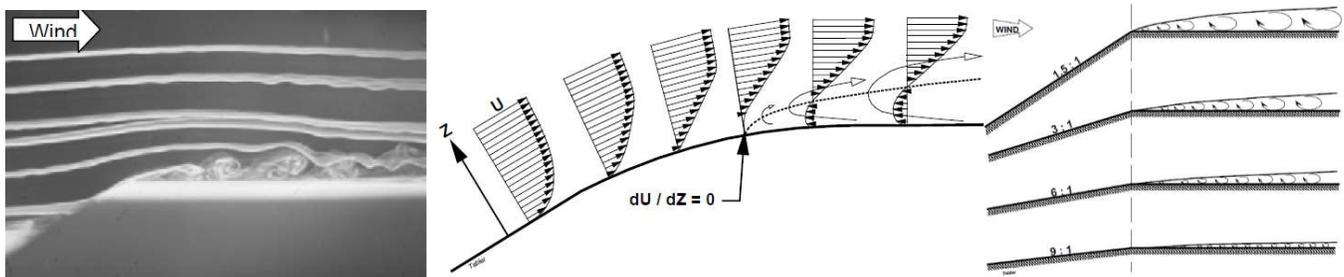


Figure 154 : L'accumulation de neige au sommet d'un remblai est sensiblement proportionnelle à la hauteur de la zone de Eddy qui est fonction de la pente des talus (tirée de Tabler, 2003).

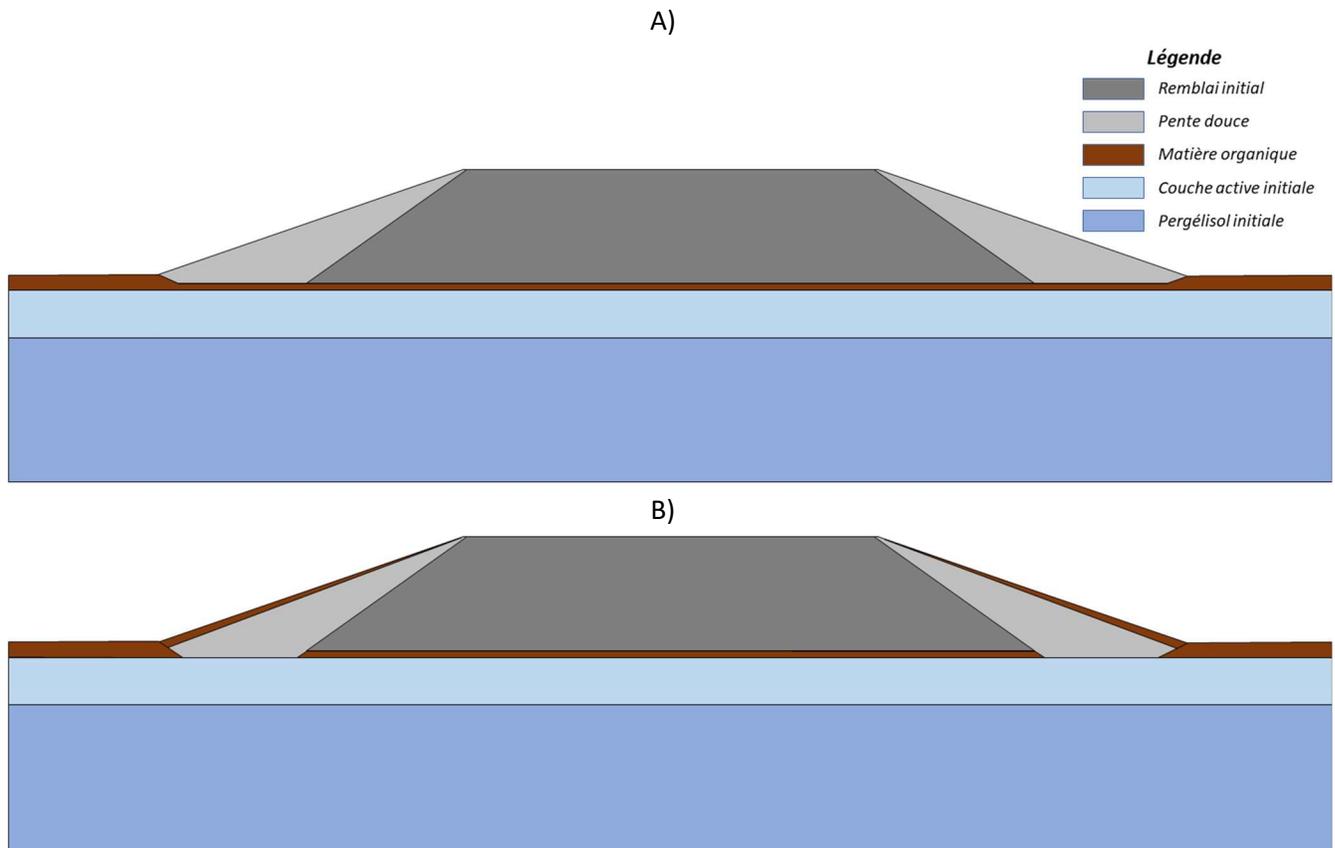


Figure 155 : Différentes configurations de l'utilisation de la matière organique dans la conception des pentes douces. A) Configuration standard sans recouvrement des talus telle qu'utilisée pour les pentes douces de la piste d'atterrissage de Tasiujaq et B) configuration avec prélèvement et recouvrement superficiel des talus telle qu'utilisée pour la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik.

1.9.3 EFFICACITÉ DES FOSSÉS DE DRAINAGE, IMPERMÉABILISATION DE REMBLAI ET PONCEAUX

Les fossés de drainage et les ponceaux demeurent des composantes critiques et sensibles d'une infrastructure construite sur pergélisol. Considérant l'apport de chaleur convective et le risque de thermo-érosion associés aux écoulements d'eau en zone de pergélisol, le contrôle du ruissellement des eaux de surface tant en périphérie qu'en marge des infrastructures est essentiel pour éviter toutes dégradations prématurées de ces dernières.

La réalisation de fossés nécessite l'excavation d'une bonne partie de la couche active, voire même le pergélisol, et le remplacement de la couche organique par un matériau granulaire. Ces interventions perturbent considérablement le régime thermique initial du pergélisol forçant un réajustement thermique rapide au cours des années suivant l'intervention. Ce réajustement thermique est à l'origine des nombreuses déformations qui se sont développées dans les fossés et parfois en pied de talus pour plusieurs sites d'infrastructures à l'étude. En raison de cette précarité thermique et l'influence reconnue des écoulements d'eau, d'importantes déformations proportionnelles aux contenus en glace du pergélisol sont habituellement à prévoir. Il importe alors de planifier des interventions de reprofilage dans les années suivant leurs mises en place. Les fossés de drainage pour plusieurs sites à l'étude dans le cadre de ce projet présentent des déformations qui conduisent à la formation d'importantes accumulations d'eau qui persistent une bonne partie de l'été. Il est donc nécessaire, malgré une performance somme toute adéquate de l'ensemble des fossés de drainage dans leur état actuel, de procéder régulièrement (ex. : annuellement ou au besoin) à leur profilage, par comblement des dépressions, afin de maintenir un écoulement efficace des eaux de surface et ainsi éviter les accumulations d'eau stagnante. Rappelons que le processus de thermo-érosion peut être extrêmement rapide ce qui implique un suivi intensif et une capacité à intervenir rapidement.

Pour les endroits bien spécifiques le long des infrastructures où des écoulements d'eau au travers des remblais sont observés ou suspectés, l'imperméabilisation d'une section du talus ou des fossés peut s'avérer une mesure efficace pour en limiter l'occurrence. Par exemple, une telle mesure a été appliquée pour les pistes d'atterrissage de Salluit, Quaqtq, Kangirsuk et Tasiujaq. Même s'il est difficile de confirmer l'efficacité spécifique de cette mesure, elle ne peut qu'être bénéfique lorsque combinée aux autres mesures d'améliorations du drainage. Les coûts relativement élevés de mise en place ainsi que les difficultés à bien ancrer la géomembrane dans le pergélisol requièrent une analyse approfondie afin de bien circonscrire les secteurs où la technique sera appliquée et déterminer la profondeur d'ancrage. Par exemple, pour certains secteurs où le pergélisol est fortement dégradé thermiquement (ex. Piste d'atterrissage de Tasiujaq), il s'est avéré extrêmement difficile, voire impossible, d'ancrer la géomembrane dans le pergélisol. Dans de telles circonstances, l'anticipation de la remontée du pergélisol au cours des quelques années suivant l'adaptation de l'infrastructure, par l'utilisation de pentes douces par exemple, pourrait servir de niveau de base pour l'ancrage des géomembranes et ainsi permettre de limiter la profondeur d'excavation.

Afin de permettre un drainage efficace de certains secteurs, plusieurs sites d'infrastructures font l'usage de fossés de décharge (ex. : Aéroports de Puvirnitq, Salluit et Quaqtq). L'utilisation de tels fossés s'est avérée efficace, particulièrement lors de la fonte printanière. De tels fossés sont sujets à l'amoncellement d'importantes quantités de neige et de glace ce qui peut limiter leur efficacité à drainer rapidement l'eau à la fonte des neiges et créer ainsi d'importantes accumulations d'eau qui persistent quelques journées (ex. : Puvirnitq) voire semaine (ex. : Salluit). Toutefois, avec des opérations de déglçage adéquatement réalisées et au moment opportun, l'efficacité de ces fossés de décharge peut facilement être maintenue comme c'est le cas pour la piste d'atterrissage de Quaqtq. Dans certains cas, le niveau de base des fossés pourrait être abaissé afin d'assurer un drainage non seulement du ruissellement des eaux de surface, mais également l'eau qui persiste dans la couche active durant la saison de dégel et qui n'est pas en mesure de se drainer efficacement loin de l'infrastructure. Une telle problématique s'observe actuellement du côté amont du remblai à convection à Puvirnitq où une certaine

quantité d'eau demeure piégée contre le remblai et limite la capacité du remblai à convection à extraire l'importante quantité de chaleur latente qui en résulte.

Au même titre que les fossés de drainage, les ponceaux demeurent des composantes extrêmement sensibles d'une infrastructure construite sur pergélisol. Dans le guide de l'ATC, des ponceaux à profil convexe sont recommandés afin de maintenir un profil d'écoulement adéquat advenant un tassement affectant la section centrale des remblais. Dans un contexte où des déformations sont susceptibles d'affecter davantage les accotements d'un remblai, la cambrure du ponceau devrait être atténuée afin que des tassements éventuels des accotements ne viennent l'exacerber au point de disloquer le ponceau ou simplement rendre le profil d'écoulement inopérant. Dans un contexte où les ponceaux favorisent un certain refroidissement du sol en hiver par la circulation d'air froid à l'intérieur, la remontée du pergélisol au centre du remblai y est fréquemment supérieure par rapport aux sections de remblai sans ponceaux. Si cette remontée du pergélisol favorise le regel d'un matériau gélif présent sous le remblai, un certain soulèvement au gel est à anticiper dans les quelques années suivant sa mise en place. Ce soulèvement au gel de la section centrale des remblais peut accentuer la cambrure des ponceaux, il importe alors de tenir compte de cette possibilité lors du dimensionnement des ponceaux.

Le haut risque d'infiltration d'eau en bordure des extrémités des ponceaux au niveau de leurs embouchures augmente le risque de dégradation thermique du pergélisol sous-jacent par l'apport de chaleur latente et possiblement par thermo-érosion. Pour contrer ce risque d'infiltration d'eau, l'imperméabilisation des embouchures des ponceaux a été systématiquement incluse dans les stratégies d'adaptation visant à améliorer le drainage. Dans l'ensemble, une telle précaution s'est avérée bénéfique sans représenter un coût important. Il s'agit toutefois d'une procédure délicate qui requiert une attention particulière lors de sa réalisation afin d'étanchéifier efficacement l'embouchure des ponceaux avec les fossés adjacents qu'ils desservent. L'une de ces attentions particulières vise à déterminer à priori un niveau de base adéquat des ponceaux afin que ces derniers se retrouvent légèrement sous le niveau des fonds de fossés. Par exemple, une erreur dans les plans et devis portant sur l'amélioration du réseau de drainage le long de la route d'accès à l'aéroport de Salluit s'est traduite par des niveaux de ponceau trop haut par rapport au fond du fossé et le terrain avoisinant. Malgré l'imperméabilisation des embouchures des ponceaux, cette erreur semble à l'origine des quelques infiltrations d'eau notées sous quelques ponceaux par Périer *et al.* (2016). Par sécurité, il devrait être envisagé d'installer systématiquement une membrane imperméable sous les ponceaux afin d'éviter toutes infiltrations d'eau qui pourraient survenir. L'utilisation d'isolant pourrait également servir à imperméabiliser le sol sous les ponceaux, mais leur utilisation, en limitant l'extraction de chaleur en hiver, doit être considérée avec prudence. Pour limiter le risque de thermo-érosion à l'exutoire des ponceaux, la mise en place de coussins de dispersions s'avère une bonne pratique à maintenir lors de la conception des réseaux de drainage pour des projets d'ingénieries en contexte similaire. Les coûts associés à une telle mesure demeurent faibles et l'absence d'évidence de processus de thermo-érosion pour les sites qui en font usage confirme leur efficacité (ex. : route d'accès à l'aéroport de Salluit).

L'utilisation de câbles chauffants s'est montrée efficace pour le déglaçage de certains ponceaux. Les observations effectuées le long de la route d'accès à l'aéroport de Kangiqsualujjuaq ont permis de constater que les ponceaux n'ayant pas de système de déglaçage étaient plus enclins à l'obstruction favorisant à l'occasion la formation d'importante accumulation d'eau du côté amont des remblais. Considérant le faible coût de ces systèmes, il est recommandé d'accroître leur utilisation afin de minimiser les risques d'obstruction des ponceaux et débordement. Notons que ces systèmes doivent être utilisés adéquatement pour garantir leur efficacité.

1.9.3.1 RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES POUR LES RÉSEAUX DE DRAINAGE

Basées sur les leçons apprises aux différents sites à l'étude portant sur la performance des réseaux de drainage, les recommandations suivantes sont à privilégier :

- Segmenter au maximum le réseau de drainage afin de bien répartir l'écoulement dans les différents ponceaux et ainsi éviter la concentration de l'écoulement dans un nombre limité de ponceaux. Pour ce faire, il peut être nécessaire d'ajouter ou augmenter le nombre de ponceaux et d'ajouter des bermes pour forcer l'eau à emprunter des ponceaux spécifiques.
- Il importe de minimiser la profondeur des fossés. Toute excavation force un réajustement thermique et l'apparition subséquente de tassements aux dégels dans les secteurs de pergélisol riche en glace. De plus, des fossés profonds favorisent des accumulations de neige plus importantes ce qui limite l'extraction de chaleur en hiver
- Imperméabiliser l'embouchure des ponceaux et appliquer un isolant sous ces derniers.
- Les solutions préconisées pour la réfection des ponceaux (surexcavation, isolation et cambrure) sont généralement considérées comme des bonnes pratiques dans des contextes de pergélisol riche en glace. Il importe toutefois de bien comprendre les processus de dégradation de l'infrastructure avant d'appliquer systématiquement de telles mesures afin de ne pas perturber davantage le terrain extrêmement sensible. Par exemple, dans un contexte où le centre de l'infrastructure est stable et que les dégradations du pergélisol affectent essentiellement les accotements, la cambrure d'un ponceau risque de s'accroître avec le temps et ainsi contribuer à une déficience éventuelle de ce dernier.
- Sans toutefois opter pour une solution de renforcement avec isolation, l'ajout seul de renfort de type géogrid pourrait aider à résister aux déformations et maintenir le ponceau opérationnel.
- D'après les recommandations émises dans le guide TAC, l'épaisseur des parois des ponceaux devrait être de 2.8 mm, et ce jusqu'à un diamètre de 1200 mm sans considération particulière selon la hauteur du remblai (EBA 2000). Il est recommandé d'utiliser des sections de ponceaux rivetées en raison de leur meilleure capacité à supporter les déformations du remblai liées aux tassements au dégel.
- Dans les secteurs de dépôts meubles minces et riches en glace (<2 m), il est préconisé d'excaver le matériel jusqu'au roc et le remplacer par un matériau non gélif.
- Dans plusieurs cas, les extrémités des ponceaux présentent une dégradation accélérée qui découle des opérations d'entretien (resurfaçage et déneigement). Il importe alors de bien identifier les extrémités de ponceaux par des balises solides afin de réduire ces risques d'endommagement lors des entretiens successifs.
- La présence de coussins de diffusion de l'écoulement à l'exutoire des ponceaux est une mesure à généraliser dans les contextes de pergélisol riche en glace.

1.9.4 EFFICACITÉ DES CLÔTURES ADAPTÉES

L'effet du gel saisonnier à l'intérieur de la couche active peut soumettre les fondations, et toute autre structure, à des forces de soulèvement considérables (Johnston, 1981). Le soulèvement gélival consiste en l'expansion du sol par la formation de lentilles de glace lors du regel du sol au début de l'hiver. En zone de pergélisol, le soulèvement gélival est restreint à la couche active et l'amplitude du processus est intimement lié au type de sol et à la disponibilité en eau. De manière générale, l'augmentation de l'épaisseur de la couche active accroît également le potentiel de soulèvement du sol par l'accroissement de la quantité d'eau et de la durée du regel (SHQ, 2018). Dans certains contextes, la formation de glace intrusive dans la couche active est une autre cause de soulèvement saisonnier dans les régions pergélisolées.

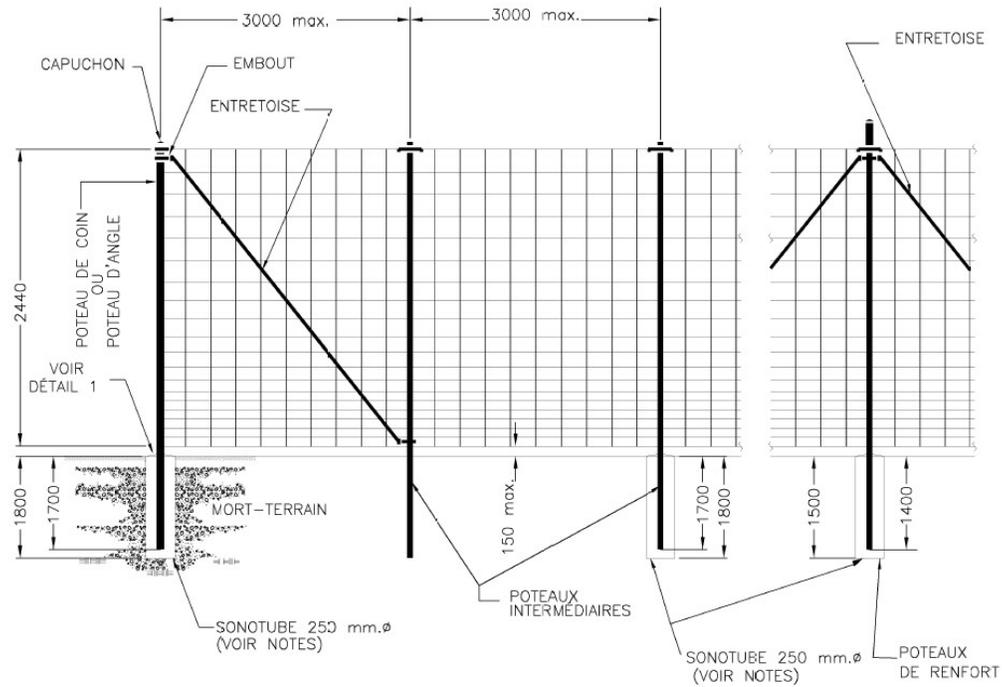
Par analyse de données interférométriques (InSAR) effectuée récemment au Nunavik (May, 2011; Eppler et al., 2015) et au Nunavut (Short et al., 2012; Leblanc et al., 2015), l'amplitude de ces mouvements saisonniers a été estimée à plus d'une dizaine de centimètres par endroit selon le type de dépôt et les conditions de drainage locales. L'amplitude des forces de soulèvement qui se développeront lors de la formation de lentilles de glace dans un sol gélif demeure toutefois difficile à évaluer en raison des nombreux paramètres à considérer tels que la surcharge, la charge de la fondation, le type de sol, la variation de la température du sol dans le temps et en profondeur, le taux de regel, la disponibilité en eau, le type de surface de la fondation, la méthode de mise en place de la fondation et le taux et la durée du chargement (Andersland and Ladanyi, 2004). Chose certaine, les forces de soulèvement qui se développent lors du regel de la couche active sont suffisantes pour soulever les structures qui y sont enfouies ou qui reposent à la surface du sol. Une fois soulevée, il est fréquent que la structure ne puisse retrouver son emplacement initial lors du dégel du sol l'été suivant. Graduellement, la structure sera ainsi expulsée de la couche active par la succession des cycles de gel et dégel. L'un des exemples types de l'effet du soulèvement gélival sur les structures, et qui est régulièrement observé dans les zones où le pergélisol est présent, est l'expulsion graduelle des fondations qui supportent les poteaux des clôtures lorsque celles-ci sont encastrées dans la couche active (Figure 156). Un aperçu d'une conception standard des clôtures en usage aux différents aéroports du Nunavik est présenté à la figure 157.

Afin de pallier cette problématique, plusieurs sections des clôtures qui délimitent le périmètre des aéroports au Nunavik ont été récemment remplacées par différentes conceptions de poteaux de clôture qui permet, en zone de sol gélif, de soit résister aux forces de soulèvement en étant ancrée solidement dans le pergélisol (poteaux de type « Russe ») (Figure 158A) ou s'ajuster aux mouvements saisonniers en étant simplement déposés à la surface du sol (poteaux de type « Yukon ») (Figure 158B). Fréquemment, pour des raisons de stabilité de la structure, les nouvelles clôtures installées au Nunavik font l'usage de ces deux types de poteaux en alternance (Figure 158C). La figure 159 montre un exemple d'utilisation des deux types de poteaux utilisés. Étant ancrés au sommet du pergélisol à l'aide d'une pointe vissée, les poteaux de type « Russe » offrent une meilleure résistance et peuvent agir à titre de poteaux de renfort, tandis que les poteaux de type « Yukon » sont davantage des poteaux intermédiaires. La conception standard des clôtures qui en font usage recommande d'utiliser les poteaux de renfort de type « Russes » minimalement à tous les 60 m et les poteaux intermédiaires de type « Yukon » à tous les 3 m. Aux changements de direction, de part et d'autre des barrières ou lors des transitions entre les sections de clôtures adaptées et celles standards, les poteaux de type « Russes » sont également utilisés. Les deux types de poteaux adaptés sont munis de deux entretoises dans l'axe de la clôture qui permettent d'y fixer le grillage. Il s'agit ici d'une distinction importante par rapport aux sections de clôture standards dont les poteaux sont munis d'entretoises seulement à tous les 60 m environ où lors des changements de direction. Notons qu'il existe une variante dans la conception des clôtures de type « Yukon ». Cette variante porte essentiellement sur le système de fixation des empattements (pièces 1 et 2, figure 158) qui peut soit être fixe (Figure 160A) ou amovible (Figure 160B).

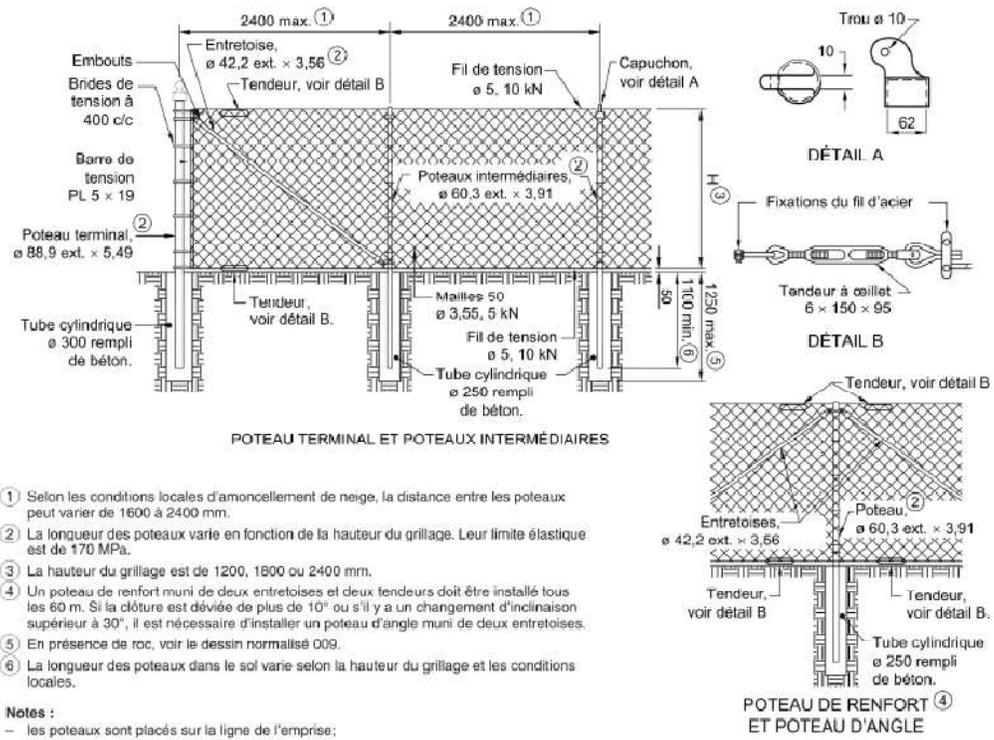
Un sommaire des coûts selon le type de poteaux de clôture utilisés est présenté au tableau 39. À l'intérieur de ce tableau, un coût unitaire moyen par type a été calculé à partir des bordereaux de paiement disponibles pour les sites de Kangirsuk, Aupaluk, Inukjuak et Salluit. À noter que pour les clôtures standards, il est difficile de déterminer si le coût comprend également celui du grillage. À partir de ces informations, le coût autant pour les poteaux de type « Russe » que de type « Yukon » est nettement plus élevé que celui d'une clôture standard. Entre les poteaux de type « Russe » et de type « Yukon », le coût est moindre pour ces derniers. Pour les clôtures de type « Russe », la grande différence de coût de mise en place selon les différents projets nécessitera une analyse plus approfondie afin de valider l'information.



Figure 156 : Sections de clôture fortement endommagées par l'action du soulèvement gélival sur les fondations, Aéroport d'Aupaluk (source : MTQ, 2011-2012, devis 7202-13-3505).



CLÔTURE DE TYPE TREILLIS POUR GIBIERS – SECTIONS À RÉPARER



- ① Selon les conditions locales d'amoncellement de neige, la distance entre les poteaux peut varier de 1600 à 2400 mm.
- ② La longueur des poteaux varie en fonction de la hauteur du grillage. Leur limite élastique est de 170 MPa.
- ③ La hauteur du grillage est de 1200, 1800 ou 2400 mm.
- ④ Un poteau de renfort muni de deux entretoises et deux tendeurs doit être installé tous les 60 m. Si la clôture est déviée de plus de 10° ou s'il y a un changement d'inclinaison supérieur à 30°, il est nécessaire d'installer un poteau d'angle muni de deux entretoises.
- ⑤ En présence de roc, voir le dessin normalisé 009.
- ⑥ La longueur des poteaux dans le sol varie selon la hauteur du grillage et les conditions locales.

- Notes :**
- les poteaux sont placés sur la ligne de l'emprise;
 - le grillage est installé du côté de la propriété du Ministère et fixé aux poteaux et aux fils de tension toutes les 4 mailles. Les broches d'attaché utilisées aux poteaux sont constituées de fils d'aluminium ayant un diamètre de 3,5 mm, alors que celles utilisées aux fils de tension sont des fils d'acier inoxydable de 1,5 mm de diamètre;
 - toutes les pièces métalliques, à l'exception des pièces en aluminium, sont galvanisées;
 - le taux de zinc pour la galvanisation des fils doit être de 490 g/m²;
 - les cotes sont en millimètres.

MATÉRIAUX — NORMES APPLICABLES	
Béton, type I	Tome VII, norme 3101
Coulis d'ancrage	Tome VII, norme 3901
Galvanisation	ASTM A123/A123M
Grillage et fils métalliques	Tome VII, norme 6601

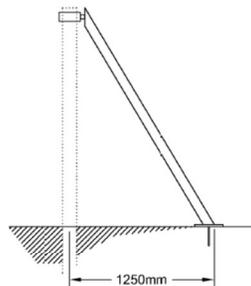
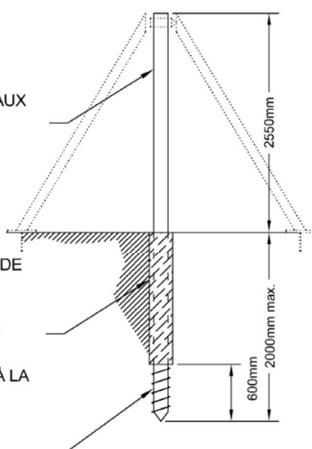
Figure 157 : Conception pour les sections de clôtures standards tirée des plans tel que construit no. PA-7202-154-11, aéroport d'Aupaluk.

A)
Poteau de type « Russe »

DIAMÈTRE EXTÉRIEUR DES POTEAUX DE RENFORT : 89mm

GAINÉ FLEXIBLE DE TYPE "TUYAU DE BALAYEUSE" SCELLÉE EN BAS ET REMPLIE DE GRAISSE. LA GAINÉ DOIT ÊTRE CONSTITUÉE D'UN MATÉRIAU ROBUSTE. LA GAINÉ S'ÉTEND DE LA POINTE À LA SURFACE DU SOL

ANCRAGE À VIS DE TYPE "TECHNO-PIEUX". LA POINTE DOIT S'ENFONCER D'AU MOINS 600mm DANS LE PERGÉLISOL



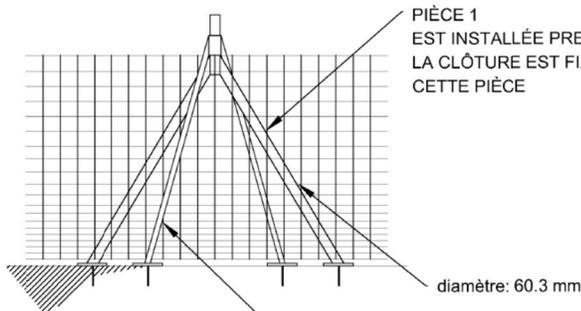
ENTRETOISE BASÉE SUR LE MODÈLE DE POTEAU DE TYPE YUKON

SYSTÈME DE FIXATION AMOVIBLE

- 1 PLAQUE 300x300x6mm
- 1 TIGE DE 200mm (BARRE D'ACIER D'ARMATURE 20M)

B)
Poteau de type « Yukon »

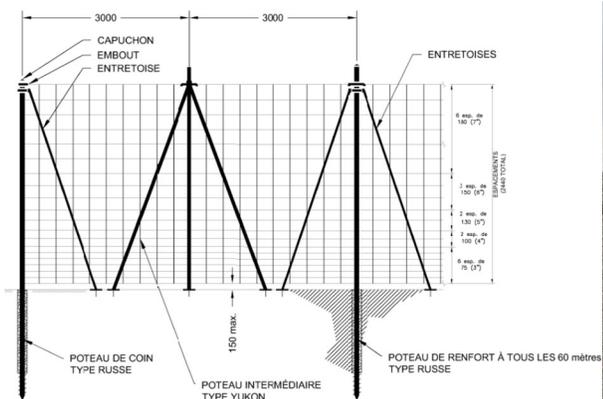
MODÈLE UTILISÉ POUR LES POTEAUX INTERMÉDIAIRES



PIÈCE 1 EST INSTALLÉE PREMIÈREMENT, LA CLÔTURE EST FIXÉE SUR CETTE PIÈCE

PIÈCE 2 EST INSTALLÉE PAR DESSUS LA PIÈCE 1

C)
Clôture utilisant des poteaux « Yukon » et « Russe »



CLÔTURE DE TYPE TREILLIS POUR GIBIERS - ZONES PERGÉLISOL



Figure 158 : Vue en plan des deux différents types de poteaux A) « Russe » et B) « Yukon » qui sont désormais utilisés dans la conception des nouvelles clôtures aux aéroports et qui doivent traverser des zones de fort soulèvement gélival (schémas tirés des plans tel que construit no. PA-7204-154-95-1731, aéroport de Kangirsuk).

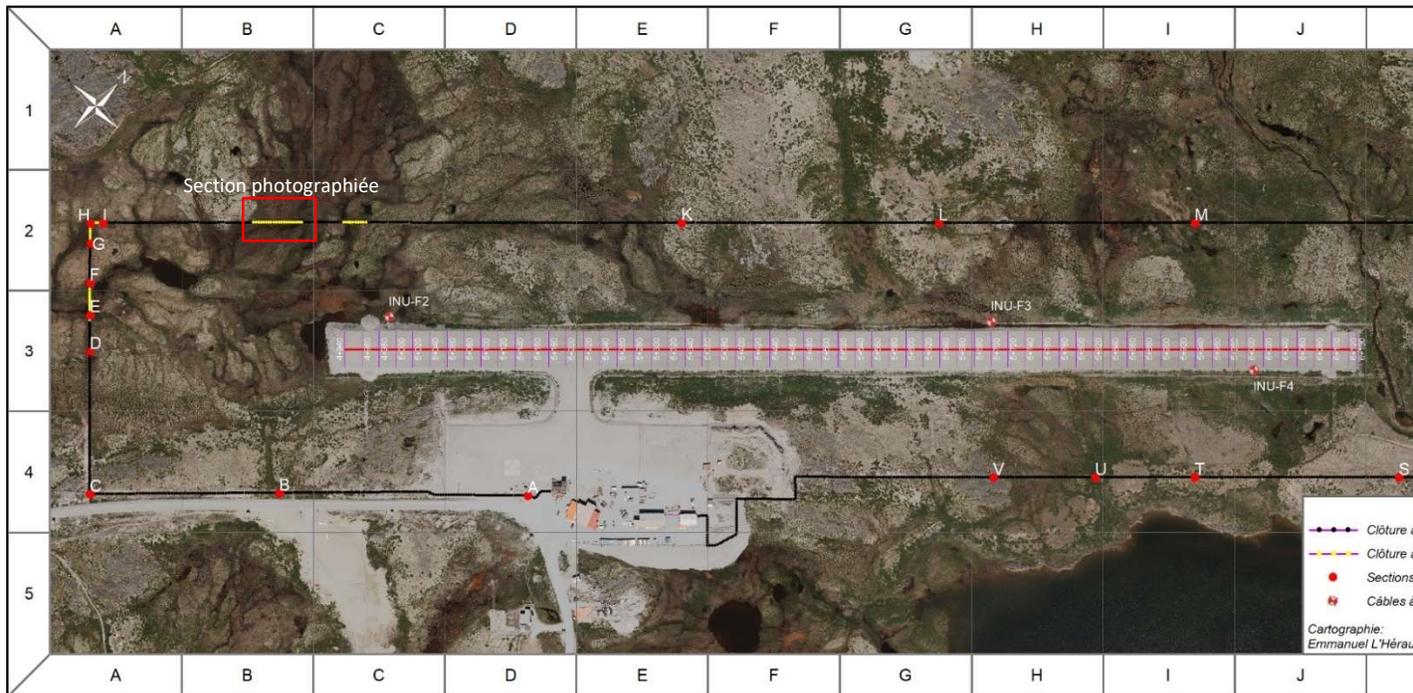


Figure 159 : A) Aperçu général des sections de clôtures adaptées mises en place autour de la piste d'atterrissage d'Inukjuak et B) utilisant les deux types de poteaux « Yukon ».

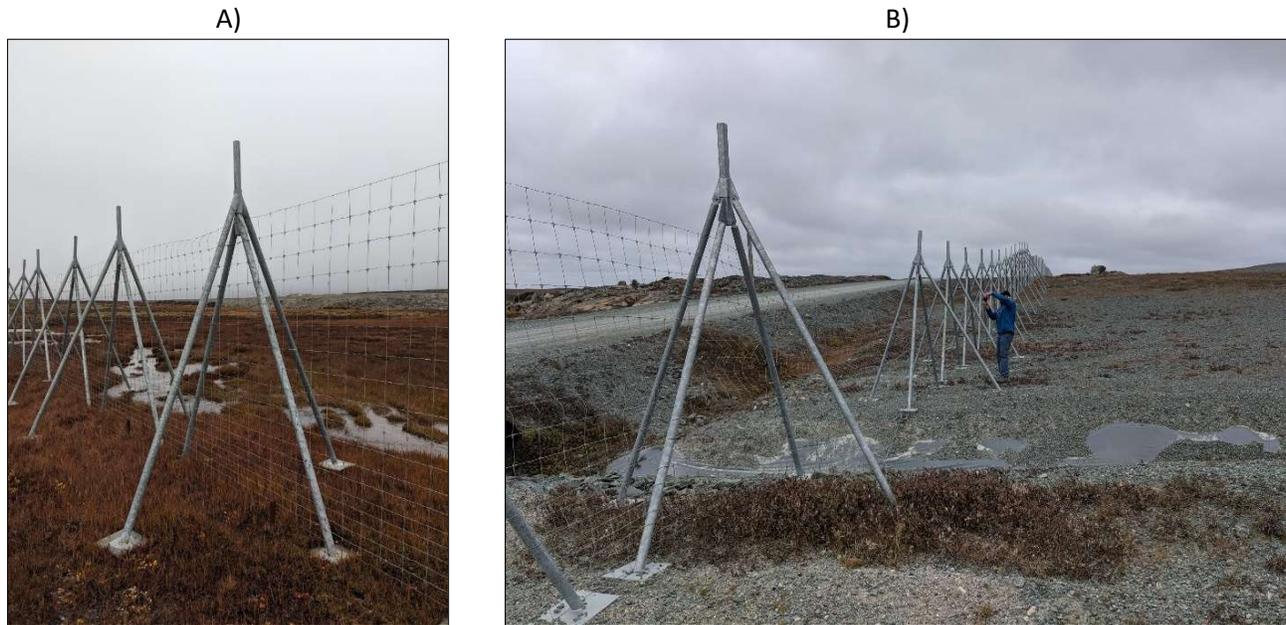


Figure 160 : Modèles de poteaux de type « Yukon » avec fixation des empattements A) fixe (aéroport d’Inukjuak) ou B) amovible qui permet l’ajustement de l’angle des pattes pour bien les appuyer à la topographie du terrain (aéroport de Kangirsuk).

Tableau 39 : Sommaire des coûts selon le type de poteaux de clôture utilisés et leurs coûts unitaires moyens. Les coûts unitaires pour chacun des types de poteaux proviennent des bordereaux de paiements disponibles.

Description	Aéroport	Source	Prix unitaire
Poteaux de type « Russe »	Kangirsuk	7204-16-3503	850.00\$
	Aupaluk	7202-13-3505	300.00\$
	Inukjuak	7202-12-3507	2734.60\$
	Salluit	7202-11-3501	1300.00\$
	Coût moyen		
Poteaux de type « Yukon »	Kangirsuk	7204-16-3503	480.00\$
	Aupaluk	7202-13-3505	750.00\$
	Inukjuak	7202-12-3507	734.42\$
	Salluit	7202-11-3501	700.00\$
	Coût moyen		
Clôture grillagée à mailles (poteaux 2.4 m c/c)	Kangirsuk	7202-15-3501	400.00\$
	Aupaluk	7202-13-3505	180.00\$
	Inukjuak	7202-14-3504	280.00\$
	Salluit	7202-11-3501	140.00\$
	Coût moyen		

1.9.4.1 PRINCIPALES PROBLÉMATIQUES OBSERVÉES POUR LES SECTIONS DE CLÔTURES ADAPTÉES

Dans le cadre de ce projet de recherche, chacun des sites munis de sections de clôture adaptées faisant l'usage des poteaux de type « Russes » et « Yukon » ont été visités au cours des étés 2018 et 2019 par l'équipe du CEN et fait l'objet d'une évaluation. Les sites qui ont été visités se résument aux aéroports de Kangirsuk, d'Aupaluk, d'Inukjuak et Salluit. La présente section vise à faire un survol des différentes problématiques qui affectent les sections des clôtures adaptées sans distinction particulière entre les sites d'implantation.

Pour les poteaux de type « Russe » les problèmes observés se résument essentiellement aux soulèvements qui persistent toujours malgré leur ancrage dans le pergélisol à l'aide d'une pointe vissée et l'utilisation d'une gaine anti-soulèvement (Figure 161). Les soulèvements observés semblent être causés par les entretoises qui, étant appuyées à la surface du sol et fixées aux poteaux, entraînent le poteau lors du soulèvement de la surface du sol.

Pour les clôtures de type « Yukon », les problèmes observés se résument à :

- La difficulté de venir bien appuyer l'empattement au sol et maintenir la clôture dans un axe vertical lorsque le système de fixation des empattements est fixe, particulièrement en présence d'un terrain irrégulier (Figure 162A).
- L'ancrage sous les empattements semble limiter la capacité des pattes à se repositionner correctement, lorsque soulevées hors sol.
- Pour les poteaux avec système de fixation des empattements amovible, certaines têtes peuvent s'incliner fortement limitant ainsi la mobilité des deux sections l'une dans l'autre (Figure 162B).
- Lorsque l'espacement entre les poteaux est faible, les empattements dans l'axe parallèle à la clôture peuvent s'entrecroiser.
- Les deux sections d'empattements qui s'emboîtent l'une dans l'autre au sommet des poteaux reposent presque toujours directement l'une sur l'autre ce qui ne permet pas le mouvement de ces deux sections de manière indépendante (Figure 162C).

La mise en place de clôture de type « Yukon » nécessite l'utilisation de poteaux de type « Russe » afin d'accroître la solidité de la clôture, particulièrement lors des changements de direction ou à tous les 60 m de distance linéaire. Cette alternance entre les deux types de poteaux crée des zones de transition. En raison de la divergence de fonctionnement entre les deux types de poteaux dont l'un est ancré dans le pergélisol et statique (poteau de type « Russe ») et l'autre simplement déposé sur la surface du sol et mobile (poteau de type « Yukon »), ces zones de transition s'avèrent problématiques. Lors des visites sur le terrain, ce sont dans ces zones de transition que de nombreuses déficiences ont été observées (Figure 163) et exacerbées à l'occasion par le soulèvement au gel de certains poteaux de type « Russe ».

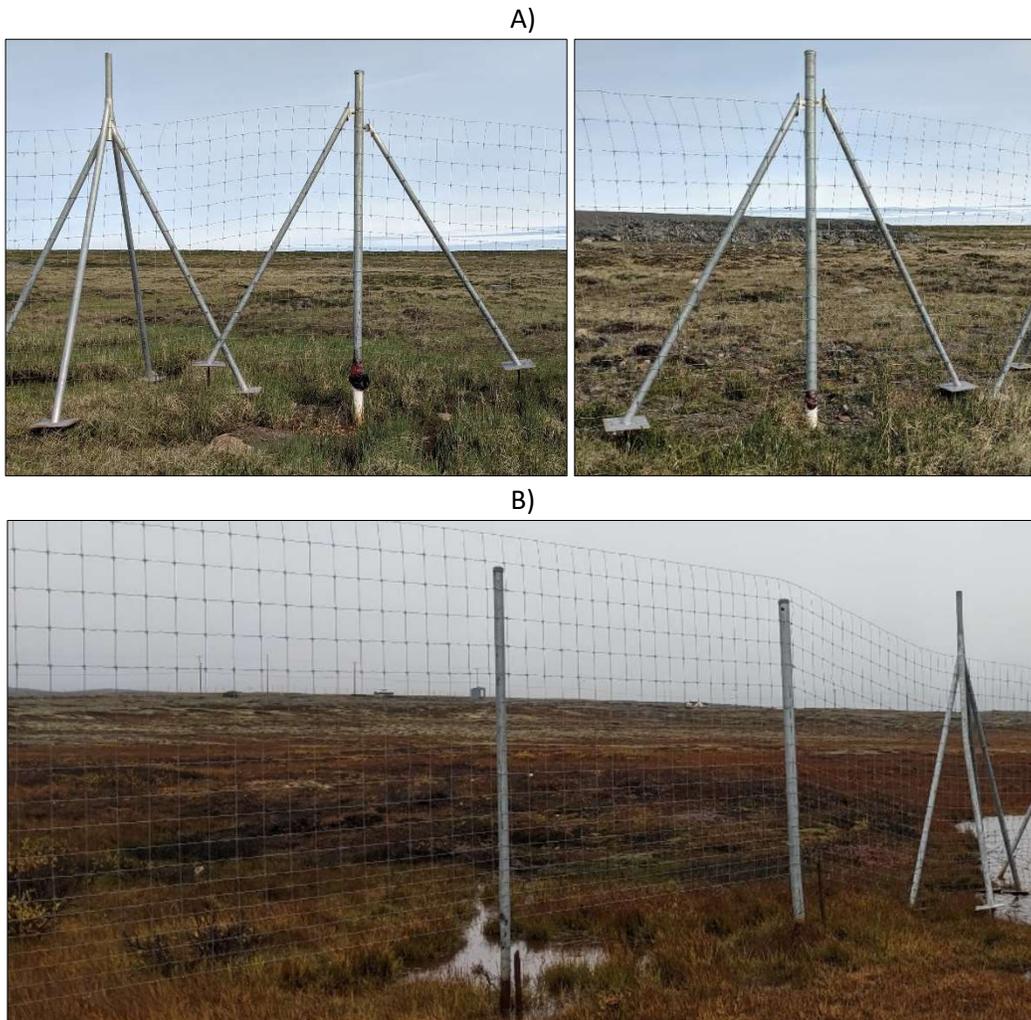


Figure 161 : Soulèvement au gel des poteaux de type « Russe » aux aéroports A) d'Aupaluk et B) d'Inukjuak.

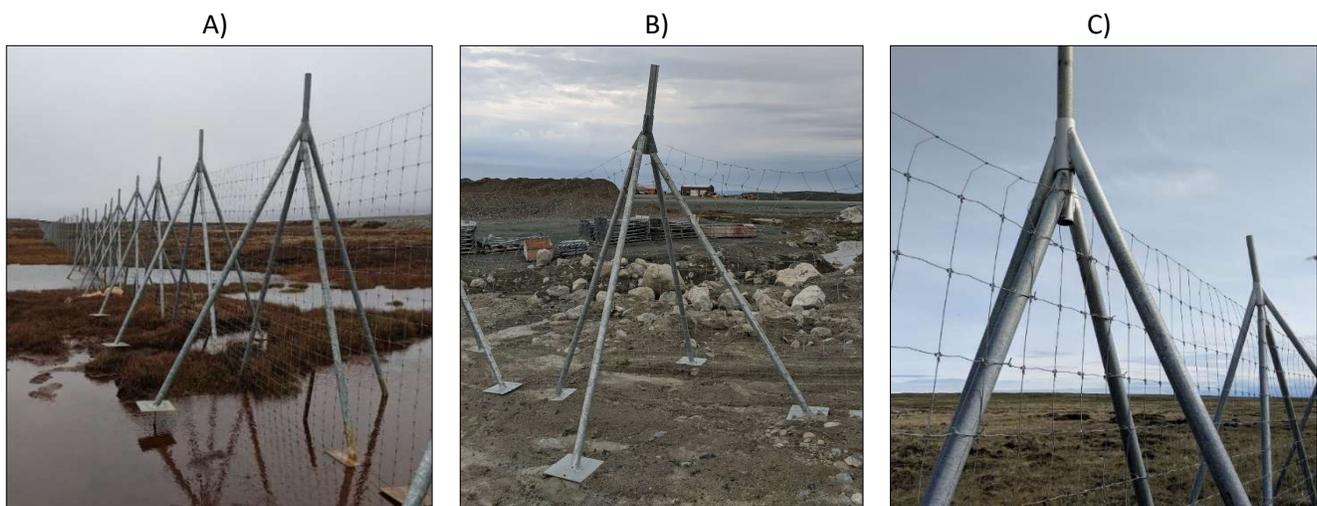


Figure 162 : Type de défauts qui affectent fréquemment les poteaux de type « Yukon ». A) emplacements mal appuyés au sol (aéroport d'Inukjuak), B) fixations amovibles des emplacements trop inclinés (aéroport de Kangirsuk) et C) emplacements perpendiculaires qui reposent directement sur les emplacements parallèles à la clôture.

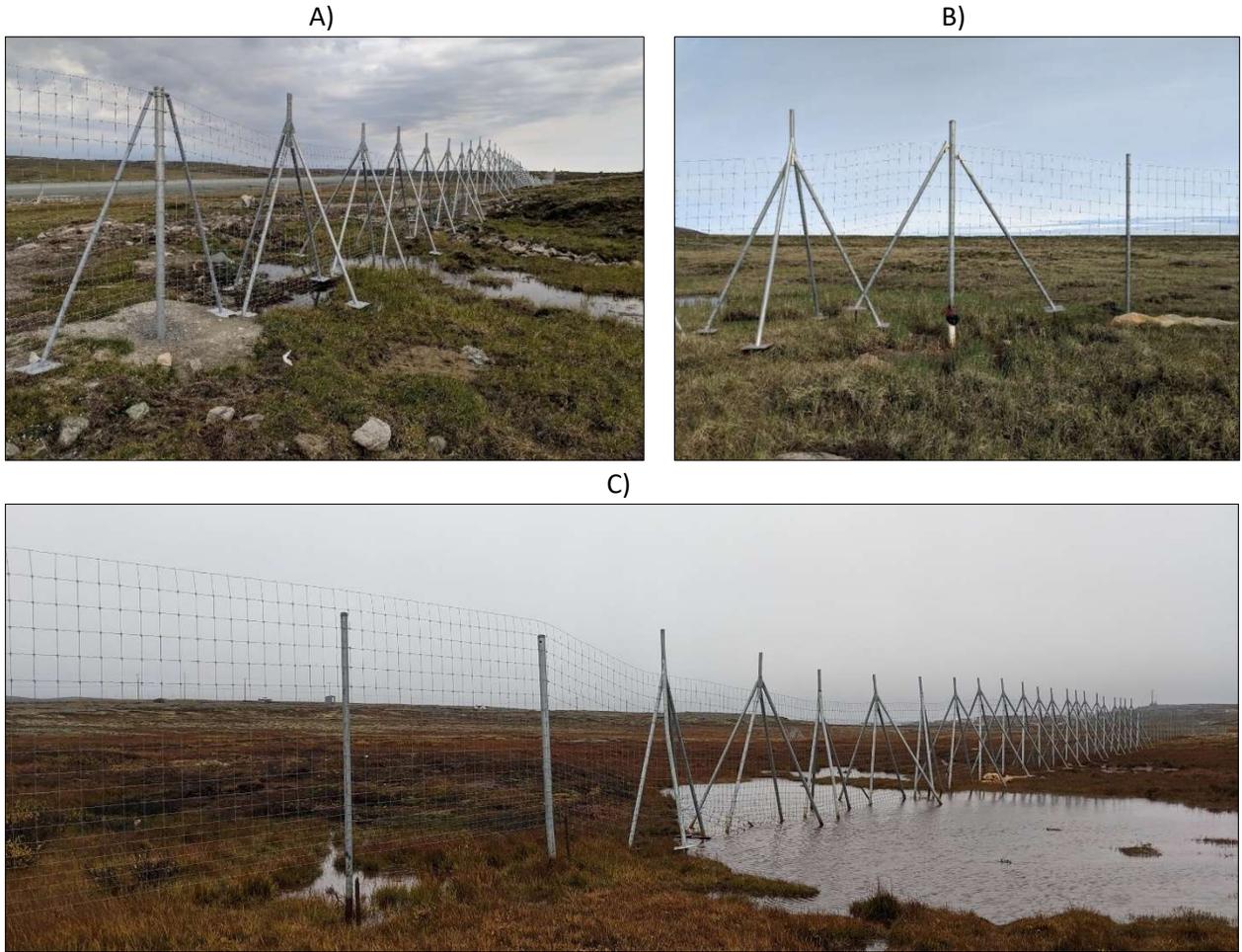


Figure 163 : Zone de transition entre les poteaux de type « Russe » et de type « Yukon » présentant des déformations importantes aux aéroports A) de Kangirsuk, B) d'Aupaluk et C) Inukjuak.

1.9.4.2 RECOMMANDATIONS POUR LES POTEAUX DE TYPE « RUSSE »

Basées sur les observations effectuées aux différents sites faisant l'usage des clôtures adaptées de type « Russe », les recommandations suivantes sont proposées afin d'en améliorer la performance lors d'éventuelles installations. À noter que pour assurer l'efficacité des poteaux de type « Russe », les mêmes principes de dimensionnement utilisés pour les pieux en adhérence s'appliquent et se résument à :

- Ancrer les poteaux à l'aide d'une pointe vissée suffisamment profonde dans le pergélisol afin d'assurer une résistance suffisante aux forces de soulèvement. La profondeur d'ancrage nécessaire sera proportionnelle à l'épaisseur de la couche active.
- Utiliser une gaine anti soulèvement dans la section qui traverse la couche active et des composantes qui favorisent l'adhérence des parois du poteau dans la section enfouie dans le pergélisol et à sa base (Figure 164). L'utilisation conjointe de ces deux éléments permet de diminuer la profondeur d'ancrage nécessaire pour assurer une résistance suffisante aux forces de soulèvement.
- Améliorer la méthode de fixation et d'étanchéisation de la gaine. Opter possiblement pour l'utilisation d'un joint en caoutchouc aux extrémités pour fixer la gaine et d'une graisse biodégradable (non à base d'hydrocarbure) afin de réduire l'adhérence possible entre la gaine et le poteau.
- Utiliser si possible un matériau non gélif au pourtour de la section enfouie du poteau afin de limiter l'adhérence au gel.
- Éviter de fixer les entretoises et le grillage aux poteaux pour éviter l'arrachement des poteaux tel qu'observé à Kangirsuk, Inukjuak et Aupaluk. L'utilisation d'un collet coulissant et la fixation de la clôture aux entretoises permettront de garder ces deux composantes indépendantes (entretoises avec grillage et poteau russe) et d'assurer le mouvement de la clôture sans affecter l'ancrage du poteau (Figure 164).
- Évaluer la possibilité d'utiliser un isolant entre 20 et 30 cm sous la surface afin de réduire considérablement la pénétration du front de dégel. Il s'agit ici d'une option de dernier recours et applicable pour un nombre limité de poteaux.

Il est important de considérer qu'au-delà d'une certaine épaisseur de la couche active et en présence de pergélisol chaud, les poteaux de type « Russe » devraient être remplacés si possible par d'autres alternatives (ex. poteaux de type « Yukon ») ou inclure des composantes additionnelles qui limitent le risque de soulèvement gélival comme celles résumées ci-haut. Pour le moment, l'efficacité de la conception actuelle est modérée, mais selon le Ministère, plusieurs problèmes d'installation ou de conception en seraient en partie responsables.

Actuellement, très peu de villages sont équipés de foreuses nécessaires à l'installation de ce type de poteaux. La mobilisation de l'équipement nécessaire augmente considérablement les coûts d'installation. Le remplacement d'un poteau défectueux demeure complexe et peut nécessiter une excavation assez profonde et possiblement de devoir dégeler la partie supérieure du pergélisol dans laquelle la pointe vissée est ancrée. Actuellement, les seules mesures d'entretien possibles sont très limitées et se résument essentiellement à repositionner les entretoises au besoin.

Suite à des discussions avec le Ministère, une alternative aux poteaux de type « Russe » est proposée à la figure 164. Pour le moment, l'appellation proposée pour ce type de poteau est le poteau de type « Nunavik ». Ces derniers n'ont toutefois pas été testés à ce jour. Si une mise à l'essai en contexte réelle est planifiée prochainement, une attention particulière devra être portée sur le risque de coinçage du poteau externe avec le poteau interne en présence de tension dans le grillage, comme c'est fréquemment le cas dans les coins et lors de changements de direction importants.

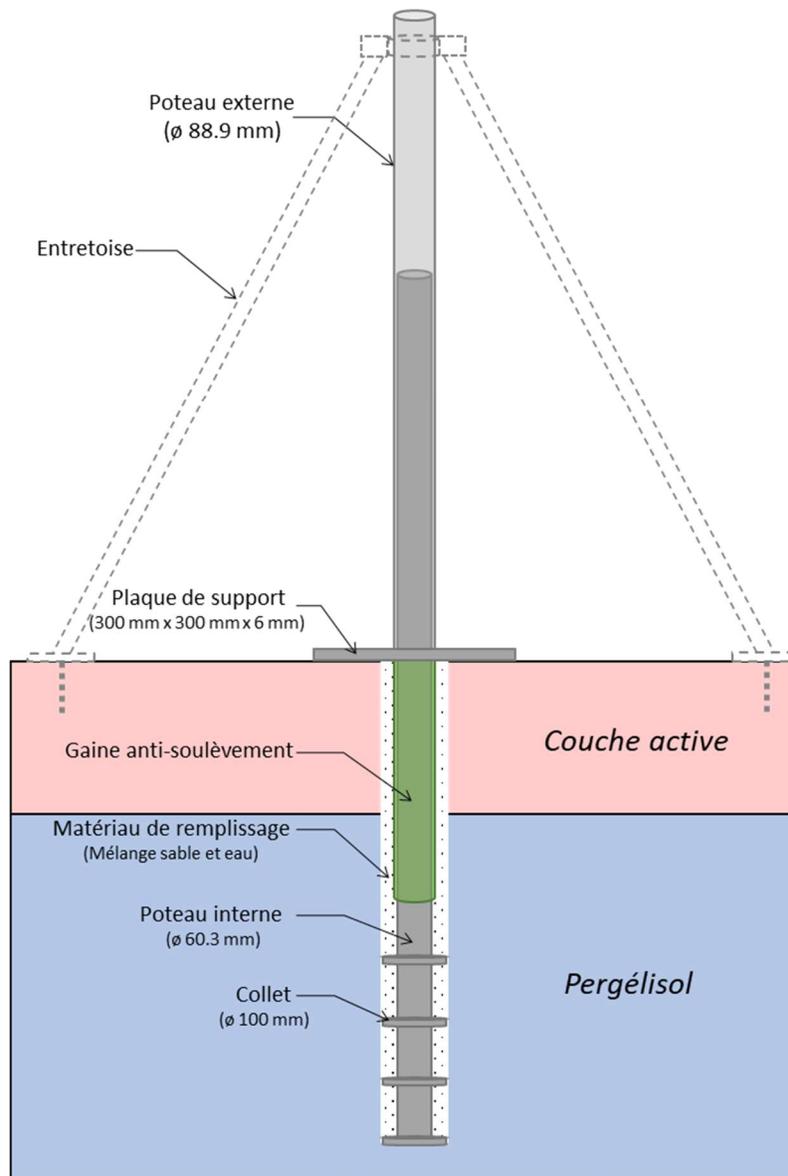


Figure 164 : Alternative proposée aux poteaux de type « russe » et qui porte pour le moment l'appellation de poteau de type « Nunavik ».

1.9.4.3 RECOMMANDATIONS POUR LES POTEAUX DE TYPE « YUKON »

Basées sur les observations effectuées aux différents sites faisant l'usage des clôtures adaptées de type « Yukon », les recommandations suivantes sont proposées afin d'en améliorer la performance lors d'éventuelles installations :

- Privilégier le système de fixation amovible pour les empattements. Ce design permet de mieux positionner/appuyer les pattes à la surface du sol en ajustant l'angle d'appui de façon indépendante. Ce type de fixation permet également le remplacement d'une seule patte et non les deux comme c'est le cas avec le système de fixation fixe. Il pourrait également être possible d'utiliser une fixation rigide sur la composante longitudinale pour bien soutenir la partie coulissante et une fixation amovible (articulée) sur la composante perpendiculaire.
- S'assurer de prévoir suffisamment d'espace entre les deux sections d'empattement qui s'emboîtent au sommet (sections parallèles et perpendiculaires à la clôture) afin d'assurer une mobilité indépendante des deux composantes.
- Augmenter l'espacement à 4 ou 5 m au lieu de 3 m afin d'éliminer le risque de croisement des empattements parallèles tout en réduisant considérablement les coûts d'installations. Notons que la section d'empattement parallèle à la clôture agit comme entretoise. Une telle configuration offre un meilleur support à la clôture de maille par rapport aux poteaux standards ou de type « Russe » et limiterait la perte de tension dans le grillage que pourrait occasionner un espacement plus grand entre les poteaux.
- Étant donné le coût relativement plus élevé par rapport à une clôture standard. Les zones sujettes au soulèvement gélival doivent être bien circonscrites afin d'en limiter l'usage le plus possible. Par exemple, la longueur de la clôture de type « Yukon » à Kangirsuk aurait pu être réduite considérablement.

Les poteaux de type « Yukon » semblent efficaces et leur entretien facilement réalisable sans nécessiter de la machinerie lourde, mais seulement du petit outillage et des ouvriers. L'installation sur fond de glace/neige accumulée sur le terrain à Quaqaq et Aupaluk n'a pas occasionné de problèmes à ce jour (source : MTQ). Le fait que la structure des clôtures de type « Yukon » est simplement déposée sur le sol, l'utilisation de foreuse n'est pas nécessaire et elle cette structure est plus facilement ajustable advenant une déformation. La grande mobilité de la structure assurée par la présence de nombreuses pièces mobiles peut, par contre, rendre les clôtures de type « Yukon » plus sensibles aux déformations. Par conséquent, un entretien annuel est recommandé afin de :

- S'assurer que les empattements sont bel et bien appuyés au sol et que la clôture est verticalement positionnée.
- S'assurer que l'espacement entre les deux sections d'empattement qui s'emboîtent au sommet est suffisant et que la section coulissante est suffisamment longue pour permettre des mouvements importants sans désemboîtement des sections.
- S'assurer que la tête des poteaux où s'emboîtent les empattements demeure verticale.

Bien qu'une utilisation hybride des poteaux de type « Russe » et « Yukon » ne soit pas recommandée, l'utilisation exclusive des poteaux de type « Yukon » soulève quelques inquiétudes. Par exemple, le retrait des poteaux de renfort tous les 60 ou 80 m pour conserver seulement les poteaux type « Yukon » qui ne sont pas ancrés dans le sol pourrait affaiblir la stabilité d'ensemble de la clôture. Également, les zones où la tension exercée par la clôture est élevée (coins et changements de direction) ou lorsque qu'une barrière est requise demeurent contre-indiquées pour l'utilisation de poteaux de type « Yukon ». Par conséquent, étant donné qu'il apparaît pour le moment difficile d'utiliser exclusivement les poteaux de type « Yukon », une modification de la conception des poteaux standards ou russes telle que proposée à la figure 164 permettrait un meilleur arrimage entre les deux types de conception limitant les déformations de la clôture en présence de mouvements différentiels des différentes structures.

1.10 CONCLUSION

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 connaissances sur le pergélisol au Québec nordique en vue de fournir l'information nécessaire à la construction et à l'entretien à venir des pistes d'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. L'Hérault *et al.* (2012) ont produit un rapport synthèse intitulé « Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik ». Ce rapport constituait, 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 acquises lors de campagnes de forages tenues en 2008 et 2009 (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. Ces nouvelles connaissances avaient permis de cibler les zones sensibles et d'y estimer l'ampleur des tassements à venir en raison du dégel du pergélisol pour ultimement proposer, sous forme de stratégie d'adaptation intégrée et optimisée, 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. En conformité avec les stratégies d'adaptation proposées dans l'étude de L'Hérault *et al.* (2012), plusieurs mesures d'adaptation ont graduellement été mises en place à différents sites d'infrastructures du MTQ au Nunavik au cours de la période 2009-2021.

L'objectif général du volet 1 visait la réalisation d'un bilan de performance de ces stratégies d'adaptation aux sites d'infrastructures aéroportuaires et routières du MTQ au Nunavik en zone de pergélisol sensible au dégel. Ce bilan visait spécifiquement à documenter l'efficacité des mesures/techniques d'adaptation mises en place afin d'identifier les facteurs environnementaux, climatiques ou anthropiques qui influencent leurs performances et ainsi mieux définir leurs contextes d'application et de proposer, au besoin, des améliorations pour maximiser leur efficacité.

Dans l'ensemble, les différentes mesures/techniques d'adaptation ont démontré une performance satisfaisante. Le climat des dix dernières années au Nunavik, caractérisé par une légère tendance au refroidissement, a certainement contribué positivement à la performance observée. À l'exception de quelques secteurs en déblai (ex. Kangirsuk) et endroits où la profondeur de dégel dépasse l'ancienne couche active sous les remblais (ex. Tasiujaq), les sections centrales des remblais sont thermiquement stables, ce qui leur confère une excellente stabilité mécanique. Pour les routes d'accès spécifiquement, le rehaussement des remblais de quelques décimètres et le retrait du pavage à titre de mesures d'adaptation ont contribué à stabiliser thermiquement et mécaniquement certaines sections. Que ce soit pour les routes d'accès et les pistes d'atterrissage, les accotements, les talus et les pieds de remblai demeurent des secteurs critiques où les conditions de drainage et d'enneigement limitent l'efficacité de certaines techniques d'adaptation à refroidir et maintenir le pergélisol en condition thermiquement stable. Les températures plus chaudes du pergélisol dans ces zones marginales favorisent l'occurrence de déformation associée aux fluages. Ces déformations soulèvent des inquiétudes quant à la stabilité à court et moyen terme de certaines infrastructures, comme c'est le cas pour la route d'accès à l'aéroport de Salluit, et mériteront une attention particulière dans le futur. Cette précarité thermique des zones marginales rappelle l'importance d'en tenir compte lors du développement des stratégies visant à adapter les infrastructures existantes ou lors de la conception de nouvelles.

Même si la plupart des mesures/techniques d'adaptation visaient à minimiser le rôle de la neige et de l'eau dans le processus de dégradation du pergélisol, ces deux facteurs requièrent toujours une attention particulière. Pour

plusieurs routes d'accès, les pratiques de déneigement actuelles atténuent considérablement l'efficacité de certaines techniques de mitigation. Par exemple, l'empilement de la neige sur les talus des pentes douces, comme c'est le cas actuellement pour les routes d'accès aux aéroports de Salluit et de Kangiqsualujjuaq, limite leur efficacité à refroidir le sol. Dans de tels contextes, il importe d'instaurer rapidement de bonnes pratiques de déneigement afin d'éviter les accumulations de neige en bordure des infrastructures, particulièrement dans les zones sensibles où le pergélisol est riche en glace. Pour les systèmes convectifs, la neige qui continue à s'accumuler naturellement en pied de remblai contribue au réchauffement des pieds de remblai. La zone d'influence des systèmes convectifs se limitant à la géométrie du remblai, les mécanismes de dégradation qui affectaient les pieds de remblai demeurent dans certains cas toujours actifs. Par conséquent, une augmentation éventuelle de l'épaisseur de la couche active dans ces secteurs et la capacité de cette dernière à piéger davantage d'eau et l'apport de chaleur latente qui en découle pourrait altérer la capacité de ces systèmes à maintenir le pergélisol sous les talus et les accotements. L'adoucissement des pentes (3H :1V ou 4H :1V) combiné à l'utilisation d'un système convectif minimiserait les risques de mauvais comportement sous les talus.

La gestion du drainage demeure dans l'ensemble très efficace et repose en grande partie sur ces principales recommandations qui ont été respectées lors de la conception des réseaux de drainage améliorés à savoir :

- Lorsque des fossés sont requis dans des secteurs de pergélisol riche en glace, utiliser des fossés peu profonds, protégés par un empierrement et, dans la mesure du possible, éloignés du corps du remblai.
- Segmenter le réseau de drainage afin de limiter le temps de résidence et les concentrations d'eau par l'ajout de ponceaux et l'utilisation de berme.
- Imperméabiliser l'entrée des ponceaux et mettre en place des coussins de diffusion aux exutoires dans les secteurs riches en glace pour minimiser le risque de thermo érosion.
- Imperméabiliser les remblais aux endroits où des écoulements souterrains sont suspectés.

