Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq

Rapport final



Félix Gravel Gaumond, ing. jr Guy Doré, ing. Ph.D.

Rapport GCT-2013-03 Ministère des Transports du Québec

Groupe de recherche en ingénierie des chaussées <u>www.gci.ulaval.ca</u> Juillet 2013



Résumé

La piste d'atterrissage de Puvirnituq a été construite à l'aide d'un épais remblai comblant une vallée au fond de laquelle repose un dépôt de sédiments fins. Depuis la construction de la piste d'atterrissage, des tassements ont été observés à cet endroit. Des travaux d'agrandissement ont eu lieu sur la piste en 2009 afin de permettre l'atterrissage d'un Boeing 737 de la compagnie Air Inuit. Dans le cadre de ces travaux, la stabilisation thermique et mécanique du remblai a été réalisée. Un remblai convectif avec un système de ventilation a été construit. Une berme, fait à partir des mêmes matériaux granulaires que le remblai convectif a été construit pour résister aux possibles forces latérales causées par une instabilité du remblai. Les travaux d'agrandissement de l'aéroport comprenaient également la déviation de l'eau s'écoulant dans la vallée. Un suivi des comportements thermique et mécanique ont été réalisé sur une période de trois ans afin de valider l'efficacité des systèmes d'extraction de chaleur dans le contexte du remblai de Puvirnituq. Une simulation numérique du comportement thermique du sol a été effectuée à l'aide du logiciel *GeoStudio*. Cette simulation a permis de prédire l'évolution du front de dégel au cours des 20 prochaines années. Une étude de stabilité a été réalisé afin d'identifier les particularités d'une analyse de stabilité dans le contexte d'un pergélisol en voie de dégradation.

Table des matières

Résumé		i
Liste des ta	ableaux	XV
1 Introd	luction	1
1.1 N	Mise en contexte	1
1.2 0	Dbjectifs du projet de recherche	2
1.3 (Drganisation du document	
2 État d	es connaissances	5
2.1 F	Pergélisol	5
2.1.1	Concepts et définitions	5
2.1.2	Température du pergélisol	6
2.1.3	Distribution du pergélisol au Canada	6
2.1.4	Distribution du pergélisol au Québec	9
2.1.5	Infrastructures aéroportuaires du Nunavik	
2.2 F	Facteurs affectant le pergélisol	11
2.2.1	Température de l'air	11
2.2.2	Couvert de neige	11
2.2.3	Couvert végétal	
2.2.4	Construction d'un remblai	
2.3 F	Réponse du pergélisol face à un changement	15
2.4 F	Propriétés thermiques et principaux modes de transfert de chaleur	
2.4.1	Propriétés thermiques	
2.4.2	Modes de transfert de chaleur	16
2.5 N	Mécanique des sols gelés, en dégel et dégelés	17
2.5.1	État du sol	
2.5.2	Capacité portante et comportement au dégel	19
2.5.3	Consolidation et tassement au dégel	
2.5.4	Fluage	
2.5.5	Influence de la salinisation	
2.6	Conception de remblai	

	2.6.1	Méthodes d'atténuation de la dégradation du pergélisol	. 28
	2.6.2	2 Remblai à convection d'air (RCA)	. 32
2	2.7	Mouvement de pente et stabilité	. 43
	2.7.1	Types de mouvements de masse	. 43
	2.7.2	2 Modélisation d'un glissement à l'aide du logiciel GEO-SLOPE	. 46
3 rec	Mise herche	e en contexte de la piste d'atterrissage de Puvirnituq et objectifs du projet de	. 48
	3.1	Géomorphologie et caractéristiques de la piste d'atterrissage	. 48
	3.2	Forages et essais géotechniques	. 51
	3.2.1	Essais laboratoire	. 55
	3.2.2	2 MASW et essais au scissomètre	. 55
	3.2.3	B Essai au pénétromètre dynamique (DCP)	. 57
	3.3	Description des travaux effectués à Puvirnituq	. 58
	3.3.1	Construction d'un remblai convectif avec ventilation	. 58
	3.3.2	2 Déviation du ruisseau	. 59
	3.4	Instrumentation	. 60
	3.5	Objectifs du projet de recherche	. 62
4	Visi	tes de terrain	. 63
۷	4.1	Visite effectué le 6-7 juillet 2011	. 63
	4.1.1	Côté Est (aval)	. 63
	4.1.2	2 Côté Ouest (amont)	. 66
2	4.2	Visite effectuée le 12-13 septembre 2012	. 68
	4.2.1	Côté Est (aval)	. 68
	4.2.2	2 Côté Ouest (amont)	. 72
2	4.3 septem	Comparaison de l'état des installations entre les visites de juillet 2011 et de bre 2012	. 76
	4.3.1	Côté Est (aval)	. 76
	4.3.2	2 Côté Ouest (amont)	. 79
5	Suiv	i du comportement thermique de la piste d'atterrissage de Puvirnituq	. 82
4	5.1	Comparaison des données climatiques	. 83
4	5.2	Année 1 : 2009-2010	. 85