Afin de maintenir l'efficacité des réseaux de drainage, un entretien régulier (nettoyage et reprofilage) est impératif. Lorsqu'un reprofilage est requis, il est fortement recommandé de procéder au remplissage des dépressions avec un matériau granulaire (sable ou MG-20) plutôt que par excavation des zones en saillie. Lors de conceptions futures, les réseaux de drainage gagneraient en efficacité si une attention particulière était portée non seulement à la maîtrise des écoulements de surface, mais également celle de l'eau présente dans la couche active en marge des infrastructures. Un drainage efficace de cette eau souterraine, en réduisant les apports de chaleur convective ou la persistance d'importantes quantités de chaleur latente, favoriserait un refroidissement efficace du pergélisol tout en limitant le développement de boucles de rétroactions positives susceptibles d'accélérer sa dégradation.

Actuellement, les remblais à pente douce démontrent une excellente performance. Cette performance, malgré une absence de données tangibles pour plusieurs sites, s'accroît lorsque ces talus sont recouverts d'une couche de matière organique en surface qui favorise la végétalisation des talus. À l'heure actuelle, seule la route d'accès à l'aéroport d'Ivujivik présente une telle caractéristique. Les coûts associés à une telle pratique n'étant pas significatif, cette approche devrait être préconisée lors de l'adaptation d'une infrastructure existante ou lors de la mise en place d'une nouvelle infrastructure qui requiert des pentes adoucies. Il serait pertinent d'évaluer plus précisément les bénéfices thermiques d'une telle mesure par modélisation numérique et également les différences entre les différentes configurations possibles (laisser la couche en place sous le remblai ou l'excaver et l'étendre en surface des talus). Il est important de mentionner qu'au-delà des bénéfices thermiques des pentes douces, l'éloignement des fossés qui en résulte limite le risque d'écoulements et d'apport de chaleur par advection sous le remblai, ce qui représente également un avantage considérable. L'utilisation des pentes douces augmente significativement l'empreinte d'une infrastructure sur le milieu et nécessite des quantités de gravier plus importantes et des ponceaux plus longs. La quantité de gravier nécessaire aux pentes douces, dans un

contexte de rareté de matériau granulaire ou simplement en présence d'un remblai trop épais, peut restreindre l'utilisation d'une telle technique. Dans de tels contextes d'application, des techniques qui gagnent en efficacité en présence de remblai épais comme les drains thermiques ou les remblais à convection (Kong, 2019) devront être privilégiées. Toutefois, lors de la conception de ces dernières, il est recommandé d'utiliser toute de même des pentes plus douces que la normale (3H :1V ou 4H :1V pour atténuer la dégradation thermique du pergélisol présent en pieds de remblai et le fluage qui peut en résulter.

L'utilisation des techniques de mitigation basées sur l'extraction de chaleur par convection d'air, par la mise en place de remblai à convection ou de drains thermiques avec ou sans système de ventilation, requiert l'optimisation de leurs composantes, et un différentiel de température suffisamment élevé entre l'air qui entre dans ces systèmes et celle du remblai et du sol d'infrastructure afin de permettre la formation de mouvements convectifs qui favorisent l'extraction de chaleur. Rappelons que cette convection s'opère seulement en hiver tandis qu'en été la stratification de densité de l'air au sein du remblai inhibe la formation de mouvements convectifs et conséquemment favorise un transfert thermique principalement par conduction. L'avantage de tels systèmes c'est qu'ils reposent sur des mécanismes passifs qui requièrent peu ou pas d'entretien. Néanmoins, cet aspect rend l'efficacité de ces derniers plus vulnérable aux changements climatiques.

Les différents modèles de projections climatiques suggèrent tous un réchauffement des températures de l'air. Ces changements au climat futur seront plus marqués en hiver qu'en été. Ceci peut avoir un effet assez important sur l'efficacité des systèmes à convection dans le futur. Le différentiel de températures en hiver entre les températures du sol et de l'air (ΔT) constitue le moteur qui initie et maintient la circulation d'air au sein de ces systèmes. Le raccourcissement de la période d'action (hiver plus court) et le réchauffement des températures de l'air en hiver ($\downarrow \Delta T$) entraîneront nécessairement une perte d'efficacité. L'augmentation du diamètre des composantes, en réduisant la restriction de l'air, permettrait d'accentuer les échanges thermiques convectifs dans une certaine mesure, sans toutefois adresser le problème de perte d'efficacité attribuable à la diminution des différentiels de températures (ΔT). Une solution coûteuse, mais certainement efficace pour adapter les systèmes existants serait d'ajouter des systèmes de ventilation mécanique afin de forcer l'air froid à rentrer dans le système en hiver en présence de différentiels de températures (ΔT) insuffisants. Cette possibilité nécessite toutefois des recherches plus approfondies afin d'en évaluer la faisabilité, les coûts et les bénéfices.

L'efficacité des pentes douces ne sera pas épargnée par le réchauffement climatique. Rappelons qu'une partie de l'efficacité des pentes douces découle de leurs capacités à minimiser les accumulations de neige et, en l'occurrence, de diminuer leurs effets isolant de manière à permettre une extraction de chaleur accrue en hiver. Si les hivers raccourcissent et que les températures de l'air se réchauffent, une perte d'efficacité des pentes douces est également à prévoir. L'adoucissement des pentes à des valeurs inférieures (ex. : pente de 1V :7H ou 1V :8H) peut être réalisée au besoin, ce qui permettrait d'augmenter leur efficacité à refroidir le sol sous les talus de quelques degrés supplémentaires. La possibilité de déneiger les pentes douces afin de complètement enlever la couverture de neige résiduelle permettrait également d'augmenter l'efficacité, mais s'accompagne de coûts d'entretien annuels récurrents. Pour contrer les effets d'un réchauffement des températures de l'air estivales, la végétalisation des pentes douces, en augmentant l'albédo de surface, permettrait assurément d'atténuer les effets éventuels d'un réchauffement climatique.

Il existe toutefois d'autres techniques de mitigation contre le dégel du pergélisol qui n'ont pas encore été mises en place à grande échelle au Nunavik, mais dont l'efficacité pourrait permettre de minimiser les effets d'un réchauffement climatique. Un aperçu de ces techniques supplémentaires est présenté à la figure 165. Parmi celles qui favorisent l'extraction de la chaleur en hiver, on retrouve les thermosiphons. Cette méthode est assez coûteuse en termes de mise en place et d'entretien, mais son efficacité est toutefois éprouvée. Basée sur le principe de convection, cette technique est toutefois sujette à une perte d'efficacité advenant un

raccourcissement des hivers et une augmentation des températures moyennes entraînant une diminution des différentiels de températures (ΔT). Les techniques qui visent une réduction de l'absorption de la chaleur en été, peu utilisées actuellement au Nunavik à l'exception du retrait du pavage, du rehaussement des remblais pour certaines sections problématiques des routes d'accès et la végétalisation des talus, offrent un potentiel intéressant. Parmi les techniques non testées à grande échelle, l'utilisation de surface à albédo élevé et d'abris solaires permet efficacement de minimiser l'absorption de chaleur en été, donc d'assurer un refroidissement du pergélisol. Contrairement aux surfaces à albédo élevé, les abris solaires s'appliquent exclusivement aux talus et pied de remblai. Dans un contexte où les talus et pieds de remblai sont toujours affectés par des accumulations de neige importantes (ex. route d'accès à l'aéroport de Salluit du côté du drain thermique), les abris solaires, efficaces autant l'été que l'hiver, permettraient un refroidissement et atténueraient les déformations aux fluages observées actuellement.

Dans un contexte où le réchauffement des températures de l'air prévu risque de dépasser la capacité de beaucoup de techniques de mitigation à limiter le dégel du pergélisol, il est de plus en plus à propos d'intégrer des éléments de renforcement mécanique dans la conception d'infrastructure. Il peut s'agir de berme, de pentes douces ou d'utilisation de géotextiles ou géogrilles afin de réduire l'étalement des accotements, le tassement ou la fissuration des remblais et le risque de rupture. Actuellement, la berme convective à Puvirnituq est un bon exemple d'une méthode de mitigation visant une stabilisation thermique couplée à une méthode de stabilisation mécanique. Par conséquent, les risques de rupture sont contrôlés par l'action de la berme indépendamment de la performance thermique du remblai à convection. En zone de pergélisol chaud, discontinu et peu épais, le dégel provoqué avant construction peut devenir une option lors de la conception. Différentes approches sont disponibles pour provoquer le dégel du pergélisol allant du simple retrait de la couche de matière organique à la surface ou son recouvrement par une fine couche de granulat (méthode passive) à l'injection de chaleur dans le sol par l'utilisation de vapeur ou d'eau (méthode active) ou par des méthodes électriques. La superficie de la zone à dégeler, la profondeur du dégel désirée, la vitesse à laquelle on peut dégeler le sol sans provoquer d'instabilité et l'échéancier de construction détermineront la méthode à préconiser. Le dégel provoqué d'un sol problématique, si ce dernier n'est pas complètement remplacé par un sol non gélif, ne permet pas d'éliminer les problématiques structurelles associées au gel et dégel saisonnier (soulèvement gélival en période de gel et perte de capacité portante en période de dégel).

Pour conclure, chacune des techniques de mitigation contre la dégradation du pergélisol dispose d'un champ d'efficacité spécifique et d'un contexte d'application optimal. Par conséquent, l'utilisation d'une seule technique ne permet pas, bien souvent, de résoudre tous les problèmes de stabilité qui affectent une infrastructure construite sur un pergélisol sensible au dégel. Il est donc recommandé de combiner davantage les différentes techniques disponibles, soit en les ajoutant à celles déjà existantes pour améliorer la performance des stratégies d'adaptation actuelles ou lors du développement de nouvelles stratégies (Figure 166). De cette manière, l'ajout de nouvelles techniques de mitigation actuellement non implémentées à grande échelle au Nunavik, en complémentarité avec celles existantes, permettrait de pallier à certains problèmes qui persistent toujours ou d'adresser des enjeux de stabilité futurs que soulève le réchauffement climatique. Notons que les combinaisons des différentes techniques sont nombreuses et leurs interactions peuvent entraîner des effets synergiques positifs ou négatifs qui devront faire l'objet d'une évaluation plus approfondie de manière à optimiser leur intégration dans une seconde itération de stratégie d'adaptation.

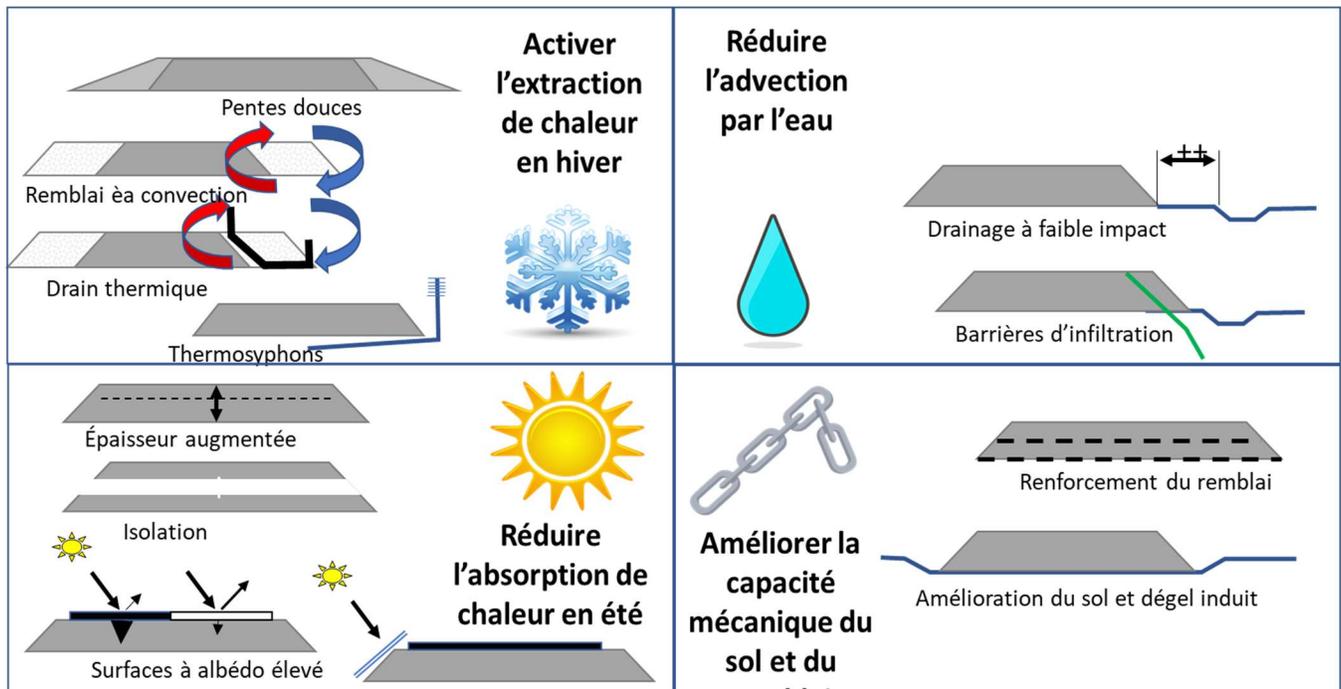


Figure 165 : Différentes techniques de mitigation disponibles contre la dégradation du pergélisol qui sont actuellement utilisées ou qui seraient potentiellement utilisables afin d'optimiser les stratégies d'adaptations déjà en place ou celles qui seront développées dans le futur pour adapter les infrastructures de transport du MTQ au Nunavik en considérant les changements climatiques.



Figure 166 : Exemple de combinaison de plusieurs techniques de mitigation contre la dégradation du pergélisol afin d'optimiser l'adaptation d'une infrastructure de transport construite sur pergélisol sensible au dégel. Dans cet exemple, l'utilisation combinée des pentes douces (meilleure extraction de la chaleur en hiver), d'un couvert végétal pour les talus et d'une surface à albédo élevé pour la surface de roulement (Réduction de l'absorption de la chaleur en été), d'une barrière d'infiltration et d'un fossé de drainage à faible impact (réduction de l'advection de chaleur par l'eau) et de renforts mécaniques (amélioration des capacités mécanique du remblai), assurerait certainement une performance thermique/mécanique optimale de l'infrastructure.

2



VOLET 2 : ÉTABLIR DES CRITÈRES DE CONCEPTION POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN ZONE DE PERGÉLISOL

2.1 MISE EN CONTEXTE

La conception d'infrastructure linéaire de transport en zone de pergélisol constitue un défi de taille en raison du nombre de facteurs à considérer qui diffèrent, tant en nature qu'en intensité, de ceux des zones sans pergélisol (Johnston, 1981). Les températures du sol ainsi que la présence ou l'absence de pergélisol sont le résultat de l'interaction d'une multitude de variables climatiques (température de l'air, radiation solaire), environnementales (végétation, drainage) et géologiques (propriétés thermiques des matériaux, flux géothermique). Pour un site donné, le régime thermique du sol reflète un état d'équilibre entre les conditions intrinsèques du milieu et les conditions climatiques. Cet état d'équilibre est fragile et peut changer rapidement vers des conditions thermiques favorables ou défavorables au maintien du pergélisol. Les tassements et instabilités engendrés par le dégel du pergélisol peuvent avoir des conséquences considérables sur les capacités structurales et fonctionnelles de l'infrastructure et la sécurité des usagers.

La construction d'infrastructures de transport perturbe l'équilibre thermique du pergélisol. Les remblais de route et de pistes d'atterrissage modifient les caractéristiques des surfaces et les propriétés des sols ainsi que les conditions de drainage et d'accumulation de neige. Ces changements entraînent une modification du régime thermique du pergélisol, paramètre incontournable dans l'évaluation des comportements mécaniques thermodépendants des sols gelés. L'amplitude de la perturbation thermique du pergélisol causée par la construction d'un remblai va dépendre de ses caractéristiques, à savoir son épaisseur, sa largeur, sa longueur, sa géométrie, le type de matériau utilisé, le type de surface, mais également, des propriétés thermiques du sol naturel sous-jacent et des conditions environnementales locales (enneigement et drainage). Les secteurs où le pergélisol est discontinu et chaud (température moyenne annuelle du sol supérieure à $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) représentent des défis d'ingénierie particuliers en raison de la réduction de la capacité de support des sols et des taux de fluage potentiellement élevés lorsque des contraintes élevées sont appliquées. Ce type de pergélisol peut être sensible aux modifications du terrain et du climat.

Les remblais sont particulièrement sensibles aux effets de bordure causés par les accumulations de neige et d'eau en pied de talus ainsi qu'à l'absorption de chaleur par rayonnement solaire. En effet, un remblai est sujet à absorber une quantité substantielle de chaleur par rayonnement solaire, ce qui peut conduire à une dégradation thermique du pergélisol et provoquer des déformations dans le remblai. Cette dégradation thermique est particulièrement importante dans le talus du remblai où le matériau granulaire devient trop mince afin d'assurer une protection du terrain naturel. La dégradation est encore plus importante lorsqu'une épaisse couche de neige s'y accumule et isole la surface du sol en hiver. Il s'ensuit habituellement un épaissement de la couche active qui donnera naissance à une dépression favorisant l'accumulation d'eau durant l'été et de neige l'hiver suivant. Le problème tend ainsi à s'amplifier d'année en année. Au Nunavik, cette condition thermique précaire des pieds de remblais, engendrée par la modification des conditions d'enneigement et de drainage liés à la présence de l'infrastructure, est à l'origine de la majorité des déformations (tassement, fluage) recensées en bordure des remblais des infrastructures de transport (L'Hérault *et al.*, 2012). Lors de la conception, il est donc nécessaire d'anticiper la dégradation possible du pergélisol en bordure des remblais. Une des précautions à prendre est de prévoir un remblai suffisamment large de manière à ce qu'une dégradation du pergélisol en marge du remblai ne puisse affecter la stabilité de la structure. L'adoucissement de la pente des talus de remblai et une bonne conception des fossés de drainage permet également de réduire les impacts thermiques néfastes potentiels par l'accumulation de neige et d'eau en pied de remblai et ainsi éviter que la situation évolue jusqu'à compromettre la stabilité de l'infrastructure. La conception d'infrastructure de transports doit donc obligatoirement considérer l'impact thermique de l'ouvrage sur le pergélisol, particulièrement si celui-ci est sensible au dégel. Une attention particulière doit être portée à l'épaulement du remblai qui constitue une zone particulièrement vulnérable aux perturbations thermiques.

En fonction du contexte d'application, une stratégie d'adaptation efficace peut faire appel à différentes techniques de mitigation aux effets complémentaires. Par exemple, le cas d'un remblai étroit et où l'enneigement est considérable de part et d'autre (Exemple : la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq), Il y aurait lieu d'envisager l'utilisation d'un revêtement à albédo élevé pour protéger la partie revêtue du remblai combinée à une technique visant à protéger l'épaulement du remblai (pente douce ou autres). Une complémentarité entre les méthodes permet d'agir sur l'ensemble de l'infrastructure afin d'assurer la stabilité thermique de l'ensemble de la structure considérant le réchauffement climatique prévisible sur la durée de vie utile de l'ouvrage.

Afin de guider les concepteurs et les gestionnaires d'infrastructures de transport en milieu nordique, ce volet du projet de recherche propose des méthodes et des lignes directrices pour la conception, la construction, l'exploitation, l'entretien et le suivi des infrastructures construites sur pergélisol. Les outils proposés ont été développés à partir de l'expérience acquise durant près de 20 ans d'observation du comportement des infrastructures de transport du Nunavik. L'expérience acquise lors de la réalisation de projets sur des routes et des pistes d'atterrissage au Yukon, aux Territoires du Nord-Ouest et ailleurs a également été mise à profit dans le développement des outils de gestion proposés. Les outils développés prennent la forme d'organigrammes, d'abaques de conception, de guides synthèses permettant d'une part d'identifier et décrire les étapes cruciales à respecter et les facteurs à considérer lors de la conception, la mise en place, l'entretien et le suivi des infrastructures construites sur pergélisol. Ces outils supporteront une méthodologie de gestion des infrastructures aéroportuaires et routières sur pergélisol qui pourra s'appliquer éventuellement au Nunavik ou, dans des contextes de collaboration, au Canada et à l'international. Par exemple, les critères de conceptions en fonction du contexte d'application, alimentés par les retombées des axes 1 et 2, seront schématisés sous formes de diagramme décisionnel et abaques. Ces outils tiendront compte des caractéristiques de l'infrastructure (linéaire ou non linéaire, large ou étroite, mince ou épaisse, pavée ou non pavée, etc.), les caractéristiques du géosystème (ex. pergélisol chaud ou froid, riche ou pauvre en glace, secteurs bien ou mal drainés, enneigement, végétation, etc.) ainsi que les paramètres climatiques actuels et à venir (température, précipitation, etc.) en vue de proposer les paramètres de conceptions appropriés permettant d'assurer une stabilité thermique et mécanique de l'infrastructure tout au long de la durée de sa vie utile.

La figure 167 illustre la gamme de techniques considérées pour l'adaptation des infrastructures de transport du Nunavik en fonction du contexte d'application. Le tableau 40 fait la synthèse des conditions d'exploitation générales et des caractéristiques sommaires des infrastructures de transport dans les communautés nordiques du Nunavik.

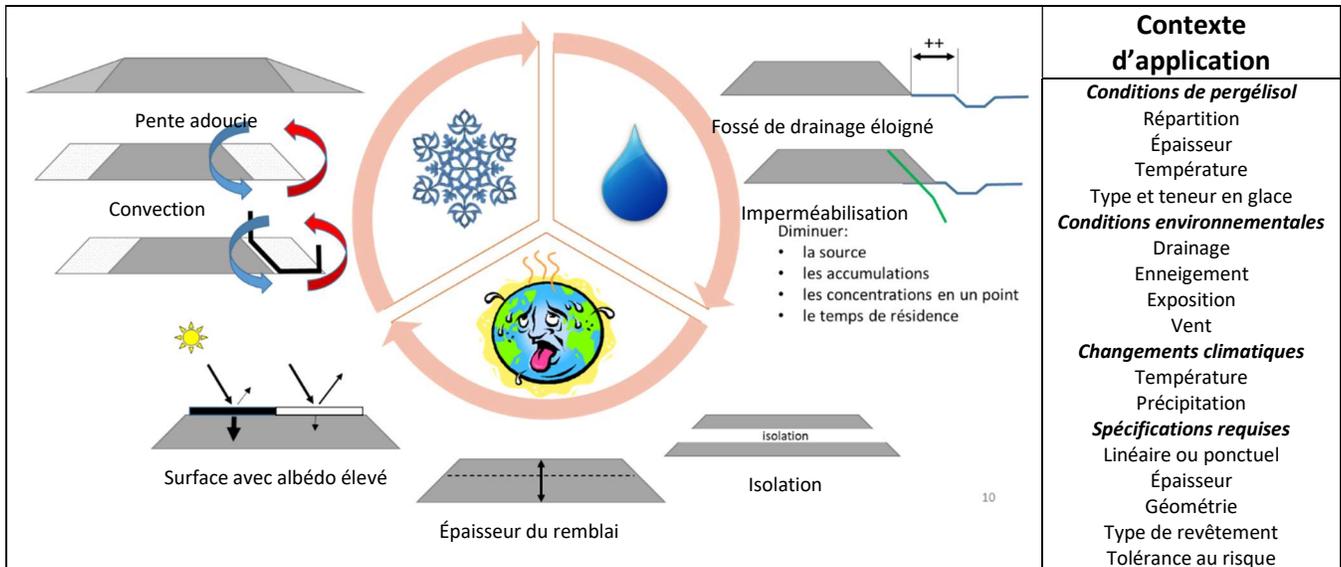


Figure 167 : Différentes techniques de mitigation contre la dégradation du pergélisol et qui composent les différentes stratégies d'adaptations mises en place aux infrastructures du MTQ au Nunavik.

Tableau 40 : Particularités générales en lien avec le contexte d'application de différentes infrastructures au Nunavik et au Nunavut à partir desquelles les expériences accumulées par le passé permettront de développer différents outils servant à orienter la conception, la construction, l'exploitation, l'entretien et le suivi des infrastructures construites sur pergélisol

Conditions de pergélisol			Caractéristiques de l'infrastructure				
			Piste		Route		
Répartition	Température	Contenu en glace (volumétrique)	Non pavée	pavée	Non pavée	Pavée	
Discontinue	Chaude > -2°C	Pauvre (< 10 %)	Kangiqsualujjuaq	Kuujjuaq*			
		Riche (> 30 %)				Umiujaq Kangiqsualujjuaq	
Continue	Chaude > -2°C	Pauvre (< 10 %)			Inukjuak Puvirnituaq		
		Moyen (10-30 %)	Puvirnituaq Inukjuak			Tasiujaq	
		Riche (> 30 %)	Tasiujaq				
	Tempéré > -2°C et < -4°C						
	Froide < -4°C	Pauvre (< 10 %)	Ivujivik				Quaqtaq Kangirsuk
		Moyen (10-30 %)	Quaqtaq Kangirsuk Akulivik				Akulivik
Riche (> 30 %)		Salluit	Iqaluit*	Salluit	Ivujivik		

2.2 OBJECTIFS

L'objectif principal de ce volet de recherche consiste à élaborer des principes et des outils de conception pour assurer la résilience et la gestion durable des infrastructures de transport en région de pergélisol à la lumière des données et analyses réalisées sur le suivi de l'efficacité des mesures/techniques d'adaptation ainsi que du contexte d'intervention.

Pour y arriver, les objectifs spécifiques suivants devront être atteints :

- Établir des critères de conception pour la technique d'adaptation choisie selon le type et la géométrie de l'infrastructure, les caractéristiques du géosystème ainsi que le contexte climatique actuel et projeté ;
- Identifier des mesures/techniques d'adaptation aux CC durables et applicables selon les risques évalués ainsi qu'en fonction du contexte d'intervention pour les infrastructures de transport en région de pergélisol en milieu isolé ;
- Identifier les technologies innovatrices de mesure, d'acquisition et de transmission de données qui possèdent un potentiel d'utilisation pour le suivi et la gestion des infrastructures et des réseaux de transport sensibles au dégel du pergélisol ainsi que les méthodes de traitement et d'intégration d'informations efficaces.

2.3 MÉTHODOLOGIE

La démarche proposée est illustrée de façon sommaire dans la figure 168. La démarche sera enrichie par l'intégration progressive de plusieurs facteurs critères contextuels qui viendront baliser l'application des méthodes proposées.

Il est très important de souligner que le choix d'une stratégie d'adaptation repose essentiellement sur une connaissance minimale de la présence et des caractéristiques du pergélisol sous l'ouvrage. Il est donc essentiel que l'étude géotechnique confirme la présence de pergélisol et en détermine les propriétés, notamment sa teneur en glace. L'étude doit déterminer le plus précisément possible la distribution du pergélisol riche en glace sous et en bordure de l'ouvrage.

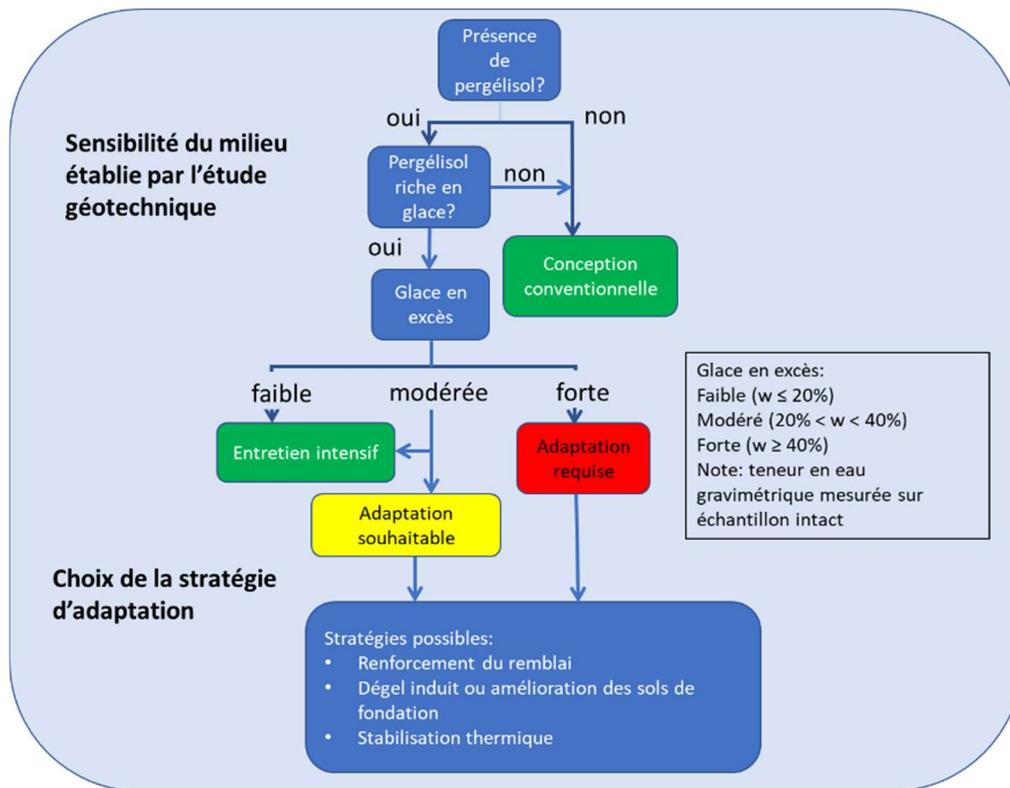


Figure 168: Démarche de conception des infrastructures de transport au Nunavik.

2.3.1 STRATÉGIE D'ADAPTATION

Les stratégies d'adaptation peuvent être regroupées en trois familles qui se résume à : A) laisser le pergélisol se dégrader et entretenir l'infrastructure (entretien intensif), B) mettre en place des techniques de mitigations pour réduire le dégel du pergélisol (stabilisation thermique) et C) induire un dégel contrôlé du pergélisol avant la mise en place de l'infrastructure (Figure 169). En prenant pour acquis que le climat se réchauffera au cours des prochaines décennies, le pergélisol se dégradera de façon significative au cours de la vie utile d'un ouvrage. Cette situation est illustrée par le cas « A » à la figure 169. Il y aura donc augmentation plus ou moins constante de l'épaisseur de la couche active ce qui entraînera un tassement au dégel proportionnel à l'épaisseur de sol dégelé et à son contenu en glace. Dans les cas de pergélisol caractérisés par des teneurs en glace faibles à modérées, l'infrastructure peut être maintenue en service par un entretien intensif. Cette stratégie, illustrée par les courbes « A », conviendra pour la majorité des situations pour les infrastructures de transport au Nunavik. Dans certains cas, l'infrastructure pourra être adaptée par renforcement, par traitement du sol ou par remplacement de sols riches en glace pour aider à maintenir l'intégrité du remblai durant le dégel. L'utilisation de géotextile ou de géogrilles ainsi que l'excavation et le remplacement de certains sols plus sensibles sont les techniques documentées dans la littérature. Ces techniques ont un potentiel intéressant mais ne seront pas discutées davantage puisqu'elles n'ont pas été utilisées jusqu'à maintenant au Nunavik.

La deuxième stratégie, illustrée par le cas « B » sur la figure 169, consiste à faire remonter le plafond du pergélisol sous la structure de telle sorte que l'épaisseur de la couche active n'excède pas son niveau initial au cours de la vie utile de l'ouvrage. Cette approche est la stratégie d'adaptation le plus couramment utilisée en ingénierie du pergélisol et elle a inspiré la plupart des adaptations d'infrastructures de transport au Nunavik. Elle sera donc abondamment discutée dans cette section du rapport.

La troisième stratégie, illustrée par le cas « C » consiste à minimiser les risques de mauvais comportement du pergélisol en induisant son dégel de façon contrôlée avant la construction de l'ouvrage. La technique, combinée à un programme d'entretien intensif, peut également s'appliquer pour stabiliser un ouvrage existant. Dans un contexte de réchauffement climatique qui risque de rendre difficile l'application de techniques de stabilisation thermique, cette technique est appelée à devenir une solution intéressante dans le futur. Le dégel induit doit cependant faire l'objet de travaux de recherche pour déterminer son champ et les modalités d'application de la technique. Pour cette raison, et puisqu'elle n'a pas été appliquée dans le programme d'adaptation des infrastructures du Nunavik, cette approche ne sera pas discutée davantage dans ce rapport.

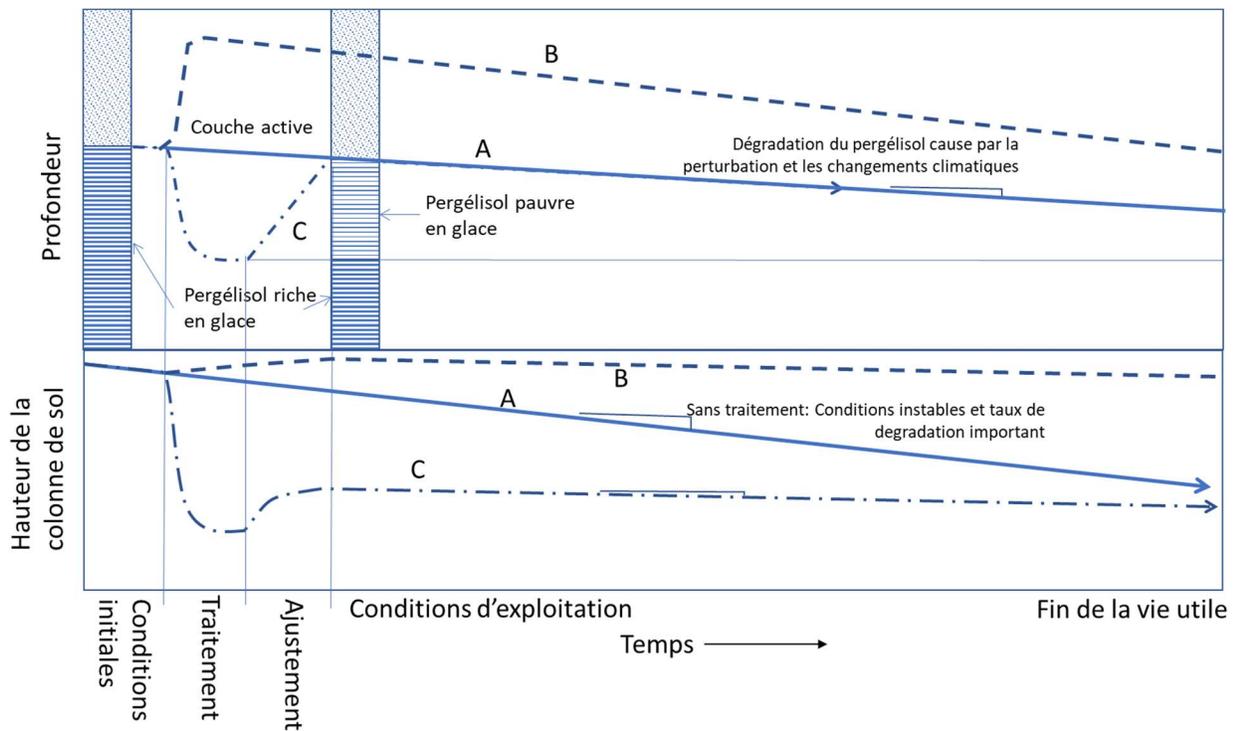


Figure 169 : Illustration des trois familles de stratégies d'adaptation applicable aux infrastructures de transport du Nunavik.

2.3.2 STABILISATION THERMIQUE

La stratégie de stabilisation thermique est celle qui est le plus souvent utilisée pour la conception des remblais sur pergélisol. On retrouve dans la littérature scientifique plusieurs références qui traitent de cette approche qui consiste généralement à viser un relèvement du plafond du pergélisol. Le calcul de la profondeur de dégel se fait généralement en utilisant un modèle analytique ou numérique et l'épaisseur du remblai est ajustée pour obtenir le relèvement souhaité. Le plus souvent, on vise à faire remonter le plafond du pergélisol à l'intérieur du remblai (frozen core embankment). Dans certains cas, on tient compte des changements climatiques et on s'assure que le plafond du pergélisol ne descende pas en bas de son niveau original durant la période de vie utile de l'ouvrage.

Le programme de recherche en ingénierie nordique Arquluq a permis le développement d'une approche rigoureuse pour la stabilisation thermique des remblais construits sur le pergélisol. L'approche proposée pour la conception des remblais sur pergélisol sensible est basée sur le calcul du bilan thermique à l'interface remblai – sol naturel, c'est-à-dire de la quantité totale de chaleur entrant et sortant du sol dans une année. Le principe général de cette approche est que si la quantité de chaleur entrant dans le sol excède la quantité de chaleur

sortant du sol (bilan positif), le sol tend à se réchauffer ce qui entraînera une dégradation progressive du pergélisol. Lorsque le pergélisol est riche en glace, un bilan thermique positif entrainera une perte progressive de la capacité structurale et fonctionnelle de l'infrastructure.

Le bilan thermique est la somme de l'indice d'induction de chaleur et de l'indice d'extraction de chaleur, qui sont exprimés sous la forme (M-Lepage et al., 2012) :

$$H_x = k_{gelé} \times -\frac{\partial T}{\partial z} \times \Delta t$$
$$H_i = k_{dégelé} \times \frac{\partial T}{\partial z} \times \Delta t$$

où H_x et H_i sont respectivement les indices d'extraction et d'induction de chaleur; $k_{gelé}$ et $k_{dégelé}$ sont la conductivité thermique à l'état gelé et dégelé de la couche de surface du sol et $\frac{\partial T}{\partial z}$ est le gradient thermique entre la température moyenne annuelle du sol à l'interface et la température du pergélisol.

Cette approche est proposée pour aider à déterminer l'état thermique d'un remblai conventionnel et à choisir les techniques d'atténuation appropriées pour extraire la quantité suffisante de chaleur assurant la stabilité du pergélisol, pendant toute la durée de vie prévue de l'infrastructure.

Il est important de rappeler que l'analyse thermique du remblai n'est pertinente que si le pergélisol est sensible (riche en glace). En l'absence de pergélisol ou dans les cas où le pergélisol est pauvre en glace (teneur en glace égale ou inférieure à la porosité du sol dense non gelé), l'analyse thermique n'est pas pertinente et les techniques de conception et de construction conventionnelles (normes et cahier des charges et devis généraux du ministère des Transports) peuvent s'appliquer.

Pour la conception des remblais de route et de pistes d'atterrissage sur pergélisol sensible (riche en glace), une méthode basée sur le gradient thermique dans le sol ou sur le bilan thermique à l'interface est proposée. La méthode développée par Kong (2019) s'appuie sur le principe que la température moyenne annuelle à l'interface remblai/sol naturel doit demeurer à une température égale ou inférieure à la température du pergélisol à la profondeur d'amplitude nulle et ce, pour la durée de vie utile du remblai en considérant les effets des changements climatiques.

Lorsqu'une conception thermique adaptée est requise, les méthodes proposées dans cette section sont fondées sur le principe de maintenir un équilibre thermique à l'interface sol-remblai durant la période de vie utile de l'ouvrage. La figure 170 illustre l'approche proposée.

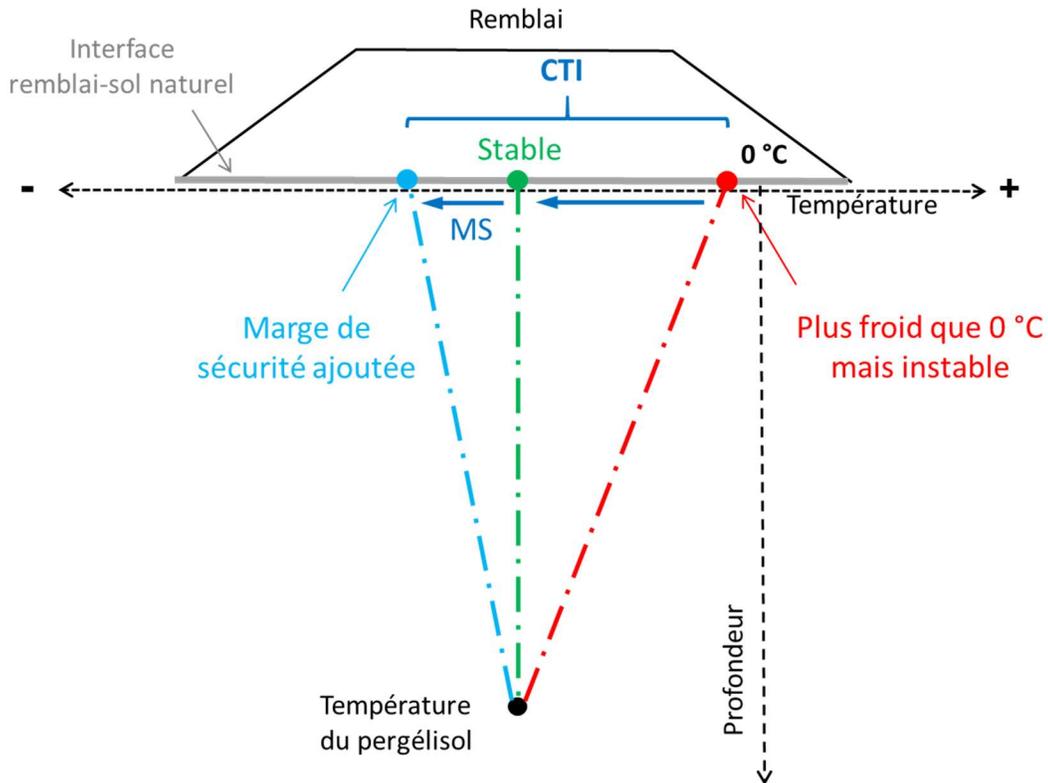


Figure 170: Principe de l'approche de conception thermique adaptée proposée

Dans la figure 170, les trois lignes pointillées illustrent des sécantes entre la température du pergélisol à une profondeur de variation de température nulle et la température moyenne annuelle à l'interface sol-remblai. La droite représente donc le gradient thermique moyen annuel sous le remblai. La courbe rouge représente le cas où la température moyenne à l'interface est supérieure à celle du pergélisol. Bien que la température moyenne à l'interface soit inférieure à 0°C (critère de plusieurs méthodes de conception thermiques), le gradient thermique est positif, ce qui implique qu'en moyenne annuellement, plus de chaleur est induite dans le sol que de chaleur est extraite. Le pergélisol est donc instable et tend à se réchauffer. Le bilan de chaleur peut alors être calculé en utilisant le gradient thermique et la conductivité thermique du sol. Dans le cas de la ligne rouge, le bilan sera positif.

La ligne pointillée verte représente une situation où la température moyenne à l'interface est la même que celle du pergélisol. Le gradient thermique est alors nul et, si on néglige le flux de chaleur géothermique, le bilan thermique est également nul. Le pergélisol est donc stable. La courbe bleue représente le cas d'un gradient moyen négatif qu'on doit viser à la conception. Un gradient légèrement négatif permet d'assurer une marge de sécurité qui vise à contrer le réchauffement climatique et à compenser le flux géothermique.

Cette approche générale sera utilisée pour faire l'analyse de la stabilité thermique d'un remblai existant ou d'un remblai prévu sur un site donné. Les étapes suivantes sont proposées :

Étape 1 : Analyse du bilan thermique.

L'analyse du bilan thermique requiert l'information suivante (voir tableau 41 pour plus d'information):

- Conditions spécifiques au site :
 - Température du pergélisol
 - Température moyenne annuelle à l'interface sol remblai
 - Conductivité thermique du sol
- Hauteur du remblai

Cette information permet d'obtenir les deux paramètres de conception :

- Le bilan thermique qui permet de dimensionner un système de protection qui aura la capacité d'extraire suffisamment de chaleur du sol pour assurer la stabilité de l'ouvrage durant sa période de vie utile
- L'indice de correction de température à l'interface (CTI) qui permet de déterminer empiriquement la correction à appliquer au remblai pour assurer sa stabilité. Cette technique s'applique à la conception des pentes de talus et à la spécification de l'albédo de surface.

L'analyse thermique doit minimalement être faite à deux endroits dans la section transversale du remblai soit au centre du remblai et à mi-pente du talus. Dans le cas d'un remblai asymétrique, l'analyse dans le deuxième talus est souhaitable. Les données requises pour l'analyse thermique et les sources d'informations possibles sont données au tableau 41.

Tableau 41: Sommaire des données requises pour l'analyse thermique et sources possibles d'information

Donnée	Remblai existant	Remblai prévu
Température pergélisol	Mesure en place avec des thermistances profondes (10 à 15 m) Estimation avec données climatiques du site et propriétés thermiques des sols avec modèle (Temp W ou autres)	
Température à l'interface sol-remblai	Mesure en place Estimation avec modèle de calcul considérant géométrie du remblai, données climatiques et propriétés des sols et matériaux de remblai	Estimation avec modèle de calcul considérant géométrie du remblai, données climatiques et propriétés des sols et matériaux de remblai
Conductivité thermique du sol	Peut être mesurée en place à l'aide d'un « Needle Probe » ou autres techniques disponibles Peux aussi être estimée à l'aide des abaques de Kersten ou à l'aide du modèle de Côté et Konrad	
Épaisseur du remblai	Mesure en place ou plans de construction	Plans de construction

Étape 2 : Faire la conception des systèmes de protection applicables.

Selon la situation rencontrée, plusieurs techniques d'adaptation peuvent être applicables. Le tableau 42 fait une synthèse de solutions possible en fonction de l'instabilité constatée dans l'étape 1.

Tableau 42: Synthèse de solutions possibles en fonction de l'instabilité.

Cas	Techniques à considérer	Section
Épaulement stable et centre instable	<i>Dans le cas d'une structure avec revêtement :</i>	
	Application d'un revêtement à albédo élevé	2.3.3.2
	Épaississement du remblai	NT
	Utilisation d'un isolant thermique	NT
	Utilisation d'un remblai à convection (ACE) sur la pleine largeur du remblai	2.3.5.1
Épaulement instable et centre stable	<i>Dans le cas d'accumulation de neige due à des vents dominants en travers :</i>	
	Pente adoucie	2.3.3.1
	<i>Dans le cas de problèmes liés à l'accumulation d'eau du côté amont du remblai :</i>	
	Creusage d'un fossé d'interception à ~10 m du pied de talus (peut être combiné à la mise en place d'un talus à pente douce)	NT
	Extraction de chaleur par une couche d'ACE placé sur le talus	2.3.5.1
	Extraction de chaleur par un drain thermique	2.3.5.2
Épaulement et centre instables	Combinaison de deux ou plusieurs techniques identifiées plus haut	

NT : non traité dans les méthodes de conception proposées

Étape 3 : Choisir et intégrer à la stratégie d'adaptation la ou les techniques qui offrent le meilleur rendement considérant le coût et la difficulté de mise en œuvre.

2.3.2.1 DÉVELOPPEMENT DES OUTILS

Le développement des outils de conception a été fait à l'aide d'un modèle numérique calé et validé sur des observations de sites instrumentés. Un modèle à éléments finis 2D de conduction de chaleur, qui prends en considération le changement de phase eau-glace, a d'abord été développé en utilisant les logiciels SVHeat et SVAir de la compagnie SoilVision ou le modèle TEMP-W de la suite GéoStudio. Dans la plupart des cas, les modèles ont été développés en utilisant les caractéristiques et les conditions du site expérimental de Beaver Creek au Yukon. Pour améliorer la précision du modèle, des paramètres spécifiques au site, telles les propriétés du sol, la température de l'air près de la surface et les dimensions du remblai, ont été mesurés et utilisés comme paramètres d'entrée. Après le calage du modèle, une analyse factorielle de certains paramètres d'entrée, telle que la température de l'air, l'épaisseur du remblai et la température du sol, a été faite pour généraliser l'application du modèle à une large gamme de conditions d'application en milieu de pergélisol. Le modèle a ensuite servi au développement d'outils pratiques (abaques et équations de conception) d'analyse et de conception thermique des remblais construit sur le pergélisol. Finalement, les outils de conception ont été validés en utilisant les données provenant de sites différents de ceux qui ont servi au développement du modèle numérique.

La Figure 171 illustre le choix de la méthode de conception à privilégier selon les circonstances. Pour chaque cas modélisé, les données thermiques de sites bien instrumentés ont été utilisées pour l'étalonnage et la validation du modèle (Tableau 43). L'information détaillée sur le développement des outils de calculs peuvent être trouvées dans Richard, 2018; Kong, 2019; Kong et Doré, 2019; Kong *et al.*, 2019; et Lanouette, 2020.

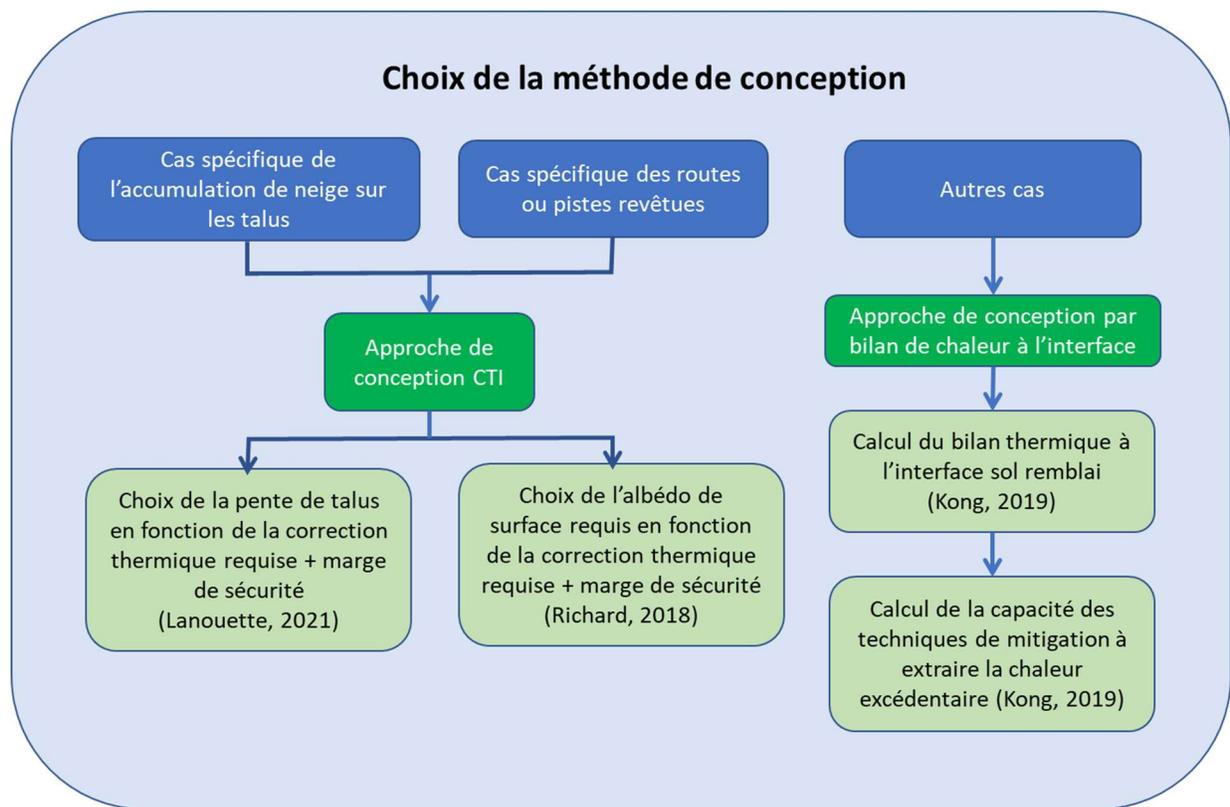


Figure 171 : Choix de la méthode de conception

Tableau 43: Sites de validation des abaques développés par modélisation.

Approche	Technique d'adaptation	Site de validation
Correction de la température à l'interface	Pente douce	Piste d'atterrissage de Tasiujaq
	Surface à albédo élevé	Alaska Highway, Beaver Creek, Yukon
Calcul du bilan de chaleur à l'interface		Piste d'atterrissage de Tasiujaq
Capacité d'extraction de chaleur	Remblais à convection d'air	Piste d'atterrissage de Puvirnitug
	Drain thermique	Route de Salluit

2.3.3 APPROCHE DE STABILISATION THERMIQUE PAR CORRECTION DE LA TEMPÉRATURE À L'INTERFACE (CTI)

Comme l'illustre la figure 170, l'approche selon la méthode de correction de la température à l'interface (CTI), consiste à obtenir le décalage thermique nécessaire pour atteindre un gradient de température zéro dans le sol en diminuant la température à l'interface remblai/sol au moyen de techniques de stabilisation. Un gradient thermique positif (ligne rouge sur la figure 170) indique généralement un flux de chaleur net dans le sol naturel et, par conséquent, un réchauffement du pergélisol. Le CTI minimal requis est défini comme suit:

$$CTI = T_{Interface} - T_{Pergélisol} + MS$$

où $T_{interface}$ est la température moyenne annuelle du sol à l'interface sol-remblai; $T_{pergélisol}$ est la température du pergélisol à la profondeur de variation nulle et MS est une marge de sécurité pour tenir compte du réchauffement climatique pendant la vie utile de l'infrastructure. Tous les paramètres sont en °C.

Cette approche peut être utilisée pour modifier les paramètres de conception pertinents, comme l'albédo de surface et la pente du talus (V:H), à partir de relations empiriques, afin de stabiliser le pergélisol.

La conception d'un système doit être faite en fonction du ΔT estimé à la fin de la vie utile de l'infrastructure. Ceci permet d'ajouter une marge de sécurité pour assurer l'efficacité de la technique durant la période visée. Les effets du réchauffement climatique peuvent être intégrés dans la méthode en augmentant le gradient thermique annuel moyen entre l'interface remblai/sol et le pergélisol (marge de sécurité), suivant le scénario choisi par le concepteur. Comme le montre la figure 172, la marge de sécurité (SM) augmente linéairement avec l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT) prévue durant la période de vie utile de l'ouvrage.

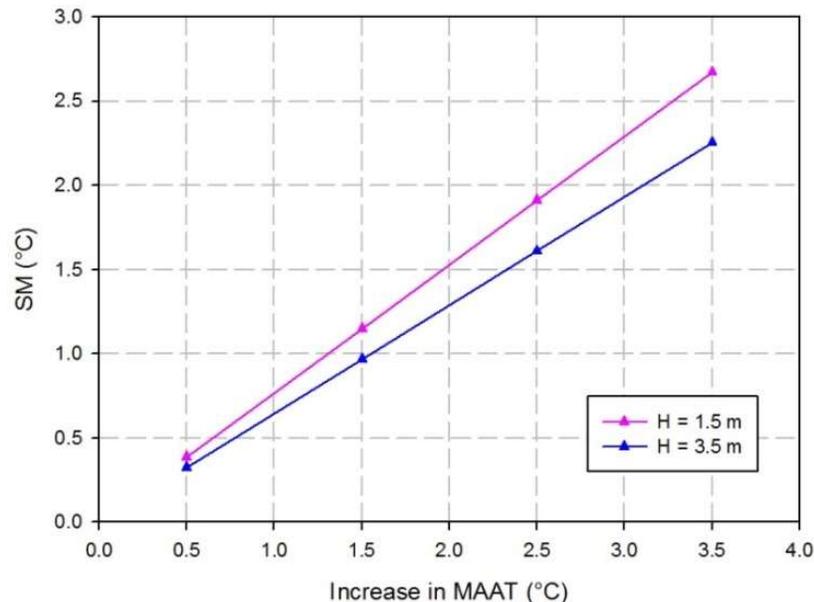


Figure 172: Marge de sécurité (SM) en fonction de l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT), pour un remblai conventionnel. (Kong, 2019)

2.3.3.1 TECHNIQUE DE LA PENTE DOUCE

L'accumulation de neige sur la pente du remblai empêche l'extraction de la chaleur du sol en hiver. Les remblais conventionnels, généralement conçus avec des pentes de 1V : 2H, ont tendance à causer de la turbulence sur le côté en aval du vent, provoquant une accumulation de neige sur la pente du remblai. Des travaux de recherche antérieurs (Lanouette et al. 2015; Doré et al. 2012) et l'expérience ont démontré que la modification de la pente peut aider à réduire l'accumulation de neige sur les remblais construits de travers à la direction des vents dominants et, par conséquent, peut atténuer la dégradation du pergélisol sous l'épaulement du remblai.

Sur la base des travaux antérieurs, un modèle thermique a été développé. Les profils selon la profondeur des températures maximales, minimales et moyennes modélisées correspondent bien aux températures mesurées, confirmant ainsi une précision raisonnable du modèle. Le modèle développé a été utilisé pour quantifier l'effet de plusieurs facteurs géométriques et climatiques. La figure 173 illustre la pente de remblai recommandée en fonction de la correction de température d'interface (CTI) requise sous la mi-pente. Les résultats numériques indiquent que pour des épaisseurs de remblai inférieures à 3.5 m, la CTI n'est pas affectée de manière significative par les variations d'épaisseur du remblai. La figure 173 montre que la pente recommandée (V:H) diminue de façon non linéaire avec la CTI requise, pour atteindre une CTI maximale de 4.4 °C obtenue pour une pente de 1V : 6H. L'effet de la diminution de la pente jusqu'à 4:1 affecte peu la température à l'interface, tandis que de fortes corrections de température d'interface peuvent être obtenues en utilisant des pentes plus douces que 1V :4H et ce, jusqu'à atteindre une CTI maximale de 4.4 °C obtenu pour une pente de 1V : 6H.

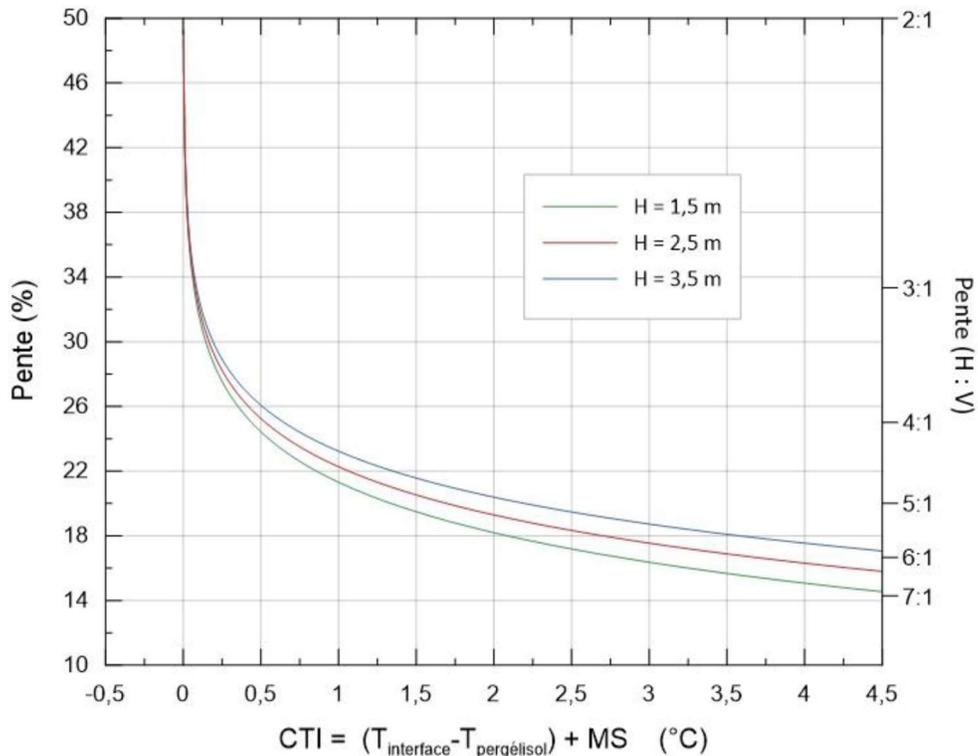


Figure 173: Abaque de conception pour la technique de remblai à pente douce, pour la stabilisation thermique du sol sous le centre de la pente, selon l'approche de correction de la température à l'interface (CTI) (traduite de Lanouette 2020).

2.3.3.2 TECHNIQUE DE LA SURFACE À ALBÉDO ÉLEVÉ

L'albédo est une propriété de la surface d'un objet définie comme le rapport entre le rayonnement solaire réfléchi et le rayonnement solaire incident. Cette propriété peut donc être utilisée pour réduire l'absorption de chaleur par la surface d'un remblai et ainsi favoriser la stabilité thermique du remblai. L'utilisation de surface à albédo élevé a un très fort potentiel pour contribuer à la stabilité thermique des remblais, plus spécifiquement dans le cas des surfaces pavées. Dans le cadre du programme de recherche en ingénierie du pergélisol d'Arquluk, deux projets (Dumais 2014, Richard 2018) portant sur l'élaboration de modèles simplifiés de bilan énergétique de surface et sur le suivi des performances thermiques et mécaniques de différents matériaux de surface à albédo élevé, ont permis de mettre au point des outils de conception et des lignes directrices pour l'utilisation de ces matériaux.

Un modèle thermique a été développé en utilisant le bilan d'énergie de surface comme entrée principale du modèle. Les profils des températures maximales, minimales et moyennes avec la profondeur prédite par le modèle concordent bien avec les observations faites au site d'essai de Beaver Creek (Yukon, Canada). Le modèle a par la suite été validé à l'aide de données de température et de mesures d'albédo provenant d'autres sites d'essai, ce qui confirme une précision raisonnable pour le modèle 2D élaboré. La figure 174 illustre l'albédo de surface recommandé en fonction de la CTI requise pour différentes épaisseurs de remblai (Richard 2018). Comme le montre la figure 174, l'albédo requis augmente linéairement avec la CTI pour toutes les épaisseurs de remblai.

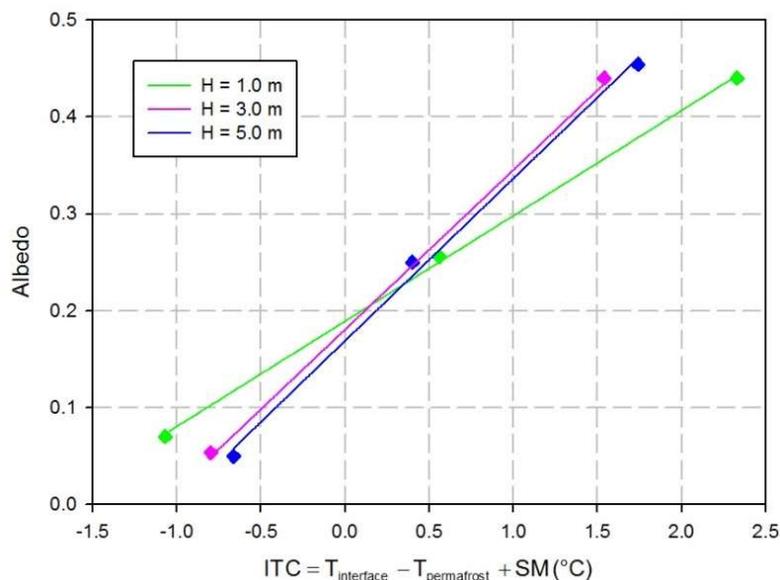


Figure 174: Albédo requis pour stabiliser le pergélisol en fonction de l'épaisseur du remblai (H) et de la CTI requise (Richard 2018).

Les relations entre la (SM) et l'augmentation de la température annuelle moyenne de l'air (TMAA), sur une période de 30 ans, pour une surface à albédo élevé sont illustrées à la figure 175. La marge de sécurité augmente de façon linéaire avec l'augmentation de la TMAA, et le changement d'épaisseur du remblai a un effet plus important sur la marge de sécurité pour une surface à albédo élevé, comparativement à une surface à faible albédo (figure 175). Par exemple, pour une augmentation de la TMAA de 3.5 °C, la marge de sécurité entre l'épaisseur d'un remblai de 1 m et 5 m, est de 1.14 °C pour un albédo élevé (0.45), tandis qu'il est de 0.78 °C pour un albédo de 0.05. Pour l'albédo choisi, la marge de sécurité est toujours plus grande pour les remblais minces que pour les remblais épais.

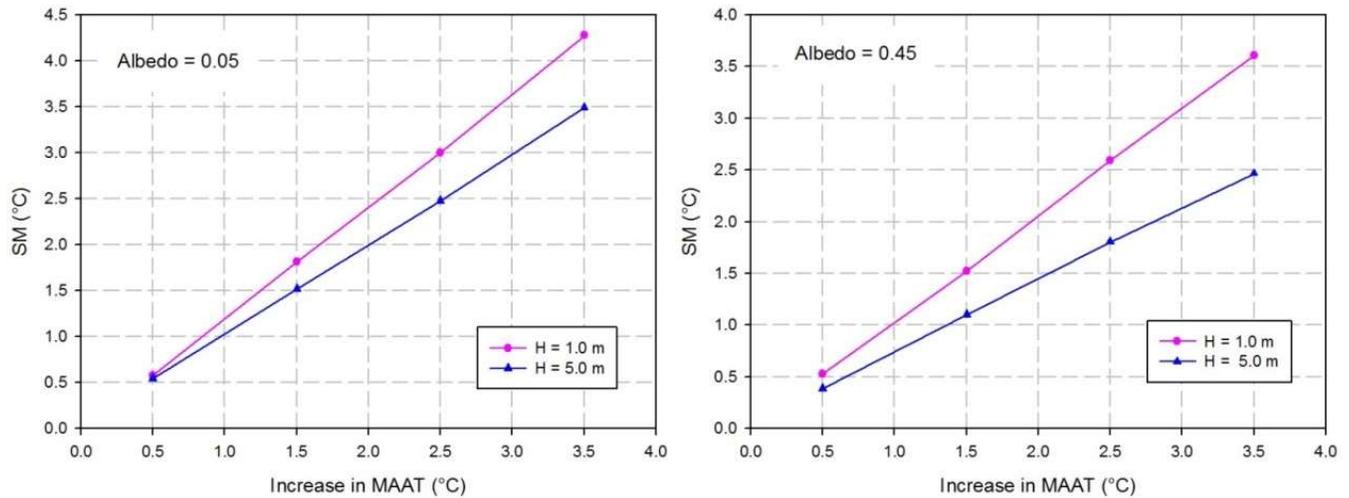


Figure 175: Marge de sécurité (SM) en fonction de l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air (MAAT) et de l'épaisseur du remblai (H) pour l'albédo d'une surface (tirée de Kong, 2019).

2.3.4 APPROCHE DE STABILISATION THERMIQUE PAR CALCUL DU BILAN DE CHALEUR À L'INTERFACE

Cette approche se fait en deux étapes. La première étape consiste à vérifier le bilan thermique à l'interface pour un remblai conventionnel (non adapté). Si le bilan de chaleur est négatif (Flux de chaleur entrant < flux de chaleur sortant), le remblai peut être considéré comme stable et aucune adaptation n'est requise. Si à l'inverse, le bilan de chaleur est positif (flux de chaleur entrant > flux de chaleur sortant) le pergélisol se réchauffe et se dégrade. Une adaptation est alors nécessaire si le pergélisol est riche en glace (Figure 168). À partir des résultats de modélisation, deux abaques ont été développés pour estimer le bilan thermique à l'interface remblai/sol, en tenant compte des conditions du site, pour un remblai conventionnel. Les figures 176 et 177 permettent d'évaluer le bilan thermique sous le centre et sous la pente du remblai, respectivement. Selon les abaques, le bilan thermique augmente avec le gradient thermique ($\Delta T/z$) et l'épaisseur du remblai. Pour un même gradient thermique, l'augmentation de l'épaisseur du remblai a beaucoup plus d'effet sur le bilan thermique pour les remblais minces que pour les remblais épais. Ces abaques permettent d'évaluer la stabilité du pergélisol sous le remblai en considérant les conditions du site et la quantité de chaleur en excès transféré au pergélisol. Les effets du réchauffement climatique peuvent être intégrés dans la procédure en utilisant les conditions climatiques prédites à la moitié de la vie utile de l'ouvrage pour une évaluation réaliste basée sur les conditions moyennes durant la période de vie utile. On peut alternativement utiliser les conditions climatiques prévues à la fin de la vie utile de l'ouvrage pour une conception conservatrice. Cette estimation peut se faire en utilisant le scénario de changement climatique choisi par le donneur d'ouvrage ou par le concepteur.

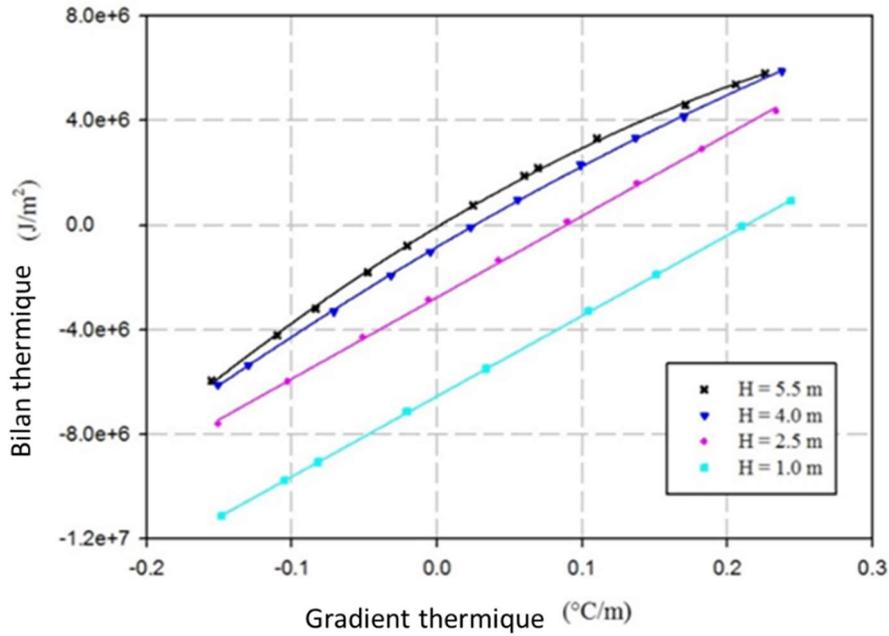


Figure 176: Bilan thermique à travers l'interface remblai/sol, sous le centre du remblai, en fonction de l'épaisseur (H) du remblai et du gradient thermique. (Kong, 2019)

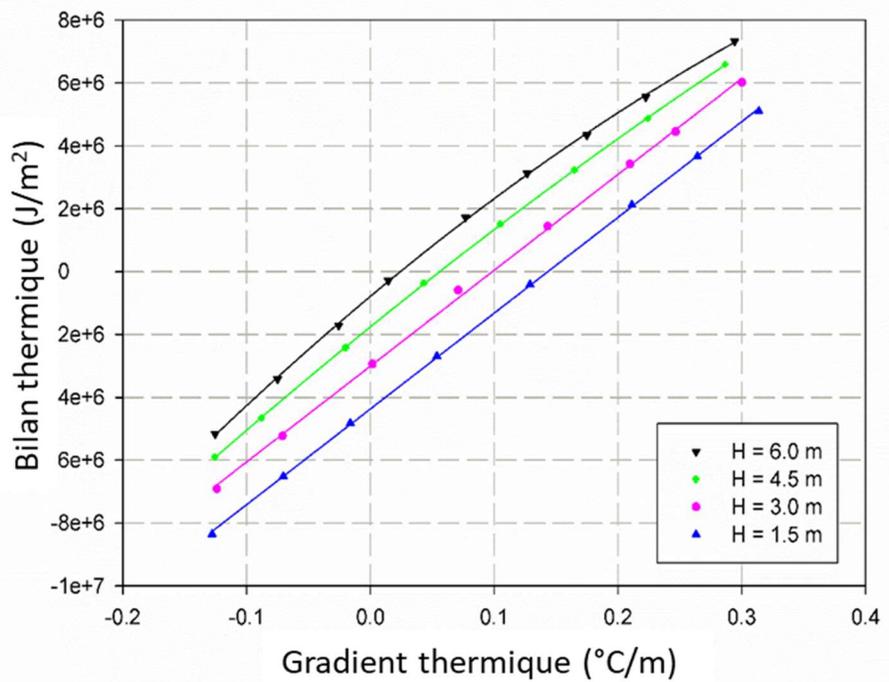


Figure 177: Bilan thermique à travers l'interface remblai/sol, sous la pente du remblai, en fonction de l'épaisseur (H) du remblai et du gradient thermique. (Kong, 2019)

Le tableau 44 propose des équations pour simplifier le calcul du bilan thermique des remblais conventionnels et ce, au centre du remblai et au milieu de la pente latérale.

Tableau 44: Équations de régression entre le bilan thermique à l'interface remblai/sol, l'épaisseur du remblai et le gradient thermique. (modifié de Kong, 2019)

Position	Équation de régression	Coefficient de détermination (R^2)
Centre-ligne	$HB = \frac{k}{k_{ref}} \times (-5.18 \times 10^6 + 3.10 \times 10^6 \times Grad + 6.82 \times 10^6 \times \log H)$	0.994
Milieu de la pente	$HB = \frac{k}{k_{ref}} \times (-5.42 \times 10^6 + 3.03 \times 10^7 \times Grad + 5.51 \times 10^6 \times \log H)$	0.998

HB est le bilan thermique (J/m^2) à travers l'interface. $Grad$ est le gradient thermique ($^{\circ}C/m$) entre la température annuelle moyenne à l'interface et la température du pergélisol; k est la conductivité thermique gelée du sol naturel au site et K_{ref} égale à $1.21 W/m-K$ mesurée à Beaver Creek, Yukon. H est l'épaisseur du remblai (m).

Dans le tableau 44, l'équation a été développée en utilisant la plage de données suivante :

- Gradients thermiques allant de $-0.14 ^{\circ}C/m$ à $+0.24 ^{\circ}C/m$ (centre-ligne);
 $-0.13 ^{\circ}C/m$ à $+0.31 ^{\circ}C/m$ (pente)
- Épaisseur du remblai variant de $1.0 m$ à $5.5 m$ (entre-ligne);
 $1.5 m$ à $6.0 m$ (pente)

L'extrapolation au-delà de ces valeurs peut induire des erreurs dans l'estimation du bilan thermique.

2.3.5 APPROCHE DE STABILISATION PAR CALCUL DE LA CAPACITÉ D'EXTRACTION DE CHALEUR

La première approche de stabilisation thermique est basée sur la capacité d'une technique d'adaptation à extraire la chaleur excédentaire, suite au calcul du bilan thermique à l'interface entre le remblai et le sol naturel. En hiver, l'extraction de la chaleur peut être fortement augmentée par la convection naturelle dans le remblai à convection d'air (ACE) et le drain thermique.

2.3.5.1 TECHNIQUE DU REMBLAI À CONVECTION D'AIR (ACE) PLEINE LARGEUR OU SUR LES PENTES LATÉRALES

Deux paramètres clés, dont l'épaisseur du remblai et la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol, ont été choisis pour étudier la capacité d'extraction thermique de la couche ACE en hiver. La différence entre la température moyenne hivernale et la température du sol est un facteur important d'activation de la convection dans un milieu (couche ou une membrane) poreux. L'épaisseur du système convectif est l'autre facteur à considérer dans l'efficacité du système.

La relation entre la capacité d'extraction de chaleur de la couche ACE à travers l'interface remblai/sol, l'épaisseur du remblai et la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol est illustrée à la figure 178 pour un ACE pleine largeur et à la figure 179 pour un ACE dans la pente. La capacité d'extraction de chaleur est estimée sous le centre du remblai ou de la pente, selon l'application pleine largeur ou dans la pente latérale. Comme le montrent les figures 178 et 179, la capacité d'extraction de chaleur augmente de façon non linéaire avec l'épaisseur du remblai pour les deux types d'applications. Le ΔT a un effet plus important sur la capacité d'extraction de chaleur de l'ACE pleine largeur que sur celle de l'ACE dans les pentes latérales. Des équations ont également été développées pour calculer la capacité d'extraction de chaleur dans différentes conditions et pour les deux types d'ACE (Tableau 45).

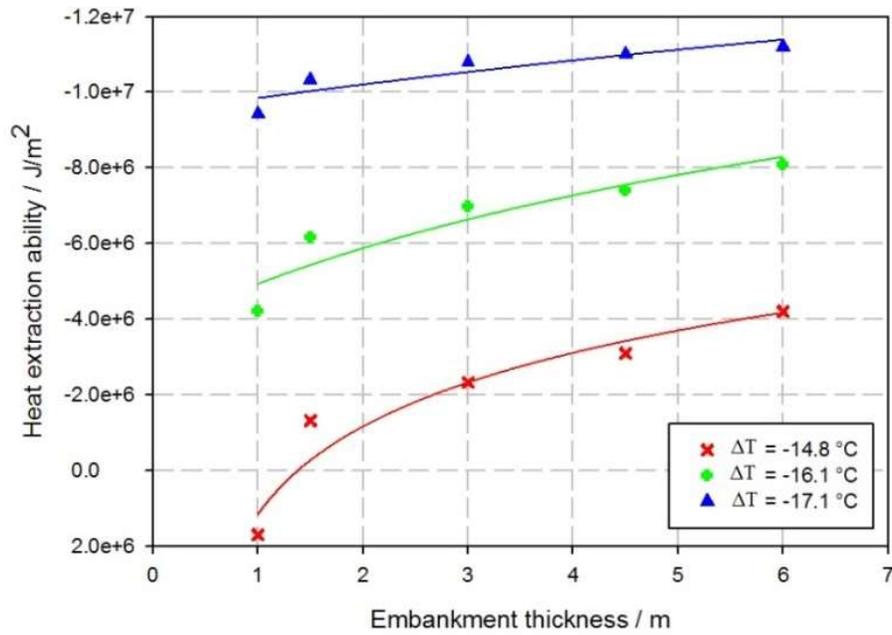


Figure 178: Capacité d'extraction de chaleur (Heat extraction capacity) de l'ACE pleine largeur à l'interface remblai-sol en fonction de l'épaisseur du remblai (Embankment thickness) et de la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol. (Kong, 2019)

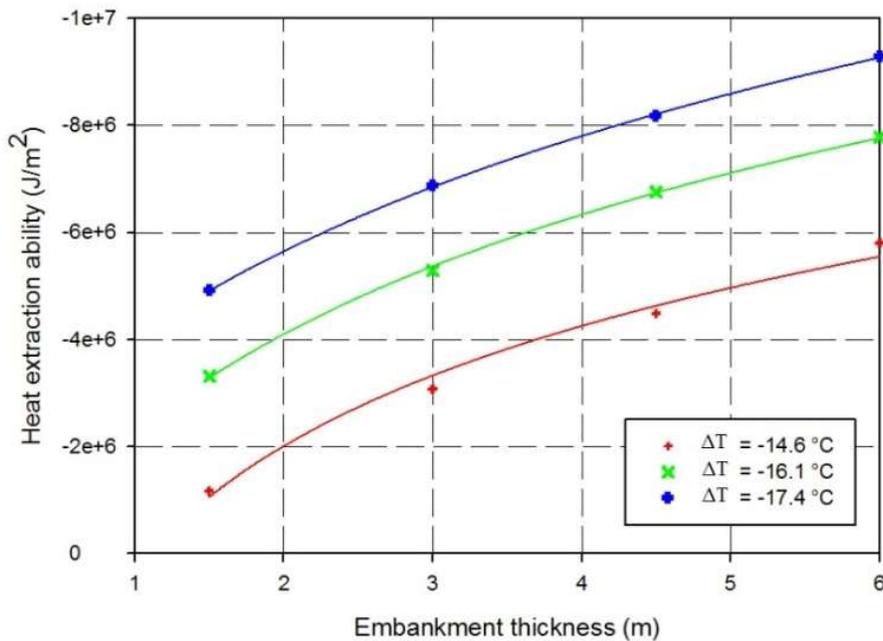


Figure 179: Capacité d'extraction de chaleur (Heat extraction capacity) de l'ACE dans la pente latérale à l'interface remblai-sol en fonction de l'épaisseur du remblai (Embankment thickness) et de la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol. (Kong, 2019).

Note : Il est important de noter que même si l'évaluation de la stabilité thermique se fait à mi-pente, l'épaisseur de remblai considérée pour la capacité d'extraction est la hauteur entre le haut du talus et l'interface avec le sol naturel.

Tableau 45: Relations entre la capacité d'extraction de chaleur à l'interface remblai-sol (HEC), la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol et l'épaisseur du remblai (H) (traduit de Kong, 2019).

Type d'ACE	Équation de régression	Coefficient de détermination (R^2)
ACE pleine largeur	$HEC = \frac{k}{k_{ref}} \times (5.59 \times 10^7 + 3.77 \times 10^6 \times \Delta T - 4.35 \times \log H)$	0.983
ACE pente	$HEC = \frac{k}{k_{ref}} \times (1.94 \times 10^7 + 1.32 \times 10^6 \times \Delta T - 7.38 \times \log H)$	0.990

HEC est la capacité d'extraction de chaleur (J/m^2) à travers l'interface; H est l'épaisseur du remblai (m); ΔT est la différence de température entre la température annuelle moyenne hivernales de l'air et la température du pergélisol ($^{\circ}C$, en valeur absolue); k est la conductivité thermique gelée du sol naturel au site et k_{ref} égale à 1.34 W/m-K mesurée à Beaver Creek, Yukon.

Dans le tableau 45, les équations ont été développées en utilisant la plage de données suivante :

- ΔT allant de $-14.8^{\circ}C$ à $-17.1^{\circ}C$ (ACE pleine largeur);
 $-14.6^{\circ}C$ à $-17.4^{\circ}C$ (ACE pente)
- Épaisseur de remblai variant de 1.0 m à 6.0 m (ACE pleine largeur);
1.5 m à 6.0 m (ACE pente)

L'extrapolation au-delà de ces valeurs peut induire des erreurs dans l'estimation de la capacité d'extraction de chaleur.

2.3.5.2 TECHNIQUE DU DRAIN THERMIQUE INSTALLÉ DANS L'ÉPAULEMENT DU REMBLAI

Comme pour l'ACE, la capacité d'extraction de chaleur du drain thermique est contrôlée par l'épaisseur du remblai et la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol. En plus de ces deux paramètres, l'extraction de chaleur est fortement affectée par la longueur du drain thermique (la section installée horizontalement) (Chataigner *et al.*, 2009).

La figure 180 illustre les relations entre la capacité d'extraction de chaleur à travers l'interface remblai-sol, l'épaisseur du remblai et la différence de température (ΔT) entre température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol, pour diverses longueurs de la partie horizontale du drain. La figure montre que la capacité d'extraction de chaleur augmente de façon non linéaire avec l'épaisseur du remblai et que la longueur de la partie horizontale du drain thermique tend à réduire la capacité de refroidissement par surface unitaire.

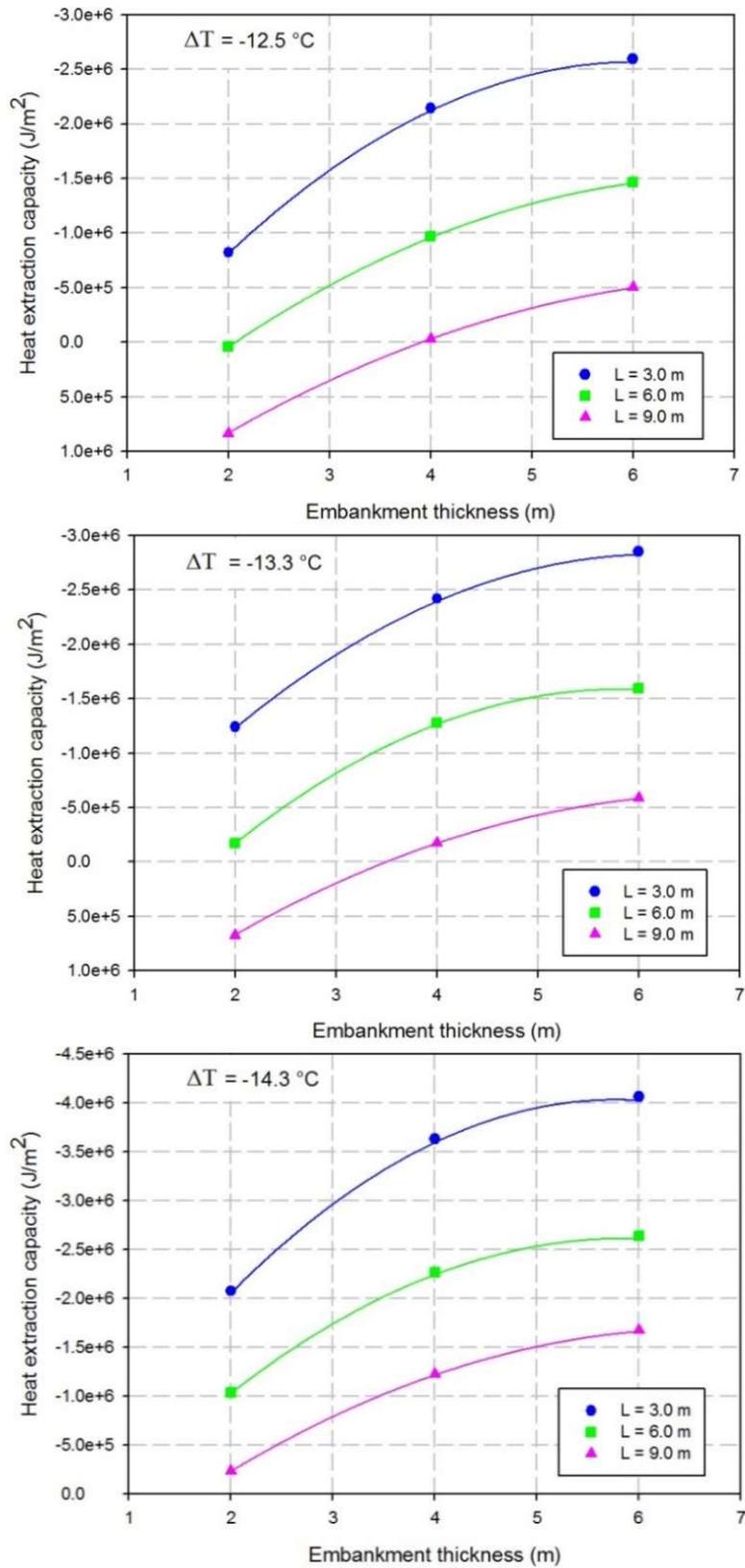


Figure 180: Capacité d'extraction (Heat extraction) de chaleur du drain thermique à l'interface remblai-sol en fonction de l'épaisseur du remblai (Embankment thickness), de la longueur du drain thermique (L) et de la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol (Tirée de Kong, 2019).

Notes : Il est important de noter que même si l'évaluation de la stabilité thermique se fait à mi-pente, l'épaisseur de remblai considérée pour la capacité d'extraction est la hauteur entre le haut du talus et l'interface avec le sol naturel.

La capacité d'extraction de chaleur du drain thermique est exprimée par l'équation présentée au tableau 46.

Tableau 46 : Relations entre la capacité d'extraction de chaleur du drain thermique (HEC), la différence de température (ΔT) entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol, la longueur du drain thermique (L) et l'épaisseur du remblai (H) (traduit de Kong, 2019).

Équation de régression	Coefficient de détermination (R^2)
$HEC = \frac{k}{k_{ref}} \times (7.83 \times 10^6 + 7.04 \times 10^5 \times \Delta T + 3.50 \times 10^5 \times L - 3.30 \times 10^6 \times \log H)$	0.985

où HEC est la capacité d'extraction de chaleur (J/m^2); k est la conductivité thermique gelée du sol naturel au site et k_{ref} est la conductivité thermique gelée de référence égale à 1.19 W/m-K mesurée à Tasiujaq, Nunavik; ΔT est la différence de température entre la température moyenne annuelle hivernale de l'air et la température du pergélisol ($^{\circ}C$), variant entre $-12.5^{\circ}C$ et $-14.3^{\circ}C$; L est la longueur du drain thermique (m), variant de 3.0 m à 9.0 m; H est l'épaisseur du remblai (m) variant de 2.0 m à 6.0 m). Le coefficient de détermination (R^2) est de 0.985. L'extrapolation au-delà de ces valeurs peut induire des erreurs dans l'estimation de la capacité d'extraction de chaleur.

2.4 VALIDATION DES APPROCHES DE STABILISATION THERMIQUE

Pour qu'un système atteigne la stabilisation thermique, la température à l'interface remblai/sol naturel doit être égale ou inférieure à la température du pergélisol, ce qui permet d'obtenir un gradient thermique nul ou négatif, et par conséquent, un bilan de chaleur également nul ou négatif. Un bilan de chaleur négatif se traduit par une extraction de chaleur plus importante que l'apport de chaleur dans le sol naturel, entraînant ainsi le refroidissement du pergélisol (Richard, 2018). Il a été prévu de valider les deux approches de stabilisation thermique, en utilisant les abaques de conception et l'analyse des résultats du suivi à long terme, sur deux sections bien documentées au Nunavik, soit la piste de Tasiujaq et la piste de Puvirnituk.

Les méthodes seront également appliquées à trois autres sites pour donner des exemples d'application des méthodes proposées en fonction des deux situations suivantes :

- Site avec quelques données, et modélisation requise pour estimer les données manquantes
- Site sans donnée, donc modélisation utilise pour estimer toutes les données requises

Les cas d'application sont décrits à la section 2.5 du rapport.

À Tasiujaq, les trois méthodes de mitigation installées dans la pente du remblai de la piste d'atterrissage, soit le remblai à pente douce, le remblai à convection d'air et le drain thermique, ont été utilisées pour la validation. Le remblai à convection d'air de la piste d'atterrissage de Puvirnituk et le drain thermique de la route de Salluit ont également été utilisés pour la validation des outils développés. Des applications des approches de stabilisation thermique ont ensuite été faites pour les infrastructures suivantes: les routes de Tasiujaq et Akulivik ainsi que la piste d'atterrissage de Kangirsuk. Le tableau 47 énumère les trois routes et les trois pistes sélectionnées et leurs critères de sélection pour représenter des situations variées.

Tableau 47: Liste des infrastructures servant à la validation et à l'application des abaques de conception.

Type d'infrastructure	Communauté	Pergélisol	Quantité d'information disponible	
Route	Tasiujaq	Intermédiaire	Peu	Application
	Akulivik	Intermédiaire	Peu	Application
	Salluit	Froid	Beaucoup	Validation
Piste d'atterrissage	Tasiujaq	Intermédiaire	Beaucoup	Validation
	Puvirnituq	Intermédiaire	Beaucoup	Validation
	Kangirsuk	Froid	Modérée	Application

2.4.1 CAS DE TASIUJAQ: PENTE DOUCE, REMLAI À CONVECTION D'AIR ET DRAIN THERMIQUE

La température du pergélisol à la piste d'atterrissage de Tasiujaq est de $-2.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 13.5 m de profondeur (forage HT-181). La figure 181 montre l'évolution des températures à l'interface remblai/sol par rapport à la température du pergélisol et la figure 182 montre la différence entre ces deux températures (ΔT). Puisqu'il n'y a pas de thermistances à l'interface remblai/sol, une interpolation a été faite avec les températures des thermistances situées au-dessus et en-dessous de l'interface pour obtenir cette valeur.

Dans le cas des sections de référence (r), du remblai à convection d'air (b) et du drain thermique (c), tout au long de la période de suivi, la température à l'interface remblai/sol est plus élevée que celle du pergélisol, indiquant que les systèmes sont instables. La section de la pente douce (a) est celle qui présente la meilleure stabilité, montrant un bilan thermique négatif pour les trois dernières années de suivi.

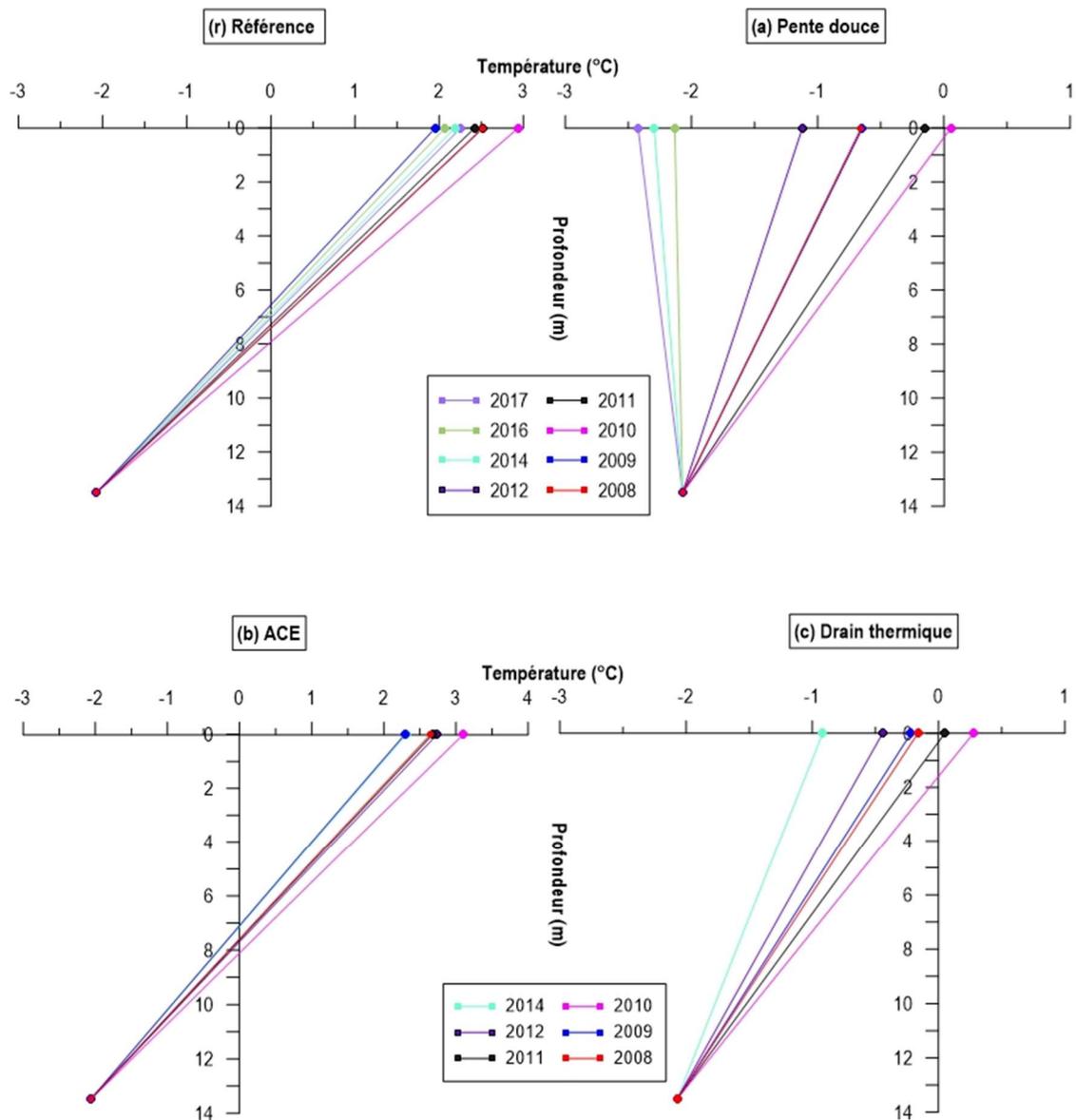


Figure 181. Évolution des températures à l'interface remblai/sol naturel par rapport à la température du pergélisol pour la section (r) Référence, (a) Pente douce, (b) ACE et (c) Drain thermique.

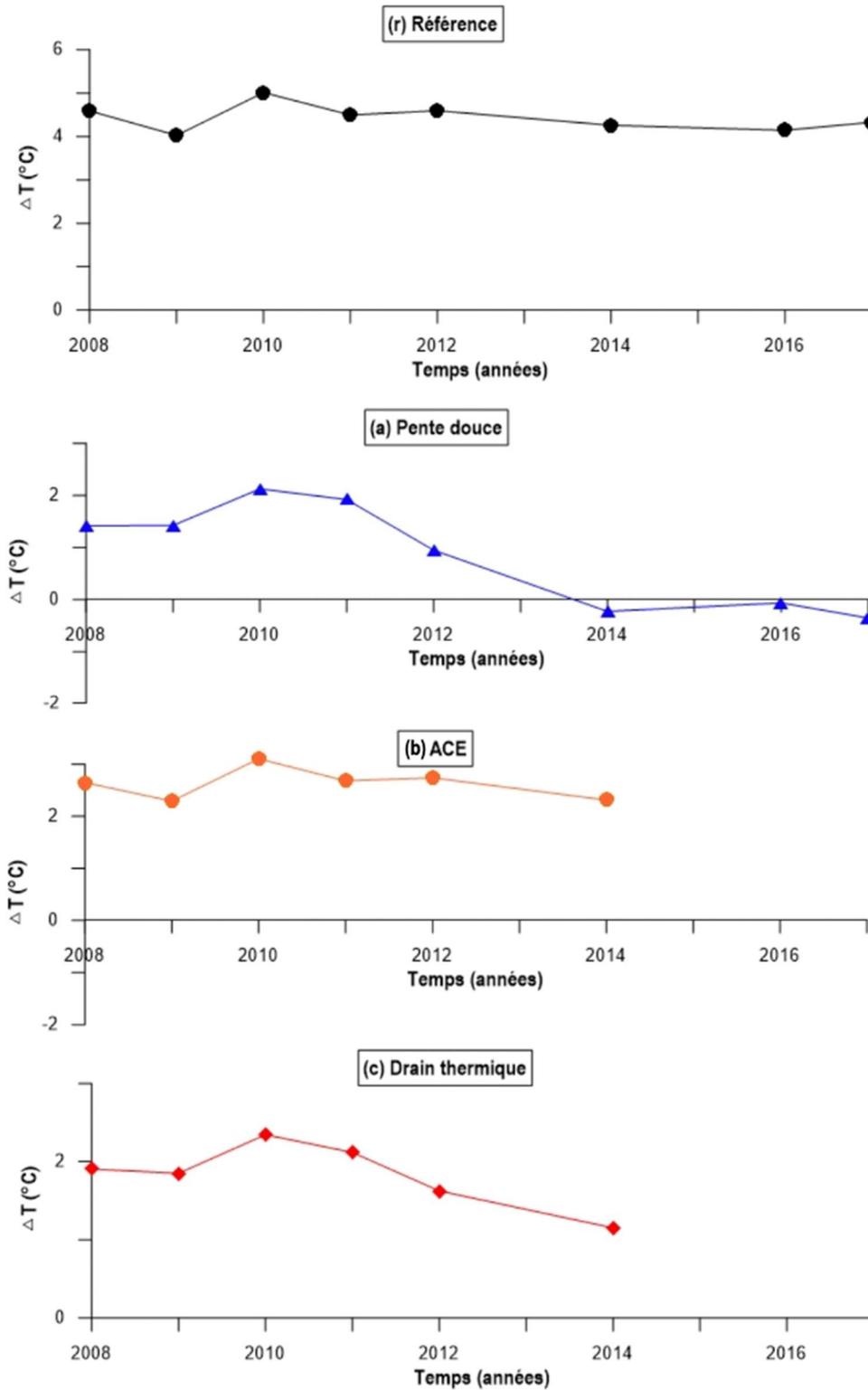


Figure 182: Différence entre la température à l'interface remblai/sol naturel et la température du pergélisol (ΔT) pour la période de suivi. Sections (r) Référence, (a) Pente douce, (b) ACE et (c) Drain thermique.

2.4.1.1 ANALYSE DE STABILISATION THERMIQUE - APPROCHE DE CORRECTION DE LA TEMPÉRATURE À L'INTERFACE (CTI) POUR LA PENTE DOUCE

Une analyse a été effectuée à l'aide des abaques développés par Lanouette (2020). L'approche de la correction de la température à l'interface (CTI), a été sélectionnée pour évaluer la performance de la section de remblai à pente douce. Elle consiste à calculer le décalage thermique nécessaire pour obtenir un gradient de température nul dans le sol en diminuant la température du sol à l'interface. Le CTI minimum requis est défini comme suit:

$$CTI = T_{\text{interface}} - T_{\text{pergélisol}} + MS$$

$$CTI = 2.36 - (-2.07) = 4.43$$

Il est à noter que la marge de sécurité (*MS*) pour tenir compte du réchauffement climatique n'est pas prise en compte puisqu'elle sert à faire des projections, ce qui n'est pas l'objet de la présente analyse. Considérant une épaisseur de remblai d'environ 3,5 m pour la section avec pente adoucie ainsi que la valeur de CTI de 4.43 °C calculée à partir des données de température de la section de référence, l'abaque (Figure 173) est utilisé pour déterminer qu'une pente d'environ 1V : 7H est requise pour maintenir le système en équilibre. La pente appliquée à Tasiujaq est de 1V : 8H et les données de température (Figure 181a) confirment que l'adaptation choisie a permis d'atteindre l'équilibre thermique sur le site de Tasiujaq.

2.4.1.2 ANALYSE DE STABILISATION THERMIQUE - APPROCHE DU BILAN THERMIQUE POUR LE REMBLAI À CONVECTION D'AIR ET LE DRAIN THERMIQUE

Certaines considérations doivent être prises en compte lors de l'utilisation de l'approche du bilan thermique, pour tenir compte des conditions particulières au site.

Étape 1 : Calcul du bilan thermique

1°) Il faut d'abord calculer la valeur du bilan thermique de la section, qui est égal à la somme de l'indice d'induction et de l'indice d'extraction de chaleur (somme des flux de chaleur entrant et sortant du sol):

$$H_x = k_f \times \text{GradT}$$

$$H_i = k_u \times \text{GradT}$$

$$\text{GradT} = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{T_{\text{pergélisol}} - T_{\text{interface}}}{Z_{\text{pergélisol}} - Z_{\text{interface}}}$$

Où H_x et H_i sont respectivement l'indice d'extraction et l'indice d'induction, k_f et k_u sont la conductivité thermique à l'état gelé et à l'état dégelé à la surface du sol, $Z_{\text{pergélisol}}$ et $Z_{\text{interface}}$ sont les élévations du point de variation nulle de température et de l'interface sol-remblai, GradT est le gradient thermique. Le gradient thermique a été calculé pour chacune des années de suivi pour la section de référence et la moyenne est de calculée pour ainsi obtenir un gradient moyen de 0.33 °C/m pour le site de l'aéroport de Tasiujaq.

2°) La figure 177 représente les valeurs pour quatre hauteurs de remblai. Si la hauteur du remblai à l'étude ne correspond à aucune de celles-ci une interpolation ou une extrapolation doit être effectuée pour trouver les valeurs correspondant à la hauteur souhaitée, comme c'est le cas pour la section de référence de Tasiujaq (3.84 m). Une interpolation a donc été effectuée, permettant d'obtenir la valeur du bilan thermique correspondant au GradT = 0.33 °C/m (Figure 183).

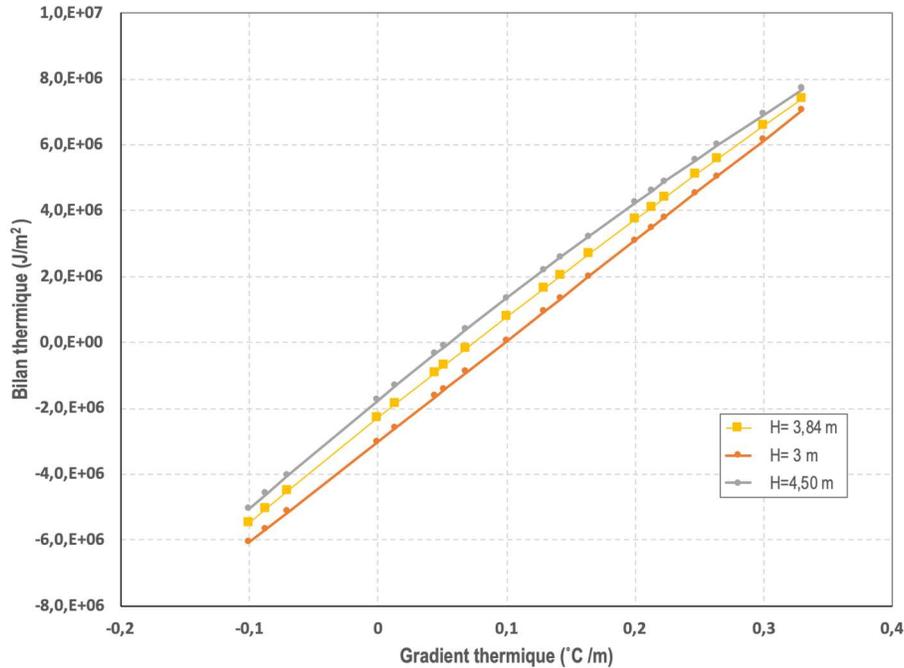


Figure 183. Résultats d'interpolation du bilan thermique à l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai H = 3,84 m et du gradient thermique (modifiée de Kong, 2019).

3°) Toutefois, l'abaque du bilan thermique ne peut être utilisé directement pour un type de sol différent du modèle. Une correction doit être effectuée au moyen d'un facteur de correction qui est fonction des conductivités thermiques. La valeur obtenue au moyen de l'abaque peut être corrigée en multipliant le bilan thermique par le rapport entre la conductivité thermique du sol à l'étude et celle du sol utilisé dans le modèle. Aux fins de l'analyse actuelle, seule la correction de la conductivité thermique gelée a été prise en compte car, d'une manière générale, on suppose que la partie du sol dégelé ne contribue pas considérablement au calcul du bilan thermique. En d'autres termes, on suppose que la contribution de chacune des conductivités du site modèle et du site d'étude suit la même proportion. Le résultat du facteur de correction est montré au tableau 48.

Tableau 48. Facteur de correction de la conductivité thermique à Tasiujaq

	Modèle – Silt	Tasiujaq – Silt argileux	Facteur de correction
k_f (W/m.K)	1.21	1.19	0.98

Pour un GradT = 0.33 °C/m et une hauteur de remblai de 3.84 m, le bilan thermique trouvé avec l'abaque est de 7.40×10^6 J/m² qui, multiplié par le facteur de conductivité gelée, donne 7.252×10^6 J/m², ce qui correspond à la quantité de chaleur à extraire du système pour atteindre la stabilité thermique.

Étape 2 : Correction du bilan thermique en fonction de la hauteur du remblai et du gradient thermique (si nécessaire)

4°) Dans le cas de Tasiujaq, les sections adaptées n'ont pas la même hauteur de remblai que la section de référence (Tableau 49) pour laquelle est calculée le bilan thermique. Une correction de la hauteur du remblai doit donc être effectuée, ce qui implique également une correction du gradient thermique.

Tableau 49. Hauteurs du remblai des sections à Tasiujaq.

Section	Hauteur du remblai (m)
Référence	3.84
ACE	5.16
Drain thermique	4.26

5°) Comme pour la section de référence, une interpolation a dû être effectuée pour trouver les courbes correspondantes du bilan thermique en fonction du gradient thermique des sections ACE et drain thermique. La figure 184 illustre graphiquement les résultats de ces interpolations.

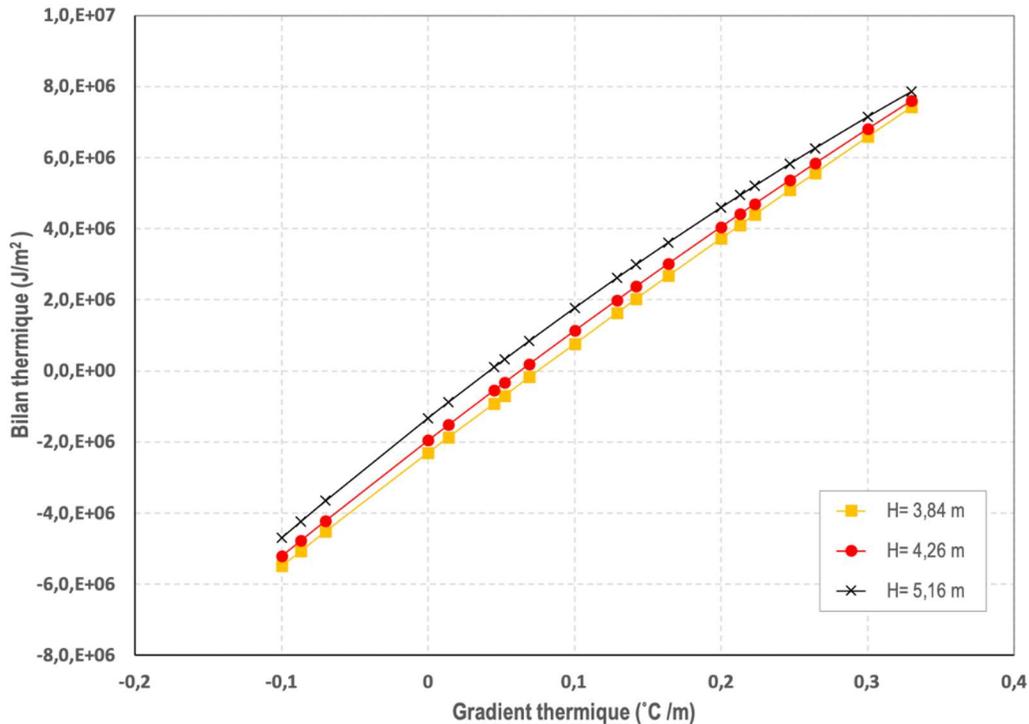


Figure 184. Résultats d'interpolation du bilan thermique à l'interface remblai/sol en fonction de l'épaisseur du remblai des différentes sections (H=3.84 m, H=5.16 m, H=4.26 m) et du gradient thermique (modifié de Kong, 2019).

6°) La correction s'est effectuée de la même façon pour l'ACE (Figure 185) et le drain thermique (Figure 186):

La correction commence au point A, sur la courbe de la section de référence (courbe jaune), pour laquelle le $\text{GradT} = 0.33 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ et le bilan thermique est égal à $7.40 \times 10^6 \text{ J/m}^2$. La correction s'effectue en plaçant les points de la courbe à corriger (noire) perpendiculairement à la courbe de référence (jaune), comme l'indique la flèche rouge sur la figure. Lorsque les nouveaux points sont projetés perpendiculairement, la correction est effectuée à la fois pour le gradient thermique et le bilan thermique, en fonction de la nouvelle hauteur du remblai.

Les points B et C indiquent respectivement les valeurs du gradient thermique et du bilan thermique associées à la hauteur du remblai à l'étude. Ces valeurs sont résumées dans le tableau 50.

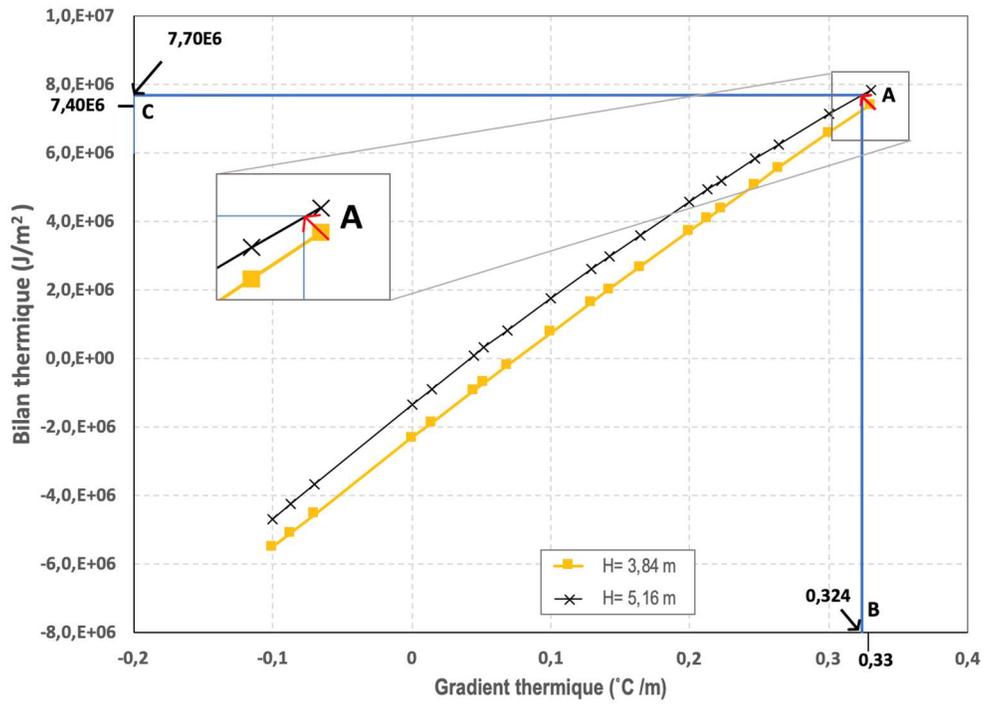


Figure 185: Correction en fonction de la hauteur du remblai de la section ACE.

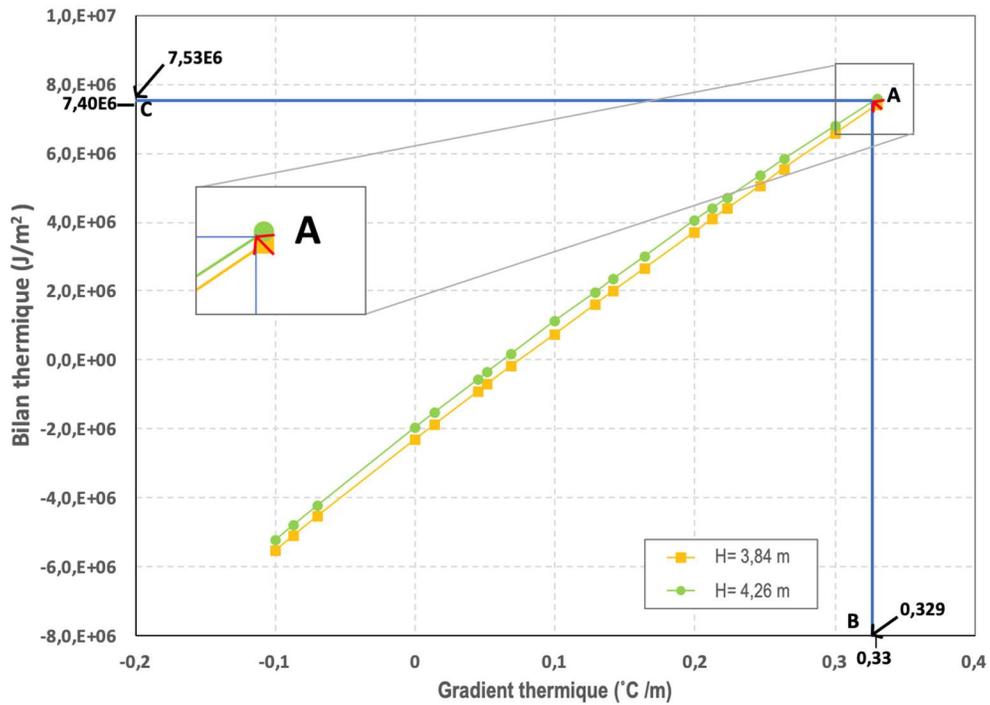


Figure 186: Correction en fonction de la hauteur du remblai de la section drain thermique.

Tableau 50. Valeurs corrigées du bilan et du gradient thermique en fonction des hauteurs de remblai des sections à Tasiujaq.

Section	Bilan thermique (J/m ²)	Gradient thermique (°C /m)
ACE	7.70E ⁶	0.324
Drain thermique	7.53E ⁶	0.329

Étape 3 : Analyse de la capacité d'extraction de chaleur

7°) L'analyse de capacité d'extraction de chaleur peut alors être effectuée pour la section ACE et celle avec drain thermique, à partir des abaques développés par Kong (2019).

2.4.1.2.1 SECTION REMBLAI À CONVECTION D'AIR (ACE) SUR LES PENTES LATÉRALES

Pour évaluer la capacité d'extraction de chaleur de la section ACE, une correction du bilan thermique en fonction des conductivités thermiques doit être effectuée avec le facteur de correction trouvé au point 3 de l'étape 1 (se référer au tableau 48). La valeur obtenue est présentée au tableau 51.

Tableau 51. Bilan thermique corrigé pour la section ACE

Section	Bilan thermique non corrigé (J/m ²)	Bilan thermique corrigé (J/m ²)
ACE	7.70E ⁶	7.55E ⁶

La figure 179 permet de trouver la capacité d'extraction de chaleur d'un remblai en fonction de sa hauteur et du ΔT qui est la différence entre la température moyenne hivernale de l'air et la température du pergélisol. Dans le cas de Tasiujaq, un ΔT moyen de -14.03 °C a été calculé.

Compte tenu du fait que 7.55 x 10⁶ J/m² doivent être extraits et que le ΔT = -14.03 °C, l'épaisseur optimale du remblai à convection d'air est trouvée suivant :

1. Le ΔT à Tasiujaq est supérieure aux courbes proposées dans l'abaque. Une extrapolation a été faite pour obtenir la courbe ΔT avec laquelle l'analyse doit être effectuée (Figure 187);

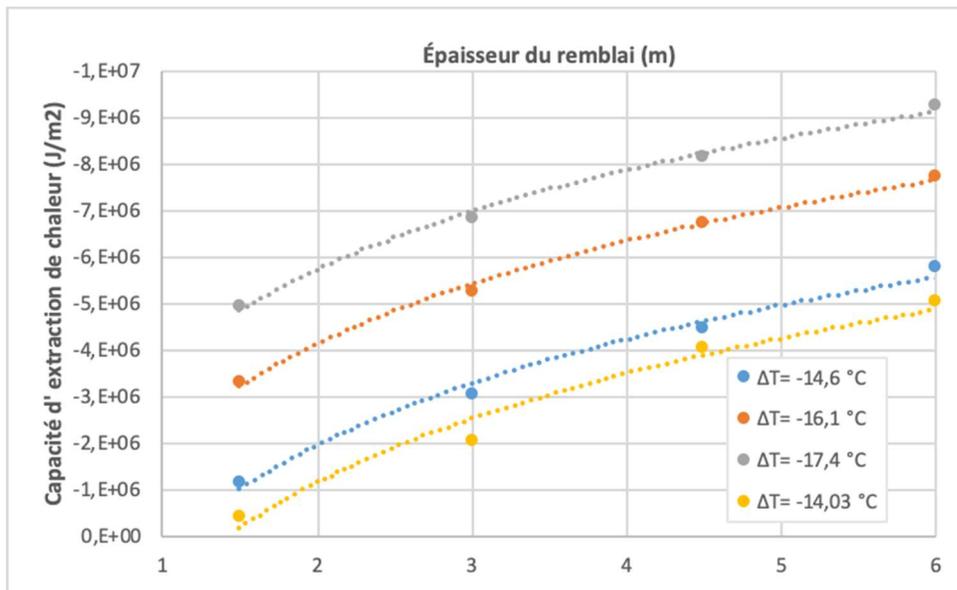


Figure 187: Extrapolation de la courbe de capacité d'extraction de chaleur de l'épaulement ACE à travers l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai et de la différence de température ΔT=-14.03 °C (modifié de Kong, 2019).

2. En utilisant la courbe extrapolée pour $\Delta T = -14.03$ °C la valeur de l'épaisseur du remblai + ACE correspondant à un bilan thermique de 7.55×10^6 J/m² est obtenue;
3. Il est ensuite nécessaire de faire une seconde extrapolation afin de trouver l'épaisseur du remblai qui permettra l'extraction de la chaleur nécessaire pour maintenir le système stable;
4. Après avoir fait les extrapolations, il a été possible de trouver que l'épaisseur du remblai + la portion à convection d'air doit totaliser 8.46 m pour extraire les 7.55×10^6 J/m².

Le tableau 52 résume les résultats obtenus des extrapolations réalisés lors de l'utilisation de l'abaque. Le remblai à convection d'air doit avoir une hauteur de 8.46 m pour garantir la stabilité de cette infrastructure. Le remblai à convection d'air installée à Tasiujaq a une épaisseur de 5.16 m, ce qui signifie, selon l'analyse de la stabilisation thermique, que cette adaptation n'avait pas la capacité d'extraire une quantité de chaleur pour assurer la stabilité thermique de l'ouvrage. Pour utiliser cette technique de mitigation à Tasiujaq, l'épaisseur du remblai devrait être augmentée de 3.30 m, pour une épaisseur totale de 8.46 m.

Tableau 52. Résumé des résultats de la validation de l'abaque pour la section ACE à Tasiujaq.

Hauteur remblai + ACE (m)	Extraction de chaleur (J/m ²)
1.5	-4.16E ⁵
3.0	-2.03E ⁶
4.5	-4.03E ⁶
6.0	-5.03E ⁶
8.46	-7.55E ⁶

Les données de température (Figure 181b) confirment que, malgré une légère diminution du gradient thermique, l'adaptation choisie n'a pas permis d'atteindre l'équilibre thermique sur le site de Tasiujaq. Il est important cependant de rappeler que l'efficacité du drain thermique sur le site expérimental de Tasiujaq a été fortement affectée par la capacité insuffisante du système de ventilation.

2.4.1.2.2 SECTION AVEC DRAIN THERMIQUE DANS L'ÉPAULEMENT

Pour évaluer la capacité d'extraction de chaleur de la section avec drain thermique dans l'épaulement, une correction du bilan thermique en fonction des conductivités thermiques doit être effectuée avec le facteur de correction trouvé à la 3^e étape (référer au tableau 48). La valeur obtenue est présentée au tableau 53.

Tableau 53. Bilan thermique corrigé section drain thermique

Section	Bilan thermique non corrigé (J/m ²)	Bilan thermique corrigé (J/m ²)
Drain thermique	7.53E ⁶	7.38E ⁶

La figure 180 permet de trouver la capacité d'extraction de chaleur d'un remblai en fonction de sa hauteur, du ΔT qui est la différence entre la température moyenne hivernale de l'air et la température du pergélisol, ainsi que de la longueur de la partie horizontale du drain thermique, où s'effectue les transferts de chaleur. Dans le cas de Tasiujaq, la longueur de cette portion du drain est d'environ 9 m, selon les plans de section type, et un ΔT moyen de -14.03 °C a été calculé.

En tenant compte d'une longueur de drain thermique de $L=9,0$ m, une interpolation doit être effectuée à partir des abaques (Figure 180), puisque la ΔT à Tasiujaq se situe entre les ΔT proposées. La courbe interpolée $\Delta T = -$

14,03 °C de la figure 188 permet de constater que pour extraire les $7.38 \times 10^6 \text{ J/m}^2$, une épaisseur de remblai considérable serait requise. La méthode du drain permet donc d'améliorer les conditions thermiques, sans toutefois atteindre la stabilité thermique du système. Les données de température (Figure 181b) confirment que, malgré diminution significative du gradient thermique, l'adaptation choisie n'a pas permis d'atteindre l'équilibre thermique sur le site de Tasiujaq.

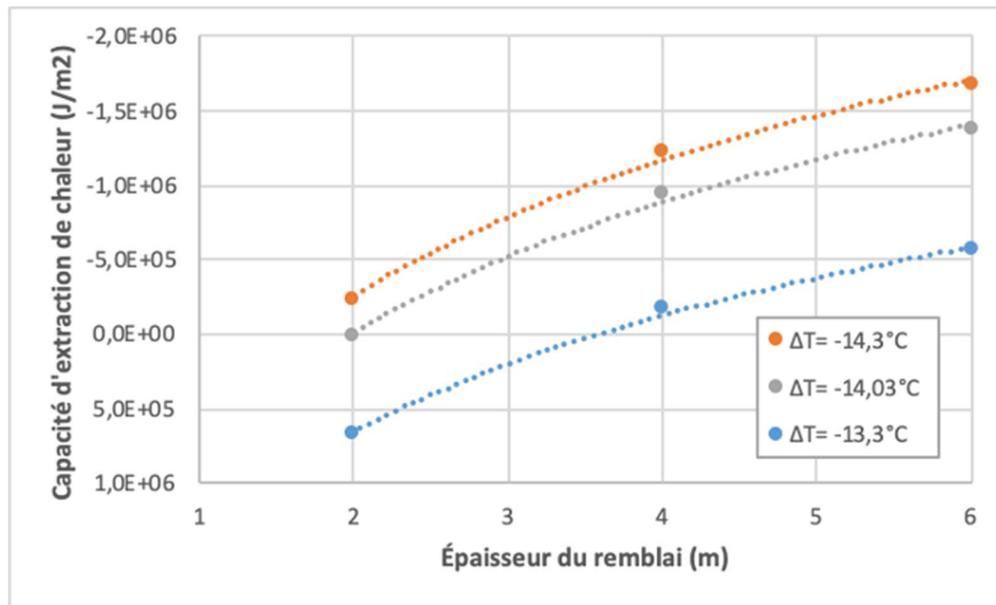


Figure 188. Capacité d'extraction de chaleur du drain thermique à l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai, de la longueur du drain thermique ($L=9 \text{ m}$) et de la différence de température $\Delta T = -14,3^\circ\text{C}$; $\Delta T = -14,03^\circ\text{C}$; $\Delta T = -13,3^\circ\text{C}$ (modifiée de Kong, 2019).

2.4.1.3 SOMMAIRE - TASIUJAJ

La section de la pente douce présente les meilleures performances parmi toutes les techniques mises en œuvre. Cette adaptation a considérablement réduit l'épaisseur de la couche active, jusqu'à environ 0,35 m sous l'interface remblai/sol naturel, résultant en une aggradation totale d'environ 1,20 m de pergélisol sur la période de suivi (2007-2017) et d'environ 4,5 m comparativement à la section de référence. De plus, l'analyse de stabilisation thermique montre que la pente de 1V : 8H mise en place a permis d'atteindre la CTI requise de 4,43 °C permettant ainsi de réduire la température à l'interface remblai/sol naturel à une valeur inférieure à celle du pergélisol.

Selon l'analyse, le remblai à convection d'air aurait dû avoir une hauteur de 8,46 m pour garantir la stabilité de cette infrastructure alors que l'épaisseur en place était de 5,16 m. Tel que confirmé par les observations, le remblai à convection a donc amélioré la condition thermique sans en assurer la stabilité. Selon l'analyse, le remblai avec drain thermique aurait dû avoir une hauteur de 8,34 m pour garantir la stabilité de cette infrastructure alors que l'épaisseur en place était de 4,26 m. Tel que confirmé par les observations, le drain thermique a donc amélioré la condition thermique sans en assurer la stabilité. Dans les trois cas, la méthode de conception semble avoir donné des résultats satisfaisants pour les conditions de Tasiujaq.

2.4.2 PUVIRNITUQ: REMBLAI À CONVECTION D'AIR

La température du pergélisol à la piste d'atterrissage de Puvirnituk est de -2.2 °C à 15 m de profondeur (câble F2). Malgré le fait qu'il y ait plusieurs données thermiques pour cette infrastructure, la température à l'interface remblai/sol naturel sous la mi-pente avant l'adaptation avec ACE n'était pas disponible. Cette valeur a été obtenue par modélisation numérique en utilisant les données disponibles du site. Une température de 0.48 °C à l'interface a été obtenue et sa relation avec la température du pergélisol est illustrée à la figure 189. Cette relation représente un gradient thermique positif indiquant qu'il y avait plus de chaleur qui entrainait annuellement dans le sol avant l'adaptation et que celui-ci était donc instable.

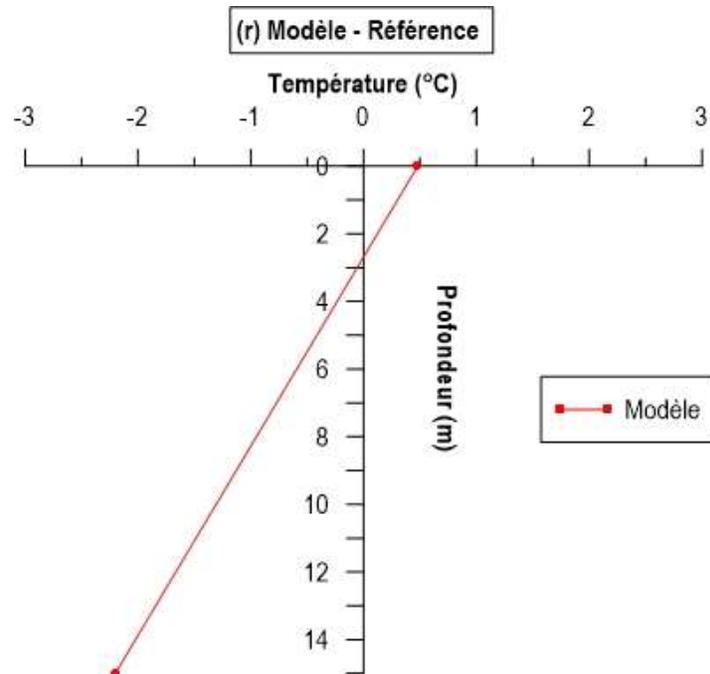


Figure 189. Relation de la température à l'interface remblai/sol naturel (modélisée) par rapport à la température du pergélisol, pour l'infrastructure de Puvirnituk avant adaptation.

2.4.2.1 ANALYSE DE STABILISATION THERMIQUE - APPROCHE DU BILAN THERMIQUE POUR LE REMBLAI À CONVECTION D'AIR

Certaines considérations s'imposent lors de l'utilisation de l'approche du bilan thermique afin de tenir compte des conditions particulières rencontrées au site.

Étape 1 : Calcul du bilan thermique

1°) Le gradient thermique (GradT), calculé avec l'unique donnée obtenue par modélisation pour la température à l'interface, a été établi à une valeur de 0.18 °C/m .

2°) L'abaque servant à évaluer le bilan thermique représente les valeurs pour quatre hauteurs de remblai (Figure 177). Toutefois, la hauteur de la section analysée à Puvirnituk étant différente de celle proposée, une extrapolation a été faite pour obtenir une valeur de bilan thermique de $6.40 \times 10^6\text{ J/m}^2$, pour une hauteur de remblai de 8 m (Figure 190). Le modèle a été développé avec un sol similaire à celui du site de Puvirnituk ayant la même valeur de conductivités thermiques. En conséquence, aucun facteur de correction n'a à être appliqué au bilan thermique.

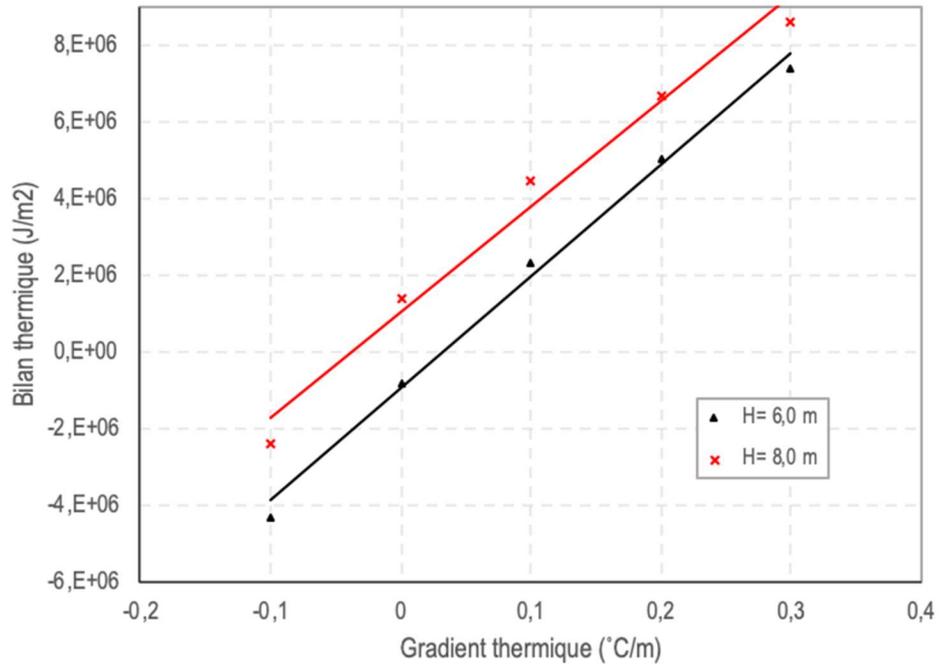


Figure 190. Résultats d'extrapolation du bilan thermique à l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai $H = 8 \text{ m}$ et du gradient thermique (modifié de Kong, 2019).

Étape 2 : Analyse de la capacité d'extraction de chaleur

3°) Compte tenu du fait que $6.40 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ doivent être extraits et que $\Delta T = -13.44 \text{ }^\circ\text{C}$, l'épaisseur optimale du remblai à convection d'air est trouvée suivant la procédure suivante:

1. La ΔT avec laquelle l'analyse doit être effectuée est supérieure aux courbes proposées dans l'abaque de capacité d'extraction de chaleur du ACE dans l'épaulement (Figure 179). Une extrapolation doit être effectuée (Figure 191);

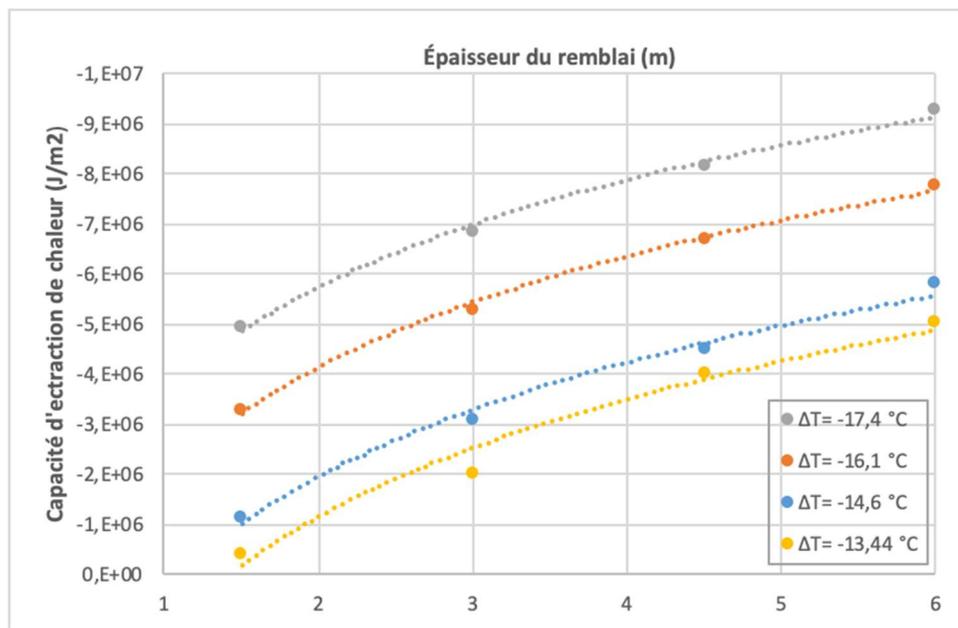


Figure 191. Capacité d'extraction de chaleur du ACE dans l'épaulement à travers l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai et la différence de température $\Delta T = -13,44 \text{ }^\circ\text{C}$ (modifié de Kong, 2019).

1. En utilisant la courbe extrapolée pour $\Delta T = -13.44^{\circ}\text{C}$, une seconde extrapolation est nécessaire pour obtenir la valeur de l'épaisseur du remblai + ACE qui permettra l'extraction de la chaleur en excès ($6.40 \times 10^6 \text{ J/m}^2$) pour maintenir le système stable;
2. Après avoir fait les extrapolations, tel que décrit pour le cas de Tasiujaq, il a été possible de trouver que l'épaisseur du remblai + ACE doit totaliser 7.91 m pour extraire les $6.40 \times 10^6 \text{ J/m}^2$.

Le tableau 54 résume les résultats obtenus des extrapolations réalisés pour utiliser les abaques de conception. Le remblai à convection d'air doit avoir une hauteur de 7.91 m pour garantir la stabilité de cette section de la piste d'atterrissage de Puvirnituk. Le remblai adapté à Puvirnituk a une épaisseur de 8 m, qui correspond à la valeur recommandée selon les résultats de l'analyse pour garantir la stabilisation thermique du système. Le suivi à long terme a d'ailleurs confirmé la bonne performance du système.