	5.2.1 de the	Évolution des températures dans le remblai convectif amont (ouest) : séries rmistances (A et B)	35
	5.2.2 thermi	Évolution des températures dans le remblai convectif aval (est) : séries de istances (C, D et E)	88
	5.2.3 dans le surfac	Évolution des régimes thermiques dans les séries de thermistances placées e sol sous les remblais à convection et la berme (F, G, F2 et F5) ainsi qu'en e du sol sous la berme (série H)	92
	5.3 A	année 2 : 2010-2011 10)1
	5.3.1 de the	Évolution des températures dans le remblai convectif amont (ouest) : séries rmistances (A et B) 10)1
	5.3.2 thermi	Évolution des températures dans le remblai convectif aval (est) : séries de istances (C, D et E) 10)5
	5.3.3 dans le surfac	Évolution des régimes thermiques dans les séries de thermistances placées e sol sous les remblais a convection et la berme (F, G, F2 et F5) ainsi qu'en e du sol sous la berme (série H))9
	5.4 A	Année 3 : 2011-2012	20
	5.4.1 de the	Évolution des températures dans le remblai convectif amont (ouest) : séries rmistances (A et B)12	20
	5.4.2 thermi	Évolution des températures dans le remblai convectif aval (est) : séries de istances (C, D et E)	23
	5.4.3 dans le surfac	Évolution des régimes thermiques dans les séries de thermistances placées e sol sous les remblais à convection et la berme (F, G, F2 et F5) ainsi qu'en e du sol sous la berme (série H)12	26
	5.5 É	Evolution du comportement thermique de Puvirnituq13	37
6	Suivi	du comportement mécanique de la piste d'atterrissage de Puvirnituq 15	;9
7	Simul	ations numériques	55
	7.1 II	ntroduction	55
	7.2 P	ropriétés des matériaux et géométrie du remblai16	66
	7.2.1	Propriétés thermiques des matériaux16	57
	7.2.2	Propriétés mécaniques des sols	59
	7.3 C	Conditions initiales, maillage et calibration du modèle17	0'
	7.3.1	Conditions initiales et maillage	0'
	7.3.2	Résultat de la calibration17	'2
	7.3.3	Évolution future de la température de l'air17	'3

	7.4	Résultats de l'évolution future du plafond du pergélisol	174
	7.5	Délai et taux de dégel à la base de la couche active	174
	7.6	Coefficient de consolidation C _v	175
	7.7	Détermination de la pression interstitielle	176
	7.8	Résultats des simulations - SLOPE/W	178
	7.8.1 1'ani	1 Scénario 1- Géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour née 2009	178
	7.8.2 1'ani	2 Scénario 2- Géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour née 2030	179
	7.8.3	3 Scénario 3- Géométrie obtenue à l'aide du MASW	180
	7.8.4 fron	4 Scénario 4- Géométrie initiale du MASW tenant compte de la progression t de dégel	181
	7.8.: imp	5 Scénario 5- Géométrie fictive comportant des surpressions interstitielles ortantes	182
8	Disc	cussion	184
	8.1	Suivi thermique du remblai de la piste de Puvirnituq	184
	8.1.	1 Déviation du ruisseau	184
	8.1.2	2 Fonctionnement et effet du remblai à convection d'air	184
	8.1.	3 Remontée du plafond du pergélisol	185
	8.2	Discussion sur le suivi mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq	186
	8.3	Discussion sur la modélisation thermique	186
	8.4	Discussion sur l'utilisation de l'indice R	187
	8.5	Discussion sur l'étude de stabilité	189
	8.6	Coûts des travaux	189
9	Rec	ommandations	192
1(O Con	clusion	196
А	nnexes.		203

Liste des figures

Figure 1- Schéma de l'approche de recherche en adaptation des infrastructures de
transport construites sur pergélisol sensible (Doré, 2012)
Figure 2- Courbe trompette typique d'un pergélisol (Andersland & Ladanyi, 2004) 5
Figure 3- Régimes thermiques (a) d'un pergélisol chaud (b) d'un pergélisol froid (modifié
de (Doré, 2011))
Figure 4- Carte de la distribution du pergélisol au Canada (Ressources Naturelles
Canada, 1995)
Figure 5- Distribution longitudinale du pergélisol (Johnston, 1981)
Figure 6- Distribution du pergélisol au Québec nordique (Allard, 2012) (sous presse lors
du Northern Forum, 19-20 avril 2012)
Figure 7- Carte indiquant l'emplacement des infrastructures aéroportuaires du Nunavik
(Guimond, 2012)
Figure 8- Température moyenne de la neige et du sol sur deux sites lors d'une journée
typique d'hiver (Nicholson & Granberg, 1973) cité par (Williams & Smith, 1991) 11
Figure 9- Effet du type de végétation sur l'accumulation de neige au sol ainsi que sur le
pergélisol sous-jacent (Williams & Smith, 1991) 12
Figure 10- Dégradation du pergélisol sous différents traitements de la surface sur une
période de 26 ans (Linell, 1973)
Figure 11- Modification du régime thermique dans le sol d'infrastructure lors de la
construction d'un remblai routier (modifié de (Doré, 2011))14
Figure 12- Fissure longitudinale observée suite à la dégradation du pergélisol sous
l'épaulement de la route de l'Alaska (Doré, 2012)14
Figure 13-Réponse d'un pergélisol riche en glace face à une perturbation (modifié de
(Mackay, 1970))
Figure 14- Schématisation du mécanisme de transfert de chaleur par conduction (Doré,
2011)
Figure 15- Différents types de convection a) Convection forcée b) Convection naturelle
en cellule fermée
Figure 16- Schématisation de la chaleur absorbée par radiation durant la journée ainsi que
la chaleur émise par radiation durant la nuit (Doré, 2011) 17
Figure 17- Différentes phases présentes dans un sol gelé et un sol non gelé (Andersland
& Ladanyi, 2004)
Figure 18- Effet de la chaleur latente sur le changement de phase de l'eau dans un sol
(Modifié de (Krahn, 2004)) 19
Figure 19- Mécanismes influençant la résistance à la compression d'un sable gelé à
différente fraction de sable (Ting et al., 1983)
Figure 20- Changement des propriétés mécaniques d'un sol dans un état gelé,
partiellement gelé, et en dégel/dégelé (Doré 2011) 20