Tableau 54. Résumé des résultats de la validation de l'abaque pour la section ACE à Puvirnituk

Hauteur remblai + ACE (m)	Extraction de chaleur (J/m^2)
1.5	1.74E^5
3.0	-1.44E^6
4.5	-3.44E^6
6.0	-4.44E^6
7.91	-6.40E^6

2.4.2.2 SOMMAIRE – PUVIRNITUQ

Les données de Puvirnituk indiquent un refroidissement du pergélisol et une aggradation du pergélisol sous le pied du remblai, ce qui semble corroborer l'efficacité du remblai convectif mis en place à assurer la stabilité thermique de cette portion du remblai. Les données obtenues à Puvirnituk semblent donc encore ici valider l'approche de conception proposée.

2.4.3 SALLUIT : DRAIN THERMIQUE

La figure 192 représente le résultat de la modélisation réalisée par Kong (2019). Modèle avec lequel il a été possible de connaître la valeur théorique de la température à l'interface (-1,31 °C) avant adaptation et qui par rapport à la température du pergélisol (-2,2 °C) donne un gradient thermique positif.

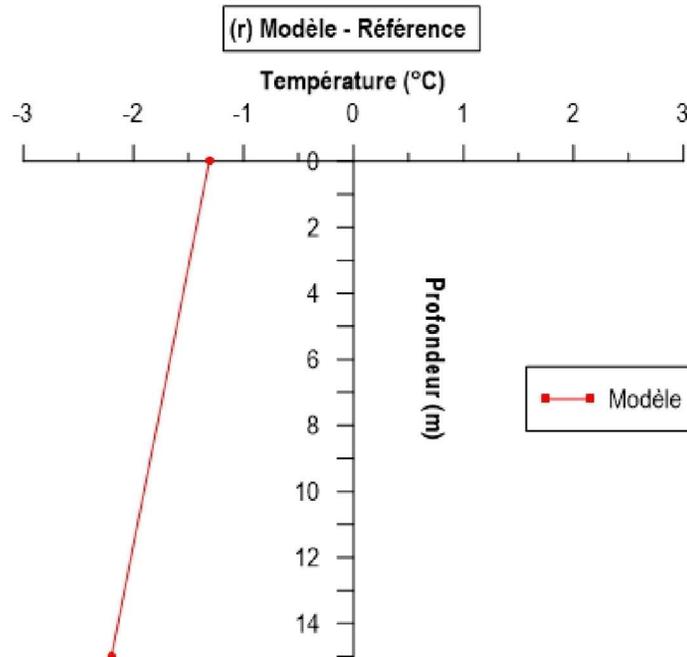


Figure 192 : Relation de la température à l'interface remblai/sol naturel (modélisée par Kong (2019)) par rapport à la température du pergélisol pour le remblai avant l'adaptation.

2.4.3.1 ANALYSE DE STABILISATION THERMIQUE - APPROCHE DU BILAN THERMIQUE POUR LE DRAIN THERMIQUE

Comme pour les deux autres sites une analyse de stabilisation thermique a été réalisée pour le drain thermique installé dans le remblai de la route de Salluit.

Étape 1. Calcul du bilan thermique

Les étapes effectuées pour le calcul du bilan thermique sont les mêmes que celles effectuées pour l'analyse des deux autres sites.

- Le gradient thermique a été calculé à partir des données mesurées et obtenues par modélisation. Le gradient est donc établi à 0,06 °C/m.
- La figure 177 représente l'abaque développé pour trouver les valeurs de bilan thermique pour quatre hauteurs de remblai conventionnel. La hauteur de la section analysée à Salluit étant différente de celles proposées dans l'abaque, une interpolation a été faite pour une hauteur de remblai de 2,5 m. La courbe correspondant à cette hauteur est représentée en jaune sur la figure 193.

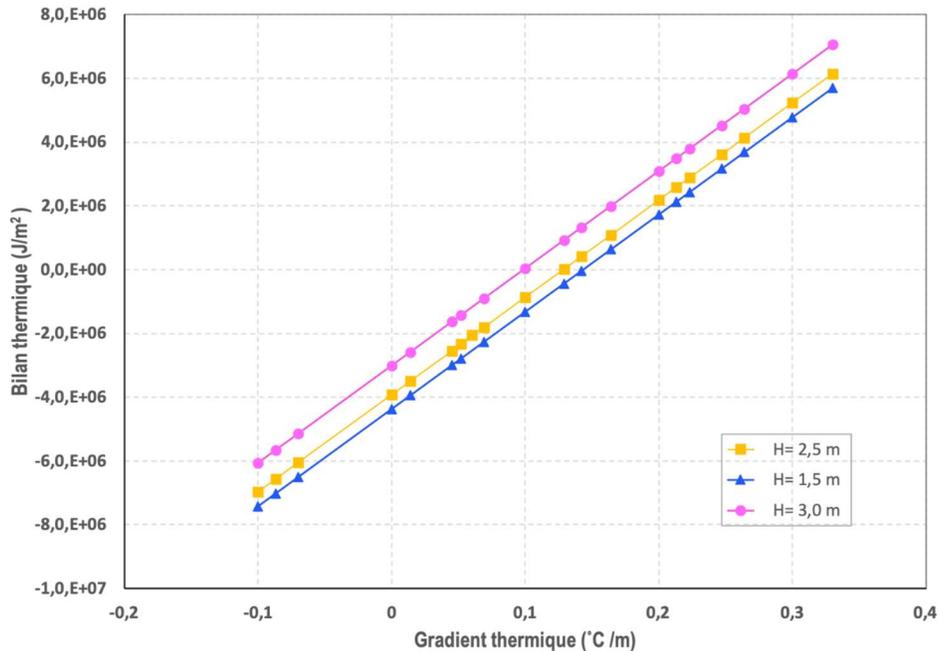


Figure 193 : Résultats interpolation du bilan thermique à l'interface remblai/sol naturel en fonction de l'épaisseur du remblai H=2,5 m et du gradient thermique (Modifiée de (Kong et al., 2019a))

Après avoir trouvé la courbe correspondant à la hauteur de remblai souhaitée (H=2,5 m), la valeur du bilan thermique correspondant au GradT=0,06 (°C/m) est trouvée. Comme le mentionnent Kong et al. (2019) pour un type de sol différent du modèle calibré, l'abaque du bilan thermique ne peut être utilisé directement. Un facteur de correction en fonction des conductivités thermiques, doit être appliqué comme le montre le point suivant.

La valeur obtenue au moyen de l'abaque peut être corrigée en multipliant le bilan thermique par le rapport entre la conductivité thermique du nouveau sol et celle du sol utilisé dans le modèle. Aux fins du présent projet, seule la correction de la conductivité thermique gelée sera prise en compte, car d'une manière générale, on considère que la mince couche de sol dégelée (s'il y en a une) sous l'interface sol-remblai peut être négligée dans le calcul du bilan de chaleur. Les résultats des facteurs sont présentés au tableau 55.

Tableau 55 : Facteur de correction bilan thermique Salluit

	Modèle – Silt (Kong et al.,2019)	Salluit – Silt argileux (Kong, 2019)	Facteur de correction
$k_f (W/m \cdot K)$	1,21	1,19	0,98

Pour un GradT=0,06 °C/m et une hauteur de remblai de 2,5 m, le bilan thermique déterminé directement sur l'abaque de la figure 177 est de $-2,10 \times 10^6$ J/m² qui, multiplié par le facteur de conductivité gelée, est corrigé et donne un bilan thermique final de $-2,06 \times 10^6$ J/m², c'est-à-dire la quantité de chaleur pouvant être ajoutée au système avant d'atteindre l'équilibre.

Compte tenu du fait que le bilan thermique résultant du système avant l'adaptation est négatif, il serait possible de laisser l'analyse à ce stade et de conclure que l'adaptation n'était pas nécessaire puisque le système initial était thermiquement stable. Cependant, la validation de la stabilité thermique a été faite pour corroborer ce résultat.

L'analyse faite pour Salluit implique une extrapolation. La procédure suivie pour cette analyse est la suivante :

- Une extrapolation entre les données des courbes L = 3,0 m de la figure 180 a été faite, puisque la ΔT est égale à $-12,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ à Salluit, et se situe hors des ΔT proposés par le modèle développé.
- En prenant la courbe extrapolée pour $\Delta T = -12,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure 194) et les valeurs de la hauteur du remblai de chacune des sections (Tableau 56), la valeur de la capacité d'extraction de chacune des sections a été trouvé.

Le Tableau 57 : Résumé des résultats de la validation de l'abaque pour la section drain thermique à Salluit résume les résultats obtenus de l'application de la courbe extrapolée (Figure 194). Ces résultats permettent de connaître la quantité de chaleur supplémentaire que le système est capable d'extraire après l'installation du drain thermique. Si on prend en compte les $-2,06 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ qui sont extraits avant l'adaptation, pour le cas de A6 la capacité d'extraction totale après l'adaptation est de $-3,1 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ et pour B6 après l'adaptation est de $-3,46 \times 10^6 \text{ J/m}^2$

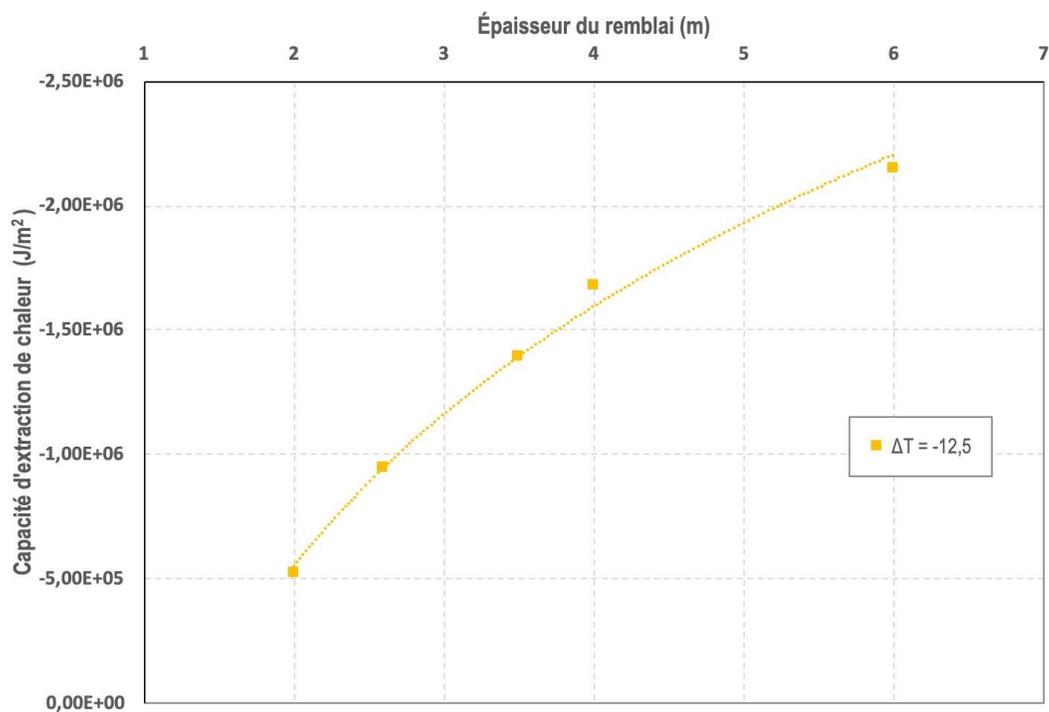


Figure 194 : Extrapolation de ΔT pour l'analyse du drain thermique Salluit

Tableau 56 : Hauteurs du remblai section A6 et B6

Section	Hauteur du remblai (m)
A6	2,60
B6	3,50

Tableau 57 : Résumé des résultats de la validation de l'abaque pour la section drain thermique à Salluit

Hauteur remblai (m)	Extraction de chaleur (J/m ²)
2,6	-9,49.E+05
3,5	-1,40.E+06

La couche active sous la section B6 montre une réponse immédiate et positive dès la première année de suivi. Bien que dans la section A6, la couche active reste stable, cela ne signifie pas que l'adaptation n'est pas efficace. Dans ce cas, la section A6 a été affectée par un écoulement d'eau qui semble empêcher l'aggradation du pergélisol, ce qui ne révèle pas pour autant une dégradation du pergélisol. Pour la section B6, la couche active se trouve à 30 cm au-dessus de l'interface remblai/sol naturel, c'est-à-dire à l'intérieur du remblai. Dans la situation d'A6, l'épaisseur de la couche active est de 1,15 m sous l'interface remblai/sol naturel. Dans le cas des deux sections, l'évolution des températures à l'interface par rapport à la température du pergélisol montre une stabilité thermique au fil des années de l'étude et l'évolution des températures confirment le bilan favorable du remblai après l'adaptation.

2.5 APPLICATION DES MÉTHODES

Tel qu'indiqué dans le tableau 47, la méthode a été appliquée aux routes d'accès de Tasiujaq et d'Akulivik, puis à la piste de Kangirsuk. Dans le cas des applications, les calculs seront effectués en utilisant les équations plutôt que les abaques de conception.

2.5.1 LE CAS DE LA ROUTE DE TASIUJAJQ

Le cas de la route de Tasiujaq est un cas d'application en conditions de pergélisol modérément chaud pour lequel peu d'information spécifique est disponible. Le problème d'accumulation de neige sur les talus de la piste d'atterrissage est bien connu et documenté. Il est donc probable que l'accumulation de neige joue un rôle important dans le comportement thermique de la route également. Cette situation a donc été ajustée dans la modélisation en utilisant un facteur « n » variable selon la position par rapport au remblai et selon les saisons. L'estimation de l'épaisseur de la neige sur les versants est établie considérant un angle de repos naturel de la neige balayée par le vent de 1V :6H. L'hypothèse sur la distribution de l'épaisseur de neige est illustrée à la figure 195 et la conversion en facteur n s'effectue en utilisant la corrélation illustrée à la figure 196.

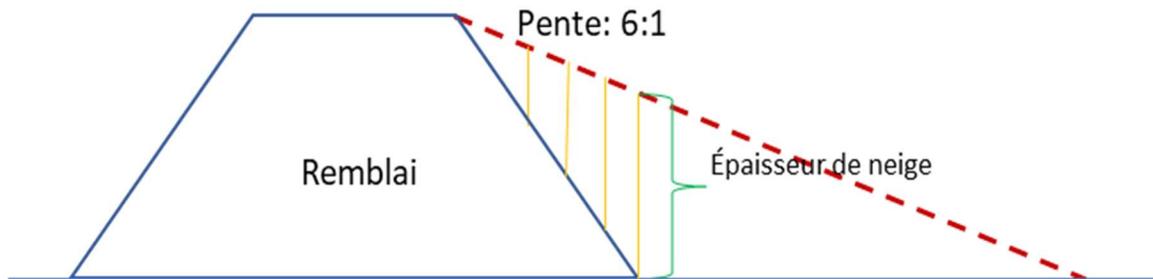


Figure 195 : Hypothèse sur la distribution de l'épaisseur de neige accumulée sur le talus d'un remblai

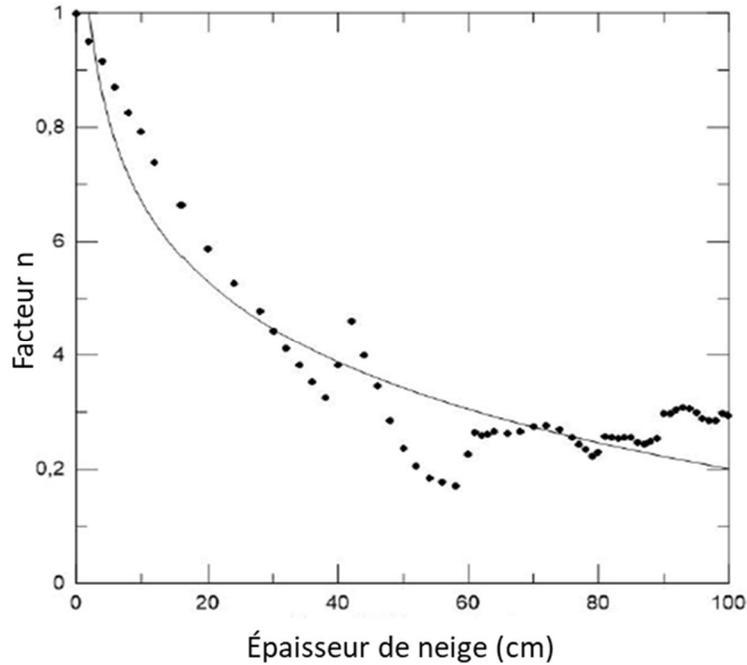


Figure 196 : Corrélation entre l'épaisseur de neige et la facteur n (Lanouette, 2020)

En l'absence de données thermiques sur le sol spécifiques au remblai étudié, la température du pergélisol est considérée être la même que celle mesurée à une profondeur de 13,5 m au câble TAS-F2 situé à environ 450 m au sud-ouest du site étudié. La température mesurée est de -2,1 °C. Les températures à l'interface sol-remblai a été déterminée par modélisation thermique à l'aide du logiciel SV-Heat de la compagnie Soil Vision. Les températures mesurées à la station climatique de Tasiujaq (Tableau 58) entre les années (2005-2016) ont été utilisées pour recréer un modèle sinusoïdal de variation annuel des températures de l'air. La comparaison entre certaines données observées et simulées est présentée au tableau 59.

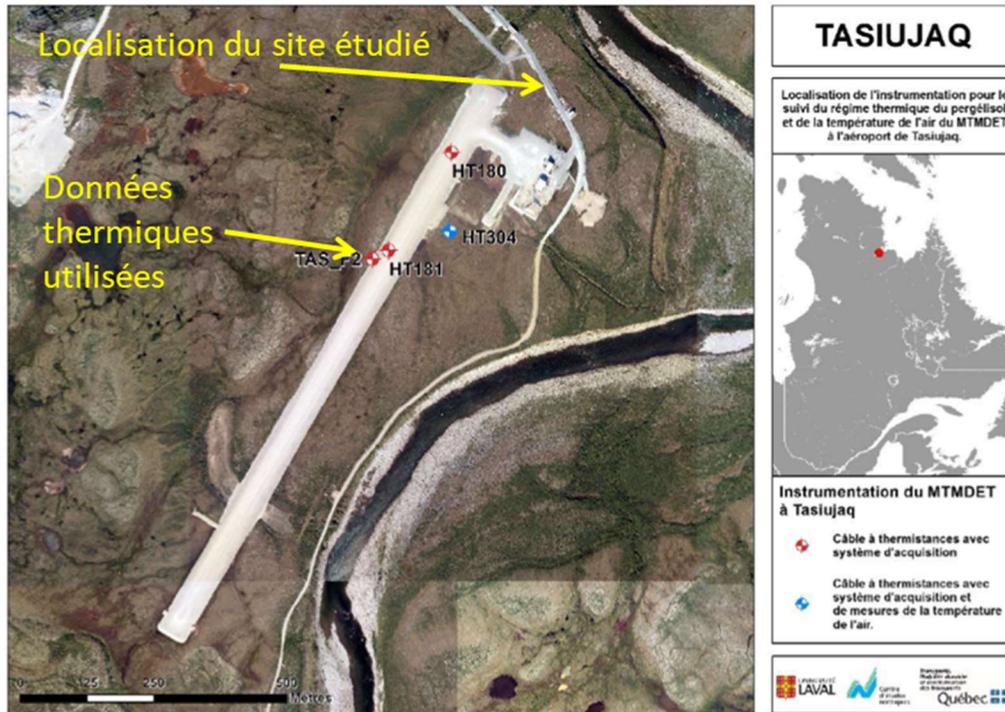


Figure 197 : Localisation du site d'étude de la route de Tasiujaq.

Tableau 58 : Données climatiques enregistrées à la station de Tasiujaq.

TASIUAQ												
Indices	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	Moyenne
Saison de gel												
Début (jj-mmm)	29-oct	27-oct	10-oct	29-oct	17-oct	03-nov	24-oct	12-oct	25-oct	28-oct	10-oct	21-oct
Fin (jj-mmm)	07-mai	29-mai	07-avr	26-mai	12-mai	27-mai	09-mai	16-mai	14-mai	24-avr	11-mai	11-mai
Durée (jour)	190	214	180	209	207	205	198	216	201	178	214	201
Moyenne (°C)	-13.19	-12.76	-17.35	-15.33	-10.68	-12.41	-14.76	-12.29	-17.15	-19.78	-15.11	-14.62
Saison de dégel												
Début (jj-mmm)	08-mai	30-mai	08-avr	27-mai	13-mai	28-mai	10-mai	17-mai	15-mai	25-avr	12-mai	12-mai
Fin (jj-mmm)	26-oct	09-oct	28-oct	16-oct	02-nov	23-oct	11-oct	24-oct	27-oct	09-oct	08-oct	19-oct
Durée (jour)	171	132	203	142	173	148	154	160	165	167	149	160
Moyenne (°C)	7.79	7.92	5.54	6.61	7.21	7.53	8.43	6.71	7.52	6.14	7.17	7.14
Année climatique												
TMAA (°C)	-2.70	-2.42	-5.90	-4.36	-1.73	-2.44	-3.16	-2.79	-4.82	-6.82	-3.97	-3.74
Indice de gel (FI)	2536	2750	3147	3220	2225	2580	2950	2690	3468	3549	3257	2943
Indice de dégel (TI)	1270	1056	1297	952	1269	1130	1315	1092	1260	1063	1082	1162
Ratio (FI/TI)	2.00	2.60	2.43	3.38	1.75	2.28	2.24	2.46	2.75	3.34	3.01	2.57

Tableau 59 : Comparaison entre les indices de gel et de dégel mesurés et les indices simulés.

	Indice de gel (°CJ)	Indice de dégel (°CJ)	Température moyenne annuelle
Mesurés (2005-2016)	2943	1162	-3.74°C
Simulés	3025	1113	-3.74 °C
Différence	(3025-2943)/2943 =2,7%	(1162-1113)/1162 ~ 0,4%	

La Figure 198 illustre le modèle géométrique utilisé pour la simulation numérique du comportement thermique de la route. Les valeurs des facteurs n utilisées pour représenter les conditions à la surface du modèle en fonction de la température de l'air sont indiquées au Tableau 60.

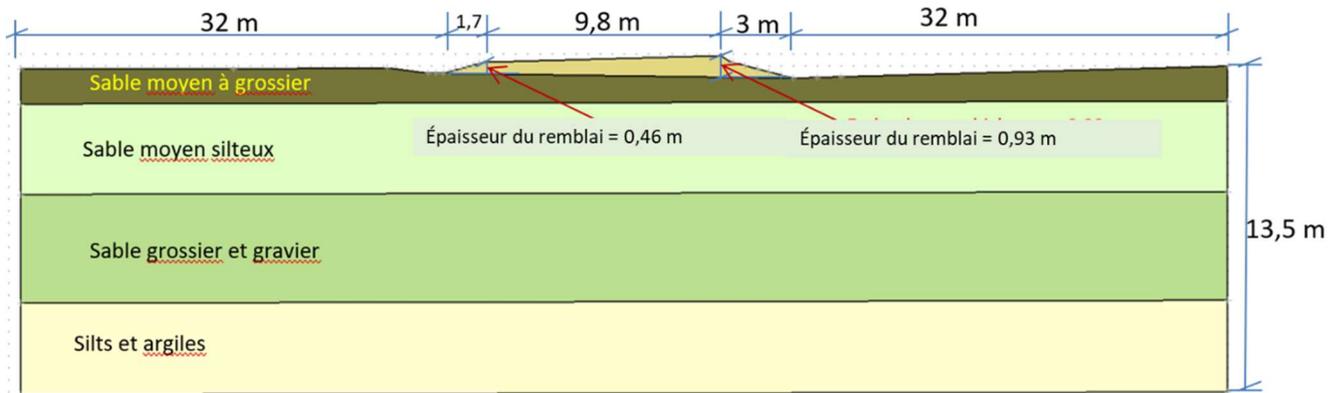


Figure 198 : Modèle géométrique utilisé pour la simulation numérique

Tableau 60 : Facteurs n pour différentes conditions aux limites supérieures du modèle

Type de surface	n_i	n_f
Sol naturel	0.50	0.50
Surface du remblai (gravier)	1.40	1.0
Talus du remblai (gravier)	1.40	Varie avec l'épaisseur de neige (voir section 2.5.1)

*Valeurs typiques suggérées dans la littérature (Doré & Zubeck (2009); Andersland & Ladanyi (2004))

La stratigraphie et les propriétés thermiques des sols utilisés dans la modélisation sont indiquées au tableau 61. Une conductivité thermique moyenne de 3,4 W/m°C (300 kJ/j/m/°C) a été utilisée pour les sols gelés sous la route.

Tableau 61 : Stratigraphie et propriétés thermiques des sols pour le site de Tasiujaq (L'Hérault et al., 2012)

Chaînage 5+300, centre-piste (câble HT-181 et le forage TAS_F2)						
Profondeur (m)	Stratigraphie	Chaleur spécifique KJ/m³/°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m³/m³)
		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/m³/°C		Conductivité KJ/jour/m/°C		Contenu en eau vol. (m³/m³)
		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

La simulation numérique a été utilisée pour déterminer les températures moyennes à l'interface sol-remblai aux trois points indiqués sur la figure 199.

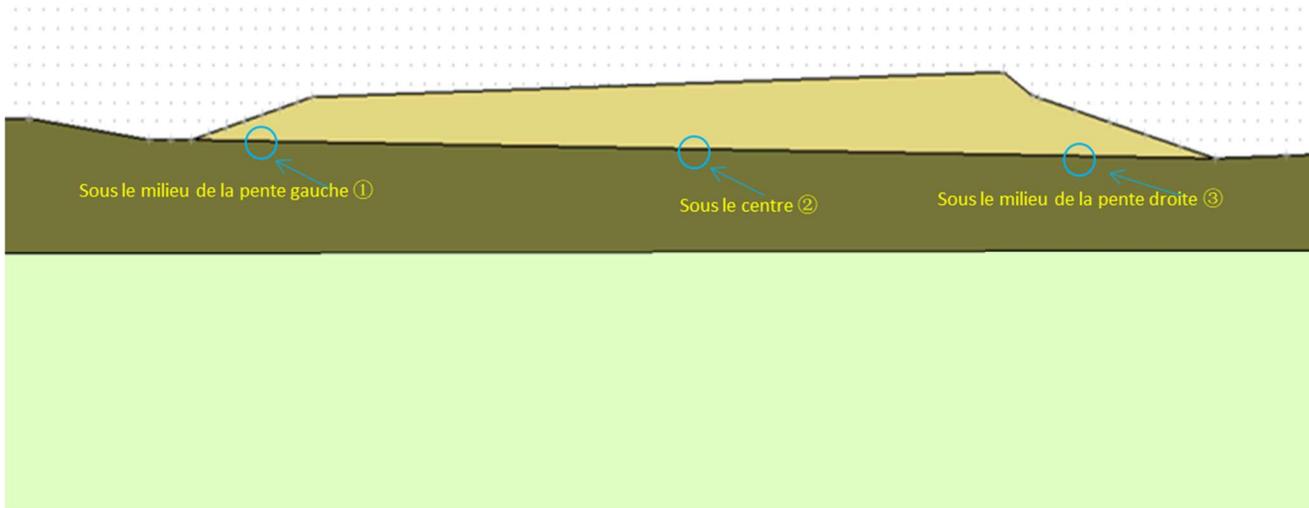


Figure 199 : localisation des points d'évaluation sous la toute de Tasiujaq.

Pour la position (1), la température à l'interface simulée est illustrée à la Figure 200:

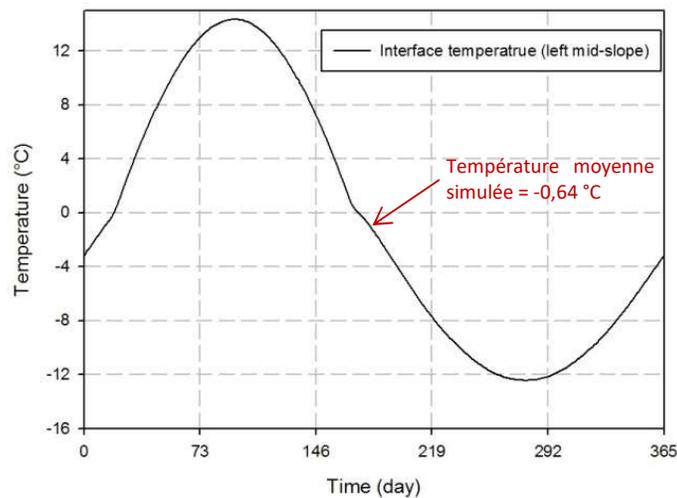


Figure 200 : température annuelle simulée pour l'interface sol-remblai sous le talus gauche (position 1)

Considérant la température du pergélisol de $-2,1^{\circ}\text{C}$ à la profondeur de $13,5\text{ m}$, le gradient thermique au point (1) est donc $= (-0,64 - (-2,1)) / 13,5 = 0,11^{\circ}\text{C/m}$. Les mêmes calculs ont été faits pour les positions 2 et 3 et les résultats ont été compilés dans le tableau 62.

Tableau 62 : Compilation des données disponibles pour les conditions de la route de Tasiujaq et résultats des calculs

Point d'évaluation	Épaisseur du remblai à l'épaulement (m)	Conductivité thermique W/m°C	Température pergélisol °C	Température moyenne hivernale de l'air °C	Température moyenne à l'interface °C	Gradient thermique °C/m	Bilan thermique MJ/m ²	État
Milieu de pente (1)	0,46	3,4	-2,1	-14,62	-0,64	0,11	-1,4	Instable
Centre-ligne (2)	0,70				-2,4	-0,022	-2,37	Stable
Milieu de pente (3)	0,93				0,75	0,21	0,27	Instable

Les données disponibles ont été utilisées pour calculer les bilans de chaleur pour les trois positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai. Les équations du tableau 44 ont été utilisées pour le calcul et les résultats obtenus sont présentés au tableau 63.

Tableau 63 : Bilans de thermiques calculés à partir des équations de régression pour trois positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai.

Position	Équation de régression	Bilan thermique MJ/m ²
Centre-ligne (2)	$HB = \frac{3.40}{1.21}(-5.18 \times 10^6 + (3.10 \times 10^6 \times -0.022) + (6.82 \times 10^6 \times \log 0,70))$	-17,7
Milieu de la pente (1)	$HB = \frac{3.40}{1.21}(-5.42 \times 10^6 + (3.03 \times 10^7 \times 0.11) + (5.51 \times 10^6 \times \log 0,46))$	-10,96
Milieu de la pente (3)	$HB = \frac{3.40}{1.21}(-5.42 \times 10^6 + (3.03 \times 10^7 \times 0.21) + (5.51 \times 10^6 \times \log 0,93))$	2,16

Le centre de la route peut donc être considéré comme stable avec une certaine marge de sécurité. Aucune adaptation n'est donc requise. Le talus (1) a un bilan négatif mais un gradient positif, ce qui n'est pas anormal pour un remblai mince. Cette portion du remblai est donc présentement stable mais il est probable qu'il se dégradera à long terme. Aucune action immédiate n'est à prendre mais ce talus devrait faire l'objet d'une réévaluation périodique. Le talus (2) est quant à lui thermiquement instables. Si le pergélisol est riche en glace à cet endroit, une adaptation doit être envisagée. Si la cause principale du problème est l'accumulation de neige par l'action du vent, l'adoucissement des pentes est probablement la première action à envisager. Si on suppose une augmentation de température de l'ordre de 1,5°C durant la période de vie utile de l'adaptation, on peut déterminer la marge de sécurité à appliquer à la figure 172. On obtient ainsi une marge de sécurité de 1,25 à appliquer pour le côté de 0,93 m d'épaisseur. La correction de température à l'interface est donc la suivante :

$$CTI = T_{\text{interface}} - T_{\text{pergélisol}} + MS$$

$$CTI_{0,93m} = 0,75 - (-2,1) + 1,25 = 4,1$$

La figure 173 indique que la pente requise pour stabiliser les talus serait donc de 1V :7H pour le talus (2).

Si le problème n'est pas associé à l'accumulation de neige par le vent, il faudrait alors envisager une stabilisation par extraction de chaleur. Considérant un ΔT de -12,5°C (Température moyenne hivernale de l'air – température du pergélisol), la figure 179 et la figure 180 indiquent qu'il faudrait rehausser le remblai d'environ 2,6 m et utiliser un remblai à convection en talus ou rehausser d'environ 3,1 m et utiliser un drain thermique pour extraire le 2,16 MJ/m² de chaleur en excès dans le sol.

2.5.2 LE CAS DE LA ROUTE D'AKULIVIK

Une deuxième application de la méthode a été réalisée sur une section de la route d'Akulivik qui se trouve en zone de pergélisol modérément chaud et pour laquelle peu d'information spécifique est disponible. Le problème d'accumulation de neige sur les talus est possiblement en cause dans ce cas. L'accumulation de neige a donc été traitée de la manière décrite dans la section 2.5.1. Le site considéré pour cette application est illustré sur la figure 201.

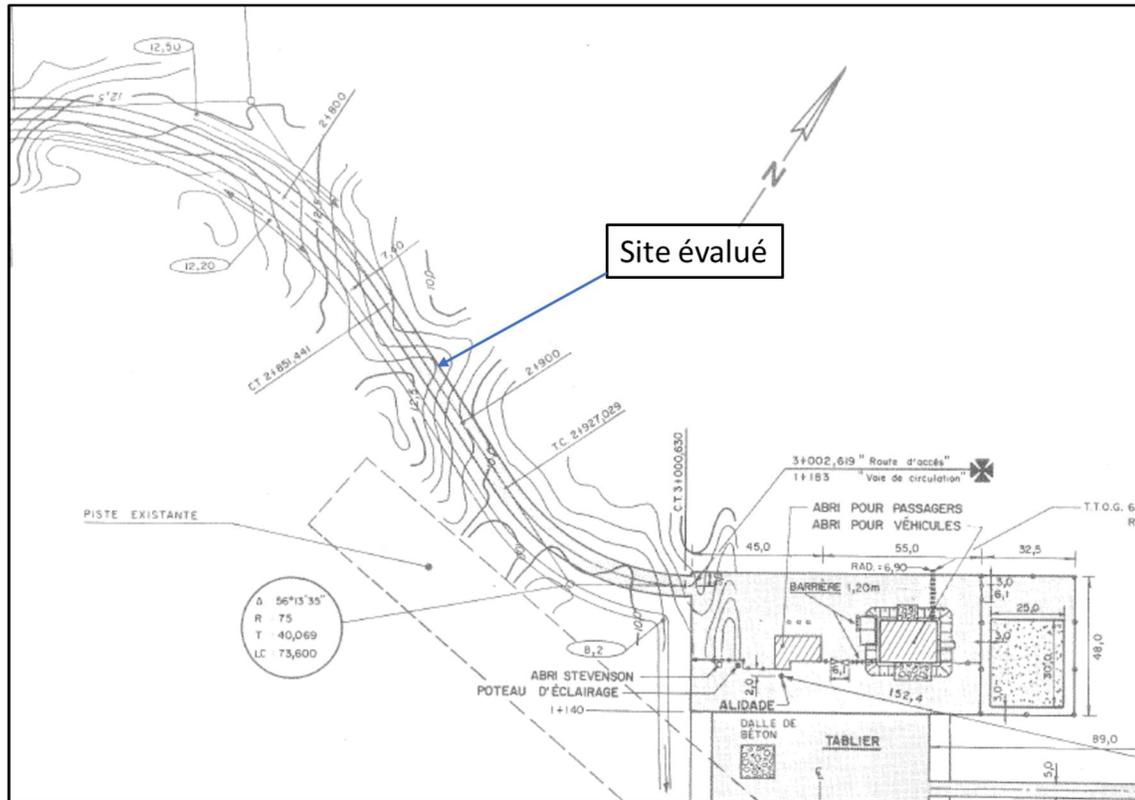


Figure 201 : Localisation du site d'application de la méthode, route d'accès à l'aéroport d'Akulivik.

En l'absence de données thermiques, la température du pergélisol est considérée être la même que celle mesurée à une profondeur de 9,5 m au câble AKU-F4 situé à environ 200 m à l'est du site étudié (Figure 202). La température mesurée est de $-1,9^{\circ}\text{C}$. Nous avons donc utilisé cette température comme température du pergélisol et comme condition limite à la base du modèle développé.

Les températures à l'interface sol-rembloi a été déterminée par modélisation thermique à l'aide du logiciel SV-Heat de la compagnie Soil Vision. Les températures mesurées à la station climatique de Akulivik entre les années (2005-2016) ont été utilisées pour recréer un modèle sinusoïdal de variation annuel des températures de l'air.



Figure 202 : Localisation de la station de mesure AKU-F4

AKULIVIK												
Indices	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	Moyenne
Saison de gel												
Début (jj-mmm)	29-oct	25-oct	18-oct	28-oct	15-oct	06-nov	22-oct	07-oct	24-oct	14-oct	09-oct	21-oct
Fin (jj-mmm)	14-mai	03-juin	06-mai	01-juin	22-mai	01-juin	29-mai	27-mai	19-mai	02-juin	01-juin	24-mai
Durée (jour)	197	221	201	216	219	207	220	232	207	231	236	217
Moyenne (°C)	-13.52	-13.57	-17.19	-15.65	-11.33	-13.42	-14.31	-13.38	-17.17	-16.11	-15.11	-14.61
Saison de dégel												
Début (jj-mmm)	15-mai	04-juin	07-mai	02-juin	23-mai	02-juin	30-mai	28-mai	20-mai	03-juin	02-juin	25-mai
Fin (jj-mmm)	24-oct	17-oct	27-oct	14-oct	05-nov	21-oct	06-oct	23-oct	13-oct	08-oct	n.d.	19-oct
Durée (jour)	162	135	173	134	166	141	129	148	146	127	n.d.	146
Moyenne (°C)	5.84	5.83	6.65	7.72	6.75	6.25	7.87	4.93	6.17	6.29	n.d.	6.43
Année climatique												
TMAA (°C)	-3.84	-3.87	-5.27	-3.97	-2.29	-3.58	-3.22	-4.23	-5.50	-4.91	n.d.	-4.07
Indice de gel (FI)	2683	3013	3476	3399	2495	2798	3171	3120	3572	3754	3587	3188
Indice de dégel (TI)	961	801	1170	1051	1134	893	1024	741	915	806	n.d.	950
Ratio (FI/TI)	2.79	3.76	2.97	3.23	2.20	3.13	3.10	4.21	3.90	4.66	n.d.	3.40

La comparaison entre certaines données observées et simulées avec le modèle sinusoïdal est présentée au tableau 64.

Tableau 64 : Comparaison de l'indice d'air mesuré et de l'indice d'air simulé pour le site de la route d'Akulivik

	Indice de gel (°Cj)	Indice de dégel (°Cj)	Température moyenne annuelle de l'air
Températures mesurées (2005-2016)	3188	950	-4.1°C
Températures simulées	3140	1060	-4.1°C
Différence	(3140-3188)/3188 =1,5%	(1060-950)/950 =12%	

La figure 203 illustre le modèle géométrique utilisé pour la simulation numérique du comportement thermique de la route. Les valeurs des facteurs n utilisées pour représenter les conditions à la surface du modèle en fonction de la température de l'air sont indiquées au tableau 60.

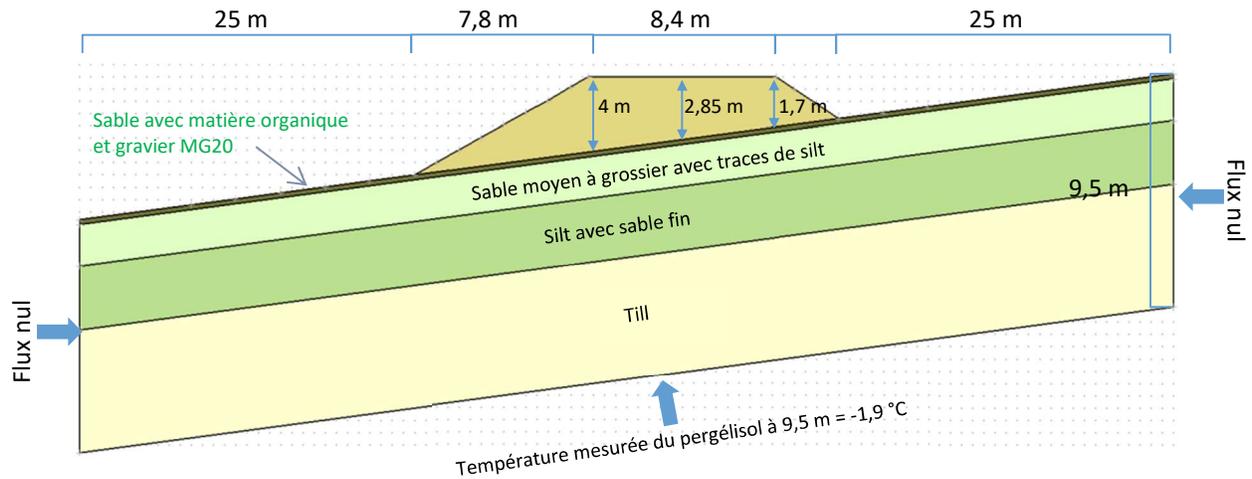


Figure 203 : Géométrie du modèle développé pour la simulation thermique du remblai de la route d'Akulivik

La stratigraphie et les propriétés thermiques des sols utilisées dans la modélisation sont indiquées au tableau 65. Une conductivité thermique moyenne de 1,62 W/m°C (140 kJ/j/m/°C) a été utilisée pour les sols gelés sous la route.

Tableau 65 : Stratigraphie et propriétés physiques et thermiques utilisées pour les simulations thermiques pour la route d'Akulivik (L'Hérault et al., (2012))

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	
chaînage 5+155 (forage AKU_F4)						
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.

La simulation numérique a été utilisée pour déterminer les températures moyennes à l'interface sol-remblai aux trois points indiqués sur la figure 204.

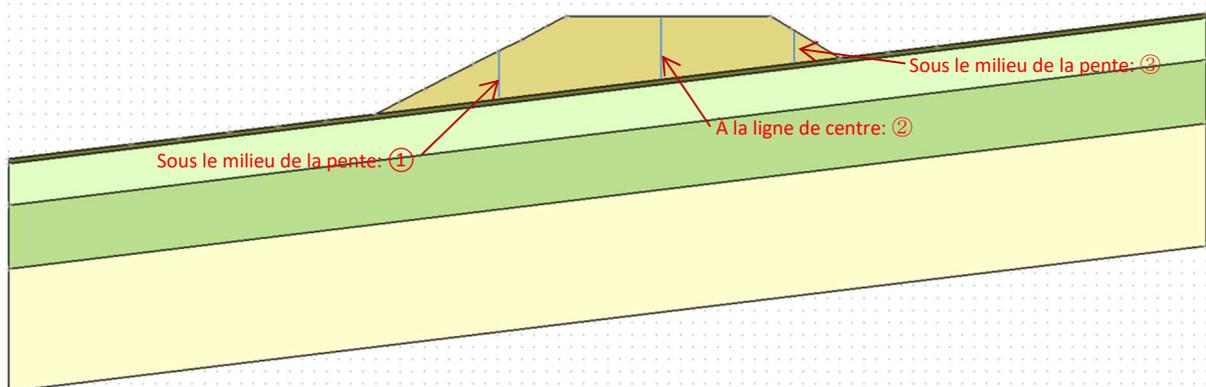


Figure 204 : localisation des points d'évaluation sous la route d'Akulivik.

Pour la position (1), la température à l'interface simulée est illustrée à la figure 205:

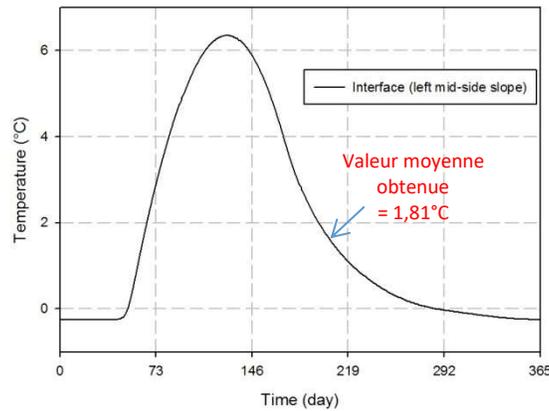


Figure 205: température annuelle simulée pour l'interface sol-remblai sous le talus à la position 1

Le gradient thermique sous la position 1 est donc $= (1,81 - (-1,9)) / 9,5 = 0,38 \text{ °C/m}$.

Les mêmes calculs ont été faits pour les positions 2 et 3 et les résultats ont été compilés dans le tableau 66.

Tableau 66 : Compilation des données disponibles pour les conditions de la route d'Akulivik et résultats des calculs

Point d'évaluation	Épaisseur du remblai à l'épaulement (m)	Conductivité thermique $W/m^{\circ}C$	Température pergélisol $^{\circ}C$	Température moyenne hivernale de l'air $^{\circ}C$	Température moyenne à l'interface $^{\circ}C$	Gradient thermique $^{\circ}C/m$	Bilan thermique MJ/m^2	État
Milieu de pente (1)	4	1,16	-1,9	-14,61	1,81	0,38	9,82	Instable
Centre-ligne (2)	2,5				-4,1	-0,21	-3,38	Stable
Milieu de pente (3)	1,7				0,86	0,29	3,23	Instable

Les données disponibles ont été utilisées pour calculer les bilans de chaleur pour les trois positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai. Les équations du tableau 44 ont été utilisées pour le calcul et les résultats obtenus sont présentés au tableau 67.

Tableau 67 : Bilans de thermiques calculés à partir des équations de régression pour trois positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai.

Position	Équation de régression	Bilan thermique MJ/m ²
Centre-ligne (2)	$HB = \frac{1.62}{1.21}(-5.18 \times 10^6 + (3.10 \times 10^6 \times -0.21) + (6.82 \times 10^6 \times \log 2.85))$	-3,65
Milieu de la pente (1)	$HB = \frac{1.62}{1.21}(-5.42 \times 10^6 + (3.03 \times 10^7 \times 0.38) + (5.51 \times 10^6 \times \log 4.0))$	12,61
Milieu de la pente (3)	$HB = \frac{1.62}{1.21}(-5.42 \times 10^6 + (3.03 \times 10^7 \times 0.29) + (5.51 \times 10^6 \times \log 1.7))$	6,21

Le centre de la route peut donc être considéré comme stable avec une certaine marge de sécurité. Aucune adaptation n'est donc requise.

Les deux côtés de la route sont thermiquement instables. Si le pergélisol est riche en glace à cet endroit, une adaptation doit être envisagée. Si la cause principale du problème est l'accumulation de neige par l'action du vent, l'adoucissement des pentes est probablement la première action à envisager. Si on suppose une augmentation de température de l'ordre de 1,5°C durant la période de vie utile de l'adaptation, on peut déterminer la marge de sécurité à appliquer à la figure 172. On obtient ainsi une marge de sécurité de 0,9 à appliquer pour le côté de 4 m d'épaisseur et de 1,1 pour le côté de 1,7 m d'épaisseur. La correction de température à l'interface est donc la suivante :

$$CTI = T_{\text{interface}} - T_{\text{pergélisol}} + MS$$

$$CTI_{4m} = 1,81 - (-1,9) + 0,9 = 4,61$$

$$CTI_{1,7m} = 0,86 - (-1,9) + 1,1 = 3,86$$

La figure 173 indique donc que la pente requise pour stabiliser les talus serait donc de 1V :6H pour les deux talus.

Si le problème n'est pas associé à l'accumulation de neige par le vent, il faudrait alors envisager une stabilisation par extraction de chaleur. Considérant un ΔT de -12,7°C (Température moyenne hivernale de l'air – température du pergélisol), la figure 179 et la figure 180 indiquent que ni le drain thermique ni le remblai à convection ne permettraient d'extraire suffisamment de chaleur pour stabiliser les deux pentes avec la géométrie de remblai actuelle. Un rehaussement considérable du profil (environ 5 m) serait requis pour extraire suffisamment de chaleur pour stabiliser le talus actuel de 1,7 m et réduire l'excédent de chaleur calculé pour le côté de 4 m.

2.5.3 LE CAS DE LA PISTE D'ATTERRISSAGE DE KANGIRSUK

Une troisième application a été faite pour le secteur en déblai de la piste d'atterrissage de Kangirsuk. Ce cas représente une application de la méthode de conception en conditions de pergélisol froid avec une quantité d'information disponible modérée. Le site considéré pour cette application est illustré sur la figure 206.

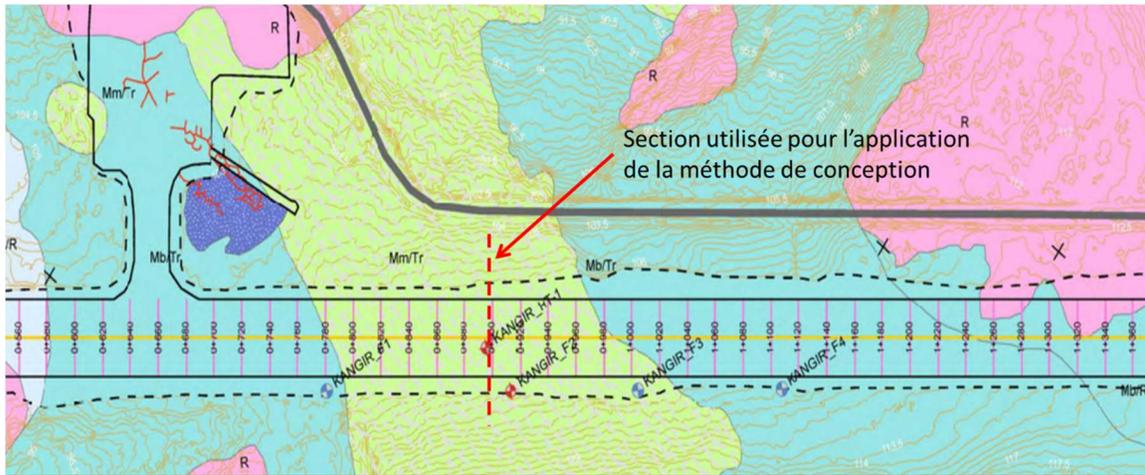


Figure 206 : Localisation du site d'application de la piste de Kangirsuk

Les données thermiques mesurées aux stations Kangir-HT-1 et Kangir-F2 ont été utilisées pour caler le modèle numérique. Ces stations donnent des informations spécifiques au site étudié mais elles sont limitées à une profondeur de 8,0 m. La température du pergélisol est considérée être la valeur moyenne mesurée à une profondeur de 8,0 m au câble Kangir-HT-1, soit environ $-4,8^{\circ}\text{C}$. Nous avons donc utilisé cette valeur comme température du pergélisol. Par contre, en l'absence d'une donnée de température du sol plus profonde, une condition limite de flux égale à $0,02 \text{ W/m}^2$ a été fixée à la base du modèle développé.

Tableau 68 : Données disponibles pour les câbles HT-1 et F2

	Kangirsuk-HT-1	Kangirsuk-F2
Données disponibles	Entre 0,66 m et 2,91 m: 2005.06 à 2016.07); Entre 4 m et 8 m: 2016.10 à ~ 2018.09;	2010.10 à 2010.12 2011.10 à 2012.05
Position	Centre	Pied de talus droit

L'épaisseur de neige accumulée en hiver sur le talus droit de la piste a été établie à partir de mesures effectuées par les représentants du CEN, le 8 mars 2006. Les valeurs mesurées dans le secteur d'intérêt varient entre 0,60 et 0,75 m. Une épaisseur de 0,70 m a donc été utilisée pour déterminer le facteur n à partir de la figure 196. La température de l'air a été simulée à l'aide d'un modèle sinusoïdal en considérant une température moyenne annuelle de -5°C (Figure 207).

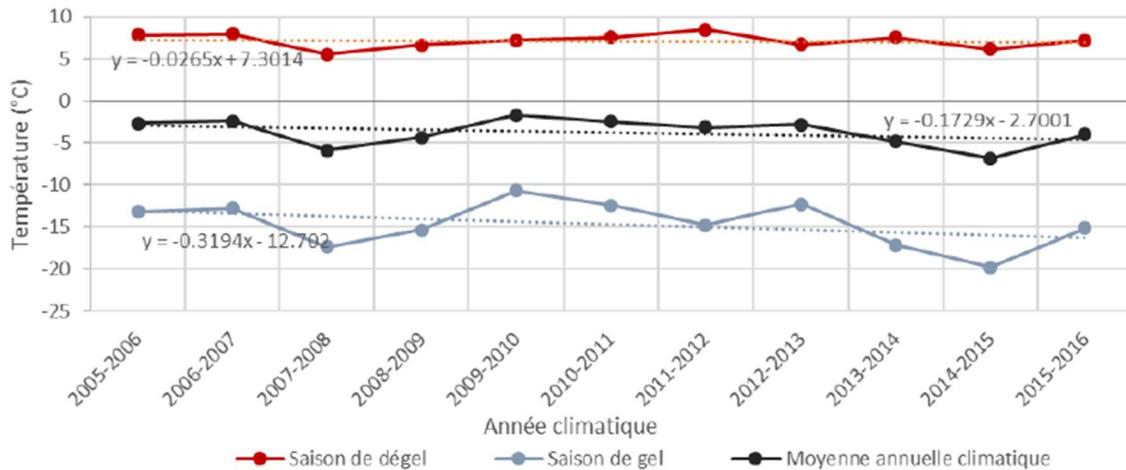


Figure 207 : Températures moyennes hivernales, estivales et annuelles entre 2005 et 2016 à Kangirsuk

Les températures à l'interface sol-remblai ont été déterminées par modélisation thermique à l'aide du logiciel SV-Heat de la compagnie Soil Vision. La figure 208 illustre le modèle géométrique utilisé pour la simulation numérique du comportement thermique de la route. Les valeurs des facteurs n utilisées pour représenter les conditions à la surface du modèle en fonction de la température de l'air sont indiquées au tableau 69. La stratigraphie et les propriétés thermiques des sols utilisés dans la modélisation sont indiquées au tableau 70. Une conductivité thermique moyenne de $1,62 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ($140 \text{ kJ/j/m}^\circ\text{C}$) a été utilisée pour les sols gelés sous la route.

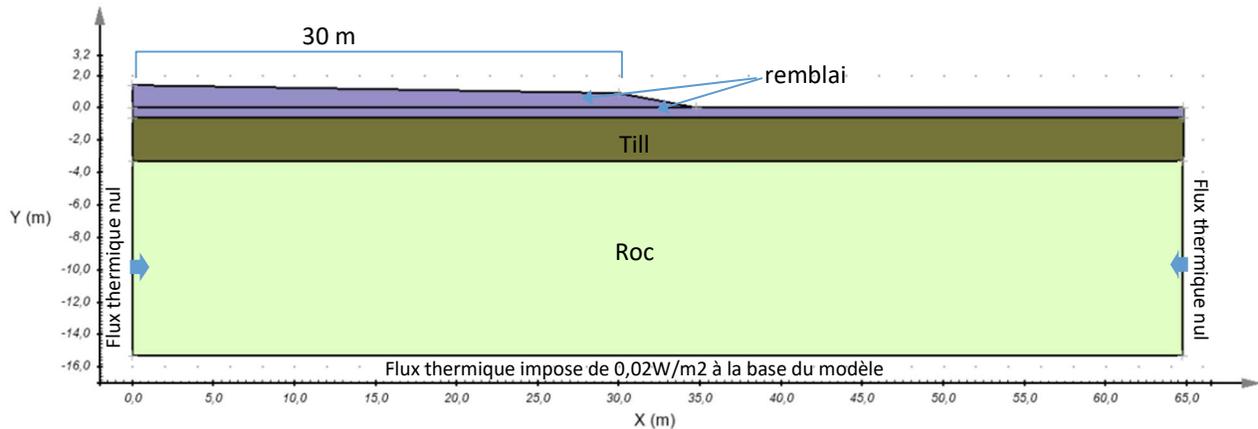


Figure 208 : Modèle géométrique utilisé pour la simulation des températures dans le remblai de la piste de Kangirsuk.

Tableau 69 : Facteurs n pour les différentes conditions limites supérieures du modèle

Type de surface	n_t	n_f
Sol naturel	0.25	0.36
Remblai (gravier)	1.86	1.0
Talus (gravier)	1.86	0,28

Tableau 70 : Propriétés thermiques et physiques des sols

Couche	k_f (W/m-°C)	k_u (W/m-°C)	C_f (MJ/m3-°C)	C_u (MJ/m3-°C)	Teneur en eau volumétrique (m³/ m³)
Remblai (1,4 m ~ -0,6 m)	2,65	2,00	1,67	1,92	0.10
Till ^b (-0,6 m ~ -3,3 m)	2,345	2,325	2,236	3,213	0.15
Roc ^b (-3,3 m ~ -13,3 m)	1,70	1,70	2,49	2,49	0,01

^a Valeurs obtenues avec les équations de Kersten; ^b Valeurs obtenues de L'Hérault et al., 2012

La simulation numérique a été utilisée pour déterminer les températures moyennes à l'interface sol-remblai sous le centre de la piste et sous le centre du talus droit de la piste. La température moyenne à l'interface simulée sous le centre de la piste est illustrée à la figure 209:

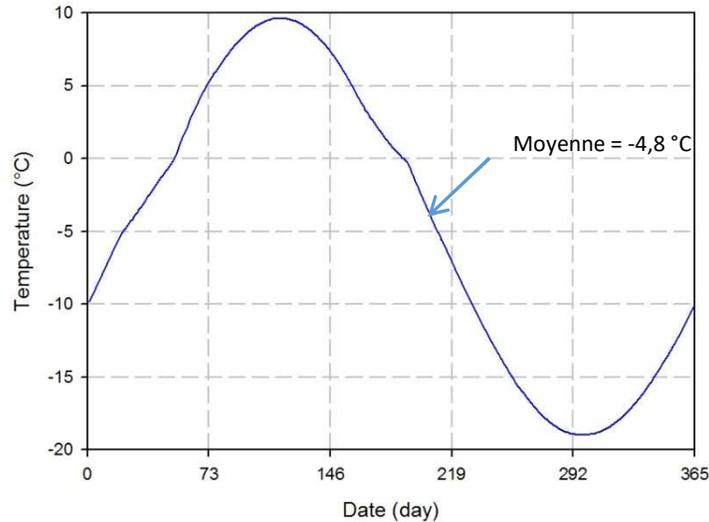


Figure 209 : Température moyenne à l'interface sol-remblai simulée sous le centre de la piste de Kangirsuk)

On obtient donc une valeur de $-4,8^{\circ}\text{C}$ qui correspond bien à la valeur de $-4,93\text{ m}$ mesurée à $0,25\text{ m}$ sous l'interface au câble HT-1. La valeur obtenue à l'interface sous le centre du talus est de $1,85^{\circ}\text{C}$.

Le gradient thermique sous le centre de la piste est donc $= (-4,8 - (-4,8))/8,0 = 0^{\circ}\text{C/m}$.

Le gradient thermique sous le talus est $= (1,85 - (-4,8))/8,0 = 0,79^{\circ}\text{C/m}$

Les données pertinentes et les résultats des calculs ont été compilés dans le tableau 71.

Tableau 71 : Compilation des données disponibles pour les conditions de la piste de Kangirsuk et résultats des calculs

Point d'évaluation	Épaisseur du remblai à l'épaulement (m)	Conductivité thermique $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$	Température pergélisol $^{\circ}\text{C}$	Température moyenne hivernale de l'air $^{\circ}\text{C}$	Température moyenne à l'interface $^{\circ}\text{C}$	Gradient thermique $^{\circ}\text{C/m}$	Bilan thermique MJ/m^2	État
Centre-piste	2,0	2,34	-4,8	-15	-4,8	0		Stable
Milieu de la pente (côté droit)	1,4				1,85	0,79	Instable	

Les données disponibles ont été utilisées pour calculer les bilans de chaleur pour les deux positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai. Les équations du tableau 44 ont été utilisées pour le calcul et les résultats obtenus sont présentés au tableau 72.

Tableau 72 : Bilans de thermiques calculés à partir des équations de régression pour trois positions d'intérêt sur la coupe transversale du remblai.

Position	Équation de régression	Bilan thermique MJ/m^2
Centre-ligne	$HB = \frac{2,34}{1,21} (-5,18 \times 10^6 + (3,1 \times 10^6 \times 0) + (6,82 \times 10^6 \times \log 2,00))$	-6,09
Milieu du talus	$HB = \frac{2,34}{1,21} (-5,42 \times 10^6 + (3,03 \times 10^7 \times 0,79) + (5,51 \times 10^6 \times \log 1,4))$	37,37

Le centre de la piste peut donc être considéré comme stable avec une certaine marge de sécurité. Aucune adaptation n'est donc requise. Le talus est thermiquement instable. Si le pergélisol est riche en glace à cet endroit, une adaptation doit être envisagée. Si la cause principale du problème est l'accumulation de neige par l'action du vent, l'adoucissement des pentes est probablement la première action à envisager. Si on suppose une augmentation de température de l'ordre de 1,5°C durant la période de vie utile de l'adaptation, on peut déterminer la marge de sécurité à appliquer à la figure 172. On obtient ainsi une marge de sécurité de 1,1 pour le talus considérant une épaisseur de 1,4 m. La correction de température à l'interface est donc la suivante :

$$CTI = T_{\text{interface}} - T_{\text{pergélisol}} + MS$$

$$CTI_{1,4\text{ m}} = 1,85 - (-4,8) + 1,1 = 4,61$$

La correction requise excède la portée du modèle illustré à la figure 173. Puisqu'un talus avec des pentes de 1V :7H ne permettrait pas de corriger davantage la situation, le talus à pente douce ne permettrait pas de corriger pleinement la situation.

Si le problème n'est pas associé à l'accumulation de neige par le vent, il faudrait alors envisager une stabilisation par extraction de chaleur. Considérant un ΔT de -10,2°C (Température moyenne hivernale de l'air – température du pergélisol), la figure 179 et la figure 180 indiquent que ni le drain thermique ni le remblai à convection ne permettraient d'extraire suffisamment de chaleur pour stabiliser les deux pentes avec la géométrie de remblai actuelle. Un rehaussement considérable du profil serait requis pour permettre une extraction de chaleur suffisante pour stabiliser le talus de la piste.

2.6 ANALYSE DE LA PERFORMANCE À LONG TERME DES MESURES D'ADAPTATION MISES EN PLACE AUX INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU NUNAVIK EN FONCTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Afin de procéder à l'analyse de la performance à long terme des mesures/techniques d'adaptation mise en place aux infrastructures de transport du Ministère en région de pergélisol, les abaques de conception présentés à l'intérieur de ce volet (sections 2.3.3, 2.3.4 et 2.3.5) ont été utilisés. Les intrants climatiques requis ont été calculés à partir de scénarios climatiques provenant d'un ensemble de 22 simulations climatiques globales post-traitées (11 modèles x 2 scénarios de trajectoire du forçage radiatif (RCP 4.5 et RCP 8.5) présélectionné par Ouranos à partir de l'ensemble complet fourni par le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) (Figure 210).

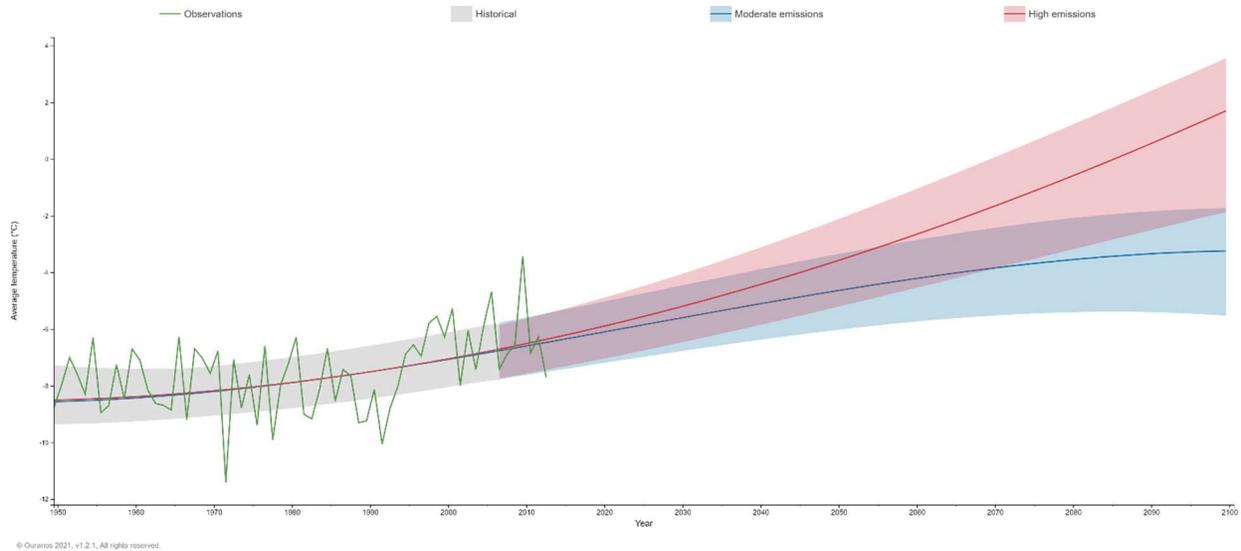


Figure 210 : Changements projetés dans le temps selon deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (scénario modéré RCP 4.5 et scénario élevé RCP 8.5) et calculés à partir d'un ensemble de simulations climatiques globales (CMIP5) (source : Ouranos, <https://portclim.ouranos.ca/#/regions/17>).

À noter que les simulations qui composent cet ensemble ont été sélectionnées à partir de toutes les simulations disponibles du CMIP5 à l'aide d'une analyse par grappe (k-means clustering) (Casajus et al. 2016). Les sorties de ces simulations ont été traitées par l'utilisation de la méthode de post-traitement 1-d quantile mapping (Gennaretti et al., 2015) afin de corriger les biais et raffiner la résolution spatiale de manière à obtenir des séries de températures de l'air journalières couvrant la période 1950-2100. Afin de limiter le nombre de simulations climatiques tout en préservant une bonne représentativité des changements plausibles, une seconde sélection par grappe a été réalisée à partir de ce sous-ensemble en utilisant les températures minimales annuelles moyennes et les températures maximales annuelles moyennes à titre de variables de sélection. Ainsi pour chacune des simulations, les deltas entre les horizons 2050 (2041-2070) et 2000 (1991-2020) pour chacune des deux variables ont permis le groupage en grappe en utilisant l'algorithme K-moyenne. Pour cette seconde sélection, le nombre prédéfini de grappes a été fixé à 4 de manière à sélectionner seulement les 4 simulations les plus représentatives de ce sous-ensemble. Cette seconde itération de l'algorithme k-moyenne a donc permis de distinguer 4 groupes de simulations qui regroupent les simulations optimistes peu probables (grappe#1), les simulations optimistes probables (grappe#2), les simulations pessimistes probables (grappe#3) et les situations pessimistes peu probables (grappe#4) et ce, pour chacun des sites d'études (Figure 211). Le petit point bleu à l'intérieur de chacune des grappes est la valeur moyenne de prédiction des analyses de la grappe (k-moyenne). Le scénario le plus près de la valeur moyenne est considéré comme le scénario représentatif de la grappe. Dans le cadre de nos analyses de la performance à long terme des systèmes de protection, les projections jugées pessimiste modérée ont été utilisées (grappe #3).