Figure 21- (A) Cryostructure microlenticulaire très riche en glace typique d'un pergélisol
syngénétique (B) Essai de potentiel de consolidation au dégel montrant l'eau en excès,
suite au dégel. (Stephani et al., 2008)
Figure 22- (a) Courbe d'indice des vides en fonction de la contrainte pour un sol soumis
au dégel. (b) Courbe de tassement en fonction de la contrainte pour un sol soumis au
dégel (Doré & Zubeck, 2009)
Figure 23- Essai de fluage à contrainte constante (a) différentes courbes de fluage (b)
courbe de fluage typique (c) vitesse de déformation en fonction du temps (Andersland &
Ladanyi, 2004)
Figure 24- Fluage du pergélisol endommageant la route de l'Alaska suite à la
construction d'un épais remblai (Doré, 2011)
Figure 25- Taux de déformation annuel au fluage du till glaciaire en fonction de la
contrainte appliquée (σ_1) et de la température (Allard, Doré, L'Hérault, Verreault et al.,
2009)
Figure 26- Fonctionnement d'un thermosiphon (Doré, 2011)
Figure 27- Fonctionnement du drain thermique
Figure 28- Principes du remblai à convection d'air (RCA)
Figure 29- Différentes conceptions de remblai convectif a) remblai convectif complet
sous une chaussée b) remblai convectif sous la chaussée, à l'interface avec le sol naturel
et également sur les accotements c) remblais convectifs couverts sur les accotements d)
remblais convectifs non couverts sur les accotements (modifié de (Doré, 2011)
Figure 30- Variation annuelle de la température de l'air et de la vitesse moyenne de l'air
dans les pores du remblai convectif (Goering 2003)
Figure 31- Comparaison des résultats obtenus par Goering et par la modélisation à l'aide
des différents logiciels de GEO-SLOPE International ltd. A) Pour le 1 ^{er} février du second
cycle B) Pour le 1 ^{er} août du second cycle (GEO-SLOPE International Ltd, 2012)
Figure 32- Comparaison des températures sous la section de référence et sous la section
de remblai convectif, de septembre 1999 à novembre 2001 (Saboundjian & Goering,
2003)
Figure 33- Différentes conception de remblai à convection d'air construit sur la section
expérimentale de la route de l'Alaska dans le secteur de Beaver Creek, Yukon (M-Lepage
et al., 2012)
Figure 34- Classification des mouvements de masse en terrain pergélisolé (Johnston,
1981)
Figure 35- Déplacement résultant des phénomènes de soulèvement au gel et de tassement
au dégel (Doré, 2011)
Figure 36- La géométrie d'une coulée bimodale (Johnston, 1981) 45
Figure 37- Résultat de l'analyse de stabilité de la pente près du lac Travaillant à l'aide du
logiciel GEO-SLOPE (Su et al., 2007)

Figure 38- Planche synthèse de la piste d'atterrissage de Puvirnituq (L'Hérault et al.,
2012)
Figure 39- Localisation des forages le long de la piste d'atterrissage de Puvirnituq (Allard,
Doré, L'Hérault, Sarrazin et al., 2009)
Figure 40- Résultat du MASW et des essais au scissomètre (modifié de (Verreault &
Doré, 2010))
Figure 41- Profil typique d'un relevé DCP avec pergélisol peu profond à Puvirnituq
(Verreault & Doré, 2010)
Figure 42- Conception du système de protection mis en place en bordure de la piste de
Puvirnituq (Verreault & Doré, 2010)
Figure 43- Tracé initial du ruissellement et déviation suite aux travaux
Figure 44- Position de l'instrumentation installée à Puvirnituq
Figure 45- Téléchargement de données enregistrées par les CR1000 (côté est)
Figure 46- Installation côté est (aval)
Figure 47- Présence d'eau au pied de la berme (côté est)
Figure 48- Fissuration des matériaux granulaires à l'extrémité est de la berme (côté est)65
Figure 49-Installation côté ouest (amont)
Figure 50- Déviation du ruisseau (côté ouest)
Figure 51-Présence d'eau au pied de la berme (côté ouest)
Figure 52- Présence importante d'eau au pied de la berme (côté ouest) avant les travaux
de construction
Figure 53- A) Déplacement de la ventilation par rapport à la tige de métal (côté ouest) B)
Couvert de ventilation brisé (côté ouest)
Figure 54- Écoulement d'eau à l'extrémité sud du remblai, à la limite entre le MG-20 et
le remblai convectif (côté est)
Figure 55- Exposition du demi-ponceau du système de ventilation à deux endroits suite
au glissement du MG-20 (côté est)
Figure 56- Fissuration des matériaux granulaires à l'extrémité est de la berme (côté est)70
Figure 57- A) Présence de matériaux granulaires sur le remblai convectif (côté est) B)
Zone présentant une quantité significative de matériaux granulaires sur le remblai (côté
est)
Figure 58- Le système de ventilation situé en bordure de la piste d'atterrissage (côté est)
Figure 59- État des tuyaux de ventilation adjacent à la berme convective (côté est) 72
Figure 60- Résurgence d'eau en bordure du MG-20 (côté ouest)
Figure 61- Déplacement important du tuyau de ventilation par rapport à la tige de soutien
(côté ouest)
Figure 62- A) Canal de ruissellement formé par l'érosion des matériaux granulaires (côté
ouest) B) Exposition du demi-ponceau du système de ventilation supérieur (côté ouest) 73
Figure 63- Système de ventilation situé en bordure de piste (côté ouest)