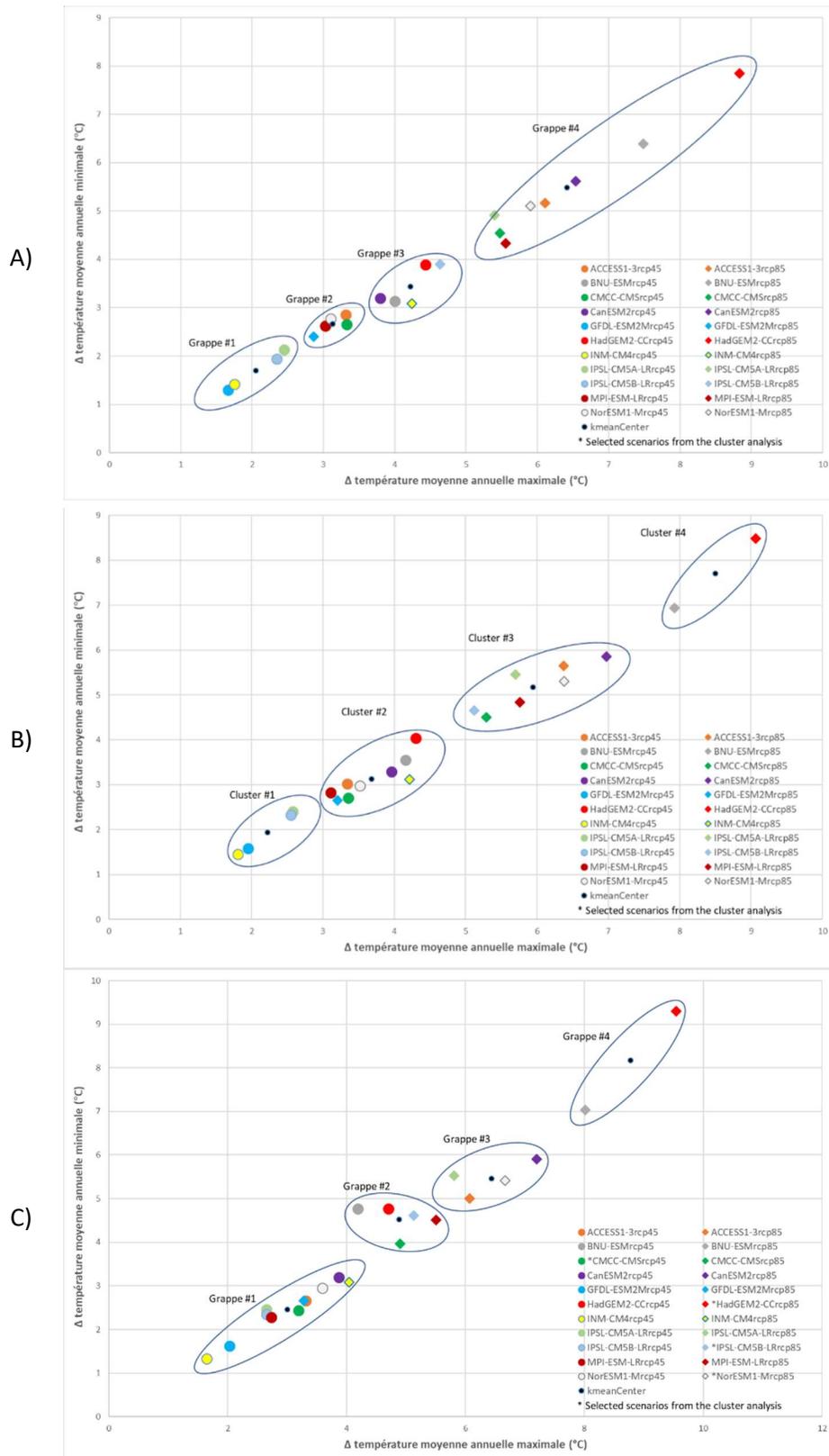


Figure 211 : Sélection des scénarios climatiques proposés par une sous-sélection du groupe CMIP 5 Analyse de réchauffement climatique utilisant différents modèles climatiques et deux hypothèses d'émissions pour A) la piste d'atterrissage de Tasiujaq, B) la piste d'atterrissage de Puvirnituk et C) la route d'accès à l'aéroport de Saalluit.

2.6.1 LES PENTES DOUCES DE LA PISTE D'ATTERRISSAGE DE TASIUJAQ

Pour établir l'efficacité de la pente douce de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, la méthode de calcul basée sur la correction de la température à l'interface (CTI) a été utilisée. Cette méthode utilise une relation empirique entre le réchauffement de la température moyenne annuelle et la marge de sécurité requise pour assurer la protection de l'infrastructure durant sa vie utile (section 2.3.3.1). Le scénario climatique INM-CM4-rcp85 (scénario pessimiste modéré, grappe#3, figure 211A) a été utilisé pour estimer le réchauffement de la température moyenne annuelle pour la période 2020-2050. La figure 212 illustre la variabilité des températures annuelles moyennes de l'air proposées par ce scénario pour la période 1950-2100 et la ligne pleine illustre la tendance générale (Polynomiale de degré 2).

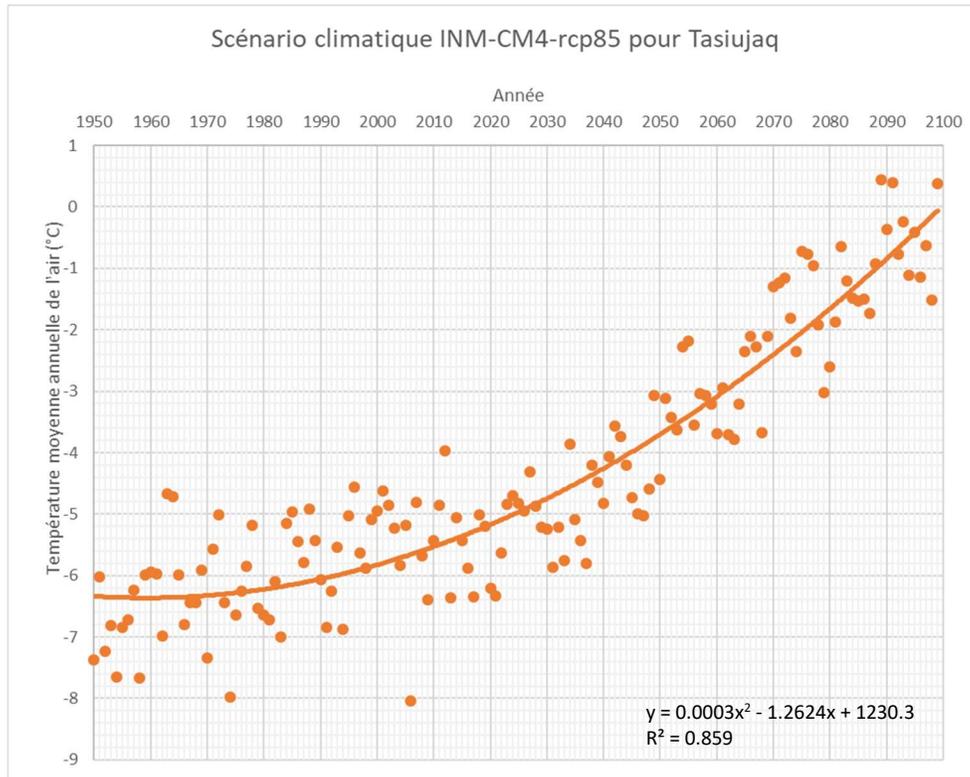


Figure 212 : Températures moyennes annuelles de l'air pour la période 1950-2100 projetées par le scénario climatique INM-CM4-rcp85, communauté de Tasiujaq, Nunavik.

L'équation de la courbe de tendance présentée à la figure 212 a été utilisée pour déterminer les températures moyennes annuelles en 2020, 2030, 2040 et 2050. En utilisant la relation illustrée pour un remblai de 3,5 m présenté à la figure 172, une marge de sécurité en fonction du réchauffement proposé par le scénario sélectionné a été déterminé pour chaque décennie. Le tableau 73 indique la température moyenne prévue par le modèle pour les prochaines décennies, le réchauffement par décennie et la marge de sécurité à prévoir pour assurer la stabilité à long terme de l'ouvrage. Les observations réalisées à Tasiujaq indiquent que le régime thermique sous la pente douce s'est stabilisé avec une température à l'interface 0,3°C plus froide que la température du pergélisol (Figure 182), ce qui donne une marge de sécurité effective de 0,3°C. Cette information a été utilisée pour établir la marge de sécurité corrigée (Tableau 73) et illustrer son évolution dans le temps (Figure 213). Une marge de sécurité avec une valeur positive indique que le gradient thermique sous la pente douce est positif, donc que le pergélisol se réchauffera. À la lueur de cette analyse, les pentes douces installées le long de la piste d'atterrissage de Tasiujaq demeureront pleinement efficaces jusqu'en 2030, après quoi, l'extraction de chaleur en hiver sera insuffisante pour maintenir le pergélisol stable thermiquement.

Tableau 73 : Températures moyennes annuelles de l'air en 2020, 2030, 2040 et 2050 estimées à partir des projections climatiques (scénario INM-CM4-rcp85) et marge de sécurité requise pour les pentes douces, piste d'atterrissage de Tasiujaq, Nunavik.

Année	TMAA (°C)	Réchauffement (°C)	MS (3,5m)	MS corrigée
2020	-5,2		0	-0,3
2030	-4,8	0,4	0,3	0
2040	-4,3	0,9	0,6	0,3
2050	-3,7	1,5	1	0,7

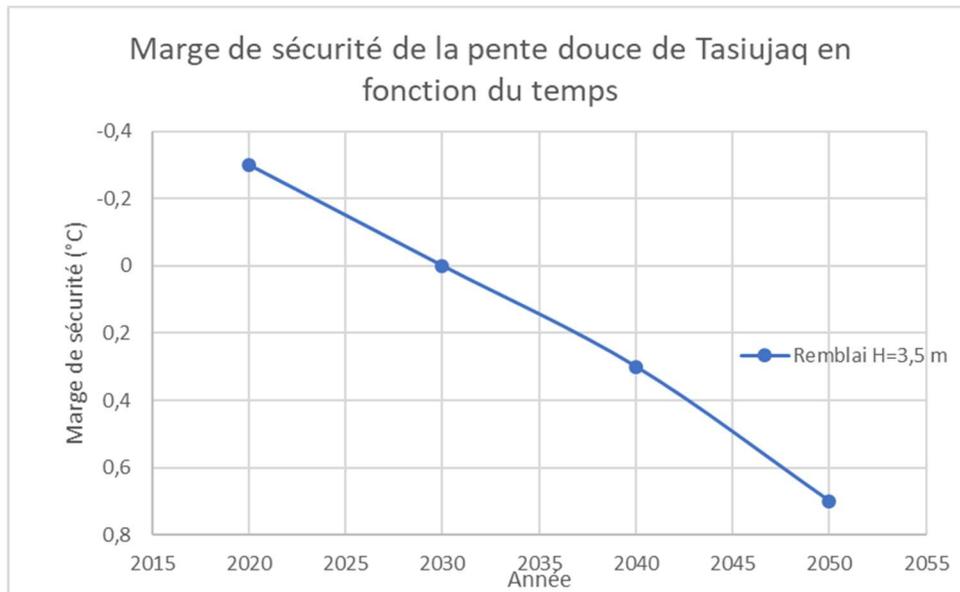


Figure 213 : Évolution de la marge de sécurité en fonction du temps selon le scénario climatiques INM-CM4-rcp85 pour les pentes douces mises en place le long de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.

2.6.2 REMBLAI À CONVECTION INSTALLÉ DANS L'ÉPAULEMENT DE LA PISTE D'ATTERRISSAGE DE PUVIRNITUQ

Pour établir l'efficacité des remblais à convection installés dans l'épaulement de la piste de Puvirnituaq, la méthode de calcul basée sur le bilan thermique a été utilisée. La méthode proposée par Kong *et al.* (2019) utilise des relations empiriques, développées par modélisation thermique, pour déterminer le bilan thermique d'un remblai sur pergélisol et ainsi déterminer la quantité de chaleur qui doit être extraite pour assurer la protection de l'infrastructure durant sa vie utile. La méthode a d'abord permis d'établir que le bilan thermique pour un remblai de 8 m d'épaisseur dans les conditions climatiques et géologiques de Puvirnituaq est de $6,4 \times \text{MJ/m}^2$ (voir section 2.4.2). Le bilan étant positif (plus de chaleur qui entre dans le système en été que de chaleur extraite en hiver), l'infrastructure doit être stabilisée thermiquement pour maintenir une stabilité mécanique à long terme.

La capacité d'extraction des systèmes de protection utilisant la convection peut être déterminée en utilisant la différence de température moyenne de l'air en hiver et la température du pergélisol (voir section 2.3.5.1). Plus la différence est forte entre les deux valeurs et plus le mécanisme de convection est efficace dans le système de protection. Pour le site de la piste de Puvirnituaq, le scénario climatique IPSL-CM5A-LR-rcp85 a été utilisé pour projeter l'évolution de la température moyenne hivernale de l'air pour la période 2020-2050. La figure 214 illustre la variabilité des températures moyennes hivernales de l'air proposées par ce scénario pour la période 1950-2100 et la ligne pleine illustre la tendance générale (Polynomiale de degré 2).

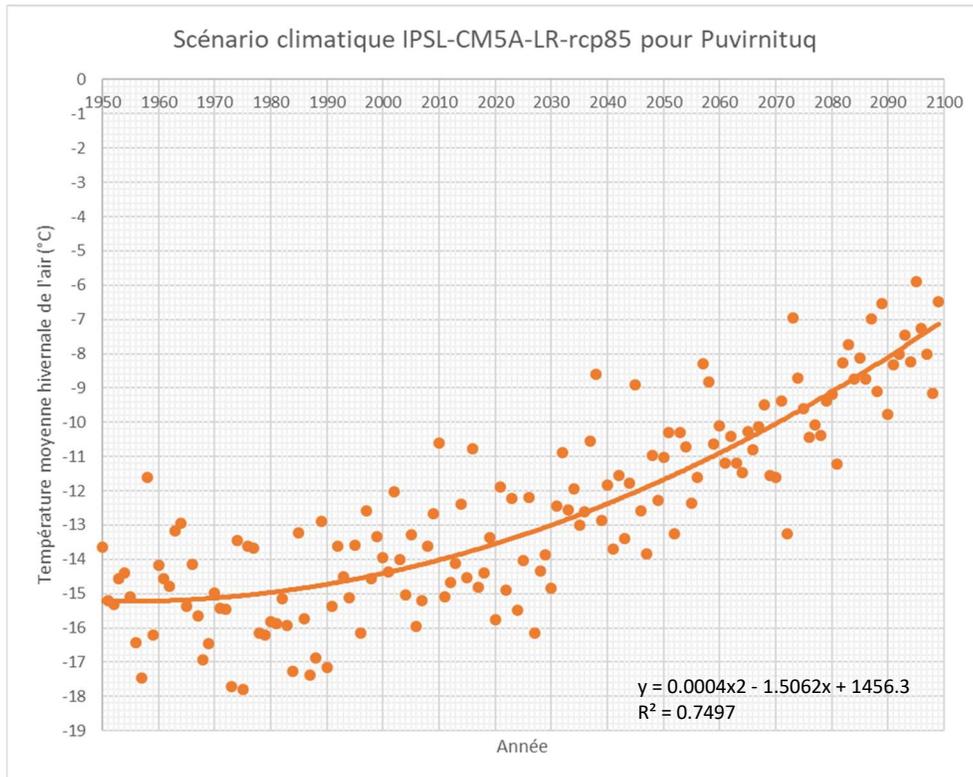


Figure 214 : Températures moyennes hivernales de l'air pour la période 1950-2100 projetées par le scénario climatique IPSL-CM5A-LR-rcp85, communauté de Puvirnituaq, Nunavik.

L'équation de la courbe de tendance présentée à la figure 214 a été utilisée pour déterminer les températures moyennes hivernales de l'air en 2020, 2030, 2040 et 2050. À partir de l'équation présentée au tableau 44, la capacité d'extraction de chaleur du remblai à convection pour différentes valeurs de ΔT et de hauteur de remblai a été déterminée (Tableau 74). Ce tableau indique la capacité d'extraction de chaleur du remblai à convection pour des remblais de 8,0 m et 4,5 m, ce qui correspond aux épaisseurs des remblais à l'égalité des épaulements du côté est (aval) et du côté ouest (amont) de la piste respectivement. Le tableau 74 indique également la capacité d'extraction du remblai de 8,0 m en utilisant un scénario de réchauffement climatique corrigé à partir des données climatiques réelles de 2020.

La figure 215 illustre l'évolution de la capacité d'extraction de chaleur des remblais à convection de la piste de Puvirnituaq en fonction du temps. Lorsque la capacité d'extraction atteint des valeurs positives, cela indique que le remblai à convection n'extrait plus de chaleur. Selon le scénario climatique sélectionné (IPSL-CM5A-LR-rcp85), il est probable que le remblai à convection du côté ouest de la piste ($H = 4,5\text{m}$) cessera d'extraire suffisamment de chaleur vers 2025 et autour de 2047 pour le remblai du côté est ($H = 8,0\text{ m}$). D'après le scénario climatique corrigé pour le remblai de 8,0 m, le remblai à convection continuera d'extraire de la chaleur en hiver après 2050 avec plus de 3000 MJ/m^2 d'extraction de chaleur. Toutefois, dans tous les cas, la quantité de chaleur extraite sera inférieure à la quantité d'extraction requise pour maintenir le régime thermique en équilibre, ce qui se traduira par un réchauffement progressif de la température du pergélisol sous le remblai au cours des prochaines décennies.

Il est important de noter que cette analyse considère un remblai à convection pleinement fonctionnel, ce qui n'est actuellement pas le cas, notamment pour le côté ouest de la piste où la neige obstrue les cheminées de ventilation. Les correctifs proposés, qui se résument essentiellement à rehausser les chemins de ventilations, devront être apportés pour assurer un fonctionnement optimal du système de protection.

Tableau 74 : Températures moyennes de l'air en hiver (TMH) en 2020, 2030, 2040 et 2050 estimées à partir des projections climatiques (scénario IPSL-CM5A-LR-rcp85) et capacité d'extraction de chaleur des remblais à convection en fonction du temps, piste d'atterrissage de Puvirnitug, Nunavik.

Année	TMH (°C)	TP (°C)	ΔT (°C)	$\Delta T_{corr.}$ (°C)	Capacité 8 m (est) (MJ/m ²)	Capacité 4,5 m (ouest) (MJ/m ²)	Capacité 8 m corr. (MJ/m ²)
2020	-13,5	-2,2	-11,3	-14,03	-2,2	-0,336	-5,7796
2030	-13	-2,2	-10,8	-13,53	-1,5	0,324	-5,1196
2040	-12,4	-2,2	-10,2	-12,93	-0,7	1,116	-4,3276
2050	-11,6	-2,2	-9,4	-12,13	0,3	2,172	-3,2716

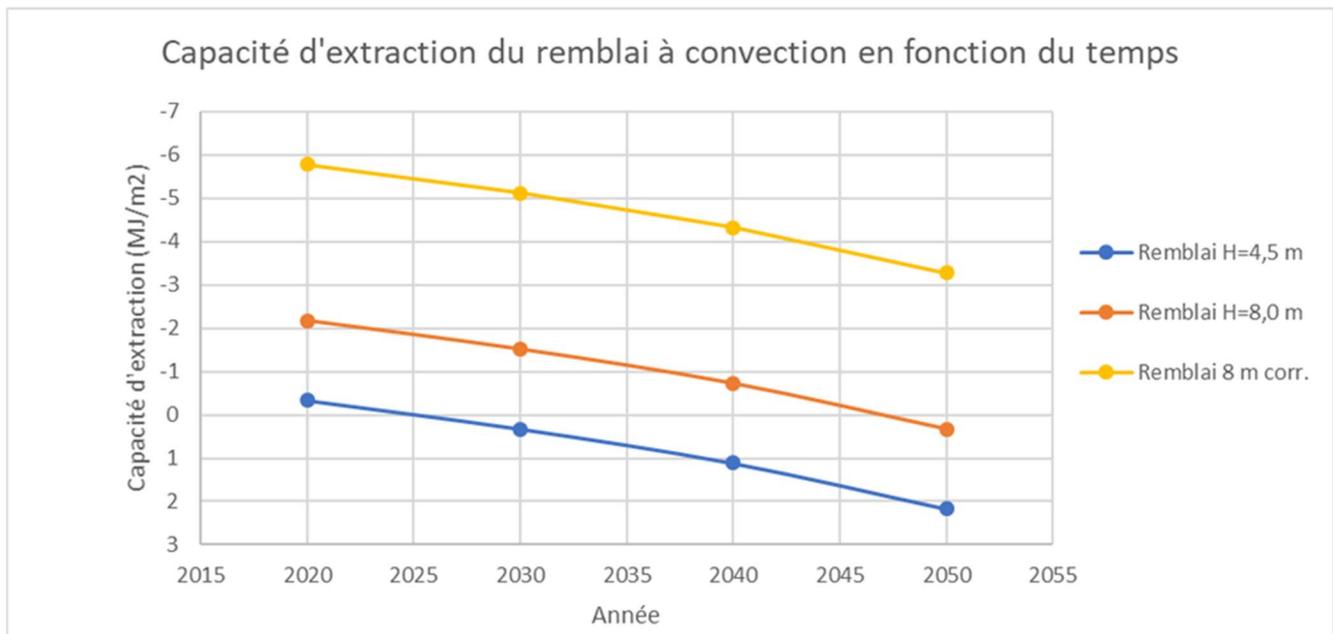


Figure 215 : Évolution de la capacité d'extraction de chaleur des remblais à convection installés dans l'épaulement de la piste d'atterrissage de Puvirnitug pour des hauteurs de remblai de 8,0 et 4,5 m et selon le scénario climatique IPSL-CM5A-LR-rcp85.

2.6.3 DRAINS THERMIQUES INSTALLÉS LE LONG DE LA ROUTE D'ACCÈS À L'AÉROPORT DE SALLUIT

Pour établir l'efficacité du drain thermique installé dans l'épaulement de la route d'accès à l'aéroport de Salluit, la méthode de calcul basée sur le bilan thermique a été utilisée. La méthode proposée par Kong *et al.* (2019) utilise des relations empiriques, développées par modélisation thermique, pour déterminer le bilan thermique d'un remblai sur pergélisol et ainsi déterminer la quantité de chaleur qui doit être extraite pour assurer la protection de l'infrastructure durant sa vie utile.

La capacité d'extraction des systèmes de protection utilisant la convection peut être déterminée en utilisant la différence de température moyenne de l'air en hiver et la température du pergélisol (voir section 2.3.5.2). Plus la différence est forte entre les deux valeurs et plus le mécanisme de convection est efficace dans le système de protection. Pour procéder à cette analyse, le scénario climatique NorESM1-M-rcp85 a été utilisé pour établir le réchauffement de la température moyenne hivernale de l'air au cours de la période 2020-2050. La figure 216 illustre la variabilité des températures moyennes hivernales de l'air proposées par ce scénario pour la période 1950-2100 et la ligne pleine illustre la tendance générale (Polynomiale de degré 2).

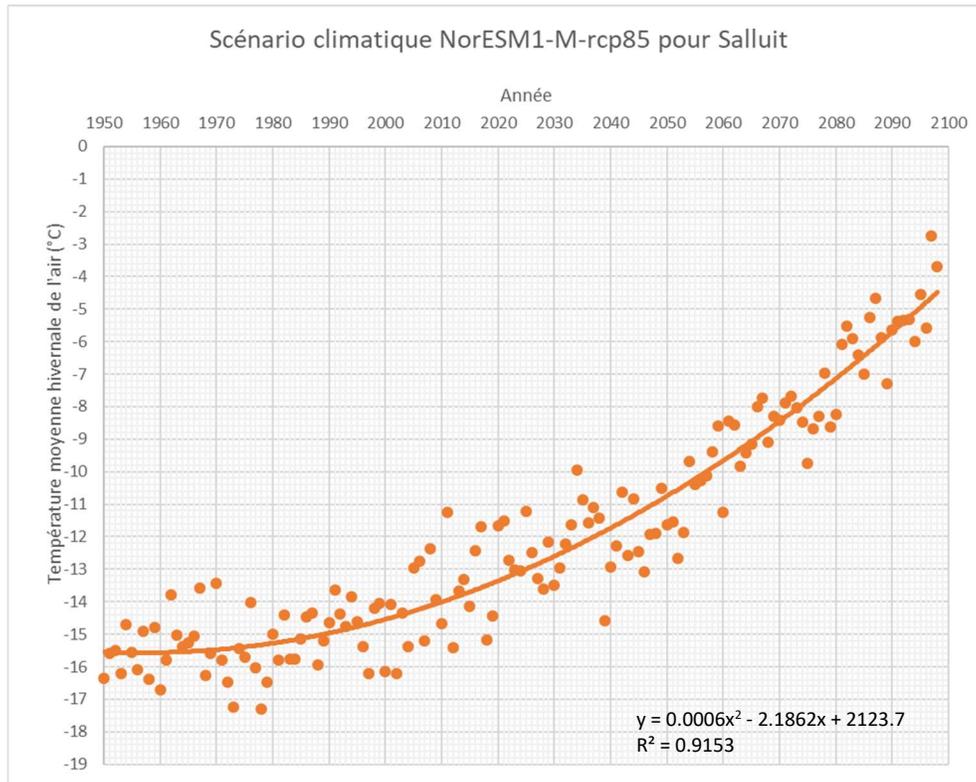


Figure 216 : Températures moyennes hivernales de l'air pour la période 1950-2100 projetées par le scénario climatique NorESM1-M-rcp85, communauté de Salluit, Nunavik.

L'équation de la courbe de tendance présentée à la figure 216 a été utilisée pour déterminer les températures moyennes hivernales de l'air en 2020, 2030, 2040 et 2050. En utilisant l'équation décrite à la section 2.3.5.2, la capacité d'extraction de chaleur du drain thermique pour différentes valeurs de ΔT et de hauteur de remblai a été déterminée. Le tableau 75 illustre la capacité d'extraction de chaleur du drain thermique pour des remblais de 2,6 m et 3,5 m, ce qui correspond aux épaisseurs des remblais à l'égalité des épaulements du côté aval de la route pour les sections d'essai A et B respectivement. Le tableau indique également la capacité d'extraction du remblai de 3,5 m en utilisant le scénario de réchauffement climatique corrigé ($\Delta T_{\text{corrigée}}$) à partir de la température moyenne hivernale observée en 2020. La figure 217 illustre l'évolution de la capacité d'extraction de chaleur du drain thermique de la route de Salluit en fonction du temps. Lorsque la capacité d'extraction atteint des valeurs positives, cela indique que le drain thermique cesse de fonctionner. Selon le scénario climatique utilisé, il est probable que le drain thermique ne soit plus en mesure de favoriser l'extraction de chaleur par convection autour de 2025 pour les sections de remblai d'une épaisseur de 2,6 m et autour de 2033 pour les remblais d'une épaisseur de 3,5 m. En utilisant le scénario climatique corrigé pour le remblai de 3,5m, le drain thermique maintient une certaine capacité d'extraction de chaleur jusqu'en 2045.

Il est important de noter que l'analyse considère un drain thermique pleinement fonctionnel, ce qui n'est actuellement pas le cas à Salluit. Les correctifs proposés à la section 1.9.1.1 devront être apportés pour assurer un fonctionnement optimal du drain.

Tableau 75 : Températures moyennes de l'air en hiver (TMH) en 2020, 2030, 2040 et 2050 estimées à partir des projections climatiques (scénario NorESM1-M-rcp85) et capacité d'extraction de chaleur du drain thermique en fonction du temps, route d'accès à l'aéroport de Salluit, Nunavik.

Année	TMH (°C)	TP (°C)	ΔT (°C)	ΔT corr. (°C)	Capacité 2,6 m (MJ/m ²)	Capacité 3,5 m (MJ/m ²)	Capacité 3,5 m corr. (MJ/m ²)
2020	-13,3	-2,2	-11,1	-12,2	-0,3	-0,7	-1,4
2030	-12,6	-2,2	-10,4	-11,5	0,2	-0,2	-0,9
2040	-11,7	-2,2	-9,5	-10,6	0,8	0,4	-0,3
2050	-10,7	-2,2	-8,5	-9,6	1,5	1,1	0,4

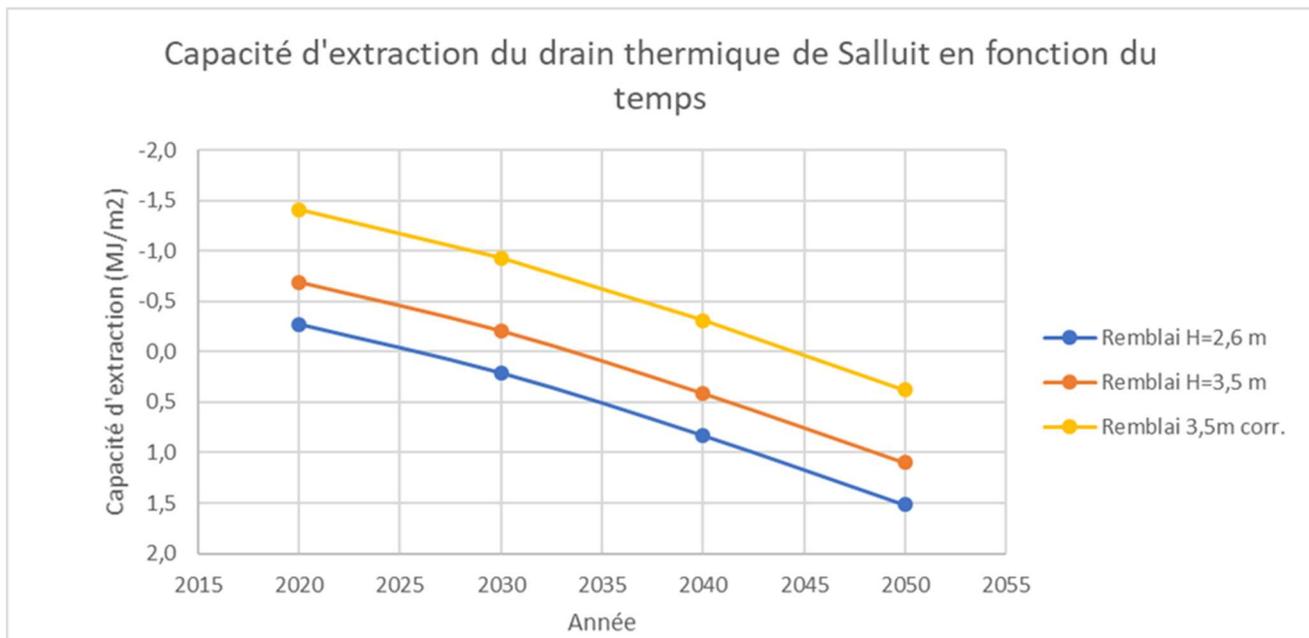


Figure 217 : Évolution de la capacité d'extraction de chaleur du drain thermique installé dans l'épaulement de la route de Salluit pour des hauteurs de remblai de 2,6 et 3,5 m et selon le scénario climatique NorESM1-M-rcp85.

2.7 DISCUSSION ET CONCLUSION PORTANT SUR LE VOLET 2

Les méthodes de conception ont été élaborées à l'aide de principes physique de transfert de la chaleur, mais elles ont été préparées dans un format qui facilite leur application en ingénierie. L'étalonnage des modèles d'analyse thermique utilisés pour le développement a été effectué à l'aide de données thermiques fiables recueillies à plusieurs sites d'essai dans le Nord canadien et les abaques de conception ont tous été validés de façon satisfaisante sur d'autres sites que celui utilisé pour leur développement. Les méthodes de conception sont considérées comme fiables, mais comportent certaines limites :

- En raison de la rareté des sites d'essai instrumentés dans les milieux pergélisolés, l'étalonnage et la validation des modèles sont fondés sur un nombre limité d'observations. Les modèles et les outils de conception développés doivent donc être davantage validés pour améliorer leur fiabilité.
- Les méthodes de conception des techniques de stabilisation thermique par convection sont valables pour les remblais à convection d'air (ACE) et le drain thermique utilisés dans le développement de la

méthode. La capacité d'extraction de chaleur des techniques de stabilisation utilisant d'autres types de matériaux peut différer sensiblement des estimations publiées dans la thèse de Kong (2019).

- L'effet de la chaleur advective provenant des mouvements latéraux de l'eau souterraine et du vent n'a pas été pris en compte dans l'analyse. Dans les cas où un transfert de chaleur significatif de ces mécanismes est attendu, la conception devrait prévoir une marge de sécurité supplémentaire. Il n'existe cependant actuellement aucun moyen d'estimer la marge de sécurité nécessaire pour compenser pleinement ces effets.

Les résultats de l'analyse de stabilité effectuée sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq confirment la validité de la méthode de conception pour la pente douce, le remblai à convection et le drain thermique. L'application de la méthode aux conditions de la piste de Puvirnituk et de la route de Salluit semble également indiquer que la méthode fonctionne dans les conditions spécifiques de ce site.

Des exemples d'application de la méthode ont également été faits pour les routes de Tasiujaq et d'Akulivik ainsi que pour la piste de Kangirsuk. Les exemples illustrent la méthodologie à suivre pour appliquer la méthode. Ils indiquent également que la stabilité thermique varie considérablement entre le centre et les épaulements des chaussées et qu'il n'est pas toujours possible de corriger la situation avec les méthodes connues.

Les trois cas de validation et les trois cas d'application indiquent par ailleurs que les conditions du Nunavik se situent dans le bas des courbes développées pour les abaques de conception des systèmes convectifs. Les valeurs de ΔT (différence entre la température moyenne hivernale de l'air et la température du pergélisol) varie entre -10,2 et -13,5 pour les 6 sites étudiés. Les courbes produites pour le ACE ont été produites pour des ΔT variant entre -14,6°C et -17,4°C, alors que pour le drain thermique, les courbes ont été produites pour des valeurs inférieures à -12,5°C. Bien que les équations permettent d'extrapoler au-delà de ces valeurs, les abaques devront être revus pour bien refléter les conditions du Nunavik. Pour les valeurs observées sur plusieurs sites du Nunavik, la capacité d'extraction varie de modérée à faible dépendant des conditions du site et de l'épaisseur de remblai à protéger.

Les plus récentes projections du climat futur pour le Nunavik, sélectionnées à partir de l'ensemble des simulations climatiques globales du CMIP5, proposent une série de trajectoires allant d'un faible réchauffement (projections optimistes) à un réchauffement marqué du climat (projections pessimistes). Pour chacune des techniques/méthodes d'adaptation utilisées au Nunavik (pentes douces, remblai à convection et drain thermique), une analyse de performance pour la période 2020-2050 a été réalisée en utilisant les abaques de conception et les intrants climatiques requis issus des projections pessimistes probables sélectionnées par l'algorithme K-moyenne (grappe#3). D'après les résultats de cette analyse, une perte de performance à long terme est anticipée pour l'ensemble des techniques actuellement à l'usage au Nunavik. Ces techniques/méthodes d'adaptation étant passive, leurs performances dépendent de certains paramètres climatiques qui régissent l'efficacité des échanges thermiques conductifs (pente douce) et convectifs (remblai à convection et drain thermique) entre l'atmosphère, le remblai et le pergélisol sous-jacent. Par conséquent, autant pour les pentes douces que pour les systèmes à convection (remblai à convection et drain thermique), ce sont les températures hivernales qui déterminent la capacité d'extraction de chaleur de ces systèmes. Malheureusement, les hivers plus doux proposés par les projections pessimistes probables sélectionnées diminueront considérablement la capacité d'extraction de chaleur des systèmes actuellement en places. Si les projections climatiques sélectionnées s'avèrent juste, un arrêt de fonctionnement des systèmes (efficacité nulle) devrait s'observer autour de 2030 dans le cas des pentes douces à Tasiujaq et du drain thermique à Salluit et autour de 2045 pour le remblai à convection à Puvirnituk. À noter qu'il est toutefois difficile de prédire l'évolution future du climat avec certitude en raison de nombreuses incertitudes découlant des limitations physiques des modèles climatiques et de notre compréhension et nos connaissances actuelles sur les développements socioéconomiques et technologiques futurs qui régissent

les émissions (GES, aérosols, etc.) dans l'atmosphère. Conséquemment, la décision d'utiliser des projections considérées comme pessimistes probables dans l'analyse de performance à long terme entraîne nécessairement des résultats conservateurs. Ces résultats pourraient être toutefois révisés dans une étude ultérieure en utilisant des projections climatiques plus à jours comme celles récemment proposées par le CMIP6.

Lors de la conception de nouvelles infrastructures ou l'adaptation de celles existantes, le dimensionnement des techniques d'adaptation devra prendre en considération l'évolution des paramètres de conception au cours de la vie utile de l'ouvrage afin de maintenir l'efficacité des systèmes à long-terme, et ce, malgré le réchauffement climatique anticipé. Il nous apparait cependant évident que le champ d'application des techniques d'extraction de chaleur par convection diminuera considérablement dans les prochaines décennies au Nunavik. Il faudra dorénavant miser davantage sur des techniques d'extraction active de chaleur ou de renforcement des structures et d'amélioration des sols par l'enlèvement et le remplacement ou par le dégel induit des sols sensibles au dégel. Ces techniques doivent cependant être développées et expérimentées si on veut pouvoir les mettre en application dans les prochaines décennies.

3



VOLET 3 : DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE QUANTITATIVE D'ÉVALUATION DU RISQUE POUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN ZONE DE PERGÉLISOL

3.1 MISE EN CONTEXTE

Le risque est le produit de la probabilité qu'un danger survienne au cours d'un intervalle de temps donné (aléa) et les conséquences directes ou indirectes de ce dernier sur la fonctionnalité d'une infrastructure et ses usagers. Le niveau de risque s'exprime souvent en termes de dommages anticipés. L'aléa est la probabilité de l'occurrence d'un danger, tandis que la conséquence combine les coûts de réhabilitation ainsi que les coûts encourus par les populations qui dépendent de l'infrastructure. Il existe une multitude de dangers communs qui affectent les remblais sur pergélisol, par exemple les tassements liés au dégel, les glissements de la couche active, les affaissements de ponceau et les effondrements de remblai au-dessus de cavités formées dans le pergélisol (ex. : fonte de coins de glace). Les conséquences directes de ces aléas sont quantifiables, par exemple, en estimant les coûts reliés à la réhabilitation de l'ouvrage. Les conséquences indirectes, telles les blessures ou la perte d'un service essentiel, sont plus difficiles à quantifier et nécessitent l'utilisation de facteurs d'échelle sociale permettant de les pondérer selon leur importance en fonction du contexte d'application.

Récemment, deux approches d'analyses de risques ont été développées et utilisées au Nunavik. Les deux approches sont : 1) la procédure d'évaluation du risque développée pour les communautés nordiques qui exploite les données contextuelles et géotechniques recueillies sur les sites étudiés pour déterminer les aléas et qui adopte une approche d'analyse multicritère pour établir le risque associé à ces aléas (Allard *et al.*, 2019) et 2) la méthode d'analyse quantitative des aléas pouvant affecter les infrastructures de transport et des risques associés qui a été développée dans le cadre du programme de recherche Arquluk et avec le support financier du programme ArcticNet (Brooks, 2019). À partir des concepts et procédures proposées par ces deux approches, ce volet du projet de recherche vise à développer, en concertation avec les gestionnaires du MTQ et de l'ARK, une approche d'évaluation quantitative du risque adaptée spécifiquement au contexte des infrastructures de transport du Nunavik.

3.2 OBJECTIFS

L'objectif principal de ce volet consiste à développer une méthode quantitative de gestion de risques basée sur les risques naturels pour les infrastructures de transports en région de pergélisol dans le contexte climatique actuel et projeté. Pour y arriver, les objectifs spécifiques suivants devront être atteints :

- Développer des indicateurs de risques en lien avec l'évolution des aléas naturels afin d'optimiser le suivi, la planification des interventions et la gestion de risques des infrastructures et des réseaux de transport ;
- Poursuivre le développement d'une méthodologie quantitative d'estimation des risques naturels pour les infrastructures de transport en région de pergélisol afin de soutenir leur conception, leur gestion ainsi que la planification des réseaux de transport.

3.3 DÉFINITIONS ET DESCRIPTIONS DES CONCEPTS EN ÉVALUATION DU RISQUE

3.3.1 LES DANGERS VERSUS LES ALÉAS NATURELS

Les dangers naturels sont définis comme étant des phénomènes naturels susceptibles d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement. Le terme danger réfère à une situation possiblement dangereuse, toutefois, ce terme fait abstraction à la probabilité de son occurrence. Par conséquent, pour un milieu donné, plusieurs dangers peuvent être identifiés, toutefois, si la probabilité d'occurrence demeure nulle ou faible, ces derniers ne seront pas considérés comme des aléas naturels. En présence d'une probabilité d'occurrence d'un danger, c'est-à-dire qu'un certain niveau de certitude persiste quant à son occurrence, mais que sa prédiction demeure difficilement prévisible, on parle alors d'un aléa naturel. Par définition, ces deux termes sont assez similaires, mais la distinction repose essentiellement sur l'identification possible d'une situation dangereuse pour l'un (danger naturel) et l'estimation de la probabilité que cette situation se produise (aléa naturel).

Les aléas naturels sont des phénomènes naturels. De nombreuses caractéristiques permettent de décrire et classer ces derniers afin de mieux comprendre la nature des phénomènes, mais également de pondérer leurs sévérités selon les conséquences sur les éléments du milieu exposés. Ces éléments se résument généralement à :

- Le type d'aléa ;
- L'amplitude/ l'intensité ;
- La probabilité d'occurrence ou la récurrence ;
- La localisation et l'étendue spatiale ;
- La vitesse de déclenchement et évolution du phénomène (cinétique) ;
- La durée de l'impact (la foudre par rapport à une tempête de neige) ;
- La prévisibilité (une tempête de neige par rapport à un séisme) ;
- Le potentiel destructif (une rupture de barrage par rapport à une panne) et
- La période d'occurrence (le moment de la journée, de la semaine ou de l'année où l'aléa est susceptible de survenir)

Lors de la manifestation d'un aléa dit primaire dans un milieu donné, il est parfois possible que ce dernier entraîne l'occurrence d'autres aléas (aléas secondaires) qui vont interagir voire se combiner entre eux. Cette combinaison et interaction sont souvent sujettes à accroître les conséquences sur le milieu.

3.3.2 LA VULNÉRABILITÉ

« La vulnérabilité représente une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux qui prédispose les éléments exposés à un aléa à subir des conséquences (Ministère de la Sécurité Publique, 2008). La vulnérabilité fait donc référence à un ensemble de caractéristiques intrinsèques d'un milieu ou d'éléments (infrastructures ou populations) qui permettent d'évaluer les conséquences néfastes qui découlent de l'occurrence d'un aléa. La vulnérabilité met donc en évidence l'incapacité ou l'inaptitude d'un milieu et de ses composantes à résister à un aléa ou maintenir ses fonctions suite à sa manifestation. » (Ministère de la Sécurité publique, 2008)

Il s'agit ici d'une composante très large dans l'évaluation d'un risque, car elle implique une analyse des conséquences potentielles autant au niveau des infrastructures qu'au niveau des opérations et le bien-être socioéconomique des usagers à l'échelle locale sans exclure de possibles conséquences à l'échelle régionale. Le concept de vulnérabilité fait donc directement référence aux éléments d'un milieu exposés à un aléa potentiel et

leur susceptibilité à subir des préjudices ou des dommages à cause de ce dernier. Parmi les éléments exposés, on fait référence généralement aux personnes, biens, réseaux, infrastructures, activités et services, qui ne sont pas nécessairement exposés physiquement à l'aléa mais qui peuvent également en subir les contrecoups de manière indirecte.

Le niveau de vulnérabilité face à un ou plusieurs aléas est fonction principalement du degré d'exposition, de la valeur ou de l'importance stratégique ainsi que de la sensibilité (tolérance) des éléments exposés. Le degré d'exposition face un aléa est intimement lié aux caractéristiques de l'aléa en question, mais dépend également du nombre d'éléments exposés (concentration). En ce qui concerne les aléas associés au dégel du pergélisol, ces derniers, à l'exception de quelques importants glissements de terrain, demeure spatialement limités, affectant ainsi généralement qu'une petite partie de l'infrastructure. Toutefois, certains secteurs, par la concentration élevée d'éléments exposés qu'on y retrouve (ex. : terminal, instruments d'aide à la navigation, lumières, etc.) se retrouvent donc plus vulnérables par rapport à d'autres secteurs moins densément occupés. La considération du nombre d'éléments exposés peut s'avérer utile dans la quantification des conséquences indirectes qui découlent de l'occurrence d'un aléa. Par exemple, il est entendu que la vulnérabilité face à un aléa augmentera proportionnellement avec le nombre d'habitants d'une communauté. À juste titre, une interruption des services aériens en raison de la fermeture d'une piste n'aura pas les mêmes conséquences indirectes à Tasiujaq qu'à Salluit, simplement de par le nombre d'individus exposés.

La valeur ou l'importance stratégique des éléments exposés réfère à ce que représente l'élément en cause pour les personnes et la collectivité (Ministère de la Sécurité Publique, 2008). Les éléments d'un milieu ayant une importance stratégique particulière, tels que les pistes d'atterrissage jugées infrastructures essentielles dans le contexte du Nunavik, sont donc davantage vulnérables face au même aléa qu'un élément exposé de second ordre (ex. : route secondaire). La valeur et l'importance stratégique d'une infrastructure comme les pistes d'atterrissage peuvent toutefois varier d'un milieu à un autre selon le contexte de transport intermodal disponible. À titre d'exemple, une piste d'atterrissage dans une communauté isolée dont le transport aérien constitue la seule liaison disponible à l'année sera nécessairement plus vulnérable face à un même aléa qu'une piste d'atterrissage en milieu non-isolé desservie par des liens routiers.

Enfin, la sensibilité fait référence davantage au niveau de tolérance d'un élément exposé face à un aléa et prédomine sur les autres aspects qui déterminent la vulnérabilité à savoir le degré d'exposition et l'importance stratégique. En d'autres mots, un élément exposé qui n'est pas sensible présentera un faible niveau de vulnérabilité (conséquences nulles, voire négligeables). Par exemple, dans le cas concret des infrastructures de transports linéaires au Nunavik construites sur pergélisol, les routes d'accès seront généralement moins vulnérables que les pistes d'atterrissages en raison de leurs plus grandes tolérances aux déformations provoquées par le dégel du pergélisol et ce, en regard des normes de sécurité en vigueur.

La réduction de la sensibilité des éléments exposés constitue par ailleurs, dans la majorité des cas, le seul levier pour réduire la vulnérabilité et ultimement le risque qui en découle. Cette diminution de la vulnérabilité passe bien souvent par l'intégration d'éléments qui permettent d'accroître la résilience. Il s'agit encore une fois d'un concept très large qui peut s'implanter dans une multitude de facettes et à différents niveaux au sein d'un milieu exposé. En présence d'un risque probable, la notion de résilience repose en la capacité à anticiper les aléas, à leur faire face, à résister à leurs effets et à s'en rétablir le plus rapidement possible de telles sortes que les conséquences demeurent négligeables ou en-dessous d'un niveau jugé acceptable. Toujours dans le contexte des infrastructures de transports construites sur le pergélisol, la résilience peut passer par la mise en place de méthode de mitigation pour contre le dégel du pergélisol visant à stabiliser thermiquement ou mécaniquement l'infrastructure et le pergélisol sol sous-jacent, mais également par la mise en place de mécanismes, d'outils et de

ressources afin d'anticiper les conséquences et agir rapidement si nécessaire en vue de maintenir ou rétablir le plus rapidement possible l'opérabilité de l'infrastructure.

3.3.3 LES CONSÉQUENCES

Les conséquences se définissent comme étant les impacts humains, sociaux ou économiques, directs ou indirectes, qui résultent de l'exposition d'un élément à un aléa en particulier. Encore une fois, la notion de conséquence est extrêmement large et la ramification des composantes permettant de les évaluer est infinie. Les conséquences sont intrinsèquement reliées aux vulnérabilités d'un milieu aux éléments exposés. En d'autres mots, une infrastructure vulnérable à un aléa, si elle y est exposée, sera sujette à subir des conséquences (atteinte ou dommage) d'une ampleur généralement proportionnelle à son niveau de vulnérabilité. En prenant encore une fois l'exemple d'un tassement au dégel qui affecte une route d'accès ou une piste d'atterrissage, la vulnérabilité plus élevée des pistes d'atterrissage attribuable, entre autres, à une plus faible tolérance aux tassements pour des raisons de sécurité, entraînera des conséquences plus importantes pour une même exposition à un aléa d'ampleur similaire.

3.3.4 LE RISQUE

Le concept de risque en sécurité civile implique l'interaction de deux composantes soit : la possibilité que se produise en un endroit donné, un aléa, et des éléments exposés et vulnérables à cet aléa tels que des populations, des activités ou infrastructures (Figure 218). Ainsi, le risque résulte de l'interaction entre un aléa potentiel et la vulnérabilité du milieu exposé à son égard. Cette combinaison d'éléments met donc en évidence le fait qu'un aléa jugé comme étant probable est susceptible d'entraîner des conséquences néfastes sur le milieu touché (Ministère de la Sécurité Publique, 2008). Cette interaction fait en sorte que ni les aléas ni la vulnérabilité ne permettent à eux seuls de déterminer un niveau de risque. Par exemple, l'occurrence d'un aléa dans un milieu où il y a absence d'éléments susceptibles d'être impactés par ce dernier ne constitue pas un risque (Figure 218A). À l'opposé, ce même aléa, s'il se produit dans un milieu occupé par une population et que des bâtiments et des infrastructures y sont vulnérables (Figure 218B), peut toutefois représenter un risque important.

« La seule reconnaissance de la possibilité qu'un aléa survienne dans un milieu où se trouvent des éléments vulnérables à celui-ci suffit à identifier la présence d'un risque. Toutefois, pour connaître le niveau de risque ou son importance, une analyse est nécessaire. Celle-ci doit alors chercher à déterminer les probabilités d'occurrence de l'aléa en cause en fonction de divers degrés d'intensité, ainsi que les conséquences potentielles pouvant être associées à sa manifestation, à la lumière des résultats de l'examen de la vulnérabilité des éléments exposés. » (Ministère de la Sécurité publique, 2008)

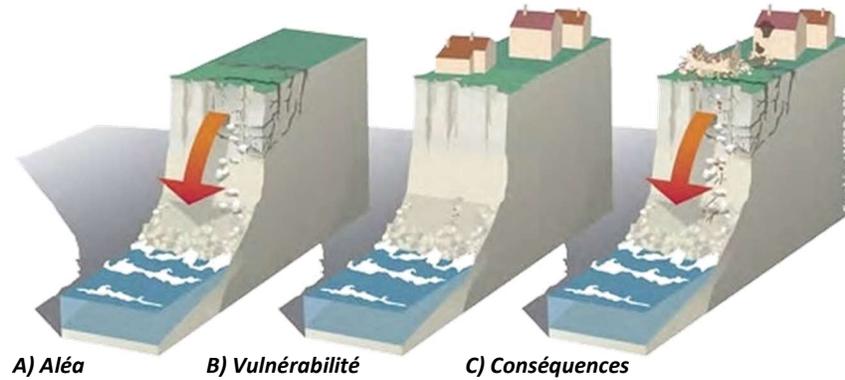


Figure 218 : Schéma conceptuel illustrant l'interaction entre aléa, vulnérabilités des éléments exposés et conséquences, fondement de l'analyse de risque.

Basé sur l'interaction entre les différentes composantes requises pour effectuer une analyse du risque, la forme de l'équation pour quantifier le niveau de risque demeure relativement simple et se présente généralement sous la forme suivante :

$$Risque = (A \cdot V \cdot C) - R \quad \text{Équation 3-1}$$

Toutefois, malgré cette forme assez simple, la quantification du risque demeure dans les faits extrêmement complexe. Le défi repose en effet sur la quantification de chacun des paramètres requis de l'équation plutôt que dans sa simple résolution. La simple estimation des probabilités d'occurrence (A), de la vulnérabilité des éléments exposés (V) et des conséquences potentielles associées (C) représente un défi de taille de par les multitudes de facteurs permettant de les quantifier (Tableau 76).

Tableau 76 : Facteurs permettant de définir la sévérité d'un aléa, la vulnérabilité d'un milieu ou d'un élément exposés, leurs résiliences et les conséquences potentielles suite à l'occurrence d'un aléa en particulier.

Aléas (A)	Vulnérabilité (V)	Conséquence (C)	Résilience (R)
<ul style="list-style-type: none"> • Type • Vitesse de déclenchement/évolution • Localisation • Étendu spatiale • Amplitude (intensité) • Fréquence • Récurrence 	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition de l'infrastructure • Sensibilité de l'infrastructure <ul style="list-style-type: none"> ○ Tolérance ○ Fonction 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts humains <ul style="list-style-type: none"> ○ Blessures ○ Pertes de vie • Coûts sociaux <ul style="list-style-type: none"> ○ Interruption de service • Coûts de réparation <ul style="list-style-type: none"> ○ Matériaux ○ Machinerie ○ Personnels ○ Conception 	<ul style="list-style-type: none"> • Mitigation <ul style="list-style-type: none"> ○ Remblai à convection ○ Drain thermique ○ Remblai à pente adoucie • Capacité à répondre <ul style="list-style-type: none"> ○ Éducation et formation ○ Vigilance • Capacité à restaurer <ul style="list-style-type: none"> ○ Ressources humaines • Disponibilité des matériaux

3.4 PROCÉDURE GÉNÉRALE EN GESTION DES RISQUES

L'analyse du risque vise à estimer un niveau de risque attribuable à un aléa susceptible de se produire, d'affecter un élément d'un milieu et ultimement entrainer des conséquences. Ce type d'analyse requiert un examen approfondi et assez raffiné afin, d'une part, d'identifier les dangers et d'établir la sévérité respective de ces derniers et d'autre part, de procéder à une analyse détaillée des caractéristiques des aléas en cause et de la vulnérabilité des éléments exposés. De manière générale, la procédure d'évaluation du risque, telle que présentée à la figure 219, cherche à répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les dangers potentiels ? (Étape 1 et 2)

- Quelles sont les probabilités qu'ils se produisent ? (Étape 3.1)
- Quel est le niveau de vulnérabilité des éléments exposés ? (Étape 3.2)
- Quelles seraient les conséquences s'ils se manifestaient ? (Étape 3.2)
- Est-ce que le niveau de risque est acceptable ? (Étape 4)
- Est-ce qu'un traitement du risque est requis ? Si oui, par quelles mesures ? (Étape 5)

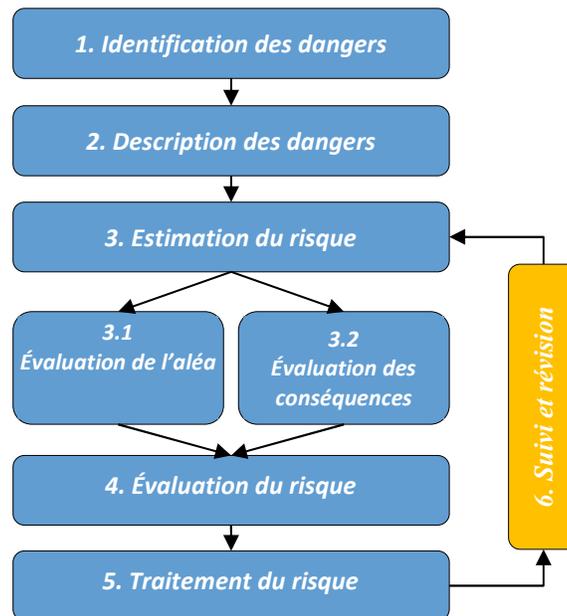


Figure 219 : Procédure générale en gestion des risques (adapté de Sécurité publique Canada, 2011).

Dans la plupart des cas, les réponses à ces questions se fondent sur des hypothèses souvent partielles et teintées d'une certaine subjectivité, ce qui nécessairement entraîne un certain degré d'incertitude dans l'analyse du risque. Selon la quantité et la qualité des données accessibles et du type d'approche préconisée (analyse quantitative, qualitative ou hybride), le résultat de cette combinaison des probabilités d'occurrence et des conséquences pourra s'exprimer de manière qualitative, quantitative ou selon une combinaison des deux approches. Sommairement, l'analyse de risques qualitative utilise des échelles descriptives pour décrire les probabilités d'occurrence de l'aléa en cause et l'ampleur des conséquences potentielles tandis que l'analyse de risques quantitative utilise des fonctions (relation mathématique) pour déterminer à la fois les probabilités d'occurrence de l'aléa en cause et l'ampleur de ses conséquences potentielles.

L'estimation du risque (étape 3), fait référence à l'importance attribuée à un risque en fonction de l'évaluation des probabilités d'occurrence de l'aléa en cause et de ses conséquences potentielles. Ainsi, une fois les probabilités d'occurrence et les conséquences potentielles déterminées (étapes 3.1 et 3.2), toutes les variables nécessaires à l'estimation du niveau de risque (équation 3-1) sont alors connues. Un exemple très commun d'évaluation du niveau de risque, qui repose sur l'utilisation de deux échelles qualitatives, est présenté à la figure 220.

		Pondération	Conséquences				
			Négligeables	Mineures	Modérées	Majeures	Sévères
			1	2	3	4	5
Probabilités	Presque certain	A	Modéré	Élevé	Extrême	Extrême	Extrême
	Probable	B	Modéré	Modéré	Élevé	Extrême	Extrême
	Possible	C	Faible	Modéré	Modéré	Élevé	Extrême
	Improbable	D	Faible	Faible	Modéré	Modéré	Élevé
	Rare	E	Faible	Faible	Faible	Modéré	Modéré

Figure 220 : Exemple de matrice de classification des risques mettant en relation la probabilité d'occurrence d'un aléa et ses conséquences.

Dans cette classification, l'importance des probabilités d'occurrence est classée en cinq niveaux de probabilités (presque certain, probable, possible, improbable et rare) et les conséquences potentielles également en cinq niveaux de conséquences (négligeables, mineures, modérées, majeures et sévères). Une fois ces deux paramètres classés (probabilités et conséquences), la mise en relation à l'intérieur d'une matrice du risque permet de classer le niveau de risque attribuable à un aléa selon différents niveaux. Dans l'exemple de la figure 220, on retrouve quatre niveaux : *extrême*, *élevé*, *modéré* et *faible*. Même si cette classification du niveau de risque s'appuie sur des critères plutôt qualitatifs, il est important de mentionner que l'attribution des classes de probabilité et de conséquences pour un aléa donné peuvent être supportée par une analyse soit de nature qualitative ou quantitative.

L'étape d'évaluation du risque (étape 4) vise à mettre en relation la classification du niveau de risque effectuée à l'étape antérieure et ainsi évaluer si le risque est géré de façon satisfaisante ou s'il requiert la mise en œuvre de mesures additionnelles en vue de minimiser son importance. En présence de plusieurs risques nécessitant des mesures additionnelles, une priorisation de traitement peut s'avérer nécessaire. Cette priorisation peut se baser sur la classification du niveau de risque pour les différents aléas selon une méthode qui accorde plus de valeur aux conséquences qu'aux probabilités d'occurrence ou selon un niveau d'acceptabilité défini par des seuils arbitraires (ex. protection de la vie prioritaire versus celle des biens).

Ultimement, la dernière étape vise, si jugé nécessaire, à traiter le risque (étape 5). Elle constitue la phase centrale de la gestion des risques et vise essentiellement à mettre en place les actions ou les mesures qui permettront de minimiser les risques auxquels sont exposés les éléments lors de l'occurrence d'un aléa. Il importe de réitérer la forme simple de l'équation du risque qui est en fait un produit des aléas et des conséquences, par conséquent, les mesures devront permettre d'agir sur l'aléa, sur la vulnérabilité du milieu ou idéalement sur les deux. Dans le cas des aléas naturels, leurs aspects hautement imprévisibles et difficilement contrôlables limitent habituellement l'implantation de mesures de contrôle efficaces visant à traiter spécifiquement leurs sévérités (probabilités et intensités). En contrepartie, les moyens possibles pour atténuer la vulnérabilité des éléments exposés (réduction des conséquences), en présence d'une bonne compréhension de la dynamique de ou des aléas potentiels, sont généralement multiples et efficaces. De tels moyens viseront essentiellement à améliorer la prévention, la préparation, l'intervention et le rétablissement d'un milieu, bref à accroître sa résilience face à un aléa.

La mise en place de mesures de traitement des risques ne suffit généralement pas à éliminer complètement le risque. Le risque zéro n'existant pas, la fraction résiduelle après traitement peut souvent nécessiter un suivi et une réévaluation subséquente (étape 6). Cette situation est d'autant plus à propos dans un contexte d'aléa liés au dégel du pergélisol pour lesquels les incertitudes du climat, principal facteur déterministe, évolue de manière non linéaire et difficilement prévisible. Dans un tel contexte, un système de suivi et de révision doit être établi afin de suivre l'évolution des risques. Outre l'évolution temporelle de certains facteurs susceptibles d'amplifier la sévérité d'un aléa, une réévaluation du risque peut s'avérer nécessaire afin de tenir compte : de nouvelles

connaissances ou données, de l'apparition de nouveaux aléas, de modifications au sein du milieu ou de l'élément exposé ayant pour effet d'accroître la vulnérabilité ou simplement pour évaluer l'efficacité de la mise en place de certaines mesures de mitigation. Un tel processus itératif permet, outre d'accroître la vigilance à l'égard des aléas potentiels et leurs conséquences, d'assurer une amélioration continue dans un cadre cohérent, rigoureux et transparent. Notez que l'étape 6, présentée à la figure 219, n'apparaît pas initialement dans l'ouvrage cité (Sécurité publique Canada, 2011) et a été ajoutée afin de refléter le processus d'évaluation quantitative du risque proposée dans la présente étude.

Pour la suite de ce chapitre, la structure du texte respecte l'ordre et la nomenclature proposée par la procédure générale en gestion des risques présentée à la figure 219. De cette manière, nous espérons que le lecteur sera en mesure de bien comprendre la portée de la méthode quantitative d'estimation du risque développée pour certains aléas naturels en région de pergélisol susceptibles d'affecter les infrastructures de transports et de son imbrication à l'intérieur d'une procédure de gestion des risques appliquée au Québec et au Canada.

3.4.1 ÉTAPES 1 ET 2 : IDENTIFICATIONS ET DESCRIPTION DES TYPES DE DANGER SUSCEPTIBLES D'AFPECTER LES REMBLAIS SUR PERGÉLISOL AU NUNAVIK

En zone de pergélisol, les types de dangers susceptibles d'affecter la stabilité d'un remblai sont nombreux. Dans le contexte du Nunavik, les plus fréquents se résument toutefois aux tassements au dégel et aux effondrements. Chacun de ces dangers requièrent un contexte géologique (épaisseur et contenu en glace au sein du pergélisol, présence de coins de glace, etc.) et physique particulier (pente, drainage) sur lequel les variations des conditions climatiques récentes et futures agissent bien souvent à titre d'éléments déclencheurs qui mènent à leur occurrence. Cette section vise à faire un survol de ces différents dangers susceptibles de survenir et d'affecter les infrastructures de transports du Ministère au Nunavik. Notons que les dangers que représentent le fluage, les ruptures de la couche active et les soulèvements au gel ont été exclus soit en raison de leur très faible occurrence (ex. rupture de la couche active) ou leur complexité d'intégration (ex. fluage). À titre indicatif, le tableau 77 présente sommairement, par site, les différents dangers susceptibles de survenir à court, moyen et long terme.

Tableau 77 : Évaluation sommaire des dangers susceptibles d'affecter la stabilité des remblais aux sites d'infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik.

Communauté	Type d'infrastructure	Tassement au dégel	Rupture de la couche active	Effondrement	Problème de ponceaux	Références
Umiujaq	Route d'accès			n.a		2
	Piste d'atterrissage			n.a	n.a	2
Inukjuak	Route d'accès			n.a		2
	Piste d'atterrissage			n.a	n.a	2
Puvirnituq	Route d'accès			n.a		
	Piste d'atterrissage			n.a	n.a	1
Akulivik	Route d'accès					
	Piste d'atterrissage				n.a	1
Ivujivik	Route d'accès			n.a		
	Piste d'atterrissage			n.a	n.a	1
Salluit	Route d'accès			n.a		1,2
	Piste d'atterrissage			n.a		1,2
Kangiqtujuaq	Route d'accès			n.a	n.a	1
	Piste d'atterrissage			n.a	n.a	1
Quaqtaq	Route d'accès			n.a		
	Piste d'atterrissage			n.a	n.a	1,2
Kangirsuk	Route d'accès			n.a	n.a	
	Piste d'atterrissage			n.a		
Aupaluk	Route d'accès			n.a	n.a	
	Piste d'atterrissage				n.a	1
Tasiujaq	Route d'accès					4
	Piste d'atterrissage				n.a	2
Kangiqtualujuaq	Route d'accès			n.a		3
	Piste d'atterrissage			n.a	n.a	3

Légende des couleurs	
	Susceptibilité faible
	Susceptibilité modérée
	Susceptibilité élevée
Références :	
1 : Allard <i>et al.</i> , 2007, 2 : L'Hérault <i>et al.</i> , 2012, 3 : L'Hérault <i>et al.</i> , 2014, 4 : L'Hérault <i>et al.</i> , 2015	

3.4.2 ÉTAPE 3 : ESTIMATION DU RISQUE

3.4.2.1 PROCÉDURE D'ESTIMATION QUANTITATIVE DU RISQUE DÉVELOPPÉE DANS LE CADRE DU PROGRAMME ARQULUK

Le risque est le produit de la probabilité qu'un danger (ex. : tassement au dégel, défaillance de ponceau) se produise durant un intervalle de temps (aléa), et des conséquences associées qui sont calculées en fonction des dommages anticipés. L'aléa est la probabilité de l'occurrence d'un danger, tandis que la conséquence combine les coûts de réhabilitation ainsi que les coûts encourus par les populations qui dépendent de l'infrastructure. Parmi les dangers communs qui affectent les remblais sur pergélisol, seuls ceux dont les fonctions d'état limite ont été déterminées dans le cadre du programme Arquluk ont été inclus dans le calcul du risque à savoir : les tassements au dégel (totaux, différentiels), les ruptures de la couche active, les ruptures de pente et les affaissements des ponceaux et les effondrements. Les conséquences directes de ces aléas sont quantifiables, par exemple, en estimant les coûts reliés à la réhabilitation de l'ouvrage. Les conséquences indirectes, telles les blessures ou la perte d'un service essentiel, sont plus difficiles à quantifier et nécessitent l'utilisation de facteurs d'échelle sociétale permettant aux gestionnaires de les adapter en fonction du site.

Fondée sur une évaluation quantitative du risque géotechnique associé à une infrastructure linéaire et utilisant une approche probabiliste, la méthode développée dans le cadre du programme Arquluk (Brook, 2019) prend en considération les aléas qui peuvent affecter le niveau de service de la structure (Figure 221A) et les conséquences potentielles de ces derniers sur le fonctionnement de l'infrastructure et les usagers (perte de performance ou interruption de service, coûts d'entretien, coûts humains et sociétaux, etc.) (Figure 221B). La méthode développée permet également de recalculer les aléas à partir de variations des températures de l'air projetées et ainsi proposer une évolution du risque futur en tenant compte du réchauffement climatique (Figure 221C).