Figure 64- Déplacement des tuyaux de ventilation par rapport aux tiges de ventilation à
des degrés différents (côté ouest)
Figure 65- Écoulement d'eau dans le canal de déviation (côté ouest)
Figure 66- Accumulation d'eau en bordure du remblai convectif (côté ouest)
Figure 67- Vue d'ensemble du remblai en direction sud pour les visites effectuées en
juillet 2011 et septembre 2012 (côté est)
Figure 68- Vue d'ensemble du remblai en direction nord pour les visites effectuées en
juillet 2011 et septembre 2012 (côté est)
Figure 69- Comparaison de l'extrémité sud du remblai convectif (côté est)
Figure 70- Évolution de la détérioration à l'extrémité est du remblai convectif (côté est)
Figure 71- Canal de déviation (côté ouest)
Figure 72- Vue d'ensemble du remblai convectif situé à l'ouest du remblai convectif
(côté ouest)
Figure 73- Présence d'eau en bordure du remblai convectif (côté ouest) 81
Figure 74- Positionnement des séries de thermistances
Figure 75- Courbe trompette de la série F2 pour l'année 2010-2011 (I) avec la
thermistance défectueuse à 7 m (II) sans la thermistance défectueuse à 7,0 m 83
Figure 76- Températures mensuelles moyennes de l'air pour les trois années de suivi 84
Figure 77- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série A entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010
Figure 78- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série B entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010 86
Figure 79- Profils thermiques dans les séries de thermistances A et B a) au 01/03/2010; b)
au 01/05/2010; c) au 01/07/2010; au 01/10/2010
Figure 80- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série C entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010
Figure 81- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série D entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010
Figure 82- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série E entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010
Figure 83- Profils thermiques dans les séries de thermistances C, D et E a) au 01/03/2010;
b) au 01/05/2010; c) au 01/07/2010; d) au 01/10/2010
Figure 84- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série F2 situées à l'interface remblai/sol ainsi qu'à 1m et 2 m de profondeur entre le 25
septembre 2009 et le 19 octobre 2010
Figure 85- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série F situées à l'interface remblai/sol ainsi qu'à 1m et 2 m de profondeur entre le 25
septembre 2009 et le 19 octobre 2010

Figure 86- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série G situées à l'interface remblai/sol ainsi qu'à 1m et 2 m de profondeur entre le 25
septembre 2009 et le 19 octobre 2010
Figure 87- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série F5 situées à l'interface remblai/sol ainsi qu'à 1m et 2 m de profondeur entre le 25
septembre 2009 et le 19 octobre 2010
Figure 88- Profils thermiques dans les séries de thermistances F2 et F5 en octobre 200996
Figure 89 : Profils thermiques dans les séries de thermistances F2 et F5 en mars 201097
Figure 90- Profils thermiques dans les séries de thermistances F2 et F5 a) en juillet 2010
b) en août 2010 c) en octobre 2010
Figure 91- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série H entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010
Figure 92 : profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme
convective pour la période de décembre 2009 et janvier 2010 100
Figure 93 : profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme
convective pour la période de février et mars 2010 100
Figure 94 : profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme
convective pour la période d'avril et mai 2010 100
Figure 95- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série A entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 102
Figure 96- Profils thermiques des séries de thermistances A et B (I) au 15-02-2011(II) et
au 15-08-2011
Figure 97-Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série B entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 104
Figure 98- Profils thermiques des séries de thermistances A et B (I) au 01-04-2011 (II) et
au 01-06-2011
Figure 99-Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série C entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 106
Figure 100-Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série D entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 107
Figure 101-Profils thermiques des séries de thermistances C, D et E (I) au 01-03-2011
(II) et au 01-04-2011
Figure 102- Schémas décrivant le gradient thermique à l'intérieur du remblai convectif :
(I) gradient lorsqu'il y a peu ou pas de convection (II) gradient lorsqu'il y a convection
(III) gradient lorsqu'il y a une convection importante
Figure 103-Mouvement convectif dans la berme qui pourrait expliquer le gradient de
température observé dans la série de thermistance D 108
Figure 104- Evolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série E entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 109