À la base de la procédure d'évaluation du risque proposée par Brooks (2019) se trouve l'utilisation de la méthode de Monte Carlo. La méthode de Monte-Carlo désigne une famille de méthodes algorithmiques visant à calculer par l'entremise de fonction d'état limite (équations) une valeur dérivée de plusieurs variables en utilisant des techniques probabilistes. Ce type d'approche est couramment utilisée dans l'évaluation du risque suivant une approche statistique. Par cette approche, un certain nombre de variables nécessaires à différents calculs sont choisies et évaluées aléatoirement en fonction des caractéristiques de leur distribution (moyenne et écart-type) et en respectant la loi des probabilités. Ainsi, pour chacune de ces variables, un grand nombre de tirages aléatoires (simulations) est effectué au sein des distributions de valeurs d'une variable afin de déterminer au hasard les valeurs qui seront utilisées à l'intérieur des différents calculs servant à l'évaluation des fonctions d'états limites. Lors de chacune de ces simulations, un générateur de nombre aléatoire permet de déterminer une valeur provenant d'une fonction de densité préalablement déterminé selon les caractéristiques de la distribution (normal ou log normal) et les statistiques descriptives la définissant (moyenne et écart-type). Cette sélection aléatoire des valeurs à l'intérieur d'une simulation permet par la suite d'utiliser les valeurs ces dernières à l'intérieur des différentes fonctions nécessaires aux calculs des paramètres qui permettront d'évaluer la probabilité d'occurrence d'un danger, c'est-à-dire l'aléa. Règle générale, plus le nombre de simulation est important (n), plus la distribution des résultats obtenus reflètera une distribution normale. Notons que malgré les fondements statistiques rigoureux de la méthode, la précision des résultats obtenus dépendra fortement de la précision des variables d'entrées. En effet, une bonne partie de l'incertitude dans l'évaluation du risque découle bien souvent d'une mauvaise attribution ou compréhension de la variabilité d'une variable utilisée dans la définition de l'aléa (Brooks, 2019). Par conséquent, la détermination de la fonction de densité (normal ou lognormal) et des caractéristiques de sa distribution (moyenne et écart-type) constitue une étape très importante dans la quantification du volet aléa qui compose l'évaluation du risque.

Pour automatiser et faciliter une telle analyse de risque, un programme nommé « Arquluk-RISK » a été créé et fonctionne avec le logiciel Microsoft Excel. Ce programme permet de calculer la probabilité d'occurrence d'un

danger (l'aléa) et évaluer ses conséquences de manière à produire une évaluation quantitative du risque que représente l'aléa pour une infrastructure linéaire construite sur pergélisol. L'évaluation du risque peut s'appliquer à un seul site (version SS - *Single Site*) ou le long d'un tronçon avec l'analyse de plusieurs sections indépendantes (version LI - *Linear Infrastructure*).

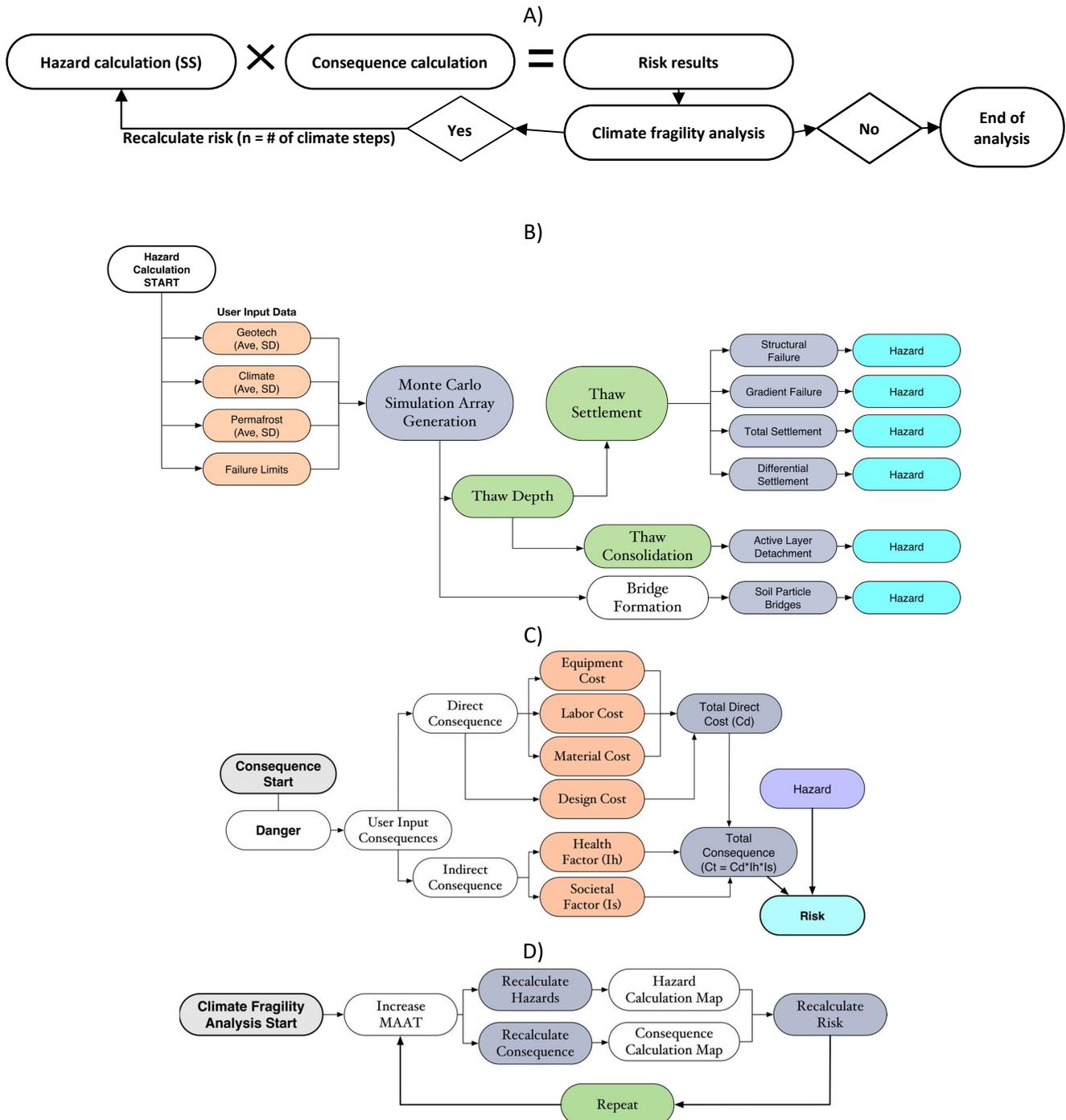


Figure 221 : A) Procédure générale de l'évaluation quantitative du risque telle que proposée par Brooks (2019). Procédure spécifique au sein des différentes composantes pour l'évaluation B) de l'aléa, C) des conséquences et D) en fonction des changements climatiques (*Climate Fragility analysis*). Les variables d'entrées sont représentées en orange, les traitements statistiques en gris, les calculs techniques en vert et les sorties en bleu (tirées de Brooks, 2019).

3.4.2.2 NOUVELLE PROCÉDURE ADAPTÉE AU CONTEXTE DES INFRASTRUCTURES DU MTQ AU NUNAVIK

La méthode quantitative d'évaluation du risque adaptée au contexte des infrastructures aéroportuaire du Nunavik découle de celle développée par Brooks (2019) illustrée à la figure 221. L'objectif principal de cette adaptation visait à limiter au maximum le nombre de paramètres requis dans l'analyse sans pour autant augmenter les incertitudes associées à l'évaluation du risque. Également, la logique d'évaluation du risque de la méthode a été légèrement repensée de manière à augmenter la flexibilité du type d'analyse et en faciliter une éventuelle intégration dans un outil d'analyse spatiale du risque qui pourrait être développé dans le futur.

Tout d'abord, l'une des premières adaptations de l'outil consistait à cibler les dangers les plus susceptibles d'affecter les infrastructures de transports du MTQ construites sur pergélisol et d'écarter ceux non-applicables ou trop localisés (ex. : rupture de couche active). Ainsi, de la liste des principaux dangers inclus dans l'analyse quantitative du risque développée par Brooks (2019) (Figure 222A), seuls les tassements au dégel et les effondrements ont été préservés (Figure 222B). À noter qu'il est toujours possible de réintégrer les autres dangers ultérieurement dans l'outil d'évaluation si jugé pertinent.

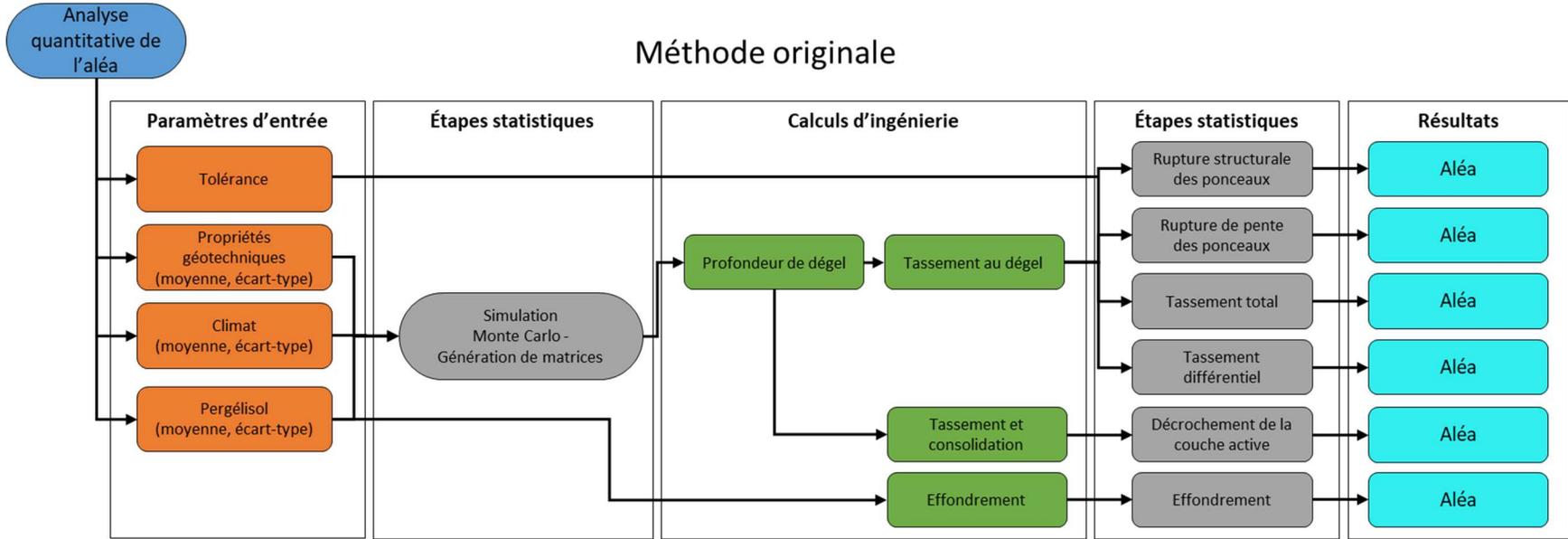
Dans l'outil développé par Brooks (2019), l'évaluation du risque pouvait s'appliquer à un seul site ou le long d'un tronçon d'infrastructure en utilisant deux versions du programme « Arquluk-RISK » annotées respectivement version SS - *Single Site* et version LI – *Linear Infrastructure*. Dans la version adaptée de l'outil, seul le programme qui permet une analyse pour un site en particulier (SS) a été préservé. Par conséquent, l'analyse linéaire est désormais possible simplement en réitérant une analyse ponctuelle à une certaine distance du site ayant fait l'objet d'une analyse antérieure. De cette manière, le nombre d'analyse est infini et l'espacement entre les sites peut être variable. La compilation de ces différentes analyses de risques ponctuelles le long d'un tracé constitue alors l'équivalent de l'analyse de risque linéaire (version LI – *Linear Infrastructure*) telle que proposée par Brooks (2019), mais en permettant une plus grande flexibilité pour l'utilisateur. Une telle flexibilité peut s'avérer avantageuse lorsqu'un tracé de route traverse une multitude de coins de glace dont l'espacement est variable ou simplement pour mieux adapter l'espacement des analyses selon les conditions de pergélisol. Par exemple, pour une section d'infrastructure construite sur des conditions de pergélisol homogènes, quelques analyses peuvent être suffisantes (espacement plus élevé), tandis que pour les sections où les conditions sont très hétérogènes, un espacement plus serré entre les sites d'évaluation peut être nécessaire.

En ce qui concerne l'évaluation du risque en fonction des changements climatiques, l'outil proposé par Brooks (2019) effectue simplement une réanalyse du risque en appliquant une augmentation constante et régulière (augmentation linéaire) des températures de l'air sur une période donnée (*Climate fragility analysis*). Étant donné que l'augmentation des températures de l'air proposée par les différentes sorties de modèles climatiques présentent une évolution non-linéaire, ceci constitue une limitation importante de l'outil d'analyse du risque actuel. La nouvelle approche proposée implique dorénavant que l'utilisateur modifie les paramètres d'entrée climatiques en fonction des valeurs proposées par le ou les scénarios climatiques désirés à l'intérieur même de l'analyse du risque. De cette manière, l'utilisateur peut réitérer l'analyse selon la période requise, qu'elle soit régulière (exemple : à tous les ans) ou irrégulière ou variable), et sans devoir respecter une augmentation linéaire des températures de l'air.

Nous sommes conscients que les simplifications apportées dans la procédure et l'outil d'analyse du risque implique des manipulations supplémentaires de la part de l'utilisateur. Toutefois, cette simplification permet de diminuer grandement le nombre de variables requises et les procédures de calcul dans l'analyse sans affecter la validité des résultats. Également, cette simplification offre davantage de flexibilité à l'utilisateur dans un contexte où une telle analyse s'inscrit dans un système géologique et climatique dont les conditions varient de manière non linéaire dans l'espace et dans le temps. À titre d'exemple, un aperçu de l'interface utilisateur de l'outil développé par Brooks (2019) est présenté à la figure 223A et celui de la version adaptée à la figure 223B.

A)

Méthode originale



B)

Méthode adaptée

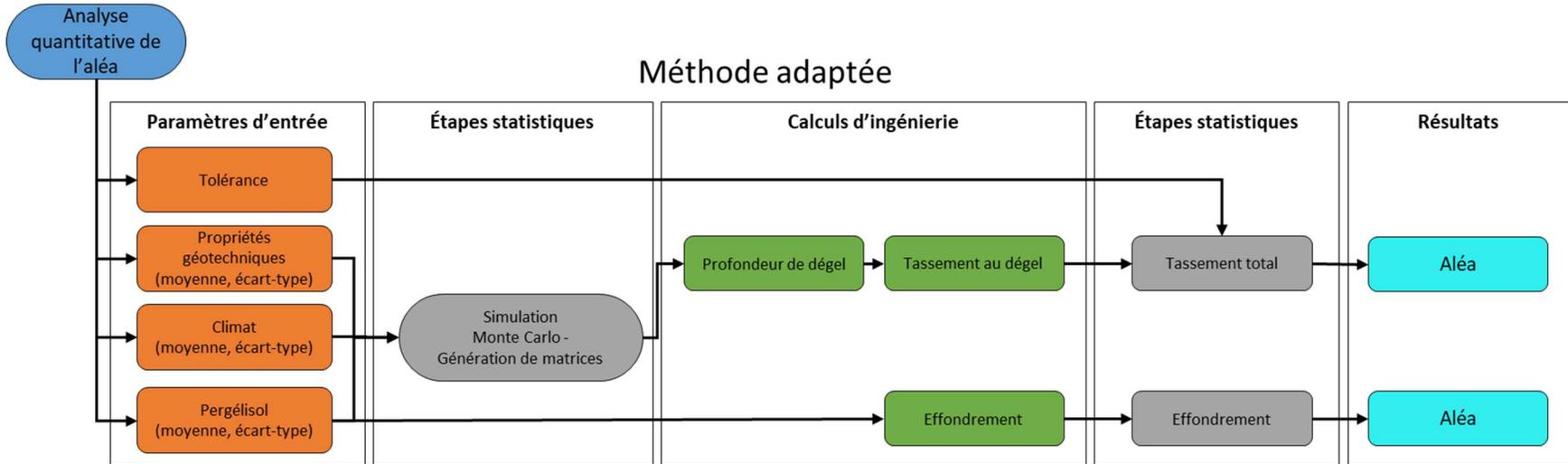


Figure 222 : Procédure d'analyse quantitative des aléas A) tel que développée par Brooks (2019) et B) après son adaptation au contexte du Nunavik.

A)

Program Setup				Dangers to Analyze (Y=1, N=0, 2 Graphs Result Histogram)								Danger Limits			
1	Units (SI or Imperial)	9	2	Total Settlement (Thaw Depth & Settlement Graphs if 2)	17	0.2	m	Total	18	0.3	m	Differential			
10000	Total Iterations	10		Diff. Settlement (Requires TS and IW Analysis)	19	2	%	Minimum Slope within Culvert	20		%	Ring Strain at Failure			
1	Thermal Conductivity Calc.	11		Active Layer Detachment Slides											
100	# Histogram Bins	12		Particle Bridge Formation (No Histogram Available)											
0	Climate Fragility - # of Steps	13		Structural Culvert Failure											
4	# Soil Layers - Embankment	14		Culvert Gradient Failure											
2	# Soil Layers - Natural Ground	15		Ice Wedge Analysis for All Selected Dangers (Y=1, N=0)											
		16													

Climate Conditions - Current and Model				Notes: 1) Tables must only include values and no formulas. 2) Determine your average and standard deviation values elsewhere and place the results on the INPUTS sheets. 3) Normal distributions are assumed for all variables except moisture content (see cell 34). If LogNormal distribution is selected, use the average and standard deviation of the data, not its ln(); a transformation to the ln() mean and standard deviations is included within the program. 4) Cells highlighted red require values before running the program.							
Mean	Stn-dv	Units									
1500	50	°C-days	Air Thawing Index (Current)								
80	10	days	Thawing Season Duration (Current)								
-5		°C	Mean Annual Air Temperature (Current)								
-3		°C	Mean Annual Air Temperature (EOD Life)								
30		°C	Sinusoidal Climate Model - Amplitude								

Subsurface Soil Profiles				Other Analysis Inputs											
Embankment Soil Profile				Natural Ground Profile											
Mean	Stn-dv	Units		Mean	Stn-dv	Units		32	10	m	Culvert Length	33	3	%	Culvert Gradient (Current)
0.8	0.1	n/a	0.7	0.1	n/a	n-factor (Natural Ground Surface)		34	5	mm	Culvert Wall Thickness	35	40	cm	Culvert Diameter
		deg	4	1	deg	slope angle (Natural Ground Condition)		36	1	n/a	Gravimetric Moisture Content Prob. Density Function (1= Normal, 0= LogNormal)	37	50	mm	Average Emb Particle Diameter
-2	0.3	°C	-2	0.4	°C	Permafrost Temperature		38	0.5	m	Average Width of Ice Wedges				
1.1		m	0.6		m	Active Layer Thickness (Current)									
1.2		m	0.8		m	Depth to Ice Wedges									

Layer Number	Layer Type	Layer Ref Num	USCS	USCS Ref Num	Thermal State	Layer Thickness (m)	Layer Depth (m)	Moisture Content (%)	Unfrozen W (%)	Dry Unit Weight (kg/m³)	Specific Gravity	ks, Mineral Conductivity (W/m-K)	Calculate Hazard	
1	5 - Gravel & La	5	GW	1	0	1	1	5	1	2300	50	2.9	0.1	2.00
2	7 - Silts & Clays	7	ML	4	1	1	2	30.00	5.00	5	2	1000	100	2.75
3	7 - Silts & Clays	7	ML	4	1	4	6	40	10	5	2	1700	100	2.6
4	2 - Ice	2	GC	3	1	2	8	90	2.00	1	1	1000	1	0.01
5	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			8							
6	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			8							
7	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			8							
8	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			8							
9	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			8							
10	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			8							

Layer Number	Layer Type	Layer Ref Num	USCS	USCS Ref Num	Thermal State or T (F)	Layer Thickness (m)	Layer Depth (m)	Moisture Content (%)	Unfrozen W (%)	Dry Unit Weight (kg/m³)	Specific Gravity	ks, Mineral Conductivity (W/m-K)	Coeff. Of Consol. (m²/s)	Eff. Cohesion (kg/m²)	Eff. Friction Angle
1	7 - Silts & Clays	7	ML	4	0	1	1	30	5.00	5	1	1800	100		2.90
2	7 - Silts & Clays	7	ML	4	1	4	5	40	10.00	5	1	1700	100		2.60
3	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			5								
4	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			5								
5	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			5								
6	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			5								
7	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			5								
8	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			5								
9	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			5								
10	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A			5								

B)

Paramètres généraux				Légende			
4	Nombre de couches de sol			Paramètres d'entrée			
1	Évaluation de l'aléa tassement au dégel (Oui=1, Non=0)			Valeur moyenne			
1	Évaluation de l'aléa effondrement (Oui=1, Non=0)			Écart-type			
0.5	(m) Tolérance limite au tassement (Évaluation de l'aléa tassement au dégel)			Attribution automatique - NE PAS MODIFIER			
0.5	(m) Diamètre moyen des particules (D50) (Évaluation de l'aléa effondrement)			Lancer l'analyse			
2	(m) Largeur moyenne des coins de glaces (Évaluation de l'aléa effondrement)						

Paramètres climatiques			
Moyenne	Écart-type	Unité	
2000	300	°C-jour	Indice de dégel (température de l'air)
100	10	jour	Durée de la saison de dégel

Paramètres de surface et du pergélisol			
Moyenne	Écart-type	Unité	
1.7	0.15	n/a	Facteur-n de dégel
-2	0.25	°C	Température du pergélisol
1		m	Épaisseur actuelle de la couche active

Profil stratigraphique du site													
# Couche	Type de matériau	Matériau id	USCS	USCS id	État	Épaisseur (m)	Profondeur (m)	Teneur en eau (%)		Teneur en eau non-gelée (%)		Densité sèche (kg/m³)	
								Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
1	1 - Asphalt	1	GW	1	0	0.25	0.25	5	2	1	1	2200	100
2	Gravel & Large Sa	5	GW	1	0	0.5	0.75	10.00	5.00	1	1	2400	100
3	7 - Silts & Clays	7	ML	4	1	0.5	1.25	40	10	8	5	2200	100
4	2 - Ice	2	OL	4	1	3	4.25	90	10.00	1	1	1000	0
5							4.25						
6							4.25						
7							4.25						
8							4.25						
9							4.25						
10							4.25						

Figure 223 : Interface utilisateur du programme « Arquluk-RISK » (SS - Single Site) : A) version originale et B) version adaptée dans le cadre du présent projet.

3.4.2.3 ÉTAPE 3.1 : ÉVALUATION DES ALÉAS

3.4.2.3.1 TASSEMENT AU DÉGEL

3.4.2.3.1.1 Estimation de la profondeur de dégel

La détermination de la probabilité d'occurrence d'un tassement au dégel se doit d'inclure une analyse thermique afin d'estimer la profondeur de dégel. Une telle analyse requiert plusieurs variables incluant les propriétés thermiques et géotechniques des matériaux et leurs dispositions stratigraphiques à un site d'analyse donné.

L'état thermique du pergélisol est assez complexe, mais dépend essentiellement de deux modes de transfert de chaleur, à savoir la conduction et la convection. Un transfert thermique par le simple contact d'un solide à un autre solide se fait par conduction alors qu'en présence d'un fluide en mouvement (liquide ou gaz) il se fait par convection. De manière générale, à l'intérieur du pergélisol, les transferts thermiques se font essentiellement par conduction sans toutefois exclure la possibilité d'échanges thermiques convectifs dans la couche active ou à l'intérieur d'un matériau poreux (exemple : remblai à convection). Étant donné que la conduction est considérée comme étant le mode de transfert thermique dominant dans le pergélisol (Johnston 1981), plusieurs options ont été développées afin d'en modéliser l'état à l'aide d'équations analytiques (1D) ou par méthodes numériques d'analyses d'éléments finis (1d, 2D ou 3D).

Parmi les méthodes utilisant des équations analytiques, l'équation de Stefan et l'équation de Berggren modifiée (Andersland et Ladanyi, 2004) sont les plus fréquemment utilisées pour déterminer la profondeur du gel saisonnier par conduction. Après évaluation faite par Brooks (2019), l'équation modifiée de Berggren s'avère celle qui offre la meilleure évaluation de la profondeur de dégel tout en étant relativement simple à implémenter à l'intérieur d'un programme. Pour cette raison, la profondeur de dégel estimé par l'outil proposé, et qui se retrouve au centre de l'évaluation de l'aléa de tassements au dégel, est évaluée par cette dernière. Notons que dans l'équation de Berggren modifiée, plusieurs variables intermédiaires sont requises afin de déterminer les propriétés thermiques des différentes couches du sol. Dans le programme Initiale, l'utilisateur disposait de deux méthodes afin de déterminer les propriétés thermiques du sol, soit la méthode de Côté et Konrad (2005) et celle de Kersten (1949). Étant donné que la méthode de Côté et Konrad (2005), quoique légèrement plus précise, requiert davantage de variables pour procéder à l'évaluation, cette dernière a été écartée afin de simplifier davantage la procédure.

Les relations empiriques développées par Kersten (1949) pour déterminer les conductivités du sol à l'état non gelé (k_t) et gelé (k_f) en fonction de la teneur en eau (w) et de la masse volumique sèche (γ_d) pour deux types de sols (sol à granulométrie grossière et sol à granulométrie fine) se définissent par les relations suivantes :

Sol grossier avec pourcentage de silt et argile < 20%

$$k_t = 0.1442 \cdot (0.7 \cdot \log(w) + 0.4) \cdot (10)^{0.6243\gamma_d} \quad \text{Équation 3-2}$$

$$k_f = 0.01096 \cdot (10)^{0.8116\gamma_d} + 0.00461 \cdot w \cdot (10)^{0.6243\gamma_d} \quad \text{Équation 3-3}$$

Sol à granulométrie fine avec pourcentage de silt et argile > 50%

$$k_t = 0.1442 \cdot (0.9 \cdot \log(w) - 0.2) \cdot (10)^{0.6243\gamma_d} \quad \text{Équation 3-4}$$

$$k_f = 0.001442 \cdot (10)^{1.373\gamma_d} + 0.01226 \cdot w \cdot (10)^{0.4994\gamma_d} \quad \text{Équation 3-5}$$

Pour ce qui est de la chaleur spécifique volumique du sol à l'état non gelé (C_{vt}) et gelé (C_{vf}) cette dernière est calculée à l'aide des relations suivantes tirées d'Andersland et Ladanyi (2004) :

Sol minéral

$$C_{vt} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot (0.17 + 1 \cdot \frac{w}{100}) \cdot C_{vw} \quad \text{Équation 3-6}$$

$$C_{vf} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot (0.17 + 1 \cdot \frac{w_u}{100}) + 0.5(\frac{w - w_u}{100}) \cdot C_{vw} \quad \text{Équation 3-7}$$

Sol organique

$$C_{vt} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot (0.4 + 1 \cdot \frac{w}{100}) \cdot C_{vw} \quad \text{Équation 3-8}$$

$$C_{vf} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot (0.4 + 1 \cdot \frac{w_u}{100}) + 0.5(\frac{w - w_u}{100}) \cdot C_{vw} \quad \text{Équation 3-9}$$

Où γ_d et γ_w correspondent respectivement à la masse volumique sèche du sol et la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³), tandis que w , w_u et C_{vw} correspondent respectivement à la teneur en eau, la teneur en eau non gelée et la chaleur spécifique volumique de l'eau (4.187 MJ/m³).

En ce qui concerne la chaleur latente volumique du sol (L), cette dernière est calculée pour un sol spécifique selon la relation suivante :

$$L = \gamma_d \cdot L_w \cdot \frac{w - w_u}{100} \quad \text{Équation 3-10}$$

Où L_w correspond à la chaleur latente massique de l'eau équivalente à 333.7 kJ/kg.

3.4.2.3.1.2 Détermination du coefficient de tassement au dégel

Pour les sols à grains fins, comme les argiles, la teneur en eau du sol gelé excède fréquemment sa teneur en eau à l'état non gelé et normalement consolidé. Par conséquent, lorsque ce type de sol dégèle, des tassements importants surviennent et se segmente essentiellement en deux phases de comportement: 1) une phase de tassement au dégel associée au changement de phase de la glace en eau et le drainage de l'eau en excès du matériel sous son propre poids et 2) une phase de tassement du sol sous l'effet des contraintes appliquées, par exemple le poids d'un remblai routier, le cas échéant. Ces phases de comportements de tassement d'un sol lors du dégel sont présentées schématiquement à la figure 224. Sur cette figure, on remarque un petit changement de l'indice des vides qui survient à l'état gelé lorsqu'une contrainte est appliquée (point a au point b) qui correspond à une déformation élastique et plastique instantanée du squelette du sol, de la glace, de l'eau non gelée et des gaz. Par la suite, advenant un dégel, survient la composante de tassement au cours de laquelle un important changement de l'indice des vides survient (point b au point c) attribuable au changement de phase de la glace en eau, au drainage de l'eau en excès du sol sous son propre poids et par la suite la composante tassement du sol (point c au point d) qui est fonction des contraintes appliquées.

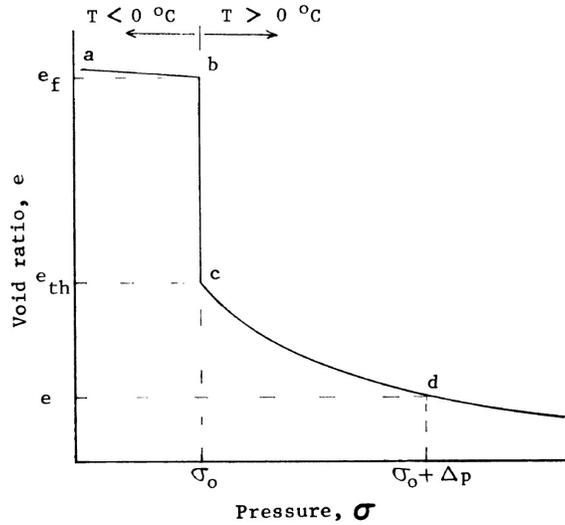


Figure 224 : A) Changement de volume d'un sol par tassement au dégel en fonction des contraintes appliquées (Tirée de Andersland et Ladanyi, 2004). σ_0 = contrainte effective exercée par le sol sus-jacent. Δp = contrainte effective exercée par la surcharge.

Dans le calcul du tassement total (s) d'un sol soumis au dégel et sous contrainte, cette distinction entre les deux composantes impliquées s'exprime également mathématiquement par l'équation 3-11 où s_{th} et s_c correspondent respectivement à la proportion du tassement total attribuable à la phase de tassement au dégel (thaw strain) et à celle attribuable au tassement sous contrainte du sol. La composante de tassement au dégel (s_{th}) pour une épaisseur de sol gelé donné (H_f) (Équation 3-12) est déterminée à l'aide d'un paramètre de tassement au dégel (A_0) calculé à partir des indices des vides du sol à l'état gelé (e_f) et non gelé (e_{th}) (Équation 3-13). La composante de tassement sous contrainte (s_c), qui s'exprime par l'équation 3-14, applique, pour une contrainte effective donnée (σ'_0), un coefficient de changement de volume (m_v) défini par l'équation 3-15 et qui correspond à un changement de volume par unité de volume et d'augmentation de contrainte effective (σ'_0 à $\sigma'_0 + \Delta p$).

$$s = s_{th} + s_c \quad \text{Équation 3-11}$$

$$s_{th} = A_0 \cdot H_f \quad \text{Équation 3-12}$$

$$A_0 = \frac{e_f - e_{th}}{1 + e_f} \quad \text{Équation 3-13}$$

$$s_c = m_v \cdot \sigma' \cdot H_f \quad \text{Équation 3-14}$$

$$m_v = \frac{1}{1 + e_{th}} \cdot \frac{e_{th} - e}{\sigma' - \sigma'_0} \quad \text{Équation 3-15}$$

Tel que mentionné précédemment, les tassements au dégel surviennent lorsque le front de dégel pénètre au-delà de la couche active et dégèle une couche du pergélisol. La fonte de la glace et l'expulsion de l'eau en excès qui en résulte entraînent un changement de volume du sol. Ce changement de volume s'exprime par un pourcentage de réduction de la hauteur du profil de sol dégelé (s). Le tassement au dégel du sol peut être déterminé en laboratoire ou estimé à partir de relations empiriques tirées de la littérature.

Dans la procédure actuelle, le tassement au dégel pour différent type de sol est évalué par les relations empiriques définies par Luscher et Afifi (1973). Le choix de ces relations, au détriment d'autres, possiblement plus précises,

repose sur le peu de paramètres d'entrée nécessaires pour procéder à une estimation. Pour différents grands groupes de sol (classification USCS), les relations empiriques telles que proposées par Luscher AMD Afifi (1973) se définissent comme suit :

Silt (ML,OL)

$$\varepsilon_{thaw} = -0.060625 \cdot \gamma_d + 82.438 \quad \text{Équation 3-16}$$

Sable et silt (SM, SP-SM)

$$\text{Pour } \gamma_d \leq 1675, \varepsilon_{thaw} = -0.003571 \cdot \gamma_d + 63.571 \quad \text{Équation 3-17}$$

$$\text{Pour } \gamma_d > 1675, \varepsilon_{thaw} = -0.05 \cdot \gamma_d + 82.438 \quad \text{Équation 3-18}$$

Gravier et silt (GM, GP-GM)

$$\varepsilon_{thaw} = -0.002875 \cdot \gamma_d + 8.06 \quad \text{Équation 3-19}$$

Sable ou gravier bien trié (SP, SW, GP, GW)

$$\text{Pour } \gamma_d \leq 1750, \varepsilon_{thaw} = -0.4 \cdot \gamma_d + 702 \quad \text{Équation 3-20}$$

$$\text{Pour } \gamma_d > 1750, \varepsilon_{thaw} = -0.02 \cdot \gamma_d + 702 \quad \text{Équation 3-21}$$

3.4.2.3.1.3 Évaluation du tassement au dégel

La figure 225 présente un aperçu général de la procédure de calcul de l'aléa de type tassement au dégel qui est effectuée à l'intérieur de l'outil d'analyse de risque. Dans cet aperçu, les paramètres d'entrée requis pour procéder aux calculs intermédiaires pour déterminer les propriétés thermiques (conductivités thermiques, chaleurs spécifiques et latentes) utilisées pour l'évaluation de la profondeur de dégel ainsi que les propriétés géotechniques (potentiel de tassement) des différentes unités caractérisant le profil du sol y sont présentés.

Dans un contexte stratigraphique multicouches, c'est-à-dire en présence de différentes couches de sols aux propriétés géotechniques différentes, le tassement total anticipé se calcul en évaluant la pénétration du front de dégel (d_{thaw}) au-delà de l'épaisseur de la couche active actuelle (ALD) et en faisant la sommation des produits entre les épaisseurs des différentes couches de sol qui seront dégelées (h_i) et leurs valeurs de tassements respectives (ε_{thaw_i}). Ce processus d'estimation du tassement total est schématiquement représenté à la figure 226 et s'exprime par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{thaw_{total}} = \sum_i^n h_i \cdot \varepsilon_{thaw_i} = (h_1 * \varepsilon_{thaw_{u1}}) + (h_2 * \varepsilon_{thaw_{u2}}) + (h_3 * \varepsilon_{thaw_{u3}}) \quad \text{Équation 3-22}$$

Pour chacune des simulations de Monte Carlo, l'équation modifiée de Berggren détermine la profondeur maximale de dégel en fonction des paramètres climatiques (indice de dégel et durée de la saison de dégel), les paramètres du pergélisol (température du pergélisol), de la stratigraphie du profil du sol et des paramètres thermiques calculés (calculs intermédiaires) pour chacune des unités stratigraphiques.

Ultimement, ce sont les combinaisons entre les profondeurs de dégel et le potentiel de tassement du profil stratigraphique soumis au dégel telles qu'illustrées à la figure 226 qui déterminera le tassement total anticipé pour une simulation donnée. Une fois ce résultat obtenu pour une simulation, la procédure entame la seconde simulation et ainsi de suite jusqu'à l'atteinte du nombre maximal de simulations requis dans l'analyse (N=20 000). À la fin de ce processus, les résultats sont comptabilités et se présentent graphiquement sous la forme d'une courbe de distribution normale (Figure 228). À partir de ces résultats, le danger de type tassement au dégel est

alors classifié selon deux catégories soit : les tassements qui sont inférieurs à la tolérance ($\epsilon_{thaw_{total}} < \text{tolérance}$) et les tassements qui surpassent la tolérance acceptable pour maintenir le niveau de serviabilité de l'infrastructure préétablie par l'utilisateur ($\epsilon_{thaw_{total}} > \text{tolérance}$). Mathématiquement, cette classification s'exprime par les équations suivantes :

$$\text{Réussite} = \epsilon_{thaw_{total}} < \text{Tolérance} \quad \text{Équation 3-23}$$

$$\text{Échec} = \epsilon_{thaw_{total}} > \text{Tolérance} \quad \text{Équation 3-24}$$

Cette classification des résultats (N=20 000) permet de déterminer une probabilité d'occurrence par l'intégration du nombre de résultats de simulation qui surpassent la tolérance. Cette approche statistique, par l'entremise de simulations de Monte Carlo basées sur la loi des probabilités et le hasard, permet ainsi d'évaluer la probabilité d'occurrence d'un tassement au-delà d'un seuil critique acceptable (tolérance), donc d'évaluer la composante aléatoire du danger et ainsi quantifier l'aléa (Figure 228).

La tolérance acceptable pour un tassement au dégel est à l'essence même de la transformation de ce danger en aléa, par conséquent, sa détermination par l'utilisateur requiert la prudence et de nombreuses considérations. Par exemple, cette tolérance peut différer selon le type d'infrastructure soumise à l'analyse (piste d'atterrissage ou route d'accès) et selon la section de l'infrastructure évaluée (centre-piste, accotement, zone d'atterrissage ou de décollage, aux abords d'un tournant ou en fonction de la limite de vitesse de circulation). Également, les valeurs de tolérance peuvent être segmentées selon le type de conséquences et interventions qui seront requises pour rétablir ou maintenir un niveau de serviabilité acceptable de l'infrastructure suite à l'occurrence de l'aléa. Par exemple, en ce qui concerne le tassement total au dégel, il peut alors être à propos de faire la distinction dans l'analyse entre des tassements de faible ampleur pour lesquels un simple nivellement sera requis pour rétablir la fonction de l'infrastructure des tassements d'ampleur modérés ou élevés qui nécessiteront possiblement une fermeture de l'infrastructure (interruption du service) en raison des risques associés pour les usagers.

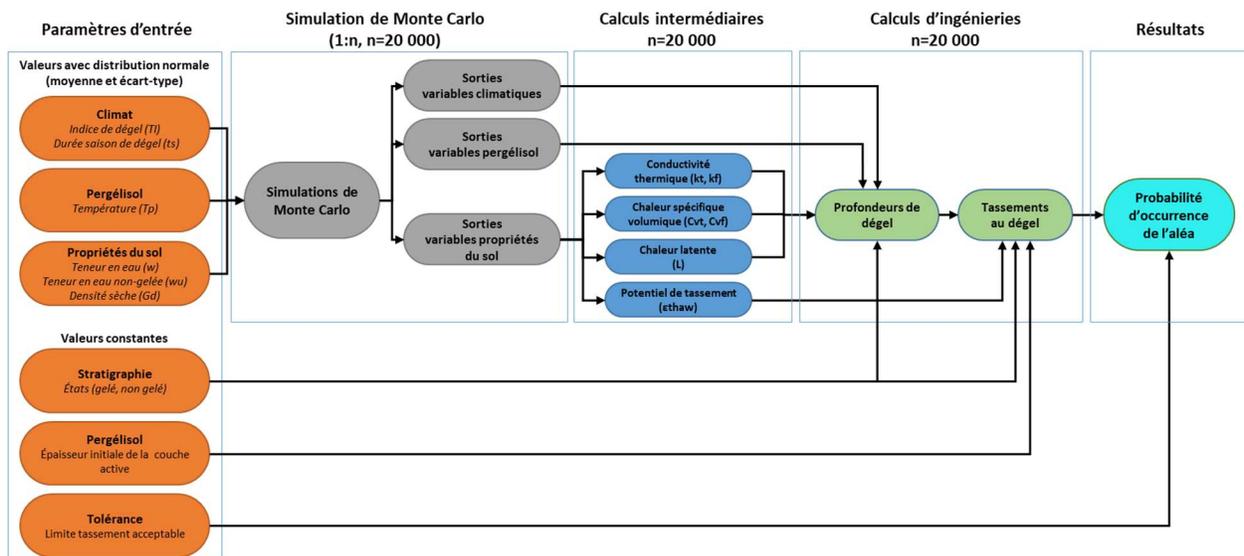


Figure 225 : Procédure de calcul pour l'évaluation de l'aléa de type tassement au dégel (modifié de Brooks, 2019). Les paramètres d'entrées apparaissent en orange, le tirage aléatoire des valeurs de certains paramètres d'entrée lors d'une simulation de Monte Carlo en gris, les calculs intermédiaires et d'ingénieries en bleu et vert respectivement et la compilation statistique des résultats pour l'ensemble des simulations en bleu sarcelle.

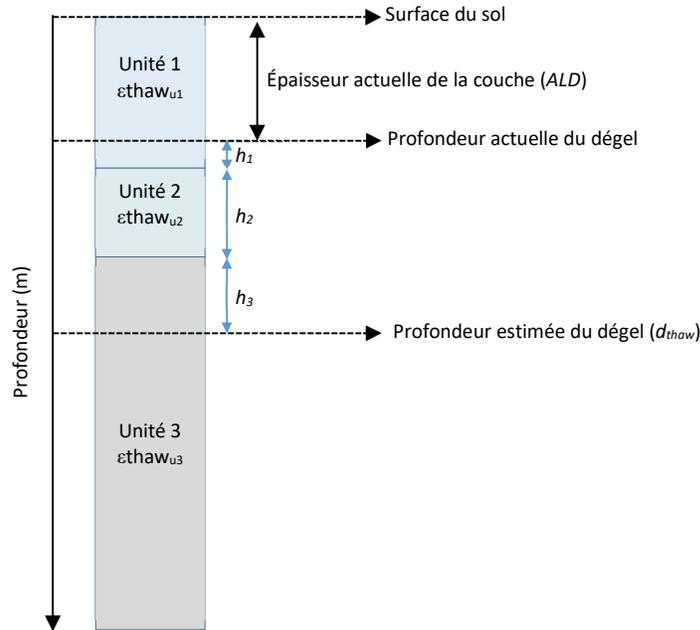


Figure 226 : Schématisation de l'évaluation du tassement total au dégel dans un contexte stratigraphique multicouche en fonction de l'épaisseur de la couche active actuelle (ALD), la pénétration du front de dégel (d_{thaw}) et en faisant la sommation des produits entre les épaisseurs des différentes couches de sol qui seront dégelées (h_i) et leurs valeurs de tassements respectives (ϵ_{thaw_i}).

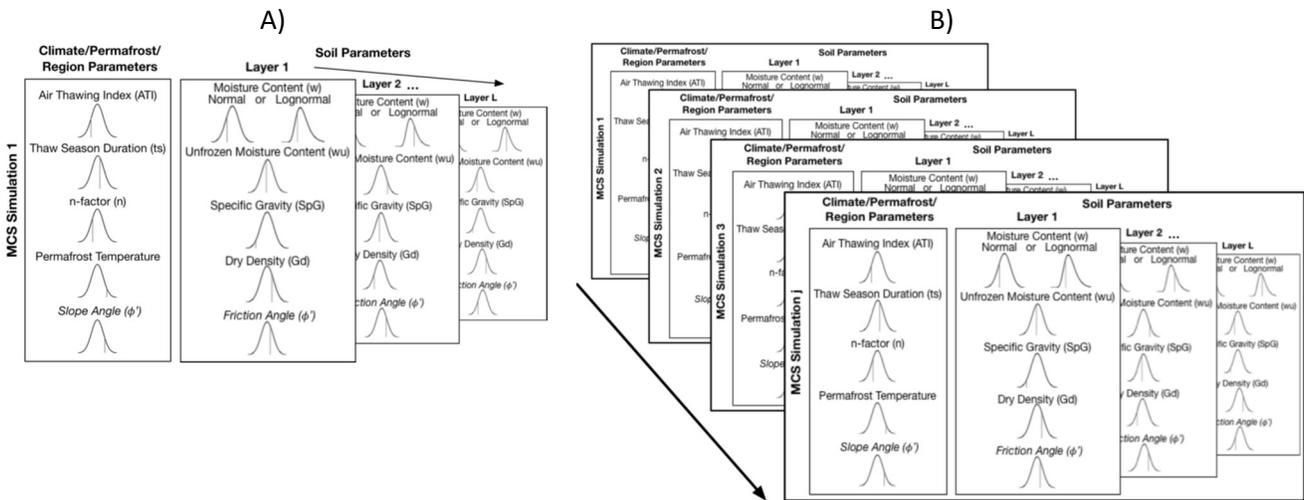
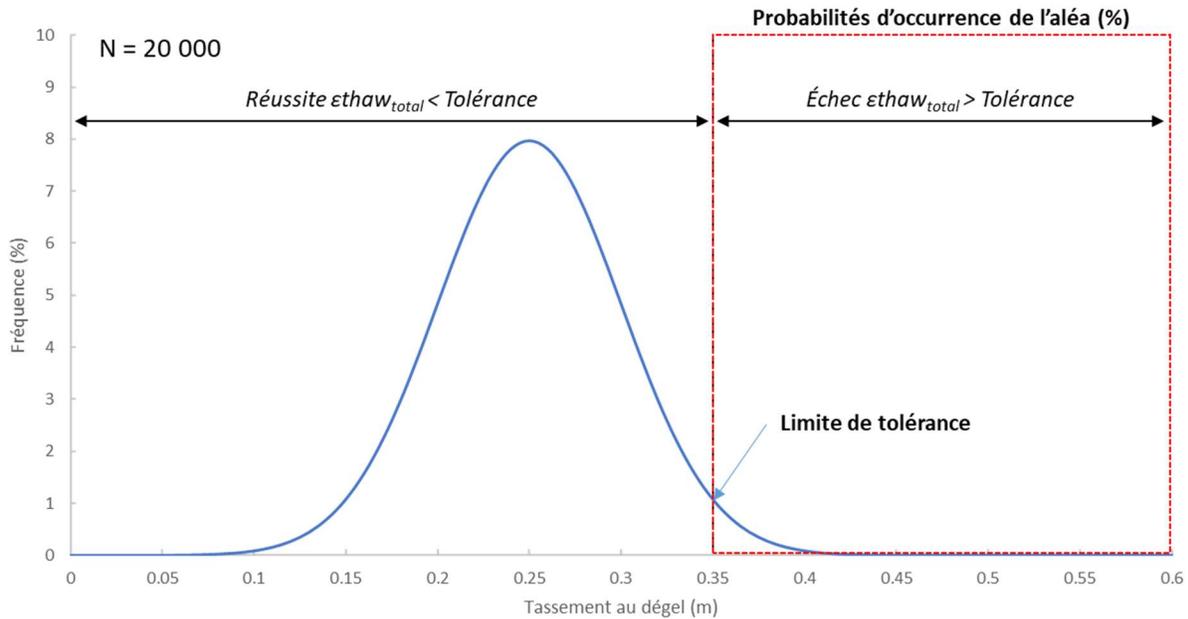


Figure 227 : Sélection des valeurs aléatoires pour les différents paramètres d'entrée au sein A) d'une même simulation de Monte Carlo et B) pour plusieurs simulation 1 à j ($j=20\ 000$) (tirée de Brooks, 2019).



Information générale				Résultats de l'analyse				
Danger	Abréviation	Tolérance	Unité	Probabilité	Moyenne	Écart-type	Min	Max
Tassement total	$\epsilon thaw_{total}$	0.35	m	5.3 %	0.25	0.05	0	0.40

Figure 228 : Représentation graphique des résultats obtenus lors de l'évaluation de l'aléa de type tassement au dégel telle que proposée par l'outil d'analyse quantitative du risque.

3.4.2.3.2 TASSEMENT DIFFÉRENTIEL AU DÉGEL

Pour certaines infrastructures linéaires de transport, les tassements différentiels constituent le danger par importance susceptible d'entraîner une perte de fonctionnalité. Les contextes géologiques où s'alternent des dépôts riches en glace avec des dépôts faibles en glace sont propices à l'occurrence d'un tel aléa. Le meilleur exemple d'un tel contexte géologique et qui s'observe fréquemment au Nunavik et dans l'ensemble des zones de pergélisol au Canada ou ailleurs, sont les réseaux de polygones à coin de glace. Dans l'outil initialement proposée par Brooks (2019), l'analyse d'un tel aléa se faisait par l'entremise de la création d'un profil de sol automatique pour lequel la profondeur des coins de glace était précisée par l'utilisateur (Figure 229). Par la suite, les différences entre les tassements totaux calculés pour un profil de sol sans coin de glace par rapport aux tassements calculés pour un profil de sol avec coin de glace permettaient de déterminer la probabilité d'occurrence de cet aléa suivant la classification suivante :

$$\text{Réussite} = \epsilon thaw_{icewedge} - \epsilon thaw_{total (soil)} < \text{Tolérance} \quad \text{Équation 3-25}$$

$$\text{Échec} = \epsilon thaw_{icewedge} - \epsilon thaw_{total (soil)} > \text{Tolérance} \quad \text{Équation 3-26}$$

Lors de la simplification de l'outil d'analyse quantitative du risque, la procédure d'évaluation des tassements différentiels a été retirée complètement. Avec l'outil simplifié, il demeure toutefois possible d'effectuer une analyse équivalente en procédant à deux analyses indépendantes (une analyse pour un site sans coin de glace et une analyse pour un site avec coin de glace). En soustrayant les zones de chevauchements entre les deux distributions et en intégrant les valeurs de tassement de chacune qui excèdent la tolérance établie pour les tassements différentiels jugés acceptables, il est alors possible d'obtenir une probabilité d'occurrence pour cet aléa. Nous sommes conscients que cette nouvelle procédure requière des étapes supplémentaires pour l'utilisateur, toutefois, il en résulte une plus grande flexibilité dans les possibilités d'analyses. Par exemple, les

profils stratigraphiques peuvent présenter des différences significatives tant au point de vue de la stratigraphies (épaisseurs des différentes couches) qu'au niveaux des propriétés thermiques rencontrées. Par conséquent, ce type d'analyse, qui n'était jadis possible que pour des secteurs affectés par des coins de glace, peut désormais s'appliquer à d'autres contextes comme par exemple lors d'une transition rapide entre un secteur pauvre en glace et un secteur riche en glace ou simplement en présence de différentes conditions de surface qui entraîne un dégel différentiel au sein d'une même unité riche en glace (ex. : section pavée versus une section non-pavée ou utilisant une surface à albédo élevée).

La procédure d'évaluation des tassements différentiels, telle qu'elle est désormais suggérée dans la nouvelle approche d'analyse du risque, permet à l'utilisateur d'intégrer la notion d'espacement entre les différentes zones dans la définition de la tolérance aux tassements différentiels. Par exemple, si des données suffisantes sont disponibles quant à la distribution des coins glace le long d'une infrastructure ou sur la répartition des différentes zones de pergélisol (zones pauvres en glace versus zones riches en glace), une analyse d'ondulation de la surface (fréquence et amplitude) pourrait être effectuée. Par exemple, dans le cas des pistes d'atterrissage, la tolérance limite de déformation de la surface peut se faire à l'aide du critère de déformation « Boeing » (Boeing Bump Criteria), illustré à la figure 230 . Ainsi, par exemple, si l'on considère que la zone affectée en surface peut être estimée en traçant une ligne avec une pente d'environ 45° à partir de la source de déformation en profondeur (Figure 229), la tolérance pour une déformation causée par un coin de glace de 2 m de largeur situé à 3 m sous la surface (valeur L de 4 m dans la figure 230) serait d'environ 6 cm.

Pour le cas des routes d'accès, plusieurs études de corrélations ont été réalisées entre l'ondulation de la surface, l'adhérence des pneus, le confort et la sécurité de l'utilisateur (Fradette 2005; OCDE 1984). De telles études ont démontré que l'impact de l'amplitude des déformations sur la sécurité de l'utilisateur et le niveau de confort dépendra de la vitesse de circulation. Par exemple, Fradette (2005) a développé, par modélisation du comportement d'un véhicule automobile sur des surfaces déformées, des graphiques illustrant la déformation acceptable basé sur l'atteinte d'un seuil de 30% d'adhérence résiduelle du pneu en fonction de la longueur des ondes des déformations et de la vitesse de circulation. Sur ces graphiques, on peut voir que l'amplitude et la longueur des ondes de déformations acceptables sont inversement proportionnelles à la vitesse de circulation (Figure 231). La longueur d'onde sur les graphiques de Fradette représente la distance de crête à crête. Pour l'exemple du coin de glace décrit précédemment, la distance de 4 m représenterait donc la demi longueur d'onde. Si on considère donc un véhicule circulant à 70 km/h et une longueur d'onde de 8 m, on trouve que la déformation tolérable serait alors de 50 mm pour l'essieu avant et d'environ 30 mm pour l'essieu arrière.

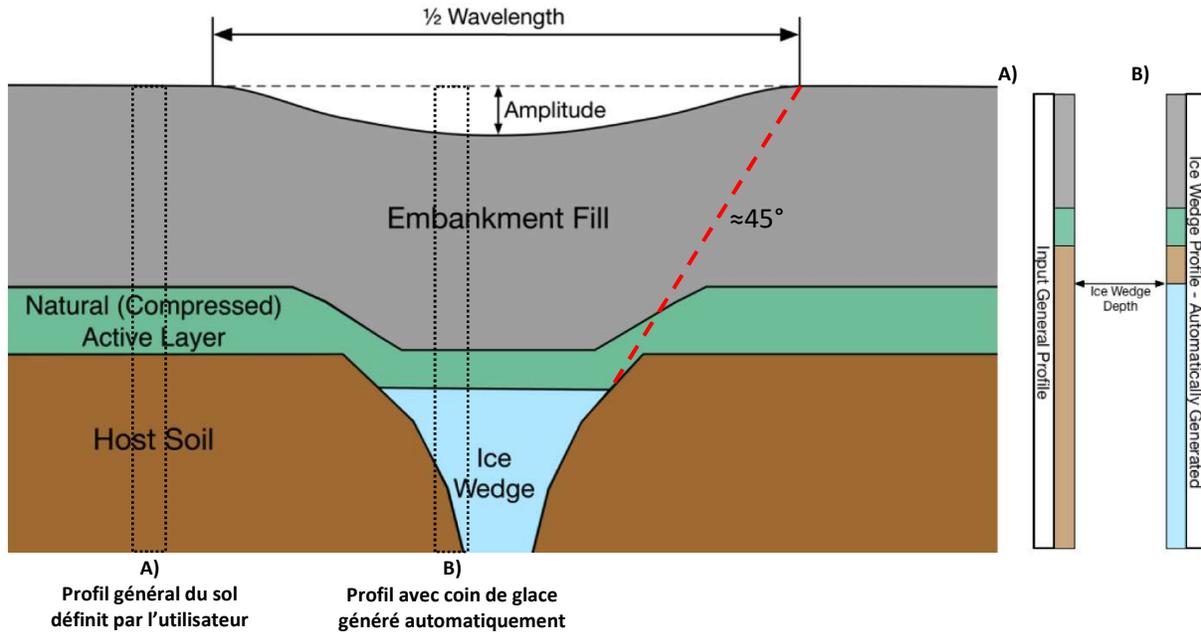


Figure 229 : Schématisation de l'évaluation de l'aléa de type tassement différentiel par l'entremise de la création d'un profil de sol automatique avec coins de glace effectuée par l'outil d'analyse quantitative du risque développé par Brooks (2019).

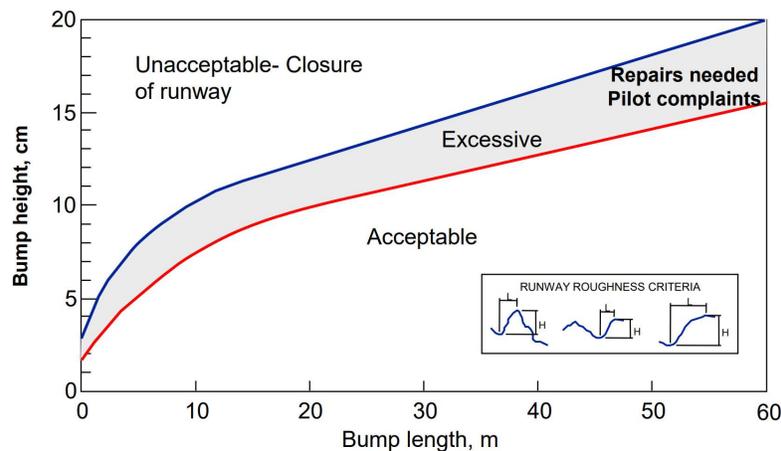


Figure 230 : Tolérance limite de déformation de la surface selon le critère de déformation « Boeing » (Boeing Runway Roughness Criteria) (source : Boeing, 2012).

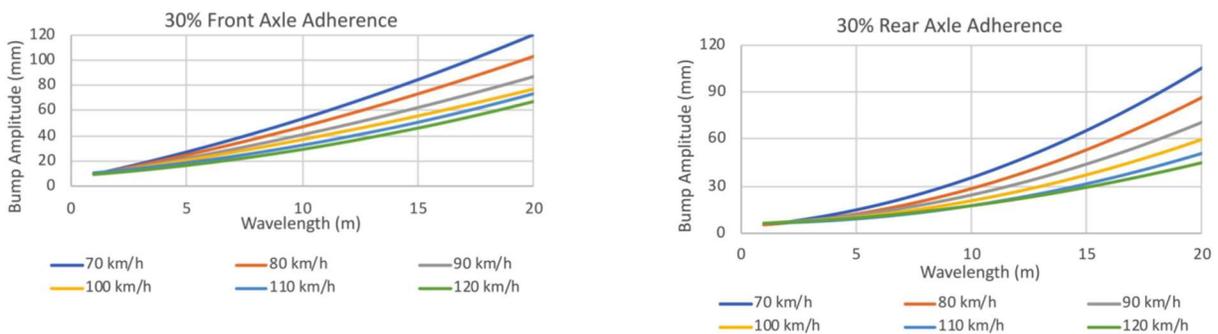


Figure 231 : Seuil d'adhérence de 30% pour les pneus avant et arrière d'un véhicule en fonction de l'amplitude et la longueur d'onde des déformations et la vitesse de circulation (modifiée de Fradette, 2005).

3.4.2.3.3 EFFONDREMENT

En raison de la faible occurrence connue de glace de glacier enfouie aux sites aéroportuaires du Nunavik, seuls les endroits où des coins de glace traversent les pistes et routes d'accès sont sujets à l'occurrence d'un tel danger.

Les trois mécanismes qui expliquent la formation d'arches (*arching or bridging*) qui se forment au-dessus des vides en milieu de pergélisol et en déterminent la stabilité sont : le positionnement des particules, la mécanique des sols non saturés et la présence d'une couche de sol gelé au-dessus d'une cavité en formation sous un remblai. L'outil de quantification du risque actuel ne considère néanmoins que la probabilité d'occurrence d'un effondrement (H_{PBF}) en fonction du positionnement des grains au sein d'un remblai. La méthode d'analyse est basée sur une relation empirique développée par Brooks (2019) et Brooks *et al* (2020) et supportée par de nombreux essais en laboratoire effectués à l'aide d'un modèle à échelle réduite (Figure 232B et C). Cette relation s'exprime mathématiquement par l'équation suivante :

$$H_{PBF} = -0.458 \cdot \ln(BR) + 1.1757 \quad \text{Équation 3-27}$$

$$BR = \frac{W_{iw}}{D_{50}} \quad \text{Équation 3-28}$$

Où le bridging ratio (BR) est déterminé par le ratio entre la largeur du coin de glace (W_{iw}) et le diamètre moyen des particules qui composent le remblai (D_{50}).

Contrairement à l'évaluation de l'aléa de type tassement au dégel, celui de type effondrement n'utilise pas l'approche par simulation de Monte Carlo pour déterminer la probabilité d'occurrence. En effet, la probabilité d'occurrence des effondrements est imbriquée à l'intérieur même de la relation empirique développée par des essais en laboratoire. Cette relation permet d'estimer la probabilité d'occurrence d'un effondrement en fonction du ratio BR , c'est-à-dire le ratio entre la largeur moyenne des coins de glace par rapport au diamètre moyen (D_{50}) de la grosseur des particules qui composent le remblai. Cette relation, exprimée mathématiquement par l'équation 3-27 et illustrée graphiquement à la figure 232C, permet d'attribuer directement une probabilité d'occurrence sans devoir passer par la procédure de Monte Carlo et une évaluation de la profondeur de dégel. Cette évaluation dépend donc exclusivement de deux variables soient : la largeur moyenne des coins de glace et le diamètre moyen des particules qui composent le remblai. En l'occurrence, cette relation ne considère pas le potentiel de formation de vides sous le remblai en fonction de la profondeur de dégel et la fonte graduelle de la masse de glace qui en résulte. Pour cette raison, la probabilité d'occurrence n'est pas affectée par la variation du climat et demeure ainsi fixe dans le temps. À noter que pour cette raison, dans un contexte où les coins de glace subissent une fonte graduelle par conduction, cette évaluation empirique tend à surestimer la probabilité d'occurrence. Néanmoins, en présence d'apports de chaleur par convection et de processus liés à la thermoérosion, la fonte des coins de glace qui peut se produire extrêmement rapidement indépendamment des températures de l'air. Dans un tel cas de figure, l'estimation de la probabilité d'occurrence d'un effondrement utilisant la relation proposée permet une estimation juste. Chose certaine, les coins de glace, par leur fréquence en milieu de pergélisol, leur composition presque exclusivement de glace et leur propension à canaliser les écoulements d'eau en surface, sont des éléments extrêmement sensibles et susceptibles d'affecter considérablement la stabilité d'une infrastructure advenant un dégel partiel ou complet.

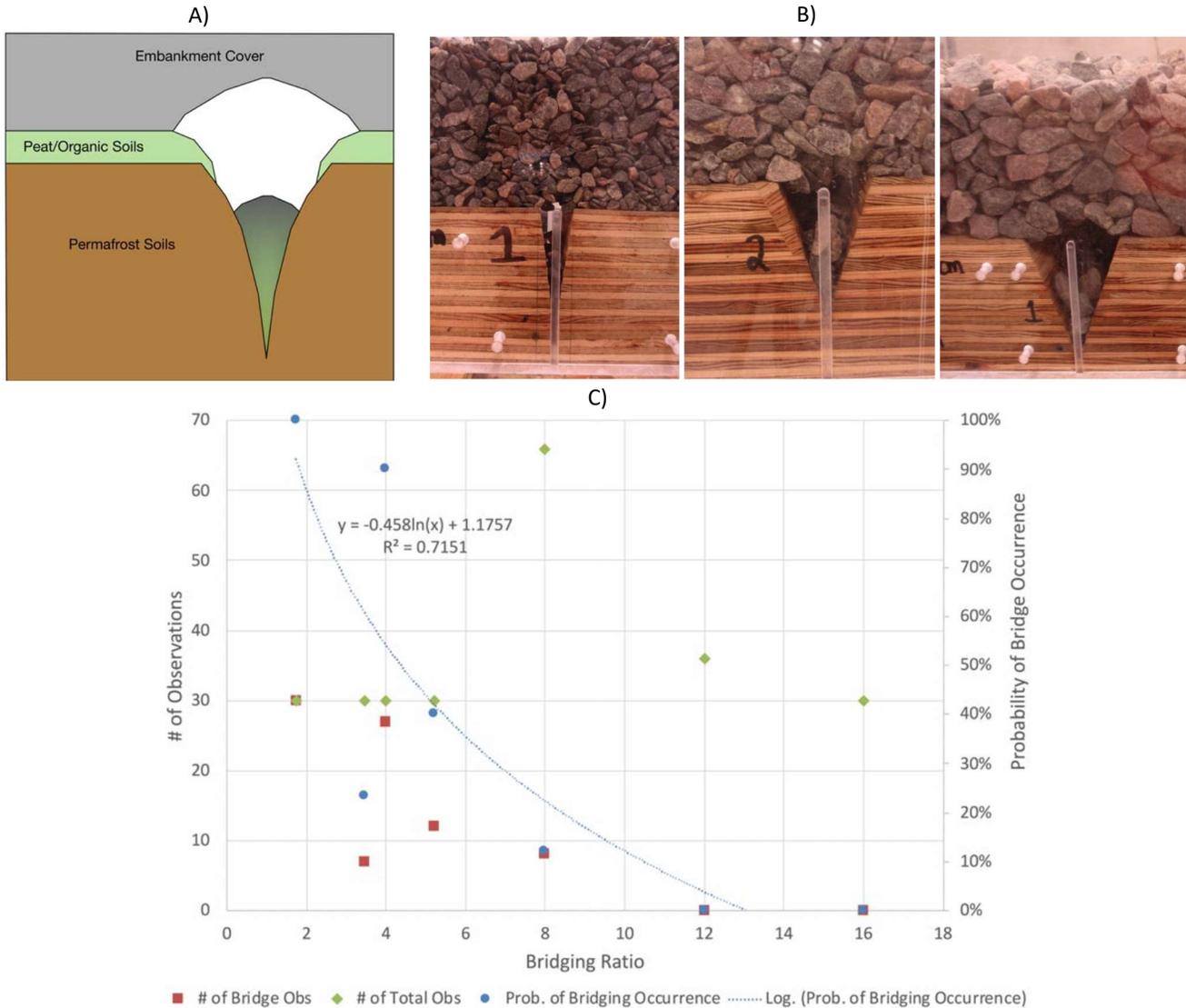


Figure 232 : A) Schéma illustrant le contexte de formation d'un vide au sein d'un remblai provoqué par la fonte complète d'un coin de glace. B) Modèle à échelle réduite utilisé en laboratoire pour établir la relation entre la probabilité d'occurrence d'un effondrement et le ratio BR déterminé par le rapport entre la largeur des coins et le diamètre moyen des particules qui composent le remblai (D_{50}). C) Probabilité d'occurrence d'un effondrement advenant une fonte complète d'un coin de glace sous un remblai en fonction du ratio BR. La régression logarithmique établie entre les observations et la probabilité d'occurrence est illustrée par la ligne bleue pointillée et accompagnée de son équation. (Tirées de Brooks *et al.*, 2020)

3.4.2.3.4 CONSIDÉRATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS L'ÉVALUATION DES ALÉAS

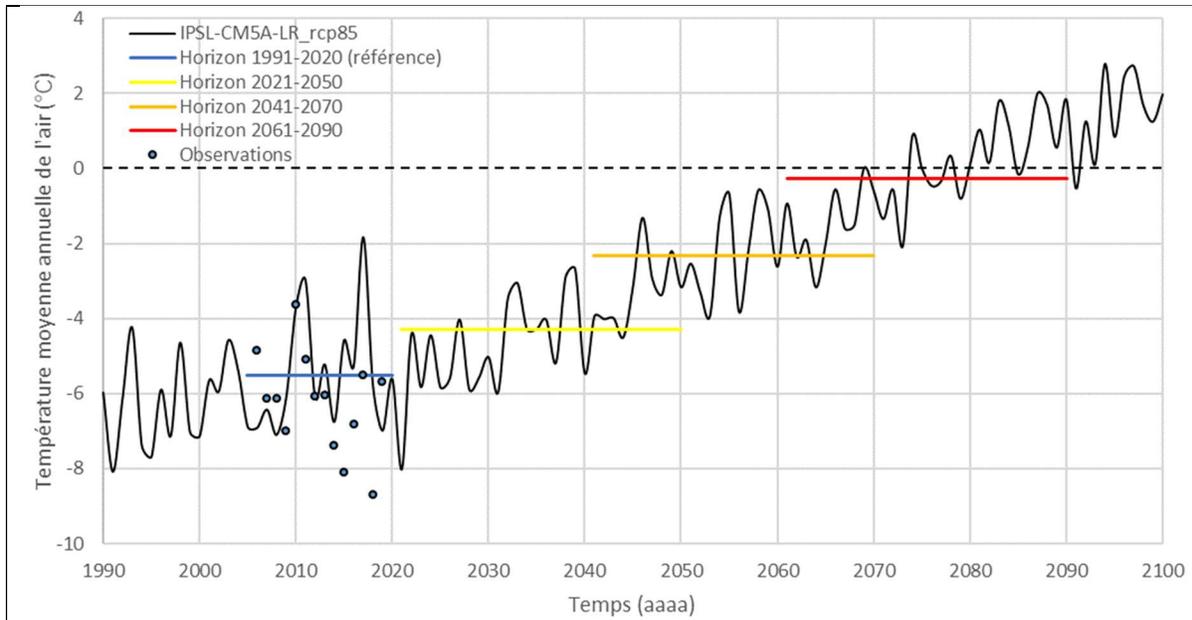
À l'exception de l'aléa de type effondrement, il est possible de considérer l'effet des changements climatiques à l'intérieur même de l'outil d'analyse quantitative du risque développé par Brooks (2019) et adapté dans la présente étude. Dans l'outil adapté, l'influence du climat sur la probabilité d'occurrence d'un aléa est considérée par l'entremise de deux paramètres climatiques soit l'indice de dégel et la durée de la saison de dégel. Ces deux paramètres sont nécessaires pour déterminer la profondeur maximale de dégel à la fin de l'été en utilisant l'équation de Berggren modifiée (Andersland et Ladanyi, 2004) et ultimement déterminer le tassement total au dégel. Comme plusieurs paramètres d'entrée dans le programme, il est possible d'utiliser des valeurs constantes ou des valeurs qui seront sélectionnées aléatoirement lors de chacune des simulations de Monte Carlo selon la fonction de densité de probabilité propre à chacun et définie par l'utilisateur via l'attribution d'une valeur

moyenne et d'un écart-type. Même si l'une ou l'autre de ces options permet de considérer l'effet des changements climatiques dans l'évaluation d'un aléa et ultimement celle du niveau de risque associé, l'attribution de valeurs constantes pour les paramètres climatiques est à proscrire. Étant donné qu'aucun modèle climatique n'est parfait et que l'incertitude quant aux scénarios d'émissions demeure extrêmement élevée, il est souhaitable d'utiliser un large éventail de simulations climatiques. Depuis quelques années, une collaboration entre les centres de modélisation (Coupled Model Intercomparison Project) permet de générer un ensemble de simulations qui constitue une sélection de base disponible à l'ensemble de la communauté scientifique. Actuellement, la communauté scientifique utilise le cinquième ensemble (CMIP5) composé de 42 modèles climatiques différents et forcés par différents scénarios d'émissions (RCP).