Figure 105- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série F2 entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 110
Figure 106- Courbes trompettes de la série F2 pour les années de suivi 2009-2010 et
2010-2011
Figure 107- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série F5 entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 112
Figure 108- Évolution de la température du sol à 1 m et 2 m de la série F5 entre le 15 juin
et le 25 septembre pour les étés 2010 et 2011 113
Figure 109- Courbes trompettes de la série F5 pour les années de suivi 2009-2010 et
2010-2011
Figure 110- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série F entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 115
Figure 111- Courbes trompettes de la série F pour les années de suivi 2009-2010 et 2010-
2011
Figure 112-Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la
série G entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 117
Figure 113- Courbes trompettes de la série G pour les années de suivi 2009-2010 et 2010-
2011
Figure 114- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série horizontale H entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011 119
Figure 115- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme
convective pour la période d'août et septembre 2011 120
Figure 116- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme
convective pour la période de février et mars 2011 120
Figure 117- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série A entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012 121
Figure 118- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série B entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012 122
Figure 119- Profils thermiques des séries de thermistances A et B au 2012-02-15 122
Figure 120- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série C entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012 123
Figure 121- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série D entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012 124
Figure 122- Profils thermiques des séries de thermistances C, D et E au A) 2012-03-15 et
au B) 2012-01-15
Figure 123- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série E entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012
Figure 124- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série F2 entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012 127

Figure 125- Courbes trompettes de la série F2 pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012
Figure 126- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série E5 entre le 26 sentembre 2011 et le 2 octobre 2012
Figure 127- Courbes trompettes de la série E5 pour les années de suivi 2010-2011 et
2011 2012
Figure 128 Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la sária E antra la 26 santambra 2011 at la 2 octobra 2012
Figure 120. Courbes trompettes de la série E pour les appéas de suivi 2010 2011 et 2011
2012 2012 2010 2011 2010 2010 2011 2010 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2
Figure 130. Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la sária G antra la 26 sentembra 2011 et la 2 octobra 2012
Figure 131 Courbes trompettes de la série G pour les appées de suivi 2010 2011 et 2011
2012
Figure 132. Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de
la série H entre le 26 sentembre 2011 et le 2 octobre 2012
Figure 133- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la herme
convective nour la période de février et mars 2012
Figure 134- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme
convective nour la période d'août et septembre 2012
Figure 135- Évolution des températures de la série F2 entre 0 et 15 0 m de profondeur
pour les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012 138
Figure 136- Évolution des températures de la série F2 entre 0 et 2.0 m de profondeur pour
les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012
Figure 137- Évolution des températures de la série F5 entre 0 et 6.5 m de profondeur pour
les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012
Figure 138- Évolution des températures de la série F5 entre 0 et 2,0 m de profondeur pour
les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012
Figure 139- Évolution des températures de la série F entre 0 et 2,0 m de profondeur pour
les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012
Figure 140- Évolution des températures de la série G entre 0 et 2,0 m de profondeur pour
les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012
Figure 141- Évolution des températures de la série F2 entre 8 et 15,0 m de profondeur
entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012
Figure 142- Évolution de la température à 1 m et 2 m de profondeur entre le 26
septembre 2009 et le 2 octobre 2012 a) pour la série F2 b) pour la série F5 c) pour la série
F d) pour la série G
Figure 143- Évolution de la température entre 3 et 5 m de profondeur entre le 26
septembre 2009 et le 2 octobre 2012 a) pour la série F2 b) pour la série F5 149

Figure 144- Évolution de la température du sol à 1 m et 2 m de la série F5 entre le 15 juin
et le 2 octobre pour les étés 2009, 2010, 2011 et 2012
Figure 145- Évolution de la température des thermistances de la série H à 66,5, 72,5 et
76,5 m du centre de la piste entre le 26 septembre 2009 et le 2 octobre 2012 151
Figure 146- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme
convective en date du 15/02/2011 et du 15/02/2012
Figure 147- Évolution de la température au centre du remblai convectif (hauteur de 0.9
m) lors du deuxième et du troisième hiver de suivi
Figure 148- Courbes trompettes de la série F5 (côté amont) pour la première année de
suivi (2009-2010) et la dernière année de suivi (2011-2012) ainsi que la différence de
température à différente profondeur
Figure 149- Courbes trompettes de la série F2 (côté aval) pour la première année de suivi
(2009-2010) et la dernière année de suivi (2011-2012) ainsi que la différence de
température à différente profondeur
Figure 150- Indices permettant de commenter le fonctionnement du remblai convectif et
indices comparables pour la station de référence
Figure 151- Sortie graphique des données inclinométriques enregistrées à Puvirnituq
entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012
Figure 152- Déplacement en fonction de la profondeur en date du 26 septembre 2009, du
26 septembre 2010, du 25 septembre 2011 et du 26 septembre 2012 161
Figure 153 : a) mouvement anticipé en cas de rupture sous le poids du remblai et b)
mouvement observé
Figure 154- Déplacement lors de a) année de suivi 1 (septembre 2009 à septembre 2010);
b) année de suivi 2 (septembre 2010 à septembre 2011); c) année de suivi 3 (septembre
2011 à septembre 2012)
Figure 155- Déplacement de la section supérieure de l'inclinomètre par rapport à la
section inférieure de celui-ci
Figure 156-Évolution du déplacement relatif à 3,5 m de profondeur ainsi que la
température à la profondeur correspondante entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre
2012
Figure 157- Problème possible d'instabilité du remblai causé par la dégradation du
pergélisol en bordure du remblai
Figure 158- Étapes de la modélisation thermique du pergélisol à l'aide du logiciel
TEMP/W
Figure 159- Stratigraphie et géométrie de la simulation numérique 167
Figure 160- Température de l'air en fonction du temps utilisée pour la calibration de la
simulation
Figure 161- Conditions initiales du modèle et maillage a) en été b) en hiver 171
Figure 162-Résultat de la simulation thermique ainsi que le plafond du pergélisol
déterminé à l'aide du MASW et de la série F2173