À l'heure actuelle, Ouranos propose un ensemble de 22 simulations climatiques globales post-traitées (11 modèles x 2 scénarios de trajectoire du forçage radiatif (RCP 4.5 et RCP 8.5) présélectionnés à partir de l'ensemble complet CMIP5. À noter que les simulations qui composent cet ensemble ont été sélectionnées à partir de toutes les simulations disponibles du CMIP5 à l'aide d'une analyse par grappe (k-means clustering) (Casajus et al. 2016). Les sorties de ces simulations ont été traitées par l'utilisation de la méthode de post-traitement 1-d quantile mapping (Gennaretti et al., 2015) afin de corriger les biais et raffiner la résolution spatiale (Figure 12) de manière à obtenir des séries de températures de l'air journalières couvrant la période 1950-2100 et ce, pour chacune des simulations (Figure 13).

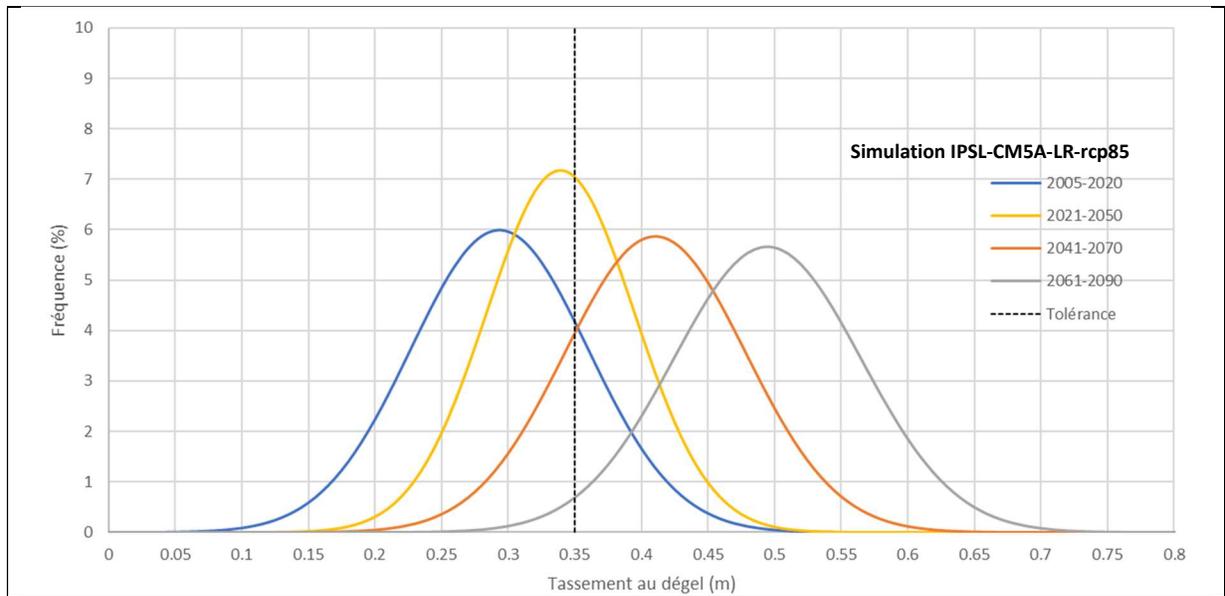
Dans le cas où il peut s'avérer pertinent de dresser un portrait approximatif de l'évolution de la probabilité d'occurrence d'un aléa dans le temps en fonction des changements climatiques par année climatique ou période climatique plus longue, il est alors possible de procéder à une analyse du risque en considérant l'ensemble de ces simulations. De cette manière, une fonction de densité de probabilité peut être générée à partir des valeurs moyennes et des écarts-types pour la période d'analyse. Une telle approche permet de dresser une évolution temporelle du risque dans le temps tout en intégrant l'incertitude qui découle de l'utilisation des différentes projections climatiques disponibles. Même si une évaluation sur une base annuelle est possible, il est souhaitable de considérer davantage une période climatique de plusieurs années. Quoique pouvant être variable, la durée recommandée d'une période climatique est habituellement de 30 ans, communément appelée un horizon climatique. Ainsi, par simulation sélectionnée et selon un horizon climatique, les valeurs de moyenne et d'écart-type pour les paramètres d'entrée requis peuvent être calculées. Ce sont ces mêmes valeurs qui pourront être utilisées à l'intérieur de l'outil d'analyse du risque développé. Un exemple de paramètres climatiques d'entrée calculés à partir d'une simulation climatique pour différents horizons est présenté à la figure 233. Les probabilités d'occurrence de l'aléa de type tassement au dégel déterminées pour chacune de ces périodes climatiques sont présentées à la figure 234.

Tel que mentionné précédemment, il peut également s'avérer pertinent de considérer plusieurs simulations climatiques différentes. Dans un tel contexte, il est alors possible de déterminer pour chacune des simulations climatiques sélectionnées, la valeur moyenne et l'écart-type calculé pour une période climatique donnée et lancer de nouvelles analyses de probabilité d'occurrence de l'aléa. Ainsi, selon les caractéristiques des paramètres climatiques de chacune des simulations climatiques sélectionnées, il sera possible de déterminer la probabilité d'occurrence des tassements au-delà du seuil de tolérance déterminé. Un exemple de paramètres climatiques d'entrée calculés à partir de plusieurs simulations climatiques pour une période climatique donnée est présenté à la figure 235. Les probabilités d'occurrence de l'aléa de type tassement au dégel déterminées pour chacune de ces simulations climatiques et pour la même période climatique sont présentées à la figure 236.



Simulations	Variables	Période (Horizon climatique)			
		2005-2020	2021-2050	2041-2070	2061-2090
IPSL-CM5A-LR rcp85	Durée saison de dégel (moyenne)	144	149	160	173
	Durée saison de dégel (écart-type)	13	13	12	13
	Indice de dégel (moyenne)	1036	1198	1454	1760
	Indice de dégel (écart-type)	212	162	208	202

Figure 233 : Variation des températures annuelles moyennes de l'air pour la région de Puvirniq pour une simulation issue de l'ensemble du CMIP5 accompagnée des moyennes et écart-types pour chacun des paramètres climatiques nécessaires à l'analyse de l'aléa.



Période (Horizon climatique)	Aléa	Tolérance	Unité	Probabilité d'occurrence	Valeur moyenne (m)	Valeur minimale (m)	Valeur maximale (m)	Écart-Type (m)
2005-2020	Tassement	0.35	m	19.5%	0.29	0.04	0.59	0.07
2021-2050	Tassement	0.35	m	41.4%	0.34	0.13	0.56	0.06
2041-2070	Tassement	0.35	m	81.4%	0.41	0.16	0.70	0.07
2061-2090	Tassement	0.35	m	98.4%	0.49	0.25	0.79	0.07

Figure 234 : Sommaire des résultats obtenus pour l'analyse de l'aléa de type tassement au dégel pour quatre différentes périodes climatiques sélectionnés au sein d'une même simulation climatique de l'ensemble CMIP5 (Simulation IPSL-CM5A-LR-rcp85).

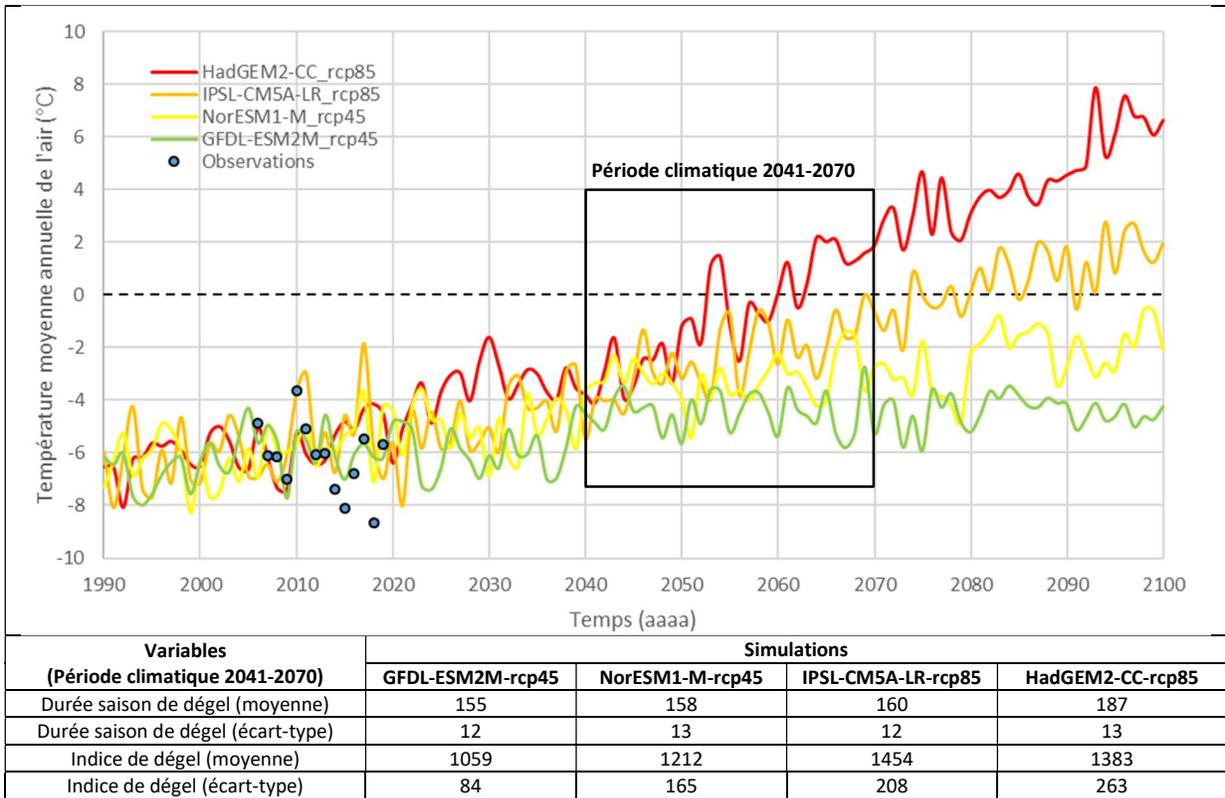


Figure 235 : Variations des températures annuelles moyennes de l'air pour la région de Puvirnituk pour 4 simulations issues de l'ensemble du CIMP5 accompagnées des moyennes et écart-types pour chacun des paramètres climatiques pour la période climatique 2041-2070.

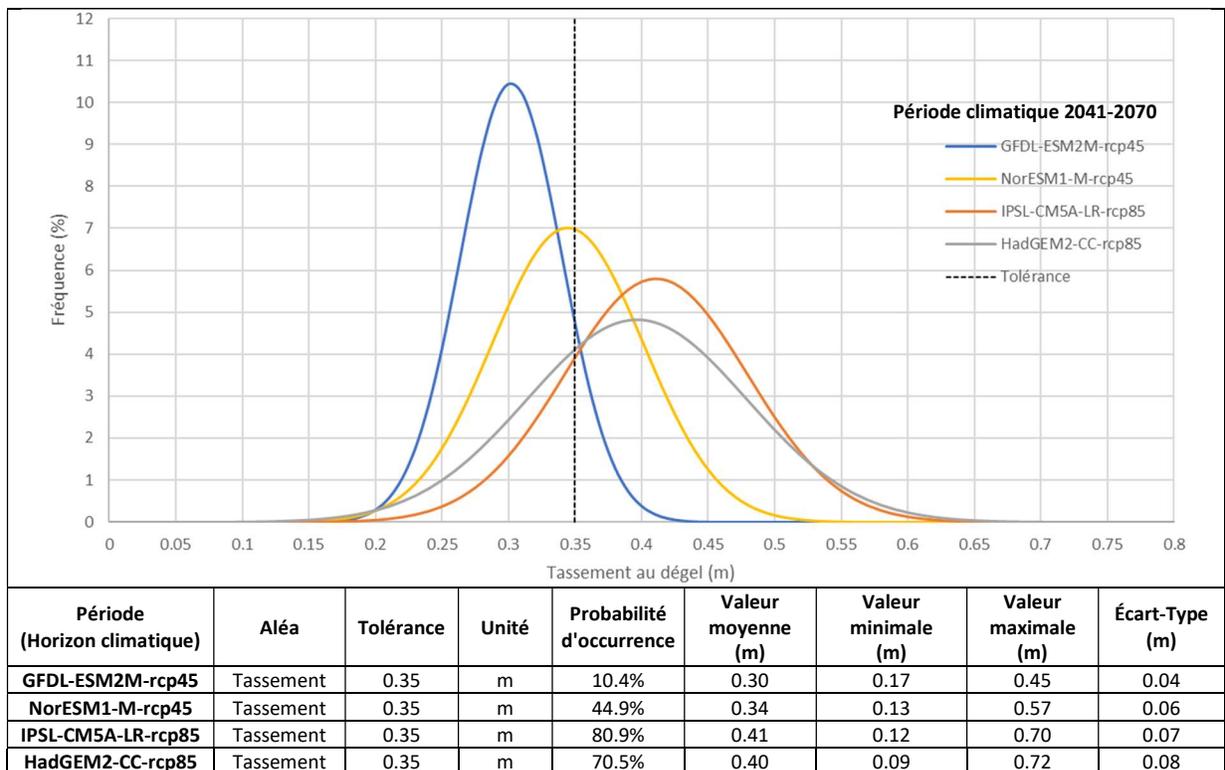


Figure 236 : Sommaire des résultats obtenus pour l'analyse de l'aléa de type tassement au dégel pour la période 2041-2070 pour chacune des simulations climatiques considérées dans l'analyse. Seulement les paramètres climatiques diffèrent entre les différentes analyses.

3.4.2.4 ÉTAPE 3.2 : ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES

Telle que présenté dans le schéma conceptuel d'évaluation du risque à la figure 218, les conséquences d'un aléa sur une infrastructure sont diverses et dépendent fortement de la sévérité de l'aléa, de son emplacement et de la superficie de l'infrastructure affectée par ce dernier. L'approche quantitative développée initialement par Brooks (2019) et adaptée dans le cadre du présent projet de recherche permet de quantifier l'aléa (probabilité d'occurrence d'un danger) en se basant sur une approche probabiliste (simulation de Monte Carlo) appliquée à des calculs intermédiaires (propriétés thermiques) et des fonctions d'ingénieries (Profondeur et tassement au dégel). Cette approche quantitative, supportée par les fondements des statistiques Bayésiennes et des fonctions mathématiques rigoureuses basées sur des principes physiques en géotechniques, limite la subjectivité dans l'évaluation des aléas.

En contrepartie, le volet portant sur l'évaluation quantitative des conséquences est extrêmement difficile sans un effort considérable de compilation des coûts de réparation et d'entretien selon les aléas, information souvent difficilement accessible ou simplement non disponible (Brooks, 2019). Pour cette raison, les conséquences pour un aléa donné sont déterminées suivant une méthode semi-quantitative. La méthode consiste à produire, pour chaque aléa étudié, une table visant à pondérer les conséquences sur une échelle arbitraire défini par le jugement de l'utilisateur.

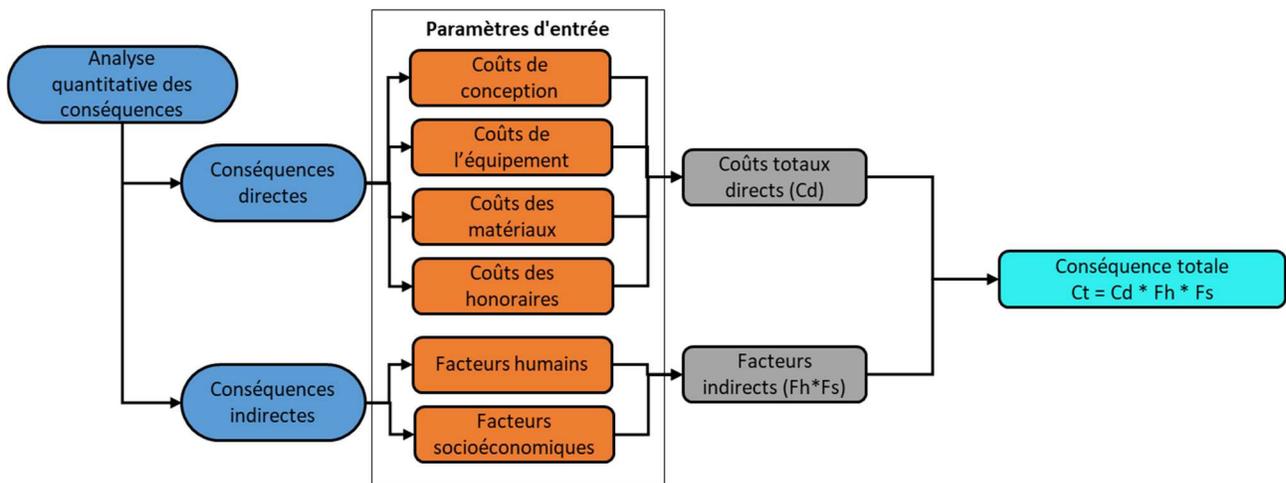


Figure 237 : Aperçu du volet d'analyse quantitative des conséquences directes et indirectes avec les différents paramètres d'entrée nécessaires à l'évaluation des conséquences total pour un aléa donné.

Ultimement, l'évaluation des conséquences totales se calcul par la formule suivante :

$$C_t = 0.5(C_d) + 0.5(C_i) \quad \text{Équation 3-29}$$

$$C_i = 0.5(F_h) + 0.5(F_s \cdot F_a) \quad \text{Équation 3-30}$$

Où les conséquences totales (C_t) correspondent aux produits des conséquences directes (C_d) et des facteurs humains et socioéconomiques indirects (F_h et F_s). L'ajout d'un facteur amplificateur (F_a) qui s'applique à la pondération des conséquences indirectes associées aux facteurs socioéconomiques permet de moduler l'ampleur de cette composante lorsque l'interruption de la fonction de l'infrastructure vient impacter également d'autres communautés. À noter que la pondération des conséquences directes et indirectes est également distribuée, mais l'utilisateur peut la modifier afin d'attribuer plus ou moins d'importance à l'une ou à l'autre.

3.4.2.4.1 CONSÉQUENCES DIRECTES

Les conséquences directes correspondent aux coûts de réparation d'une infrastructure engendrés par l'occurrence d'un aléa en particulier. Ces coûts se résument essentiellement aux coûts : de conception, de l'équipement, des matériaux et de la mise en œuvre. Dans le contexte des aéroports du MTQ au Nunavik, ces coûts peuvent être modulés en fonction des frais de mobilisation des équipements et des matériaux généralement plus élevés qui découlent de l'accessibilité restreint du territoire (absence de liens routiers). L'approche pour déterminer ces coûts est similaire à celle effectuée dans le processus d'évaluation des coûts de construction/réparation. À l'heure actuelle, le peu d'information portant sur les différents types de coûts engendrés par la construction ou la réparation des infrastructures de transport au Nunavik affecté par la dégradation du pergélisol limite la capacité à procéder à une évaluation quantitative adéquate de ces derniers. La méthode d'estimation des coûts d'entretien décrite à la section 1.8.4.2 du rapport peut permettre une estimation des coûts directs liés au tassement au dégel.

Une alternative consiste à déterminer, sur une échelle de 1 à 10, la sévérité des conséquences monétaires liées à l'entretien intensif ou à la réhabilitation en fonction des types d'aléa (Tableau 78).

Tableau 78 : Pondération des conséquences directes liées aux coûts liés à l'entretien intensif ou à la réhabilitation en fonction des types d'aléa.

Conséquences	Pondération	Description
Sévères	1	Conséquences monétaires sévères
Majeures	0.6	Conséquences monétaires majeures
Modérées	0.4	Conséquences monétaires modérées
Mineures	0.2	Conséquences monétaires mineures
Négligeables	0.1	Conséquences monétaires négligeables

3.4.2.4.2 CONSÉQUENCES INDIRECTES

La difficulté d'évaluer quantitativement les conséquences indirectes, c'est-à-dire celles liées non pas aux dommages tangibles subit par l'infrastructure, mais par les usagers, est bien réelle. Ces coûts indirects engendrés par des facteurs humains (gravité des blessures, fatalités, etc.) ou facteurs socioéconomiques (interruption du service et son impact sur l'économie local et le bien-être de la population), sont donc difficilement quantifiable sans un effort important (Dalziell et Nicholson 2001; Kiremidjian, Stergio et Lee R. 2011; Stamatis 2014). Pour cette raison, l'approche d'évaluation des conséquences indirectes proposées dans la présente procédure d'évaluation du risque repose sur une pondération de type scalaire basée sur des critères qualitatifs plutôt que quantitatifs.

L'évaluation des conséquences indirectes repose sur deux principaux facteurs, les facteurs humains et les facteurs socioéconomiques. Les facteurs humains (Fh) consistent à évaluer, de manière indirecte, les conséquences en termes de blessures ou de fatalités susceptibles de se survenir suite à l'occurrence d'un aléa. On peut donner l'exemple d'un écrasement d'avion ou d'un accident d'auto qui sont des conséquences graves d'une altération de la surface d'une infrastructure causé par un tassement au dégel ou un effondrement. Basé sur cette prémisse, l'échelle de pondération proposée pour quantifier les conséquences indirectes associés aux facteur humains est présentée au tableau 79. Puisque les dangers susceptibles d'affecter les remblais d'infrastructures linéaires de transport se produisent habituellement sur une longue période de temps, le potentiel de blessures graves ou de fatalités demeure faible. Pour cette raison, les tassements au dégel n'entraîneront généralement que des conséquences mineures.

Les facteurs socioéconomiques (Fs), quant à eux, portent sur l'évaluation des conséquences indirectes pour la communauté et celles environnantes qui découlent d'une interruption dans la fonction de l'infrastructure. Ces facteurs socioéconomiques peuvent avoir une portée assez large autant au niveau des impacts sur les communautés environnantes que sur les différents secteurs d'activités pouvant être affectés. Par exemple, une interruption de service d'un aéroport dont la localisation géographique en fait un point névralgique en termes de connectivités des passagers et de marchandises, comme celles de Salluit, Puvirnirtuq ou Kangirsuk, est susceptibles d'entraîner des conséquences socioéconomiques indirectes aux autres communautés. Dans le cas des aéroports de second ordre (ex. aéroport de Tasiujaq ou d'Aupaluk), les conséquences indirectes d'une interruption de service se limite bien souvent à la communauté elle-même. Pour cette raison, dans la nouvelle approche proposée, un facteur amplificateur des conséquences indirectes est proposées selon l'importance de l'aéroport soumise à l'analyse. En ce qui concerne les secteurs d'activités pouvant être affectée par une interruption de service, la liste peut s'avérer très exhaustive, particulièrement dans le contexte des villages du Nunavik où le transport aérien est le seul lien permanent à l'année qui assure l'acheminement des personnes et marchandises d'une communautés à l'autres. Dans un tel contexte, les conséquences indirectes d'une interruption de service est immense pour une communauté en raison des impacts multisectoriels anticipés (retard dans l'acheminement des aliments frais, des médicaments et du personnel médical, etc.). À noter que la portée des conséquences indirectes potentiels demeurent à la discrétion de l'utilisateur qui procède à l'analyse du risque. Chose certaine, ces conséquences seront proportionnelles à la durée de l'interruption qui elle dépendra de la sévérité de l'aléa et de la capacité des autorités à procéder aux réparations afin de rétablir la fonction de l'infrastructure et ou à la mise en place d'alternatives en cas d'interruption prolongée.

Dans le cadre de la démarche actuelle d'évaluation quantitative du risque, la pondération des conséquences indirectes relatives aux facteurs humains (Fh) et socioéconomiques (Fs) reprend celle proposée par Brooks (2019). Cette pondération est basée sur l'expérience de l'auteur, mais également supportée par des discussions tenues avec quelques gestionnaires d'aéroport, dont celle d'Iqaluit. Pour les aléas de type tassement au dégel et effondrement, les conséquences indirectes issues des facteurs humains sont respectivement de 1 et 2. Cette pondération des conséquences indirectes relativement basse pour ces deux aléas est justifiée par leurs chances très faible d'entraîner des blessures ou des décès. L'aspect plus imprévisible et spontané des effondrements par rapport au tassement au dégel se traduit par une pondération des conséquences humaines légèrement plus élevée, mais qui demeure somme toute assez faible. Pour ces deux aléas, les conséquences indirectes liées aux facteurs socioéconomiques dépendront de la nécessiter de fermer ou non la totalité ou une section de l'infrastructure ainsi que de la durée de l'interruption. Toutefois, une simple prise de conscience par les gestionnaires des possibles aléas susceptibles de survenir et d'affecter l'opérabilité de leur infrastructure suffit à mettre en place des mesures permettant de procéder rapidement aux réparations (machinerie, matériau et main d'œuvre) et ainsi minimiser la durée de la période d'interruption. À titre d'exemple, pour l'aéroport d'Iqaluit, les conséquences socioéconomiques associées à une interruption temporaire et partielle de la piste d'atterrissage, en assumant que la section de la piste disponible permet les évacuations médicales et la desserte des communautés, avaient été évaluées à 2 (Mineures) par Brooks (2019). Les conséquences socioéconomiques de ces aléas pourraient être revue à la baisse étant donné que les pistes du Nunavik sont en gravier et les évacuations médicales et possiblement l'acheminement de toutes autres ressources nécessaires (médicament, denrées fraîches, etc.) peuvent être assurer au besoin par des avions de type Twin Otter dont la tolérance aux déformations de piste est très élevée. Par exemple, en prévoyant une réserve en gravier suffisante, des tassements ou effondrement pourraient temporairement être comblés et ainsi restaurer la pleine fonctionnalité de l'infrastructure. Dans le cas d'une fermeture partielle, les pistes sont généralement assez longues pour permettre aux avions de type Otter de décoller et d'atterrir sans problème.

Tableau 79 : Pondération des conséquences indirectes liées aux facteurs humains (Fh).

Conséquences	Pondération	Description
Sévères	1	Décès
Majeures	0.6	Blessures graves nécessitant une évacuation
Modérées	0.4	Blessures demandant des soins
Mineures	0.2	Blessures mineures
Négligeables	0.1	Peu ou pas de blessures

Tableau 80 : Exemple de classification des pistes d'atterrissages selon leur importance, leur fonction, le type d'appareil et leur tolérance aux déformations.

Aéroport	Importance	Fonction	Type d'appareil	Tolérance au déformation
Umiujaq	Faible	Desserte locale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Inukjuak	Modérée	Desserte locale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Puvirnituaq	Élevée	Desserte régionale	DHC-6, BE-350, DHC-8 et 737	Faible
Akulivik	Faible	Desserte locale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Ivujivik	Faible	Desserte locale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Salluit	Élevée	Desserte régionale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Kangiqsujuaq	Faible	Desserte locale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Quaqtaq	Faible	Desserte locale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Kangirsuk	Modérée	Desserte régionale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Aupaluk	Faible	Desserte locale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Tasiujaq	Faible	Desserte locale	DHC-6 et DHC-8	Modérée
Kangiqsuallujuaq	Faible	Desserte locale	DHC-6 et BE-350	Modérée

Tableau 81 : Pondération des conséquences indirectes liées aux facteurs socioéconomiques (Fs).

Conséquences	Pondération	Description
Sévères	1	Coût économique très élevé
Majeures	0.6	Coût économique élevé
Modérées	0.4	Coût économique moyen
Mineures	0.2	Coût économique faible
Négligeables	0.1	Coût économique très faible

Tableau 82 : Facteur amplificateur en fonction des conséquences indirectes associées aux facteurs socioéconomiques susceptibles d'affecter d'autres communautés.

Conséquences	Pondération	Description
Sévères	10	Impact sur plus de la moitié des communautés (> 8)
Majeures	6	Impacts sur plusieurs communautés (4 à 8)
Modérées	4	Impact sur quelques communautés (2 à 4)
Mineures	2	Impact sur quelques communautés (1 à 2)
Négligeables	1	Pas de conséquence sur les autres communautés

3.4.2.5 CLASSIFICATION DU RISQUE

Le niveau de risque fait référence à l'importance attribuée à un risque en fonction de l'évaluation des probabilités d'occurrence de l'aléa en cause et de ses conséquences potentielles (MSP, 2008). Une fois les probabilités d'occurrence d'un aléa évaluée par l'outil d'analyse quantitative du risque (étape 3.1) et les conséquences potentielles déterminées (étapes 3.2), tous les paramètres requis pour classifier le risque sont alors déterminés.

Une classification du risque couramment utilisée repose sur l'utilisation de deux échelles qualitatives. L'une expose une gradation de l'importance des probabilités d'occurrence d'un aléa et la seconde décrit une gradation des conséquences potentielles (Figure 220). Dans l'exemple proposé, cinq niveaux de probabilités d'occurrence sont retenus allant de presque certain à rare et pour chacune des classes de valeurs de probabilités d'occurrence ont été déterminées (Figure 220). Ainsi, la valeur de probabilité d'occurrence d'un aléa obtenue par l'outil servira à classifier le risque selon les niveaux de probabilités déterminés. Pour ce qui est des conséquences, cinq niveaux ont également été retenus allant de négligeable à sévères et pour lesquels les valeurs obtenues par l'équation 3-29 permettent de classifier les conséquences dans le bon niveau. Que l'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un aléa et celle des conséquences soient de nature qualitative ou quantitative, une telle méthode de classification permet de classifier le risque selon quatre niveaux : faible, modéré, élevé et extrême. Une telle matrice permet de classer le risque en considérant non seulement sa probabilité d'occurrence, mais également selon ses conséquences sur l'opérabilité d'une infrastructure et la sécurité des utilisateurs. Par exemple, pour un aléa dont la probabilité d'occurrence est évaluée comme étant faible, mais dont les conséquences potentielles sont jugées sévères, le niveau de risque associé sera modéré. Par opposition, un aléa presque certain, mais dont les conséquences seront négligeables, présentera également un niveau de risque modéré.

Il est important de mentionner que malgré que la matrice de classification du risque présentée à la figure 220 s'appuie sur des critères de classement qualitatifs, l'évaluation des probabilités et des conséquences d'un aléa peuvent, quant à elle, être effectuée en utilisant des méthodes quantitatives. Dans l'outil proposé, l'évaluation de l'aléa est supportée par une méthode statistique rigoureuse qui utilise des fonctions mathématiques pour procéder à une évaluation quantitative. En contrepartie, l'évaluation des conséquences qui est proposée se base sur une pondération des conséquences directes et indirectes potentielles qui demeure à la discrétion de l'utilisateur. Même si l'évaluation des conséquences pourrait également se faire de manière quantitative, cette dernière demeure pour le moment essentiellement qualitative. Nous sommes donc actuellement en présence d'une approche de classification du risque hybride qui utilise à la fois des données quantitatives et qualitatives. L'intérêt de cette approche de classification tient au fait que des probabilités d'occurrence et des conséquences quantifiables ne sont généralement pas accessibles pour tous les risques. Le recours à une matrice de classification du risque comme celle proposée à la figure 220 permet donc de faciliter l'établissement du niveau de risque et la comparaison entre eux, et ce, même si les paramètres nécessaires à l'évaluation du risque (aléa et conséquences) ont été calculés ou pondérés utilisant une méthode quantitative ou qualitative basée sur l'expérience de l'utilisateur.

		Pondération	Conséquences				
			Négligeables	Mineures	Modérées	Majeures	Sévères
			0.1	0.2	0.4	0.6	1
Probabilités	Presque certain (76-100%)	A	Modéré	Élevé	Extrême	Extrême	Extrême
	Très probable (51-75%)	B	Modéré	Modéré	Élevé	Extrême	Extrême
	Probable (26-50%)	C	Faible	Modéré	Modéré	Élevé	Extrême
	Peu probable (6-25%)	D	Faible	Faible	Modéré	Modéré	Élevé
	Rare (<5%)	E	Faible	Faible	Faible	Modéré	Modéré

Figure 238 : Exemple de matrice de classification des risques mettant en relation la probabilité d'occurrence d'un aléa et ses conséquences.

3.4.3 ÉTAPE 4 : ÉVALUATION DU RISQUE

L'estimation et la classification du risque associé à un aléa permettent de dresser un portrait le plus juste possible du niveau de risque que ce dernier représente pour les infrastructures et les usagers. Toutefois, le niveau de risque ainsi déterminé n'indique en rien le seuil d'acceptabilité de celui-ci et la priorité de traitement qui doit lui être accordée. Selon son importance, cette étape d'évaluation permet de déterminer si le niveau de risque établi est jugé acceptable ou s'il requiert la mise en place de mesures additionnelles en vue de diminuer son importance. Pour un risque nécessitant la mise en place de mesures, une priorité de traitement pourra alors être déterminée. Cette évaluation du risque mènera alors à la mise en place de mesures de gestion adaptées aux caractéristiques et à l'importance des risques considérés. Cette étape de l'évaluation des risques peut donc être définie comme un processus visant, d'une part, à déterminer les risques qui requièrent la mise en place de mesures pour en réduire l'importance et d'autres part, à leur attribuer une priorité de traitement.

3.4.4 ÉTAPE 5 : TRAITEMENT DU RISQUE

Lorsqu'un aléa présente un risque pour une infrastructure, l'utilisateur peut considérer deux solutions pour traiter le risque. Ces solutions se résument à : 1) augmenter la résilience de l'infrastructure exposée ou 2) relocaliser l'infrastructure.

3.4.4.1 AUGMENTER LA RÉSILIENCE DE L'INFRASTRUCTURE EXPOSÉE

La première solution consiste à gérer l'infrastructure en fonction de la connaissance des risques associés à cet aléa et ses conséquences sur l'opérabilité de l'infrastructure. Une telle connaissance requiert une documentation exhaustive des caractéristiques propres au milieu, à savoir la variabilité des conditions du pergélisol à l'échelle de l'infrastructure (distribution, teneur en glace, température) et l'identification et la description des différents aléas qui leur sont associés. Pour chacun des aléas identifiés, il importe d'identifier les facteurs qui influencent l'occurrence, la vitesse de développement, l'amplitude et la durée de ces derniers. Une fois cette documentation exhaustive réalisée pour un milieu donné, il est possible de mettre en place des éléments visant à accroître la résilience de l'infrastructure exposée. Une infrastructure adaptée permettra d'éviter la manifestation d'un aléa ou d'en limiter les probabilités d'occurrence, de résister à l'aléa ou de réagir rapidement pour permettre à l'infrastructure de se rétablir lorsque l'aléa survient. Ces éléments qui permettent d'accroître la résilience des infrastructures se divisent en deux catégories à savoir : ceux qui permettent la mitigation du risque et ceux qui visent l'anticipation et la préparation nécessaire pour mieux réagir et rétablir l'opérabilité de l'infrastructure rapidement suite à l'occurrence d'un aléa.

En présence de conditions propices à l'occurrence d'aléas associés à la dégradation du pergélisol, les éléments de mitigation incluent la mise en place de techniques visant à minimiser le dégel du pergélisol (techniques de stabilisation thermique) ou les impacts structuraux potentiels (techniques de stabilisation mécanique) afin de maintenir un niveau d'opérabilité acceptable de l'infrastructure. En fonction des processus de dégradation du pergélisol et de leurs causes, des caractéristiques de l'infrastructure et des conditions climatiques actuelles et futures, les principales techniques de stabilisation thermiques se résument principalement à l'utilisation de pentes douces, de remblais convectifs, les surfaces à albédo élevé, le rehaussement ou l'isolation des remblais. Ces techniques peuvent être combinées afin d'optimiser la performance globale de la stratégie d'adaptation mise en place (ex. : rehaussement du remblai avec adoucissement des pentes et utilisation d'une surface à albédo élevé). Néanmoins, l'ensemble de ces techniques dites de stabilisation thermique visent à limiter ou stabiliser la dégradation du pergélisol par l'atténuation des facteurs qui en sont responsables. Par conséquent, ces techniques ont une limitation importante. Dans un contexte où le climat se réchauffera, ces techniques de stabilisation thermique ne permettront pas, outre que de ralentir, de maintenir voire refroidir le pergélisol à des températures inférieures à celles induites par des conditions plus chaudes (ex. : réchauffement des températures de l'air). En bref, malgré la mise en place de pente douce, de surface à albédo élevé, de remblai à convection, d'isolation où

autres techniques, le pergélisol sous les sections adaptées se réchauffera proportionnellement en fonction du réchauffement du climat. En raison de cette interdépendance avec le climat, la performance de ces techniques de stabilisation thermique, dans un contexte de réchauffement climatique, deviendra de plus en plus limitée. Dans un tel contexte, certaines techniques de stabilisation mécanique pourraient être appliquées en complémentarité aux techniques de stabilisation thermique afin de préserver l'intégrité structurelle de l'infrastructure advenant une perte d'efficacité et qui entraînerait une dégradation thermique du pergélisol (ex. géogrille, berme, remplacement des sols problématique). Ces techniques de stabilisation mécanique peuvent également être appliquées seules et dimensionnées de telle sorte que les caractéristiques du pergélisol ne constitueraient pas des éléments de dimensionnement. Ainsi, la performance de ces techniques de stabilisation mécanique sera indépendante des conditions climatiques futures et de la dégradation thermique du pergélisol associée à un possible réchauffement des températures de l'air.

Dans l'impossibilité d'appliquer de telles techniques de mitigation en vue de minimiser les risques qui découlent d'une dégradation thermique du pergélisol, une bonne préparation, tant au niveau des prises de décision (gestionnaires) qu'au niveau des interventions (équipes d'entretien) et des opérations (opérateurs), permettrait d'accroître la résilience des infrastructures exposées aux aléas du pergélisol. L'objectif de la préparation est d'anticiper les aléas et leurs conséquences sur l'infrastructure afin de mettre en place les mécanismes, les outils et les ressources nécessaires pour mieux réagir lors de leur occurrence, et ce, en vue de maintenir ou rétablir le plus rapidement possible l'opérabilité (minimiser les impacts). De tels mécanismes peuvent, sans s'y limiter, consister à : des suivis réguliers afin d'identifier et évaluer tout signe indicateur d'un danger potentiel pour l'infrastructure (systèmes d'alerte), des protocoles visant à coordonner les actions en réponse à un aléa en particulier ou une planification adéquate des ressources nécessaires (ex. matériaux granulaires, équipement et main d'œuvre) afin de permettre d'intervenir rapidement et adéquatement pour rétablir l'opérabilité de l'infrastructure. Ces éléments, axés davantage dans la préparation et la planification à faire face à un aléa, peuvent constituer à eux seuls des mesures d'adaptation ou être utilisés en complémentarité à la mise en place de techniques de mitigation visant à stabiliser thermiquement ou mécaniquement l'infrastructure.

3.4.4.2 RELOCALISER L'INFRASTRUCTURE

Advenant l'impossibilité d'appliquer des mesures de stabilisation thermique et mécanique efficaces contre le dégel du pergélisol, d'une absence de volonté dans la préparation à faire face aux aléas potentiels ou par le manque de ressources suffisantes nécessaires au maintien et rétablissement de l'opérabilité de l'infrastructure suite à un aléa, la deuxième solution consiste à relocaliser l'infrastructure. Lors de cette relocalisation, il importe d'appliquer le principe de précaution et ainsi éviter les zones à haut risque que pourraient représenter certaines conditions de pergélisol, particulièrement dans un contexte de changement climatique. Malheureusement, dans un contexte où l'infrastructure relocalisée devra desservir une communauté ou relier différents lieux d'occupation du territoire, il peut s'avérer difficile, voire impossible, d'exclure tout secteur problématique dans la planification d'un tracé ou la sélection d'un site d'implantation. Néanmoins, la connaissance des conditions du pergélisol, de la variabilité de ses conditions et des aléas associés augmenterait la vigilance des concepteurs, des constructeurs et des opérateurs, ce qui contribuerait à accroître la résilience des infrastructures et limiterait ainsi les risques potentiels.

3.4.5 ÉTAPE 6 : SUIVI ET RÉÉVALUATION DU RISQUE

Au cours de la durée de vie d'une infrastructure, les conditions environnementales changeantes ainsi que les modifications apportées à même l'infrastructure constituent des facteurs susceptibles de modifier le régime thermique du pergélisol et nécessairement la probabilité d'occurrence d'un aléa associé au dégel du pergélisol. Rappelons que l'équilibre thermique du système pergélisol, qui régit en grande partie sa stabilité mécanique, est particulièrement sensible aux changements climatiques ou aux modifications des conditions de surface (albédo,

enneigement, drainage, etc.). Cet aspect transitoire du risque requiert bien souvent une réanalyse afin de tenir compte des modifications apportées à l'infrastructure susceptible de modifier le régime thermique du pergélisol, de refléter davantage l'intégration de nouvelles connaissances susceptibles de modifier le niveau de risque (ex. nouveau scénario de changement climatique, réévaluation à la hausse ou à la baisse des teneurs en glace, etc.) ou simplement des changements au niveau de la vulnérabilité d'une infrastructure face à un aléa (ex. modification du rôle, de la tolérance, etc.). Cet aspect évolutif du risque requiert la mise en place de mécanisme itératif, cyclique et permanent au sein de la procédure de gestion du risque (Figure 219) afin d'assurer un suivi et une révision des différentes étapes nécessaires à l'estimation du risque. De cette façon, l'évaluation du risque et son traitement peuvent être révisés afin de mieux répondre à son évolution anticipée.

Cette réévaluation permet de s'assurer que les décisions prises pour traiter le risque sont suffisantes ou si des modifications sont requises. Ces modifications peuvent tenir compte de nouvelles connaissances ou données sur un ou plusieurs risques, de l'occurrence de nouveaux aléas, de l'augmentation de l'importance des aléas déjà analysés ou d'une augmentation de la vulnérabilité d'une infrastructure ou de la collectivité face à un aléa. De telles modifications au processus peuvent aussi découler d'une évaluation de la performance des mesures de mitigation mises en place advenant l'observation d'effets négatifs non anticipés ou simplement une efficacité non escomptée de ces dernières. Une telle procédure de suivi et de révision du risque contribue à assurer une prise de décisions éclairée et cohérente en matière de gestion du risque.

3.5 DISCUSSION ET CONCLUSION

L'outil proposé par Brooks (2019) et adapté au contexte des infrastructures linéaires de transport du Nunavik a été grandement simplifié de telle sorte que le nombre de paramètres d'entrée requis par l'utilisateur est désormais minimal sans toutefois affecter la validité de l'analyse. Cette simplification offre l'avantage, outre de faciliter son utilisation, de pouvoir plus facilement imbriquer la procédure à l'intérieur d'une approche d'analyse géospatiale du risque. La section et la superficie de l'infrastructure affectées par un aléa auront des impacts considérables sur les conséquences engendrées. Par exemple, en ce qui concerne une piste d'atterrissage, un tassement qui survient dans les accotements ou aux extrémités de la piste représentera un risque moins élevé que des tassements qui affectent la bande de roulement ou les zones critiques de décollage et d'atterrissage. Également, considérant la sécurité des usagers, la section affectée déterminera si l'infrastructure doit être complètement ou en partie fermée afin de procéder aux réparations. Ainsi, une fermeture partielle de l'infrastructure limite les conséquences indirectes, car une fonctionnalité minimale peut-être assurée (restriction du type d'appareil, maintien des évacuations médicales, etc.). Pour ce qui est de la superficie de la zone affectée, cette dernière déterminera les conséquences directes associées aux coûts de réparation et dans une moindre mesure, le temps également requis pour rétablir la fonction de l'infrastructure. Cette variabilité des conséquences à l'échelle de l'infrastructure justifie la pertinence de développer une approche d'analyse spatiale du risque basée sur l'outil d'analyse quantitative du risque proposé dans la présente étude. Toutefois, la spatialisation du risque impose plusieurs défis techniques associés d'une part à la non-uniformité des conditions géotechniques et également au temps de traitement requis pour conduire l'analyse du risque en soit. Par conséquent, malgré le fort potentiel que présente une approche d'analyse spatiale du risque, plusieurs aspects requièrent des efforts en recherche supplémentaires.

Il est à rappeler que le fluage ainsi que le soulèvement au gel n'ont jamais été considérés dans l'outil développé par Brooks (2019). Pour cette raison, ces dangers demeurent toujours exclus de l'analyse du risque proposée et, en raison de leur complexité, vont nécessiter des recherches supplémentaires s'il s'avère pertinent de les intégrer dans le futur. Le danger que constitue le soulèvement au gel s'applique dans un contexte de dégradation avancée du pergélisol où la profondeur maximale du front de dégel et de gel pénètre dans le sol naturel sous-jacent au remblai. En fonction de la gélivité du dépôt soumis à ces cycles de gel et de dégel, le problème de soulèvement

gélival peut entraîner la déformation accotement (étalement des accotements), dislocation des ponceaux. Actuellement, pour ce qui est des pistes d'atterrissage, ce risque demeure faible en raison de la faible pénétration du front de gel et dégel sous le remblai. Toutefois, avec l'augmentation des épaisseurs de la couche active anticipée avec le réchauffement climatique, l'augmentation de l'épaisseur de la couche active au-delà de la base du remblai pourra entraîner des déformations de la surface (soulèvements en hiver et tassements en été) observables sur une base saisonnière. Actuellement, ce risque a surtout causé la détérioration des clôtures ancrées dans la couche active ou à faible profondeur dans le pergélisol.

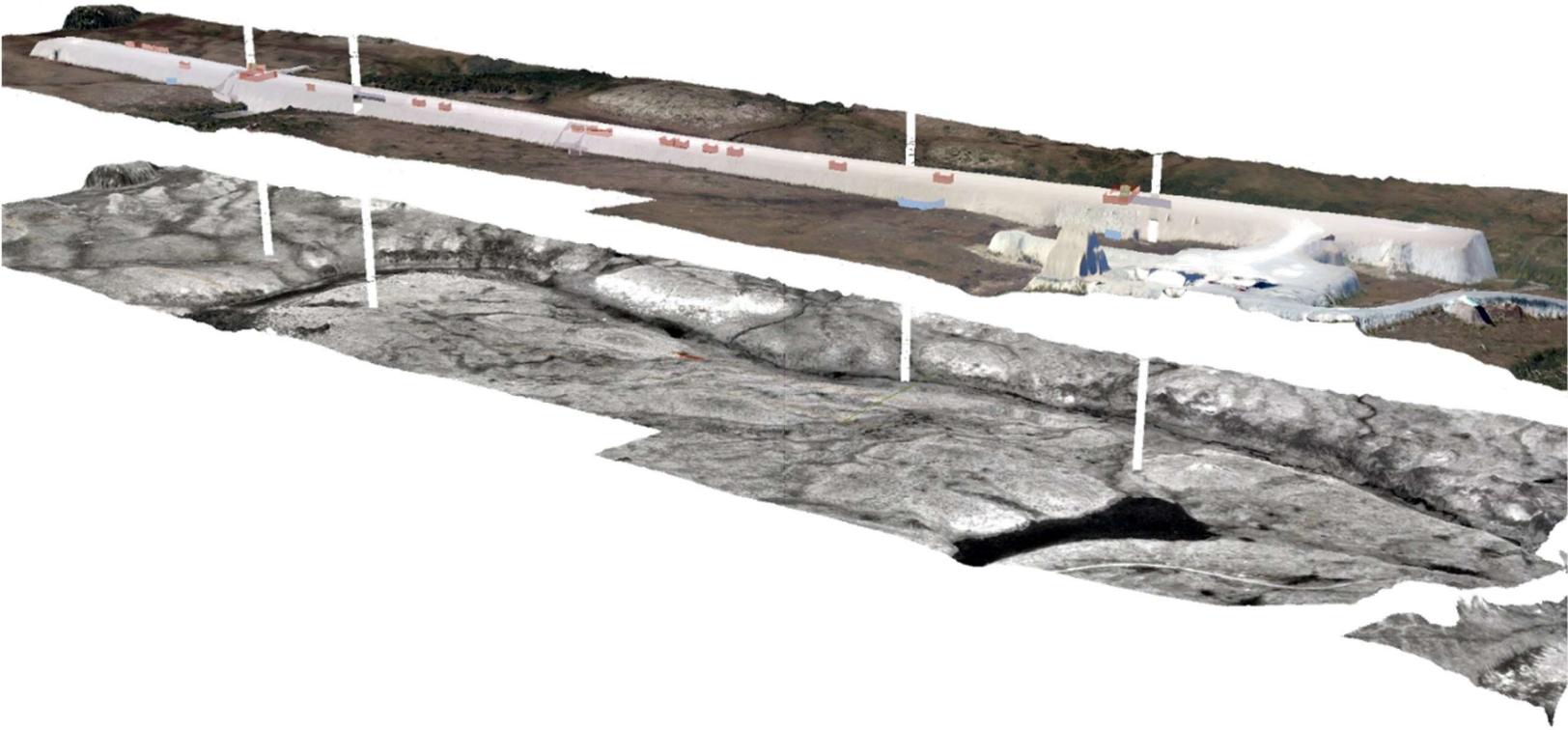
Dans un contexte où les gestionnaires doivent composer avec des infrastructures déjà en place et les caractéristiques du milieu sur lesquelles elles reposent et où une incertitude plane quant à la vitesse et l'amplitude des changements climatiques à venir, il importe de se tourner sur le concept de résilience afin de minimiser les risques futurs. Le concept de résilience repose, en présence d'un aléa donné et d'un degré d'exposition, à la mise en place de diverses solutions technologiques ou décisionnelles permettant de mieux mitiger, mieux se préparer, mieux réagir et mieux se rétablir pour limiter les impacts d'un aléa sur l'opérabilité de l'infrastructure.

Compte tenu de la proactivité du Ministère des Transports du Québec dans la gestion du risque aux aéroports où les aléas associés à une dégradation thermique du pergélisol sont présents, plusieurs des solutions/stratégies proposées précédemment afin d'accroître la résilience ont déjà été appliquées ou sont en voie de l'être. Par exemple, pour chacune des infrastructures, le Ministère, par l'entremise de nombreux projets de recherches ou de contrats privés, dispose de connaissances approfondies sur la variabilité des conditions du pergélisol, les mécanismes de dégradation en causes et leur risque potentiel sur l'opérabilité de leurs infrastructures. À ces connaissances, qui ont permis de cibler les secteurs problématiques jugés à haut risque, s'ajoute un suivi thermique régulier qui fait l'état du comportement thermique du pergélisol à l'échelle des infrastructures en fonction des variabilités actuelles du climat. En plus de permettre de documenter l'évolution du comportement thermique, ce suivi thermique permet de supporter le développement de modèles numériques visant à prédire le comportement thermique et mécanique futur et déterminer quelles en seront les conséquences sur l'opérabilité de l'infrastructure. En complément, le Ministère réalise de nombreux suivis périodiques afin de relever toutes déficiences qui peuvent représenter un risque pour l'intégrité de l'infrastructure ou les opérations associées. Ce sont d'ailleurs ces connaissances de base sur le pergélisol et les informations évolutives fournies par les différents suivis qui ont permis au Ministère d'établir un ordre de priorité des infrastructures à adapter en fonction du niveau de risque et de déterminer les techniques de mitigation les plus appropriées pour adapter les infrastructures aux changements climatiques. La continuité des suivis après adaptation permet d'évaluer et de documenter la performance des techniques de mitigation mise en place et ainsi procéder, au besoin, à une réévaluation du risque et appliquer, si nécessaire, des mesures supplémentaires pour le minimiser.

La stratégie à adopter face aux enjeux du dégel du pergélisol et les impacts sur le milieu bâti repose sur une complémentarité tant au niveau de l'acquisition de la connaissance sur les conditions du pergélisol qu'au niveau des méthodes d'adaptation des infrastructures à privilégier ainsi que sur les mécanismes à mettre en place afin d'accroître leur résilience. Au cours des vingt dernières années, la collaboration entre le Ministère et les universités a permis de développer et d'instaurer un cadre de gestion du risque qui a été développé suivant cette approche collaborative. Dans le contexte des changements climatiques, cette collaboration se doit d'être maintenue afin d'assurer un mécanisme de gestion du risque axé davantage sur la proactivité que la réactivité, comme c'est le cas trop souvent. Le rôle de la recherche dans le développement et le maintien des outils de gestion doit être appuyé par des développements conséquents dans les processus d'acquisition, de traitement et de diffusion de l'information. La mise à jour de cette information scientifique demeure une composante cruciale afin d'orienter adéquatement le choix et les priorités d'interventions nécessaires au maintien d'infrastructure sécuritaire. Malheureusement, une certaine latence dans l'acquisition des données tant au niveau du suivi thermique que mécanique persiste actuellement, ce qui retarde la capacité d'analyse et d'évaluation du risque. Il

en résulte bien souvent un retard pour la prise de décision dans le choix du type d'intervention, qui, combiné aux défis logistiques propres aux régions nordiques isolées, ralentit considérablement la réactivité des autorités face aux enjeux de sécurité. Dans un contexte où les pistes d'atterrissage constituent des points névralgiques de très hautes importances qui jouent un rôle central pour le maintien de la santé, la sécurité et l'économie des communautés nordiques, une telle latence peut avoir un impact majeur et mérite que l'on s'y attarde. Ceci est d'autant plus important dans un contexte de changement climatique pour lequel le passé n'est plus garant du futur.

4



VOLET 4 : DÉVELOPPEMENT D'OUTILS DE GESTION INTÉGRÉS POUR SOUTENIR LA CONCEPTION, L'ENTRETIEN, LE SUIVI ET LA GESTION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ EN ZONE DE PERGÉLISOL DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

4.1 MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS

À partir des registres d'exploitation, des données et des informations recueillies par le Ministère dans le cadre des projets de recherche sur l'état ainsi que sur le comportement des infrastructures en lien avec le dégel du pergélisol, ce volet du projet vise à effectuer une refonte qui permettra de consolider et de transférer la connaissance, de soutenir la conception et l'exploitation des réseaux de transport ainsi que d'améliorer le suivi et la gestion de risques des ouvrages dans un contexte de changements climatiques. Pour ce faire, ce volet du projet consiste essentiellement à développer des outils d'aide à la décision ainsi que de transfert et de consolidation de connaissances pour optimiser la prise en compte des connaissances acquises sur les risques naturels et l'adaptation aux changements climatiques pour soutenir la planification des interventions et la gestion des infrastructures de transport en zone de pergélisol.

Dans ce volet, il a été convenu de développer les quatre outils d'aide à la décision et de transfert de connaissance suivants :

1. Une base de données géospatiales avec plate-forme de visualisation et de diffusion portant sur les géosystèmes, les données géotechniques, les risques naturels, la localisation de l'instrumentation et autres sur les sites d'infrastructures du Ministère au Nunavik ;
2. Un protocole pour le suivi et l'entretien des infrastructures et des équipements mis en place pour adapter les ouvrages aux changements climatiques ;
3. Un rapport synthèse sur le suivi et analyse des infrastructures de transport du MTQ sensibles au dégel du pergélisol dans un contexte de changements climatiques au Nunavik ;
4. Un outil numérique et guide d'utilisation pour le processus de gestion quantitative des risques liés aux changements climatiques pour les infrastructures de transport en zone de pergélisol.

4.1.1 BASE DE DONNÉES GÉOSPATIALES ET PLATEFORME DE VISUALISATION

4.1.1.1 INTRODUCTION

Dans le cadre de la réalisation du projet CC19.1, une structure de stockage (base de données géospatiale) sous la plateforme ArcGIS 10.5 est en cours de développement afin de regrouper efficacement les données géospatiales pertinentes au projet de recherche et à la planification des interventions du MTQ. La base de données en cours de développement consiste en des couches d'entités géographiques (points, lignes et zones) pour lesquelles des champs spécifiques ont été définis permettant ainsi d'uniformiser et structurer l'information d'un site à l'autre. Afin d'uniformiser l'acquisition des données, des dictionnaires (liste de valeurs possibles préétablies) sont également en cours de développement pour les différents champs contenus dans les couches d'entités et tables d'attributs. Outre la structuration de l'information, l'un des objectifs de cette base de données est de pouvoir être interrogée via une plate-forme de visualisation. Cette plate-forme permettra de consulter et de visualiser les données acquises par l'instrumentation et les équipements de suivi liés au dégel du pergélisol en place ainsi que l'information géophysique et géotechnique produite dans les études antérieures conduites par l'Université Laval. Cet outil d'aide à la décision permettra notamment d'optimiser la planification des interventions (conception, entretien, etc.), de documenter l'efficacité des mesures d'adaptation aux CC à long terme et d'optimiser la gestion de risque des ouvrages. Les données seront hébergées sur le serveur du CEN qui en assurera le maintien, la sécurité et la sauvegarde pour la durée du projet de recherche.

4.1.1.2 CONCEPTION DE LA GÉODATABASE

La conception d'une géodatabase implique l'organisation des informations géographiques disponibles à l'intérieur d'une série de thèmes de données, c'est-à-dire un ensemble d'éléments géographiques communs (ex. infrastructures routières, dépôts de surface, modèle numérique d'altitude, imagerie satellite, etc.). Cette organisation de l'information en série de couches thématiques est un concept clé d'un système d'information géographique et implique de s'attarder à la manière de diviser et regrouper cette information de manière logique. À partir de cette sélection de données disponibles et regroupées sous forme de thème, le mode de représentation le plus approprié pour représenter l'information sera sélectionné. Chacun des thèmes disposera de ses propres modes de représentations de l'information (points, lignes, polygones, surfaces, matrices, etc.) déterminés en fonction de l'expression spatiale des phénomènes réels à représenter. L'une des premières étapes de la conception de la base de données géospatiales du MTQ consistait à identifier les éléments géographiques à cartographier et les jeux de données associées disponibles. En collaboration avec le MTQ, les données disponibles ont été regroupées par thèmes (jeux de classes d'entité), puis par classes d'entités selon le mode de représentation approprié.

4.1.1.3 PRÉSENTATION DES ÉLÉMENTS STRUCTURELS D'UNE GÉODATABASE

Dans l'environnement ArcGIS et autres systèmes SIG similaires, on distingue trois types de jeux de données fondamentaux qui permettent de représenter spatialement des phénomènes réels. Ces trois principaux types de jeux de données sont : les classes d'entités (données vectorielles), les tables attributaires et les jeux de données matricielles. La représentation géographique d'un phénomène oriente le choix du type de jeux de données qui sera utilisé, mais ne se limite pas, bien souvent, qu'à une seule option. Par exemple, il est commun de représenter la topographie par des courbes de niveau (données vectorielles) ou par une image topographique (matricielle). Dans ce contexte, les aspects de sémantiques vont diriger l'utilisation d'un format plutôt qu'un autre afin de permettre une représentation adéquate du ou des phénomènes. La création d'un ensemble de ces types de données constitue la première étape de la conception et de la création d'une géodatabase. L'intégration de ces jeux de données dans une géodatabase permet d'établir des relations entre ces derniers. Ce perfectionnement de la géodatabase à l'aide de fonctionnalités avancées facilite l'acquisition et la gestion des données tout en assurant leurs intégrités.

Classes d'entités (données vectorielles) : les classes d'entités sont des ensembles homogènes d'entités (objets géographiques) avec une représentation spatiale commune possédant une géométrie vectorielle (un point, une ligne ou un polygone) (Figure 239A) et dont les attributs sont stockés dans une table de base de données (Figure 239B). Les classes d'entités sont simplement des tables avec des champs spéciaux contenant des informations sur la géométrie des entités. Ce type de données géographiques est bien adapté pour représenter des entités possédant des limites disjointes comme des rues, des états et des parcelles.

Tables attributaires : Tables composées de lignes et de colonnes. Les lignes représentent des enregistrements, et les colonnes des champs. Chaque champ permet de stocker un type spécifique de données (ex. : un nombre, une date ou du texte) et les lignes constituent la base des entités géographiques (Figure 239B).

Dans ArcGIS, il est possible d'associer les enregistrements d'une table à des enregistrements d'une autre table à l'aide d'un champ commun appelé clé. De cette manière, il est possible de créer temporairement ou de façon permanente des liens entre les différentes tables. L'utilisation de classes de relations dans la géodatabase permet de définir et gérer les associations permanentes entre les tables (Figure 239B).

Raster (données matricielles) : Matrice de cellules (ou pixels) organisées en lignes et en colonnes (grille) dans laquelle chaque cellule contient une valeur représentant des informations sur le phénomène réel

représenté (ex. photographies aériennes numériques, des images satellites, des images numériques, modèle numérique d'altitude, des plans numérisés, etc).

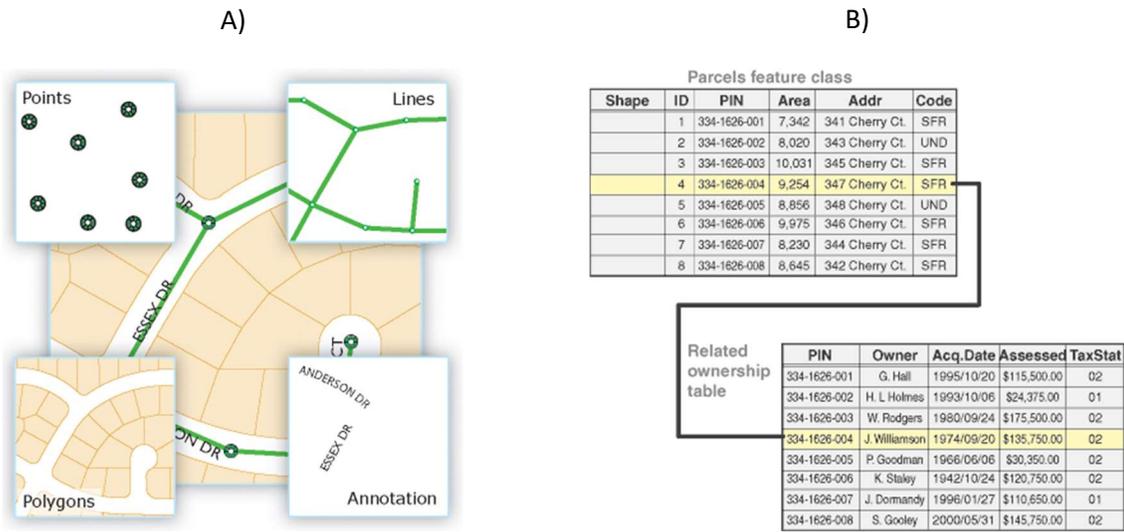


Figure 239 : A) Types de classes d'entités en fonction de leur géométrie vectorielle (un point, une ligne ou un polygone). B) Exemple d'une table attributaire utilisée pour les classes d'entités et qui permet de stocker les informations sur la géométrie vectorielle (table du haut) et d'une table attributaire mise en relation à l'aide d'un champ commun et une classe de relation (sources : ArcGIS).

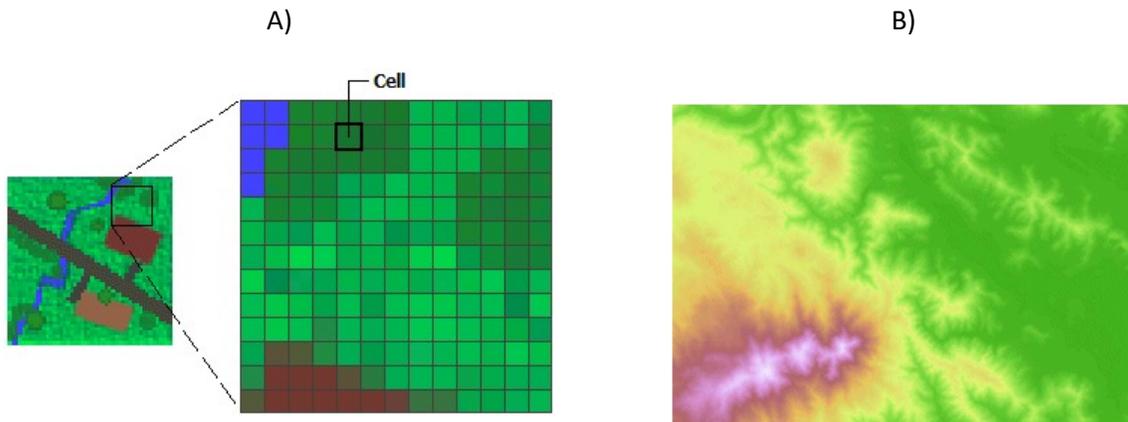


Figure 240 : Représentation géographique d'un phénomène réel utilisant un jeu de données matricielles. A) Type d'occupations du sol (données discrètes) et B) modèle numérique d'altitude (données continues) (sources : ArcGIS).

4.1.1.4 DESCRIPTION ET ORGANISATION DES DONNÉES CONTENUES DANS LA BASE DE DONNÉES DU MTQ

La base de données développée contiendra, sans s’y limiter, les couches d’information géographique présentées à l’annexe C. Il est important de mentionner que ces couches d’information se divisent en trois principaux types selon la structure et le format qui convient le mieux à la représentation géographique du phénomène cartographié. Ainsi, nous retrouvons les données vectorielles (classe d’entité sous forme de point, de lignes ou de polygones), les tables attributaires (table non spatiale) et les données matricielles (raster). À noter que plusieurs tables attributaires seront hébergées et gérées par d’autres bases de données déjà existantes.