Figure 163- Résultat de l'évolution future du pergélisol
Figure 164- Estimation du temps de dégel au front de dégel 175
Figure 165- Résultats d'un essai de consolidation au dégel d'un silt argileux de Salluit,
prélevé au forage SAL_F6_290_304 en 2008 176
Figure 166- Schéma de la situation au front de dégel a) à la fin de l'hiver b) au dégel
maximal
Figure 167- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie obtenue à l'aide de la
simulation thermique pour l'année 2009 179
Figure 168- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie obtenue à l'aide de la
simulation thermique pour l'année 2030 180
Figure 169- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie obtenue à l'aide du MASW
Figure 170- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie projetée du pergélisol pour
2030
Figure 171- Suppression interstitielle imposée dans le bulbe de dégel 182
Figure 172- Résultat de l'étude de stabilité avec une surpression interstitielle à l'interface
de sol en dégel équivalente à 52 kPa 183

Liste des tableaux

Tableau 1- Plages de valeurs et valeurs typiques de perte de capacité portante lors dudégel de différents types de sols (Doré & Zubeck 2009)21
Tablaau 2 Stratigraphia du sondaga PLIV E1 (Allard Dará L'Hárault Sarrazin et al
2009)
Tableau 3- Stratigraphie du sondage PUV F2 (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al.,
2009)
Tableau 4- Stratigraphie du sondage PUV_F5 (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al.,
2009)
Tableau 5- Indice de gel et de dégel pour les trois années de suivi
Tableau 6- Températures moyennes annuelles du sol à différente profondeur pour les
séries F et G 143
Tableau 7- Températures moyennes annuelles du sol à différente profondeur pour les
séries F2 et F5
Tableau 8- Températures moyennes annuelles du sol pour la série H 146
Tableau 9- Profondeurs du plafond du pergélisol ainsi que la variation du plafond du
pergélisol depuis le début du suivi du comportement thermique154
Tableau 10- Propriétés thermiques des matériaux utilisés pour la simulation 168
Tableau 11- Propriétés mécaniques des matériaux utilisés pour l'étude de stabilité à l'aide
du logiciel SLOPE/W 170
Tableau 12- Détermination de l'indice de dégel consolidation R 177
Tableau 1- Variation de l'indice R et de la pression interstitielle en fonction de l'épaisseur
de sol en dégel (30 jours de dégel, $C_{v(Salluit)}$ = 3,5 x10 ⁻⁷)
Tableau 2- Variation de l'indice R et de la pression interstitielle en fonction du temps de
dégel (épaisseur du sol dégelé= 0,5m; $C_{v(Salluit)}$ = 3,5 x10 ⁻⁷) 188
Tableau 3- Variation de l'indice R et de la pression interstitielle en fonction du
coefficient de consolidation (30 jours de dégel, épaisseur du sol dégelé= 0,5m) 188
Tableau 4- Coûts des éléments du remblai à convection
Tableau 5- Coûts des travaux à effectuer pour la déviation du ruisseau

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Les projets d'infrastructure de transport en milieu nordique nécessitent une approche adaptée afin de rendre ces projets durables. La Figure 1 présente le schéma de l'approche de recherche suivie par le groupe de recherche de l'Université Laval en adaptation des infrastructures de transport construites sur pergélisol sensible.



Figure 1- Schéma de l'approche de recherche en adaptation des infrastructures de transport construites sur pergélisol sensible (Doré, 2012)

La première étape de cette approche s'est effectuée par l'entremise du projet *Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier du MTQ au Nunavik et adaptation* (Beaulac, 2006). Ce projet a permis d'identifier les infrastructures de transport instables au Nunavik et d'évaluer la faisabilité de plusieurs solutions.

Les étapes suivantes de l'approche de recherche se sont déroulées à l'intérieur d'un ou de plusieurs projets. Une campagne de forages profonds avec récupération intacte, entreprise par le Centre d'étude nordique et l'Université Laval a permis d'accroître les connaissances sur l'étendue et les propriétés exactes des sols sensibles au dégel sous 8 pistes d'atterrissage et deux routes d'accès qui ont préalablement été identifiées comme sensibles au dégel du pergélisol (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin, & Verreault, 2009; Allard, Doré, L'Hérault, Verreault, & Sarrazin, 2009).

Une méthode de stabilisation thermique a été développée dans le cadre du projet *Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik* (Voyer, 2009). Ce projet a permis de développer un modèle numérique et de le valider en fournissant des données thermiques pour une chaussée réelle obtenue à l'aide d'un remblai expérimental construit à l'intérieur d'une chambre froide en laboratoire.

Deux sections d'essai ont permis l'expérimentation de techniques de stabilisation du pergélisol en conditions naturelles au Québec et au Yukon. Ces deux sections ont fait l'objet de maitrises. Le premier projet, *Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures du Nunavik : Aéroport de Tasiujaq* (Ficheur, 2011) a permis d'évaluer le comportement de trois systèmes de protection du pergélisol appliqués au remblai de la piste de Tasiujaq. Le deuxième projet consiste en douze sections d'essai qui ont été suivies au Yukon: *Performance thermique des techniques de protection du pergélisol au site expérimental de Beaver Creek, Yukon, Canada* (M-Lepage, Doré, Fortier, & Murchison, 2012).

La dernière étape de l'approche de recherche en adaptation des infrastructures de transport construites sur pergélisol sensible est la réalisation de projets pilotes. Le projet pilote faisant l'objet de ce mémoire, *Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq*, est l'un de ces projets pilotes.

1.2 Objectifs du projet de recherche

Le projet de recherche *Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de Puvirnituq* a pour objectif principal de vérifier l'efficacité des systèmes de protection construits à cet endroit. Les objectifs spécifiques du projet de recherche proposé sont les suivants :

- Identifier les particularités d'une analyse de stabilité dans le contexte d'un pergélisol en voie de dégradation
- Vérifier l'efficacité des systèmes de protection thermique et mécanique prévus pour stabiliser les remblais de la piste.

1.3 Organisation du document

Le présent document se divise en neuf chapitres. Le contenu des différents chapitres est détaillé dans les paragraphes suivants.

Le Chapitre 2 présente un état des connaissances sur le pergélisol, les facteurs affectant le pergélisol, la réponse du pergélisol face à un changement, la mécanique des sols gelés, en dégel et dégelé, la conception de remblai sur pergélisol incluant des méthodes d'atténuation de la dégradation du pergélisol et les mouvements de pente.

Le Chapitre 3 présente une mise en contexte de la piste d'atterrissage de Puvirnituq ainsi que les objectifs du projet de recherche. La mise en contexte inclue la géomorphologie et les caractéristiques du terrain adjacent à la piste d'atterrissage de Puvirnituq, les forages et essais géotechniques réalisés, la description des travaux de construction et l'instrumentation installée.

Le Chapitre 4 traite des deux visites de terrain qui ont eu lieu aux mois de juillet 2011 et de septembre 2012. Les différentes observations réalisées lors de ces visites sont détaillées. L'état général des installations et l'évolution des dégradations sont également discutés.

Le Chapitre 5 présente le suivi du comportement thermique. Une comparaison des données climatiques est d'abord présentée suivi des résultats provenant des séries de thermistances installées dans le remblai convectif ainsi que dans le sol naturel, et ce, pour les trois années de suivi.

Le Chapitre 6 présente le suivi du comportement mécanique à l'aide de l'inclinomètre installé en pied de remblai pour les trois années de suivi.

Le Chapitre 7 présente la modélisation des comportements mécanique et thermique du remblai de la piste d'atterrissage de Puvirnituq.

Le Chapitre 8 présente une discussion sur les différents résultats obtenus dans le cadre de ce projet de maîtrise.

Les recommandations et la conclusion se trouvent aux Chapitre 9 et 10.

2 État des connaissances

2.1 Pergélisol

Le pergélisol est une couche de sol dont la température se maintient sous 0°C pendant plus d'un an (Williams & Smith, 1991). Cette définition tient compte uniquement de la température du sol et non de sa composition (Andersland & Ladanyi, 2004). La section suivante traitera des concepts et définitions relatives au pergélisol, de la distribution de celui-ci au Canada, au Québec et plus spécifiquement dans le village nordique de Puvirnituq.

2.1.1 Concepts et définitions

La Figure 2 présente un profil thermique caractéristique d'un pergélisol. Sur cette figure, communément appelé courbe trompette, l'abscisse correspond à la température tandis que l'ordonnée correspond à la profondeur. La courbe de gauche correspond à la température la plus froide atteinte dans le sol à la profondeur donnée. La courbe de droite correspond à la température la plus chaude atteinte dans le sol à la profondeur donnée. Ces courbes correspondent aux extrêmes de températures enregistrées dans le sol et peuvent être survenues à des moments différents. Durant l'année, la température du sol varie entre ces deux extrêmes. Sur la Figure 2, la couche active correspond au sol dont la température varie de valeurs positives à négatives durant l'année. Autrement dit, cette couche gèle et dégèle en alternance avec les saisons. Également sur la Figure 2, le pergélisol correspond au sol dont la température reste négative tout au long de l'année.



Figure 2- Courbe trompette typique d'un pergélisol (Andersland & Ladanyi, 2004)

À une certaine profondeur, la température du sol redevient positive. Il s'agit de la base du pergélisol. Si la base de la couche active ainsi que la base du pergélisol sont connues, il est possible de déterminer l'épaisseur du pergélisol. L'épaisseur du pergélisol dépend du gradient géothermique. Pour des conditions de site similaires, plus le gradient

géothermique est fort, plus l'épaisseur de pergélisol sera faible. Par opposition, plus le gradient géothermique est faible, plus l'épaisseur de pergélisol sera grande.

Dans le pergélisol, il est possible de retrouver la présence de taliks. Un talik est une couche de sol non gelé à l'intérieur du pergélisol. Les taliks peuvent être «fermé» lorsqu'ils sont complètement entourés de pergélisol, ou «ouvert» lorsqu'ils sont partiellement entourés de pergélisol (Andersland & Ladanyi, 2004). Même en hautes latitudes, les corps d'eau (rivières ou lacs) ne gèlent pas en profondeur, ce qui a un effet sur la température du sol sous-jacent (Williams & Smith, 1991). La configuration locale du pergélisol est donc affectée par ces corps d'eau et des taliks y sont souvent associés.