4.1.1.5 SCHÉMA DE LA STRUCTURE GÉNÉRALE DE LA BASE DE DONNÉES DU PROJET CC19.1 ET SON ARRIMAGE AVEC LES BASES DE DONNÉES EXISTANTES DU CEN

La structure de la base de données développée dans le cadre du projet de recherche CC19.1 permettra l’arrimage entre les éléments géographiques contenus dans la géodatabase et, si applicable, les résultats qui leur sont associés et qui sont stockés dans les bases de données déjà existantes du Centre d’études nordiques (CEN). Actuellement, le CEN dispose de deux bases de données, soit une nommée Cryobase qui stocke et gère les données géotechniques et une nommée SILA qui contient les données de suivi environnemental (Figure 241). Un effort considérable est en cours afin d’arrimer les différentes bases de données et permettre une certaine interopérabilité qui permettra de consulter l’information via la plateforme de visualisation dont le format reste à préciser. Par exemple, les câbles à thermistances, représentés spatialement dans la géodatabase par une classe d’entité de type points, seront liés aux données de température du sol compilées dans la base de données SILA par une relation de type un à plusieurs. Cette relation permettra d’accéder non seulement aux caractéristiques géospaciales de l’entité géographique sélectionnée, mais également aux données qui lui sont associées, mais stockées à l’extérieur de la géodatabase. Le même principe s’appliquera pour la mise en relation entre les forages, représentés par une classe d’entité de type points dans la géodatabase, et les tables attributaires contenant la description stratigraphique, les listes d’échantillons et les résultats des analyses géotechniques qui sont gérées et stockés dans la base de données Cryobase.

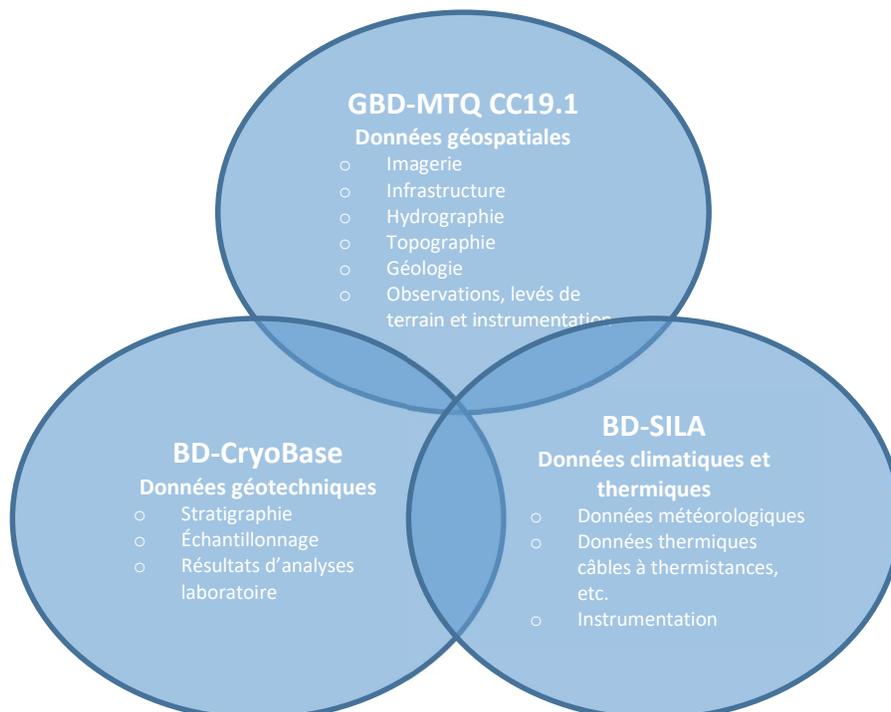


Figure 241 : Présentations des trois bases de données et le type d’information qu’elles contiennent.

4.1.1.6 PLATE-FORME DE VISUALISATION

Afin de consulter et visualiser l'information géospatiale, une plateforme de visualisation interactive est en cours de développement dans le cadre du projet CC19.1. Initialement, la plateforme de visualisation ArcGIS Explorer de la compagnie ESRI avait été sélectionnée par le Ministère. Malheureusement, la compagnie ESRI a récemment annoncé qu'elle arrêterait le développement et l'offre de support pour ce produit, forçant ainsi la sélection d'une alternative.

L'une de ces alternatives consiste à développer une application cartographique en utilisant le produit *Web AppBuilder* for ArcGIS développé par ESRI. Le produit *Web AppBuilder* est une interface utilisateur de type tel écran, tel écrit ou « WYSIWYG : What You See Is What You Get » qui permet de créer des applications web pour visualiser l'information cartographique en 2D ou 3D sans aucun codage nécessaire. Le produit *Web AppBuilder* permet entre autres de créer une application HTML/JavaScript qui peut s'exécuter sur tous les périphériques et y insérer un éventail de fonctionnalités, appelé *widgets*, qui sont déjà prêtes à l'emploi. Il est également possible de personnaliser et configurer l'application en fonction des besoins du projet, et d'héberger les différents outils en lignes ou sur un serveur externe. Cette application satisfait les objectifs du projet, puisque les cartes et les documents insérés sont disponibles dès leur intégration et peuvent être utilisés et partagés presque instantanément en ligne sur un ordinateur ou un appareil mobile (ESRI, 2018). La diffusion de l'application se fait avec un lien URL. L'administrateur a le choix de restreindre l'usage à un groupe de personnes ou de partager ouvertement et publiquement. Il est également possible de changer les paramètres pour permettre à plusieurs administrateurs de modifier et mettre à jour la base de données web (ESRI, 2019).

Une version de la plate-forme a été présentée au mois de janvier 2021 (Figure 242). Un document explicatif accompagne cette plate-forme et documente les procédures d'accès et de mises à jour.

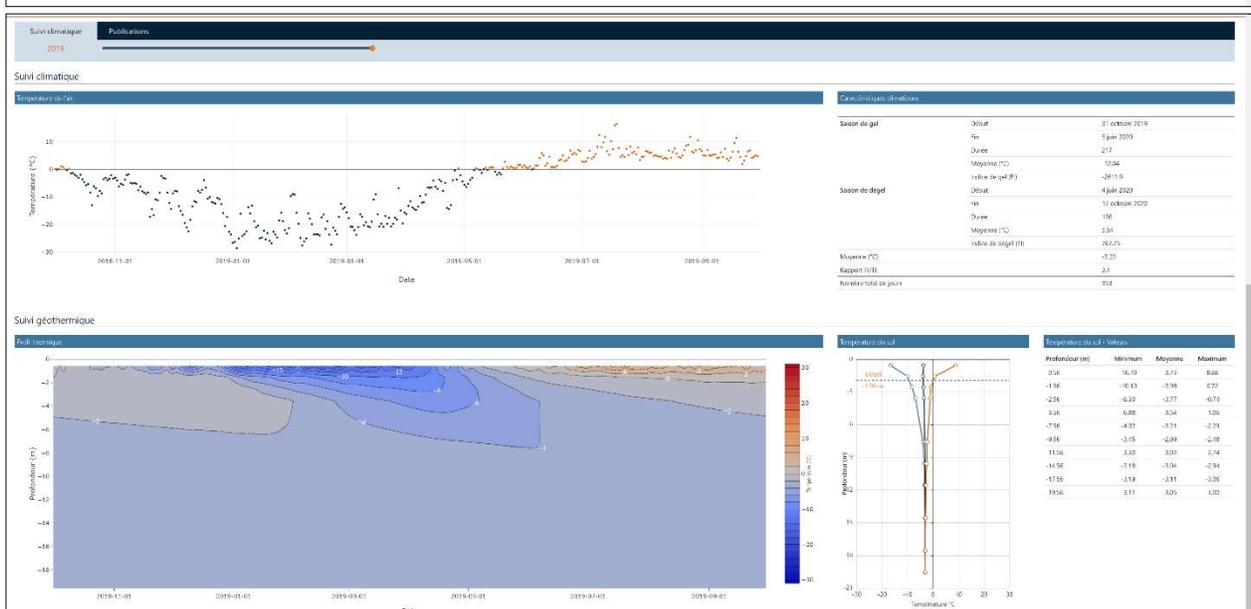
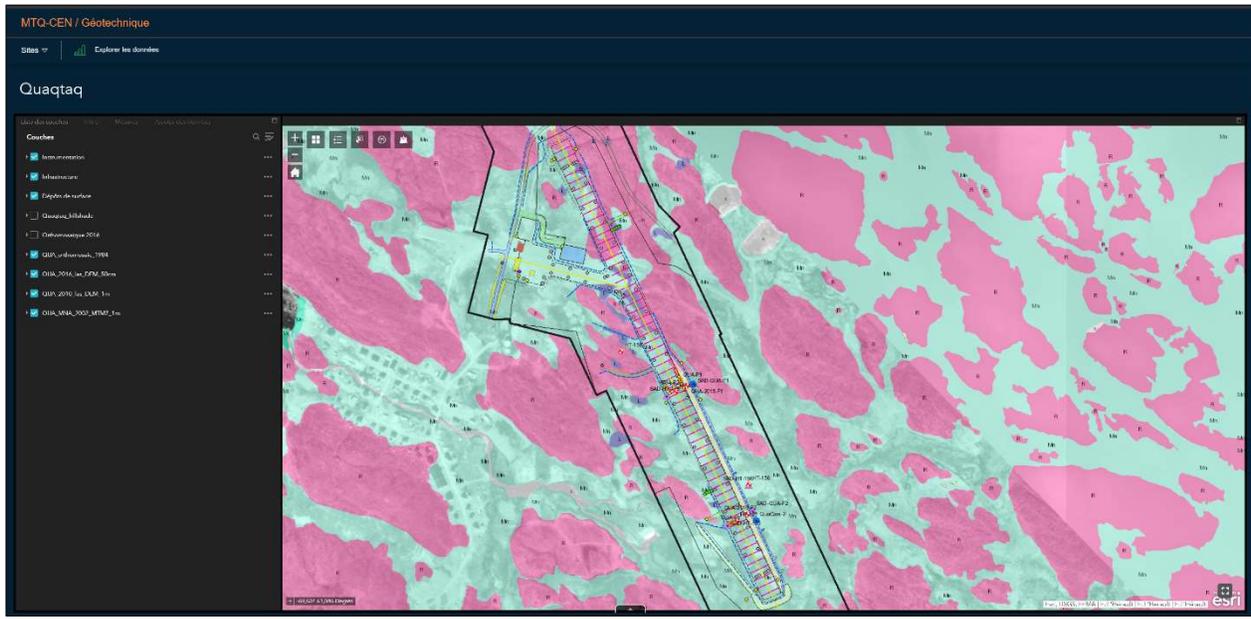


Figure 242 : Aperçu de la plate-forme web qui permet de visualiser les différentes informations géospatiales, géotechniques et thermiques, disponibles par site et contenues dans les différentes bases de données du CEN.

4.1.2 RAPPORT SYNTHÈSE : SUIVI ET ANALYSE DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MINISTÈRE SENSIBLES AU DÉGEL DU PERGÉLISOL DANS UN CONTEXTE DE CC AU NUNAVIK

Dans le cadre du projet, une refonte du rapport de suivi interne du MTQ a été réalisée en collaboration avec un géotechnicien consultant. Ce rapport synthèse, intitulé : « Rapport synthèse : suivi et analyse des infrastructures de transport du ministère sensibles au dégel du pergélisol dans un contexte de changements climatiques au Nunavik », compile et résume les informations issues des registres d'exploitation, des relevés de terrain effectués par le Ministère et des différents projets de recherche portant sur l'état ainsi que sur le comportement des infrastructures en lien avec le dégel du pergélisol. L'objectif de ce rapport est de présenter un résumé du contexte de construction et du comportement jusqu'à maintenant des pistes aéroportuaires et de leurs routes d'accès au Nunavik situées en zone de pergélisol afin de consolider et faciliter le transfert de la connaissance, de soutenir la conception et l'exploitation ainsi que d'améliorer le suivi et la gestion de risques de ces infrastructures dans un contexte de CC. Douze des treize sites aéroportuaires du Ministère, l'aéroport de Kuujuarapik ayant été exclu en raison de l'absence de pergélisol dans la région, sont présentés dans ce rapport. Ce rapport fait un survol, par site, de la conception préconisée et le type de construction réalisée, les dégradations observées avec leurs causes, les différentes études et recherches entreprises pour mieux caractériser le pergélisol et les techniques d'adaptation mises en œuvre pour éliminer ces dégradations ou du moins réduire leur vitesse d'évolution.

La version finale du rapport synthèse a été transmise au ministère en décembre 2019 et présente par site, sans toutefois s'y limiter, les aspects suivants :

- Une description du site (caractéristiques du géosystème) ;
- Les problématiques liées au dégel du pergélisol ;
- Les types de dégradations observées, leurs évolutions et leurs sévérités ;
- La nature des mesures d'adaptation mises en œuvre ;
- Une évaluation de la vulnérabilité des infrastructures.

À noter que le rapport synthèse est un document évolutif qui sera mis à jour par le ministère lorsque de nouvelles informations sur l'instrumentation, sur les techniques d'adaptation et sur l'état des infrastructures et des systèmes seront disponibles.

4.1.3 PROTOCOLE : SUIVI ET ENTRETIEN DES INFRASTRUCTURES ET DES ÉQUIPEMENTS MIS EN ŒUVRE POUR ADAPTER LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU MTQ EN RÉGION DE PERGÉLISOL AU NUNAVIK

Un protocole de suivi et d'entretien intitulé : « Protocole de suivi et d'entretien des techniques d'adaptation aux changements climatiques sur les infrastructures aéroportuaires du MTQ en région de pergélisol au Nunavik » a été développé afin d'assurer le fonctionnement et la pérennité des mesures d'adaptation mises en œuvre. Cet outil d'aide à la décision, élaboré sous la forme d'un protocole illustré accompagné de fiches d'inspection et cartes de localisation des adaptations et des instruments par aéroports, est un aide-mémoire qui recommande les inspections, les suivis et les activités d'entretien courantes à réaliser pour assurer l'efficacité et la fonctionnalité des techniques d'adaptation mises en place pour protéger les conditions de pergélisol et la pérennité de l'instrumentation pour le suivi du comportement thermique et mécanique sur les routes d'accès et les pistes d'atterrissage du MTQ au Nunavik. Cet outil d'aide à la décision s'adresse principalement aux différents intervenants dans le domaine des infrastructures de transport en région de pergélisol et de l'adaptation aux CC. Enfin, il a été préparé à partir des informations recueillies dans différents documents d'appels d'offres liés à la réalisation des travaux d'immobilisation en adaptation, des rapports d'inspection et de suivi interne des infrastructures aéroportuaires sensibles au dégel du pergélisol du MTQ-BCNQ ainsi que de différents

rapports de recherches produits par le Centre d'études nordiques (CEN), la Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval et Ouranos pour le compte du MTQ.

La version finale de ce protocole a été transmise au ministère en décembre 2019 et présente essentiellement, sans toutefois s'y limiter :

- Les infrastructures et les équipements qui doivent faire l'objet de suivis (système d'évacuation d'air, instrumentation, etc.) et de travaux d'entretien (dénivellement de certains remblais en pente adoucie, entretien des fossés de drainage, etc.) ;
- Les différents équipements à inspecter et les différents éléments à vérifier afin d'assurer la fonctionnalité des équipements et des infrastructures ;
- La nature et la fréquence des travaux d'entretien à effectuer ;
- Le moment et les délais optimaux pour effectuer les travaux d'entretien ou de remplacement ;
- Le matériel, les équipements, la main-d'œuvre, l'outillage et la machinerie requis pour effectuer les travaux d'entretien ou de remplacement, etc.

Comme pour le rapport de suivi interne, le protocole est un document évolutif qui devra être mis à jour par le ministère lorsque de nouvelles informations sur l'instrumentation, sur les techniques d'adaptation et sur l'état des infrastructures et des systèmes seront disponibles.

4.1.4 L'OUTIL NUMÉRIQUE D'ÉVALUATION ET DE GESTION QUANTITATIVE DES RISQUES ADAPTÉ AU CONTEXTE DES INFRASTRUCTURES LINÉAIRES DE TRANSPORT DU NUNAVIK EN ZONE DE PERGÉLISOL

L'outil numérique d'évaluation et de gestion quantitative des risques adapté au contexte des infrastructures linéaires de transport du Nunavik en zone de pergélisol, tel que décrit dans le volet 3, est désormais accessible. Cet outil, qui est une adaptation de celui proposé par Brooks (2019), a été grandement simplifié de telle sorte que le nombre de paramètres d'entrée requis par l'utilisateur est désormais minimal sans toutefois affecter la validité de l'analyse (Figure 223B). Développé à l'intérieur du logiciel EXCEL, par l'intégration de routines développées en langage VB, cet outil ne requiert qu'une licence de la suite Office de Microsoft et s'accompagne d'un guide d'utilisation intitulé : « Guide d'utilisation de l'outil numérique d'évaluation du risque pour les infrastructures de transport en zone de pergélisol ».

Actuellement, cet outil permet de quantifier les aléas associés au dégel du pergélisol les plus communs au Nunavik soit : les tassements au dégel et les effondrements. L'outil proposé procède à l'évaluation de l'aléa de manière quantitative (probabilité d'occurrence) en utilisant une méthode statistique rigoureuse et des fonctions mathématiques. En contrepartie, même si l'évaluation des conséquences pourrait également se faire de manière quantitative, cette dernière demeure pour le moment essentiellement qualitative avec une pondération des conséquences directes et indirectes potentielles à la discrétion de l'utilisateur. Une évaluation des conséquences appuyée davantage sur une méthode quantitative pourrait être développée dans un projet de recherche futur et s'imbriquer dans l'outil actuel proposé. En addition, la section d'évaluation des conséquences dans sa forme actuelle n'est pas intégrée dans l'outil numérique développé. Par conséquent, l'évaluation des conséquences directes et indirectes doit se faire manuellement par l'utilisateur en utilisant ou adaptant la pondération proposée à la section 3.4.2.4. Ultimement, ceci implique que la classification du risque à l'intérieur d'une matrice, telle que celle présentée à figure 238, doit se faire également manuellement. Une intégration et une automatisation complète du processus d'estimation du risque pour une infrastructure requièrent encore quelques efforts de développement supplémentaires, efforts qui pourraient être réalisés lors d'une mise à jour ultérieure de l'outil. À noter qu'il serait aussi possible d'intégrer d'autres aléas lors de cette mise à jour, si jugé pertinent par le Ministère.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le projet de recherche « Adapter la conception et développer des outils de gestion intégrés pour soutenir l'adaptation aux changements climatiques des infrastructures de transport du Ministère des Transports du Québec en région de pergélisol au Nunavik (CC19.1) » était un projet très ambitieux qui a été réalisé avec succès dans le cadre d'une collaboration exemplaire entre le Ministère des transports et de la mobilité durable et le Centre d'études nordiques de l'Université Laval. Le projet visait à faire le bilan de 20 ans de recherche sur le comportement des infrastructures de transport du Nunavik construites sur pergélisol instable et sur l'adaptation de ces infrastructures affectées par les perturbations causées par les altérations anthropogéniques et par les changements climatiques. Le vaste programme de recherche et de développement réalisé au cours des vingt dernières années est unique au monde et il peut être considéré comme un modèle à suivre pour le développement et la gestion d'un réseau d'infrastructures de transport en conditions de pergélisol et en contexte de changements climatiques.

Le projet a permis d'améliorer les connaissances sur le comportement des infrastructures de transport et sur les mécanismes de dégradation. Il a également permis de faire un bilan rigoureux des méthodes d'adaptation développées et mises en place dans différents contextes. Il a finalement permis de développer une série d'outils de conception et de gestion. Les avancées réalisées au cours des vingt dernières années et plus particulièrement au cours de ce projet sont considérables. Les résultats de la recherche mettent toutefois en évidence les limites des techniques d'adaptation à maintenir la stabilité des ouvrages à long terme considérant l'ampleur des bouleversements climatiques. Il est donc essentiel de poursuivre des efforts de recherche et de développement pour améliorer les techniques d'adaptation existantes et en développer de nouvelles.

Les conclusions principales du projet de recherche sont donc les suivantes :

Volet 1 : Depuis 2010, la mise en œuvre des stratégies d'adaptation aux changements climatiques spécifiques à chaque ouvrage a permis l'application, à grande échelle, de nombreuses techniques de protection du pergélisol et mesures d'adaptation visant à accroître la résilience des infrastructures de transport du MTQ au Nunavik. L'installation d'instrumentation à des endroits stratégiques pour assurer le suivi du comportement thermique et mécanique du pergélisol en font un laboratoire unique qui dispose, dans certains cas, d'un suivi qui s'échelonne sur plus de 16 années. Ce suivi historique combiné aux connaissances acquises dans le cadre de ce projet a permis d'évaluer la performance globale des travaux d'adaptation réalisés et leurs efficacités spécifiques tenant compte du contexte d'application et des fluctuations climatiques saisonnières et interannuelles récentes. Pour chacun des sites étudiés, un bilan de performance exhaustif des stratégies et des mesures spécifiques d'adaptation a été réalisé. Dans l'ensemble, les différentes mesures/techniques d'adaptation ont démontré une performance satisfaisante. Le climat des dix dernières années au Nunavik, caractérisé par une légère tendance au refroidissement, a certainement contribué positivement à la performance observée.

Les remblais à pente adoucie ont démontré une excellente performance tout en assurant l'éloignement des fossés afin de limiter le risque d'écoulements et d'apport de chaleur par advection. Les différences de coûts entre un remblai traditionnel et un remblai à pente adoucie découlent majoritairement de la quantité de gravier nécessaire, quantité de gravier qui est proportionnelle à l'épaisseur initiale du remblai. Par conséquent, il s'agit ici d'un facteur important qui permet d'orienter le choix de cette méthode au détriment d'une autre qui ne requiert pas une modification de la géométrie du remblai comme c'est le cas avec des remblais à convection ou avec drains thermiques. Il pourrait également s'avérer pertinent de procéder à une analyse paramétrique afin de déterminer l'épaisseur maximale justifiant l'utilisation des pentes douces considérant le coût versus l'efficacité estimée. Pour accroître la performance des pentes douces temporairement, le temps de résorber les taliks sous les accotements,

il pourrait être envisagé de déneiger les talus à quelques reprises au courant des hivers suivant la mise en place. Cependant, une telle procédure entraînerait des coûts d'opération et des défis logistiques considérables qui devront être soigneusement évalués.

Les techniques de mitigation basées sur l'extraction de chaleur par convection d'air telles que les remblais à convection ou les drains thermiques avec ou sans système de ventilation mis en place au Nunavik ont démontré, quant à elles, des performances satisfaisantes, mais non optimales. Sur le plan technique, plusieurs causes ont été avancées pour expliquer ces performances non optimales. Outre le non-respect des configurations prescrites dans les plans et devis qui est spécifique au cas de Salluit, les causes identifiées portent davantage sur : une conception non optimale des systèmes (ex. : configuration complexe augmentant la restriction dans l'écoulement de l'air), un sous-dimensionnement des composantes (ex. : nombre, diamètre et hauteur des cheminées de ventilation insuffisants) et l'influence de facteurs environnementaux propre aux sites (ex. : calfeutrage des composantes par le givre ou recouvrement par la neige). Une multitude de facteurs environnementaux et paramètres de conception et de dimensionnement sont susceptibles d'affecter la performance de tels systèmes, il est donc juste de supposer que les causes sont multifactorielles, complexes et difficilement dissociables. Pour cette raison, il demeure actuellement difficile de déterminer avec certitude la ou les causes pouvant expliquer les performances observées. Néanmoins, cette étude fait un survol exhaustif des pistes de solutions/améliorations quant à la conception, l'installation et l'entretien des systèmes convectifs avec systèmes de ventilation pouvant servir d'assise pour d'éventuelles recherches visant l'optimisation de tels systèmes.

À l'exception de quelques secteurs en déblai (ex. Kangirsuk) et endroits où la profondeur de dégel dépasse l'ancienne couche active sous les remblais (ex. Tasiujaq), les sections centrales des remblais sont thermiquement stables, ce qui leur confère une excellente stabilité mécanique. Pour les routes d'accès spécifiquement, le rehaussement des remblais de quelques décimètres et le retrait du pavage à titre de mesures d'adaptation ont contribué à stabiliser thermiquement et mécaniquement certaines sections. Que ce soit pour les routes d'accès et les pistes d'atterrissage, les accotements, les talus et les pieds de remblai demeurent des secteurs critiques où les conditions de drainage et d'enneigement limitent l'efficacité de certaines techniques d'adaptation à refroidir et maintenir le pergélisol en condition thermiquement stable. Les températures plus chaudes du pergélisol dans ces zones marginales favorisent l'occurrence de déformation associée aux fluages. Ces déformations soulèvent des inquiétudes quant à la stabilité à court et moyen terme de certaines infrastructures et mériteront une attention particulière dans le futur. Cette précarité thermique des zones marginales rappelle l'importance d'en tenir compte lors du développement des stratégies visant à adapter les infrastructures existantes ou lors de la conception de nouvelles. Même si la plupart des mesures/techniques d'adaptation mises en place visaient à minimiser le rôle de la neige et de l'eau dans le processus de dégradation du pergélisol, ces deux facteurs requièrent toujours une attention particulière. Pour plusieurs routes d'accès, les pratiques de déneigement actuelles atténuent considérablement l'efficacité de certaines techniques de mitigation. Dans de tels contextes, il importe d'instaurer rapidement de bonnes pratiques de déneigement afin d'éviter les accumulations de neige en bordure des infrastructures, particulièrement dans les zones sensibles où le pergélisol est riche en glace.

La gestion de l'eau de ruissellement de surface aux abords des infrastructures demeure dans l'ensemble très efficace suite à l'amélioration des réseaux de drainage. Afin de maintenir l'efficacité des réseaux de drainage, un entretien régulier (nettoyage et reprofilage) est impératif. Lors de conceptions futures, les réseaux de drainage gagneraient en efficacité si une attention particulière était portée non seulement à la maîtrise des écoulements de surface, mais également celle de l'eau présente dans la couche active en marge des infrastructures. Un drainage efficace de cette eau souterraine, en réduisant les apports de chaleur convective ou la persistance d'importantes quantités de chaleur latente, favoriserait un refroidissement efficace du pergélisol tout en limitant le développement de boucles de rétroactions positives susceptibles d'accélérer sa dégradation.

Volet 2 : Afin de guider les concepteurs et les gestionnaires d'infrastructures de transport en milieu nordique, ce volet du projet de recherche visait à développer des méthodes et des lignes directrices pour supporter la conception, la construction, l'exploitation, l'entretien et le suivi des infrastructures construites sur pergélisol. Les outils proposés ont été développés à partir de l'expérience acquise durant près de 20 ans d'observation du comportement des infrastructures de transport du Nunavik et d'expériences acquises ailleurs au Yukon et aux Territoires du Nord-Ouest. Les outils développés prennent la forme d'organigrammes et d'abaques de conception permettant d'une part d'identifier et décrire les étapes cruciales à respecter et les facteurs à considérer lors de la conception ou l'adaptation d'infrastructures en zone de pergélisol. Les abaques de conception élaborés à partir des modèles d'analyse thermique étalonnés aux données thermiques recueillies à plusieurs sites d'essai dans le Nord canadien ont tous été validés de façon satisfaisante sur d'autres sites que ceux utilisés pour leurs développements et sont considérés comme fiables. Les principes et les outils de conception présentés à l'intérieur de ce volet constituent une avancée importante pour assurer la résilience et la gestion durable des infrastructures de transport en région de pergélisol. Toutefois, en raison de la rareté des sites d'essai instrumentés en zone de pergélisol, il importe de continuer d'étalonner et valider les outils proposés.

La plupart des techniques/méthodes d'adaptation actuellement à l'usage au Nunavik sont dites passives, c'est-à-dire que leur fonctionnement et leur performance dépendent de paramètres climatiques qui dictent l'efficacité des échanges thermiques conductifs (pente douce) et convectifs (remblai à convection et drain thermique) entre l'atmosphère, le remblai et le pergélisol sous-jacent. Conséquemment, avec le réchauffement climatique, les techniques/méthodes d'adaptation utilisées au Nunavik (pentes douces, remblai à convection et drain thermique) perdront en efficacité à long terme. Pour les systèmes à convection, l'augmentation du diamètre des composantes, en réduisant la restriction de l'air, permettrait d'accentuer les échanges thermiques convectifs dans une certaine mesure, sans toutefois aborder le problème de perte d'efficacité attribuable à la diminution des différentiels de températures (ΔT). Une solution coûteuse, mais certainement efficace pour adapter les systèmes existants serait d'ajouter des systèmes de ventilation mécanique afin de forcer l'air froid à rentrer dans le système en hiver en présence de différentiels de températures (ΔT) insuffisants. Cette possibilité nécessite toutefois des recherches plus approfondies afin d'en évaluer la faisabilité, les coûts et les bénéfices. L'efficacité des pentes douces ne sera pas épargnée par le réchauffement climatique. L'adoucissement des pentes à des valeurs inférieures (ex. : pente de 1V :7H ou 1V :8H) peut être réalisé au besoin, ce qui permettrait d'augmenter leur efficacité à refroidir le sol sous les talus de quelques degrés supplémentaires. Lors de la conception de nouvelles infrastructures ou l'adaptation de celles existantes, le dimensionnement des techniques d'adaptation devra prendre en considération l'évolution des paramètres de conception au cours de la vie utile de l'ouvrage afin de maintenir l'efficacité des systèmes à long terme, et ce, malgré le réchauffement climatique anticipé.

Il nous apparaît cependant évident que le champ d'application des techniques de mitigation actuellement en place diminuera considérablement dans les prochaines décennies au Nunavik. Il existe toutefois d'autres techniques de mitigation contre le dégel du pergélisol qui n'ont pas encore été mises en place à grande échelle au Nunavik, mais dont l'efficacité pourrait permettre de pallier à certains problèmes qui persistent toujours ou d'adresser des enjeux de stabilité futurs que soulève le réchauffement climatique (ex. : les thermosiphons, la végétalisation des talus, déneigement des pentes douces, l'utilisation de surface à albédo élevé et d'abris solaires, techniques d'extraction active de chaleur ou de renforcement des structures et d'amélioration des sols par l'enlèvement et le remplacement ou par le dégel induit des sols sensibles au dégel). Chacune de ces techniques dispose d'un champ d'efficacité spécifique et d'un contexte d'application optimal. Pour cette raison, nous recommandons de combiner davantage ces techniques pour améliorer la performance globale d'une stratégie d'adaptation. Notons que les combinaisons des différentes techniques sont nombreuses et leurs interactions peuvent entraîner des effets synergiques positifs ou négatifs. Ces interactions devront faire l'objet d'une évaluation et expérimentation plus approfondie de manière à guider leur intégration lors de mise à jour de stratégie d'adaptation ou la conception de nouvelles infrastructures de transport au cours des prochaines décennies.

Volet 3 : La méthode quantitative d'évaluation du risque pour les infrastructures de transport en zone de pergélisol dans le contexte climatique actuel et projeté qui a été développée dans le cadre de ce projet s'appuie sur les travaux réalisés par Brooks (2019) et les procédures d'évaluation du risque telles que proposées par la Sécurité publique Canada (2011). La méthode proposée permet d'estimer un niveau de risque attribuable à l'occurrence d'un aléa et les conséquences potentielles de ce dernier sur l'infrastructure. La méthode développée repose sur la simplification de l'outil proposé par Brooks (2019) afin de réduire le nombre de paramètres d'entrée requis par l'utilisateur sans affecter la validité de l'analyse. Actuellement, cet outil permet de quantifier les aléas associés au dégel du pergélisol les plus communs au Nunavik soit : les tassements au dégel et les effondrements. L'outil proposé procède à l'évaluation de l'aléa de manière quantitative (probabilité d'occurrence) en utilisant une méthode statistique rigoureuse et des fonctions mathématiques. En contrepartie, même si l'évaluation des conséquences directes et indirectes pouvait également se faire de manière quantitative et automatisée, cette dernière demeure pour le moment essentiellement qualitative et se faire manuellement par l'utilisateur. Une évaluation des conséquences appuyée davantage sur une méthode quantitative pourrait être développée dans un projet de recherche futur et s'imbriquer dans l'outil proposé afin de classer le niveau de risque de manière automatisée. Une intégration et une automatisation complète du processus d'estimation du risque pour une infrastructure requièrent toutefois quelques efforts de développement supplémentaires, efforts qui pourraient être réalisés lors d'une mise à jour ultérieure de l'outil.

À noter qu'il serait aussi possible d'intégrer d'autres aléas lors de cette mise à jour, si jugé pertinent par le Ministère, tel que le fluage ainsi que le soulèvement au gel. L'outil d'évaluation du risque proposé, qui se fait à l'échelle d'un emplacement spécifique, pourrait s'imbriquer dans une approche d'analyse géospatiale du risque applicable à l'ensemble d'une infrastructure. Une telle approche permettrait de caractériser la variabilité du risque selon l'emplacement de l'aléa, son étendue, la tolérance de la section de l'infrastructure exposée (ex. accotement versus centre-piste, seuil de piste versus bande de roulement, etc.) et les conséquences directes et indirectes associées. Toutefois, une analyse spatiale du risque impose quelques défis techniques associés à la non-uniformité des conditions géotechniques et également au temps de traitement requis pour conduire l'analyse du risque en soit. Une telle approche constituerait une avancée scientifique considérable en termes de gestion des risques associés au dégel du pergélisol et contribuerait, certes, à accroître la résilience des infrastructures linéaires de transport au Nunavik et ailleurs.

Volet 4 : Dans un contexte où les gestionnaires doivent composer avec des infrastructures déjà en place et les caractéristiques du milieu sur lesquelles elles reposent et où une incertitude plane quant à la vitesse et l'amplitude des changements climatiques à venir, il importe de se tourner sur le concept de résilience afin de minimiser les risques futurs. La proactivité du Ministère des Transports du Québec dans la gestion du risque pour les infrastructures aéroportuaires construites sur pergélisol sensible au dégel est d'avant-garde. Par exemple, le Ministère réalise de nombreux suivis périodiques afin de relever toutes déficiences qui peuvent représenter un risque pour l'intégrité de l'infrastructure ou les opérations associées. À ces observations s'ajoute un suivi thermique régulier qui fait l'état du comportement thermique du pergélisol à l'échelle des infrastructures en fonction des variabilités actuelles du climat. Ces informations évolutives fournies par les différents suivis ont permis au Ministère d'établir un ordre de priorité des infrastructures à adapter en fonction du niveau de risque et de déterminer les techniques de mitigation les plus appropriées pour adapter les infrastructures aux changements climatiques.

Afin de maintenir cette proactivité, le volet 4 de ce projet visait à développer des outils d'aide à la décision pour soutenir la planification des interventions et la gestion du risque pour les infrastructures de transport dans un contexte de changements climatiques. Les outils ont été développés à partir des registres d'exploitation, des données et des informations recueillies par le Ministère dans le cadre de projets de recherche antérieurs sur l'état et le comportement des infrastructures en lien avec le dégel du pergélisol et se résument à : une base de données

géospatiales avec plate-forme de visualisation, un protocole pour le suivi et l'entretien des infrastructures et des équipements mis en place pour adapter les ouvrages aux changements climatiques, un rapport synthèse sur le suivi et analyse des infrastructures de transport du MTQ sensibles au dégel du pergélisol et un outil numérique et guide d'utilisation pour le processus de gestion quantitative des risques pour les infrastructures de transport en région de pergélisol. Les outils développés dans le cadre de ce projet, en consolidant l'expertise et les connaissances acquises au cours des 20 dernières années, contribueront définitivement à maintenir les bonnes pratiques en matière de conception, d'adaptation et gestion des risques pour les infrastructures de transport en zone de pergélisol. Une mise à jour régulière de ces outils, et plus particulièrement de l'information qu'ils contiennent, demeure toutefois essentielle afin d'orienter adéquatement le choix et les priorités d'interventions requises pour le maintien d'infrastructures de transport sécuritaires et promouvoir un cadre de gestion du risque proactif.

RÉFÉRENCES

- ADOTPF, (1985), White Paint for Highway Thaw Settlement Control, Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Report no. FHW A-AK-RD-85-16, Fairbanks, Alaska, p.1-7
- Allard M., Calmels F., Fortier D., Laurent C., L'Hérault E. et Vinet F. (2007a). Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique. Réalisé pour le compte d'Ouranos, Ressources Naturelles Canada. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec. 42 pp.
- Allard, M., Doré, G., L'Hérault, E., Verreault, J., Sarrazin, D. (2009). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport d'étape 2, Centre d'études nordiques, Université Laval, 83 p.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P. et Tarussov, A. 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., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E., Sarrazin, D. et al. (2012). Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: Importance for municipal and transportation infrastructures. In: Allard, M. and M. Lemay (Eds), Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization. ArcticNet Inc., Quebec City, Canada, p. 171-197.
- Allard, M., R. Lévesque, M. K.-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., Pilon, J. A. et Frydecki, J. (1994). Le pergélisol et les aéroports du Québec nordique. Centre d'études nordiques, Université Laval, 72 p.
- Allard, M. et Sarrazin, D. (2007), Monitoring des thermistances - collecte et interprétation des données: Aéroports de Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk, Quaqaq, Akulivik, Salluit et Puvirnituk au Nunavik. Rapport Annuel au Ministère des Transports (Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 41 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., Sarrazin, D. et Roger, J., (2013). Monitoring des thermistances – collecte et interprétation des données : aéroports de Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq au Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 147 p.
- Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (1994). An Introduction to Frozen Ground Engineering, Chapman & Hall, 351 p.
- Beaulac, 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.
- Beaulac, I. et G. Doré (2005). Bilan de la condition des pistes et des chemins d'accès menant aux aéroports du Nunavik, Université Laval, Département de génie civil, rapport GCT-2005-09, 123 p.
- Ben-Miloud, K. et Seguin, M. K. (1990). Stratigraphy, distribution of active layer and discontinuous permafrost in Kangiqsualujuaq basin, Northern Quebec. Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. Centre d'études nordiques. Université Laval, Québec.

- Berg, R.L. & Aitken, G.W., (1973). Some passive methods of controlling geocryological conditions in roadway construction, Proceedings of the Second International Conference on Permafrost, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 581-586.
- 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.
- Barón Hernández M.F. (2020) Adaptation des infrastructures de transport du MTQ au Nunavik : Bilan de la performance et validation de la méthode de conception thermique. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Département de génie civil et de génie des eaux, Québec.
- Bouchard, C. (1990). Simulation du régime thermique de sols pergélisolés : essai du modèle Tone. Département de géographie, Université Laval. Thèse (M.Sc.), 137 p.
- 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
- Brooks, H., G. Doré, and A. Locat (2017) *Permafrost-Supported Linear Infrastructure Risk Analysis Software: Design and Goals*. ASCE's 1st Congress on Technical Advancement, September, Duluth, Minnesota. DOI: 10.1061/9780784481028.011
- Casajus N, Périé C, Logan T, Lambert M-C, de Blois S, Berteaux D (2016) An Objective Approach to Select Climate Scenarios when Projecting Species Distribution under Climate Change. PLoS ONE 11(3): e0152495. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152495>.
- 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 tomodesitometric analysis." *Permafrost and Periglacial Processes* 15(4): 367-378.
- Calmels, F., Gagnon, O., et Allard, M. (2005). A portable earth-drill system for permafrost studies. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(3), 311–315.
- Chataigner Y., Gosselin L., Doré G. (2009). Optimization of embedded inclined open-ended channel in natural convection used as heat drain. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(6), 1151-1160.
- 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.
- Doré G. et Beaulac I. (2007) *Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptation*. Rapport de l'université Laval, remis au ministère des transports du Québec, Québec, 49 p.
- Darrow, M.M. (2011). Thermal modeling of roadway embankments over permafrost. *Cold Region Science and Technology* 65 (3), 474–487.
- Doré G., Ficheur A., Guimond A., Boucher M. (2012). Performance and cost-effectiveness of thermal stabilization techniques used at the Tasiujaq airstrip. *Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment*, pp. 32-41.
- Dumais S. (2014). Évaluation des revêtements routiers à albédo élevé en contexte nordique. Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, 162 p.
- Dumais S., Doré G., 2016. An albedo based model for the calculation of pavement surface temperatures in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 123: 44-52. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.11.013.

- Eppler, J., Sharma, J., Kubanski, M., Busler, J., Roger, J., and Allard, M. (2015). INSAR monitoring of transportation infrastructure in permafrost regions. Actes de la 68e Conférence Canadienne de Géotechnique et 7e Conférence Canadienne sur le Pergélisol (GéoQuébec 2015), Québec, Canada. p. 367.
- Esch, D.C., (1996). Road and Airfield Design for Permafrost Conditions, Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph, book of Roads and Airfields in Cold Regions, Edited by Ted S.Vinson, Co-edited by James W. Rooney and Wilbur H. Haas, Published by American Society of Civil Engineers, New York, Section 5, pp.121-149.
- Ficheur A. (2011) *Expérimentation de techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik: Aéroport de Tasiujaq*. Mémoire de maîtrise. Département de génie civil, Université Laval, Québec, 197 p.
- Ficheur, A. et Doré G. (2011) *Expérimentation de techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik : Aéroport de Tasiujaq*. Rapport préparé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Département de génie civil, Université Laval, Québec, 211 pp.
- 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 ième Congrès Canadien de Géotechnique, Sième 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.
- Gennaretti, F., Sangelantoni, L., and Grenier, P. (2015), Toward daily climate scenarios for Canadian Arctic coastal zones with more realistic temperature-precipitation interdependence, J. Geophys. Res. Atmos., 120, 11,862– 11,877, doi:10.1002/2015JD023890.
- Gravel Gaumond, F. et Doré, G. (2013) *Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituaq*. Rapport préparé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Québec, 243 pp.
- 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.
- Journeaux, Bédard & Associés Inc. (1990). Forage et analyse de sol pour projet d'alimentation en eau potable, Tasiujaq, N.Q. Rapport S-90-261. Réalisé pour le compte de Vezina Fortier et Associés. Dorval, Québec, 45 pp.
- Jorgenson M.T., Racine C.H., Walters J.C., Osterkamp T.E. (2001). Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in Central Alaska. Clim. Chang. 48 (4), 551–579.
- Karray, M., Ethier, Y., et Lefebvre, G. (2009). *Relevés MASW au site de l'aéroport de Puvirnituaq*. Rapport technique. Granby, Québec.
- Kersten, M. S. (1949). Thermal properties of soils. University of Minnesota, Eng. Exp. Station, Bull. 28
- Kong X. (2019). Development of design tools for convection mitigation techniques to preserve permafrost under northern transportation infrastructure. Thèse de doctorat, Université Laval, Faculté des sciences et de génie, Québec, 170 p.

- Kong X., Doré G., Calmels F., 2019. Thermal modeling of heat balance through embankments in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology* 158: 117-127
- Ladanyi, B. (1972). An Engineering Theory of Creep of Frozen Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 9, p. 63-80.
- Lanouette F., Doré G., Fortier D., Lemieux C. (2015). "Influence of snow cover on the ground thermal regime along an embankment built on permafrost: In-situ measurements". In: *Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference*, Quebec City, Canada.
- Lanouette F. (2021). *Stabilisation thermique des remblais construits sur le pergélisol sensible au dégel à l'aide d'une approche de conception tenant compte de l'accumulation de la neige. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Département de génie civil et de génie des eaux, Québec.*
- 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.
- 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, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtac, Kangirsuk et Tasiujaq, Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec.* Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 224 p.
- L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A-S., Doyon-Robitaille, J., Lachance, M-P., Ducharme, M-A., Larrivée, K., Grandmont, K., et Lemieux, C. (2013). *Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik. Rapport final.* Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 90 p.
- L'Hérault, E., M. Allard, M. Lemay, C. Barrette et A-S. Carbonneau (2014). *Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour la route d'accès et l'aéroport de Kangiqsualujuaq, Nunavik. Rapport final au ministère des Transports du Québec.* Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 77 p.
- L'Hérault, E., M. Allard, M. Lemay, C. Barrette, A-S. Carbonneau et M-A. Ducharme (2015). *Route d'accès à l'aéroport de Tasiujaq : Développement des connaissances sur les propriétés du pergélisol et identification de solutions d'adaptation dans un contexte de changements climatiques. Rapport final réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec.* Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 89 p.
- L'Hérault, E. et M. Allard (2016). *Réparation d'équipement et d'instrumentation existants reliés aux mesures d'atténuation du pergélisol à Kangirsuk et Salluit. Rapport sommaire des travaux effectués réalisé pour le compte du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec.* Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 20 pp.

- Lupien, Rosenberg, Journeaux et Associés. Inc. (1984). Étude géotechnique, Tasiujaq, Option #3, rapport S-84-710, 135 p.
- Murton, J.B. and French, H.M. (1994). Cryostructures in permafrost, Tuktoyaktuk coastlands, western Arctic, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31: 737-747.
- 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-.
- M-Lepage J. (2016) Experimentation of mitigation techniques to reduce the effects of permafrost degradation on transportation infrastructures at Beaver Creek experimental road site, Alaska Highway, Yukon. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Département de génie civil et de génie des eaux, Québec.
- M-Lepage J., Doré G., Fortier D. et Murchison P. (2012) *Thermal Performance of the Permafrost Protection Techniques at Beaver Creek Experimental Road Site, Yukon, Canada*. Proceedings of the Tenth International Conference on permafrost (TICOP), Russia.
- Morgenstern, N. R. and Nixon, J. F. (1971). "One-dimensional Consolidation of Thawing Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 8, p. 558-565.
- Ministère de la Sécurité publique (MSP), Gouvernement du Québec (2008). Concepts de base en sécurité civile. p.60. ISBN 978-2-550-54254-4
- 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.
- Périer L., Lamontagne V., Nolet A-G., Malenfant-Lepage J., Lemieux C., Doré G., Allard M. (2016) *Suivi du comportement thermique et mécanique de la route d'accès de Salluit et expérimentation d'une méthode de détection de la dégradation du pergélisol le long des structures linéaires*. Rapport réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec. Département de génie civil et de génie des eaux et Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, 115 p.
- Phukan, A. et Andersland, O.B. (1978). Foundation for cold regions. Chapitre 6. *In Geotechnical Engineering for Cold Region*, ed. O.B. Andersland and D.M. Anderson. New York : McGraw-Hill, pp. 276-362
- Radar-Inspection (2005). Interprétation des relevés de géoradar aux sites aéroportuaires de Salluit, Kangirsuk, Tasiujaq, Inukjuak, Puvirnituq. Akulivik, Umiujaq et Quaqaq au Nunavik. Rapport final - Août 2005, 35 p.
- Reimchen D., Doré G., Fortier D., Stanley B. and Walsh R. (2009) Cost and constructability of permafrost test sections along the Alaska Highway, Yukon. Dans le compte-rendu de la conférence annuelle de l'Association des Transports du Canada.
- Richard C. (2018). Stabilisation thermique des infrastructures routières construites sur pergélisol sensible au dégel à l'aide de surface à albédo élevé. Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, 147 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, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqaq, 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.
- Short, N., LeBlanc, A. M., Sladen, W., Oldenborger, G., Mathon-Dufour, V., et Brisco, B. (2014). RADARSAT-2 D-InSAR for ground displacement in permafrost terrain, validation from Iqaluit Airport, Baffin Island, Canada. *Remote Sensing of Environment*, 141, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.016>
- 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.
- Vinet F. (2008). Géomorphologie, stratigraphie et évolution du niveau marin holocène d'une vallée soumise à des conditions macrotidales en régression forcée, région de Tasiujaq, Nunavik. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 97 pp.
- Vinet, F., Allard, M. et L'Hérault, E., (2012). Dépôts de surface, TASIUJAO, Québec, Nunavik; Centre d'études nordiques, échelle 1:10 000.
- Voyer É. et Doré G. (2010) *Expérimentation de méthodes de mitigation et des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport au Nunavik: Projet expérimental de Salluit*. Université Laval, Québec.
- Wijeweera, H. et Joshi, R. C. (1991). Creep behavior of fine-grained frozen soils, Canadian Geotechnical Journal, vol. 28, p. 489-502.
- Zarling, J.P. et Braley, A.W. (1986). Thaw stabilization of roadway embankments constructed over permafrost, Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Report No FHWA-AK-RD-87-20, 41 p.
- 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).
- Nixon, J. F. et G. Lem. 1984, «Creep and strength testing of frozen saline fine-grained soils», *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 21, no 3, p. 518–529.

ANNEXE A

Description et organisation des données intégrées dans la base de données qui sera développée dans le cadre du projet CC19.1

Jeux de classes d'entités (données vectorielles)			
Thèmes (jeux de classes d'entités)	Classe d'entités	Éléments géographiques Catégorie, classe et sous-classe	Mode de représentation
Infrastructure 	InfraPoint	<ul style="list-style-type: none"> - Accessoires <ul style="list-style-type: none"> ○ Barrière - Signalisation <ul style="list-style-type: none"> ○ Feux <ul style="list-style-type: none"> ▪ Feu de bord de piste ▪ Feu de bord de voie de circulation ▪ Feu de bord d'aire de trafic ▪ Feu de seuil de piste ○ PAPI ○ RTIL ○ CPDT ○ IDV ○ PIPA - InstrumentNAV <ul style="list-style-type: none"> ○ HWOS ○ AWOS - Adaptation <ul style="list-style-type: none"> ○ Cheminée de ventilation 	Point 
	InfraLigne	<ul style="list-style-type: none"> - Accessoires <ul style="list-style-type: none"> ○ Clôture - Infrastructures <ul style="list-style-type: none"> ○ Ligne de centre ○ Chaînage ○ Pied de remblai ○ Bordure de piste ○ Bordure de route <ul style="list-style-type: none"> ▪ Route partie pavée ▪ Route partie non pavée - Drainage <ul style="list-style-type: none"> ○ Centre de fossé - Adaptation 	Ligne 
	InfraPolygone	<ul style="list-style-type: none"> - Foncier <ul style="list-style-type: none"> ○ Limite de bail ○ Autres limites <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cimetière ▪ Autres bâtiments - Bâtiment <ul style="list-style-type: none"> ○ Aérogare ○ Garage ○ Abri barrière - Accessoires <ul style="list-style-type: none"> ○ Dalle de béton - Infrastructure <ul style="list-style-type: none"> ○ Accessoires <ul style="list-style-type: none"> ▪ Chemin d'accès équipement ▪ Tumulus signalisation - Drainage <ul style="list-style-type: none"> ○ Empierrement 	Polygone 

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protection fossé ▪ Tapis de diffusion ○ Ponceau - Adaptation ○ Remblai à convection ○ Remblai à pente adoucie ○ Digue ○ Berme 	
Géosystème 	GeoPoint	<ul style="list-style-type: none"> - Affleurements ○ Roc ○ Autres dépôts - Formes géomorphologiques ○ Dépressions thermokarstiques ○ Ostioles ○ Blocs ○ Coin de glace ○ Buttes cryogéniques à noyau de glace ○ Palses - Étiquettes 	Point 
	GeoLigne	<ul style="list-style-type: none"> - Limite des unités - Formes géomorphologiques ○ Lobes de gélifixion ○ Cicatrice de glissements ○ Plages soulevées 	Ligne 
	GeoPolygone	<ul style="list-style-type: none"> - Dépôts de surface - Formes géomorphologiques ○ Dépressions thermokarstiques ○ Champs de blocs ○ Réseau de polygones à coins de glace ○ Esker ○ Drumlins ○ Crag and tail ○ Gelifluxion ○ Glissement de terrain 	Polygone 
Hydrographie 	HydroPoint	<ul style="list-style-type: none"> - Étiquette 	Point 
	HydroLigne	<ul style="list-style-type: none"> - Cours d'eau 	Ligne 
	HydroPolygone	<ul style="list-style-type: none"> - Plans d'eau - Zones mal drainées 	Polygone 
Instrumentation 	InstrPoints	<ul style="list-style-type: none"> - Camera - Câble à thermistances ○ Automatisé ○ Non automatisé - Système d'acquisition de données - Inclinomètre vertical - Piézomètre - Capteur de température autonome - Station météo - Plaque de tassement - Points de mesure (DTS) 	Point 

	InstrLignes	<ul style="list-style-type: none"> - Câble à thermistances <ul style="list-style-type: none"> o Automatisé o Non automatisé - Câble de raccordement <ul style="list-style-type: none"> o Enfoui o Non enfoui - Tracé fibre optique (DTS) - Inclinomètre horizontal 	Ligne 
Observation de terrain 	ObsPoints	<ul style="list-style-type: none"> - Observation de surface <ul style="list-style-type: none"> o Accumulation d'eau o Accumulation de neige o Dépressions o Fissures o Rotation des accotements o Rupture de pente o Érosion - Observation géotechnique <ul style="list-style-type: none"> o Sondage o Forage o Coupe stratigraphique - Relevés géophysiques <ul style="list-style-type: none"> o Géoradar o Resistivité o MASW 	Point 
	ObsLignes	<ul style="list-style-type: none"> - Observation de surface <ul style="list-style-type: none"> o Fissures o Dépressions - Relevés géophysiques <ul style="list-style-type: none"> o Géoradar o Resistivité o MASW 	Ligne 
	ObsPolygones	<ul style="list-style-type: none"> - Observation de surface - Observation infrastructure 	Polygone 
Données topographiques 	TopoPoints	<ul style="list-style-type: none"> - Points arpentés (repères) - Bornes géodésiques - Points d'élévations du terrain naturel avant construction et de la surface de la piste après construction (plans officiels « tels que construits » MTQ) 	Point 
	TopoLignes	<ul style="list-style-type: none"> - Section topographique 	Ligne 
	TopoPolygones	<ul style="list-style-type: none"> - Limites des levés topographiques 	Polygone 
	LAS_2010	<ul style="list-style-type: none"> - Données LIDAR de 2010 	Multi-points 
	LAS_2016	<ul style="list-style-type: none"> - Données LIDAR de 2016 	Multi-points 
	LAS_2010_Iso_1m	<ul style="list-style-type: none"> - Contours topographiques aux mètres, données LIDAR de 2010 	Ligne 

	LAS_2016_Iso_1m	- Contours topographiques aux mètres, données LIDAR de 2016	Ligne 
--	-----------------	---	--

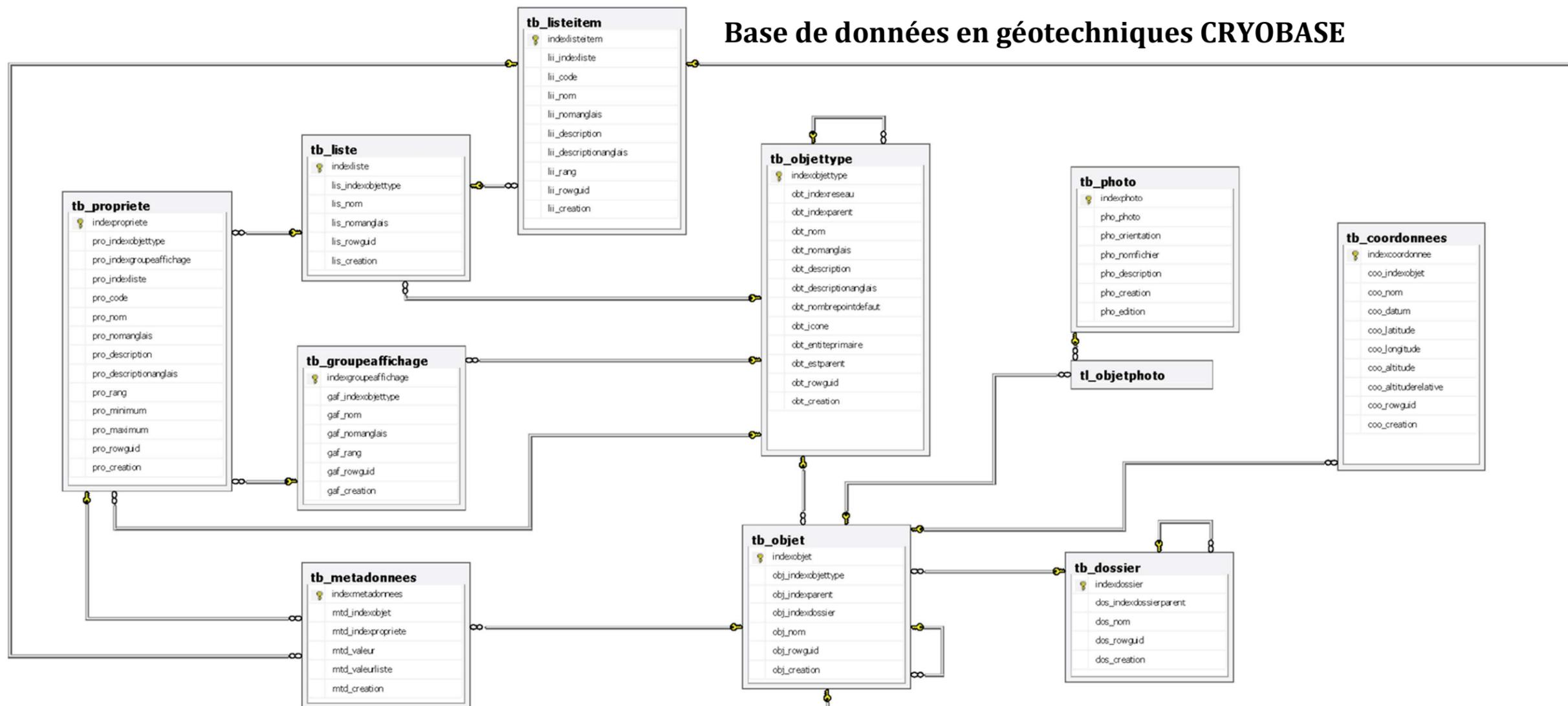
Tables attributaires			
Thèmes (tables attributaires)	Classe d'entités	Éléments stockés	Mode de représentation
Documents	T_Documents	- Fiches descriptives - Rapports - Articles - Documents de référence - Plans	Table attributaire 
Sources	T_Sources	- Personne-ressource - Organisations - Références - Coordonnées	Table attributaire 
Photos	T_Photos	- Photographies	Table attributaire 
Données géotechniques	T_InfoStrati	- Information stratigraphique	Table attributaire 
	T_Echantillons	- Échantillons prélevés	Table attributaire 
	T_SousEchantillons	- Sous-échantillons	Table attributaire 
Instrumentation	T_SystemeAcquisition	- Caractéristiques système d'acquisition	Table attributaire 
	T_Instruments	- Position et caractéristiques des instruments	Table attributaire 
Résultats	T_Variables	- Variables issues des analyses de laboratoire	Table attributaire 
	T_ResultatsTxT	- Résultats valeurs en chaîne de caractères (texte)	Table attributaire 
	T_ResultatsNum	- Résultats valeurs numériques	Table attributaire 
	T_ResultatsDTS	- Résultats câble DTS	Table attributaire 
Métadonnées	T_ResMetadonnees	- Métadonnées à propos des résultats	Table attributaire 

Raster (données matricielles)			
Thèmes	Classe d'entités	Description	Mode de représentation
Photographies aériennes	***_Mosaïque_1985_15cm	- Mosaïque panchromatique de 1985 couvrant le secteur de la piste avant sa construction	Mosaïque 
	***_Orthomosaïque_2002_25cm	- Orthomosaïque panchromatique de 2002 couvrant les communautés nordiques incluant les infrastructures aéroportuaires	Mosaïque 
	***_Orthomosaïque_2010_15cm	- Orthomosaïque couleur de 2010 couvrant les communautés incluant les infrastructures aéroportuaires	Mosaïque 
	***_Orthomosaïque_2016_7cm	- Orthomosaïque couleur de 2016 couvrant les communautés incluant les infrastructures aéroportuaires	Mosaïque 
Modèles numériques d'altitude	***_MNA_1989_PreCons_1m	- Modèle numérique d'altitude du secteur de la piste avant construction	Raster 
	***_MNA_1989_PostCons_1m	- Modèle numérique d'altitude du secteur de la piste après construction	Raster 
	***_MNA_2002_1m	- Modèle numérique d'altitude de 2002 couvrant les communautés incluant les infrastructures aéroportuaires	Raster 
	***_LAS_MNA_2010_1m	- Modèle numérique d'altitude généré à partir des données LIDAR de 2010	Raster 
	***_LAS_MNA_2016_50cm	- Modèle numérique d'altitude généré à partir des données LIDAR de 2016	Raster 
Plan numérisé	***_Relevé_topographique	- Feuilles spécifiques des plans « tels que construits » numérisés et géoréférencés	Raster 
	***_Plan_constuction	- Feuilles spécifiques des plans « tels que construits » numérisés et géoréférencés	Raster 
	***_Plan_adaptation	- Feuilles spécifiques des plans des travaux d'adaptation numérisés et géoréférencés	Raster 
Relief ombragé	***_ReliefOmbrage_2002	- Carte de relief ombragé générée à partir du MNA de 2002	Raster 
	***_ReliefOmbrage_2010	- Carte de relief ombragé générée à partir du MNA de 2010	Raster 
	***_ReliefOmbrage_2016	- Carte de relief ombragé générée à partir du MNA de 2016	Raster 

ANNEXE B

*Schémas des bases de données en géotechnique (SILA) et de suivi environnemental (SILA) du CEN et leurs
arrimages avec la base de données du MTQ CC19.1*

Base de données en géotechniques CRYOBASE

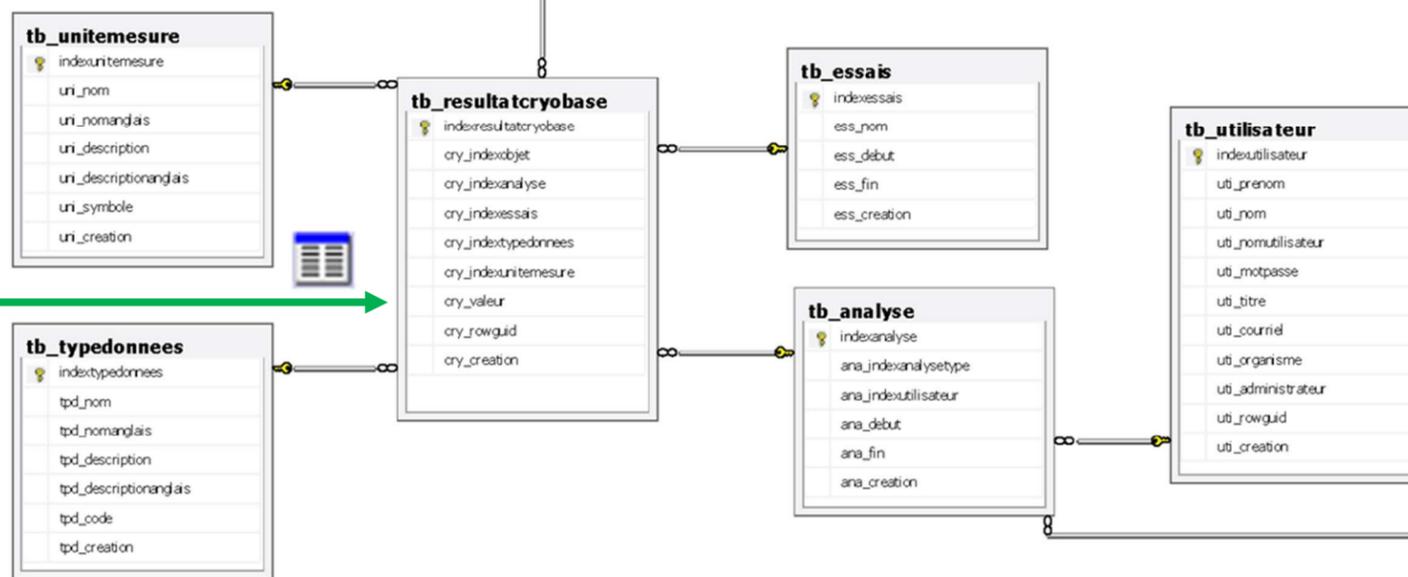


Base de données géospatiales MTQ CC19

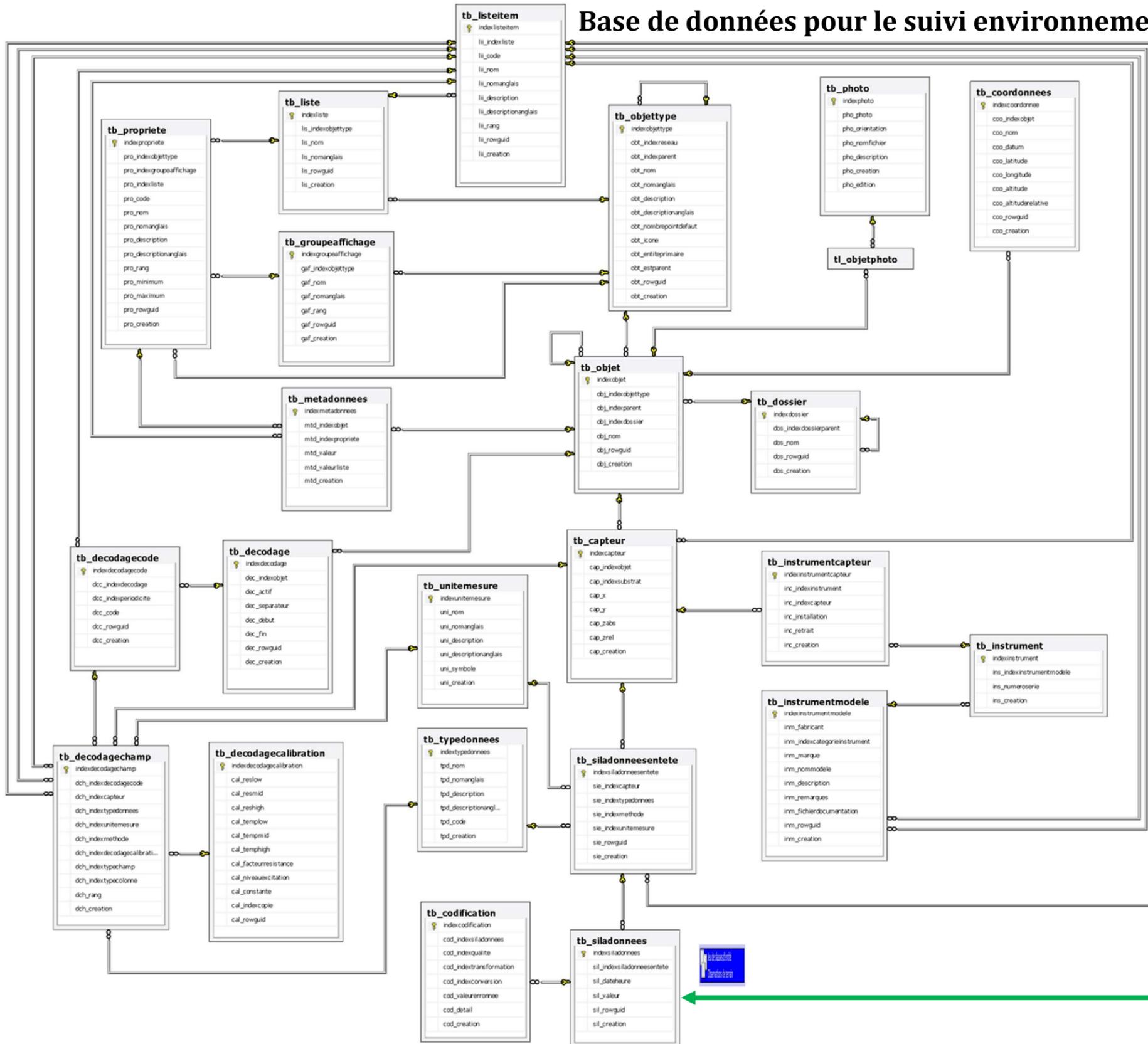
Jeu de classes d'entité
Observations de terrain

Classe d'entité de points
ObsPoints

Classe de relation
ObsPointsHasResults
Un à plusieurs



Base de données pour le suivi environnemental SILA



Base de données géospatiales MTQ CC19.1