2.1.2 Température du pergélisol

Une des propriétés caractéristiques les plus importantes d'un pergélisol est sa température. En tenant compte de cette propriété, il est possible de subdiviser le pergélisol en deux catégories, soit le pergélisol chaud et le pergélisol froid (Doré, 2011). Le pergélisol chaud est composé de sol partiellement gelé (entre $-2^{\circ}C$ et $0^{\circ}C$). Ce pergélisol est sensible aux variations des conditions thermiques, c'est-à-dire qu'une faible quantité de chaleur peut engendrer son dégel. Le pergélisol froid est composé majoritairement de sol complètement gelé (sous $-2^{\circ}C$) et de minces couches de sol partiellement gelé (entre $-2^{\circ}C$ et $0^{\circ}C$), situées à sa base et à son sommet (Figure 3 b)). Ce type de pergélisol est moins sensible aux variations des conditions thermiques.



Figure 3- Régimes thermiques (a) d'un pergélisol chaud (b) d'un pergélisol froid (modifié de (Doré, 2011))

2.1.3 Distribution du pergélisol au Canada

La Figure 4 présente la distribution du pergélisol au Canada. La Tableau 1 présente la légende de cette carte. Cette légende a été élaborée à l'aide de deux caractéristiques du pergélisol, soit la proportion de territoire couvert par le pergélisol et la teneur en glace du

pergélisol. La colonne de gauche représente l'étendue du pergélisol. La première catégorie correspond au pergélisol continu, c'est-à-dire un pergélisol couvrant 90-100% du territoire. Ensuite, la deuxième catégorie correspond au pergélisol discontinu extensif, c'est-à-dire un pergélisol couvrant 50-90% du territoire. La troisième catégorie correspond au pergélisol discontinu sporadique, c'est-à-dire un pergélisol couvrant 10-50% du territoire. Et finalement le pergélisol isolé, c'est-à-dire un pergélisol couvrant 0-10% du territoire. La deuxième caractéristique selon laquelle cette carte a été élaborée est la teneur en glace dans les premiers 10 à 20 mètres. Cette caractéristique est indiquée sur la ligne du haut. La première catégorie correspond à un pergélisol qui a une teneur en glace élevée, soit supérieure à 20%. La deuxième catégorie correspond à un pergélisol qui a un teneur en glace moyenne, soit entre 10 et 20%. La troisième catégorie correspond à un pergélisol qui a un teneur en glace faible, soit inférieur à 10%. Finalement la dernière catégorie correspond à un pergélisol dont la teneur en glace est nulle. La Figure 4 permet de constater qu'une grande proportion du territoire canadien est couverte de pergélisol. Ce territoire correspond cependant aux zones les moins peuplées du Canada.



Figure 4- Carte de la distribution du pergélisol au Canada (Ressources Naturelles Canada, 1995)

Tableau 1- Légende de la carte de la distribution du pergélisol au Canada (Ressources Naturelles Canada, 1995)

Étendue du pergélisol (% de la zone renfermant du pergélisol)	Glace de sol dans les 10 à 20 m supérieurs du sol (% en volume de glace visible) Inclue la glace de ségrégation, la glace intrusive, la glace réticulée, les cristaux de glace et la pellicule de glace enrobant les particules de sol						
	Élevée (>20 %)		Modérée (10-20 %)		Faible (>10 %)		Nulle (0 %)
Pergélisol continu (90-100 %)	Cé	Cmé	Cm	Cfm	Cf	and a	
Pergélisol discontinu étendu (50-90 %)	12. P	1.5	Ém	Éfm	Éf	Énf	25
Pergélisol discontinu sporadique (10-50 %)	1	1000	1543	Sfm	Sf	Snf	1
Îlots de pergélisol (0-10 %)			-	Îfm	Îf	Înf	În
Absence de pergélisol (0 %)	1	Profession .		1 alt	a frid	the start	
Pergélisol sous-marin	1	1		Ofm	6. 6	distant of	-

La Figure 5 représente la distribution longitudinale du pergélisol au Canada du sud (droite) vers le nord (gauche). Il est possible de constater une certaine transition du pergélisol. D'abord, dans les régions les plus au sud, le pergélisol est discontinu. Il a une couche active importante et une épaisseur relativement faible. Il est ensuite possible de constater une transition du pergélisol vers un pergélisol continu. Dans les régions le plus au nord, la couche active est peu importante et l'épaisseur du pergélisol est importante. Il est également possible de voir la diminution du nombre de taliks en se déplacement vers le nord.



Figure 5- Distribution longitudinale du pergélisol (Johnston, 1981)

2.1.4 Distribution du pergélisol au Québec

Le pergélisol est présent dans environ un tiers du territoire de la péninsule du Québec-Labrador (Allard, 2012). La Figure 6 présente la distribution du pergélisol au Québec nordique. La zone A correspond au pergélisol continu qui a généralement une épaisseur dépassant 150 mètres. Une épaisseur maximale de 632 mètres de pergélisol a été mesurée à la mine Raglan, au Nunavik (Allard, 2012). La zone B correspond au pergélisol discontinu et répandu (> 50 % de la surface du terrain). Le pergélisol est présent dans tous les types de matériaux géologiques de surface et absent sous les terrains humides avec peuplements arbustifs et sous les peuplements forestiers denses. La zone C correspond au pergélisol discontinu et dispersé (< 50 % de la surface des terres). Le pergélisol est présent sous les collines dénudées et peut avoir une épaisseur de plus de 100 mètres. La Zone D correspond au pergélisol sporadique (< 2 % du territoire). Le pergélisol est principalement présent dans les tourbières et sous les sommets dont la hauteur est suffisante pour constituer des îlots de toundra forestière.



Figure 6- Distribution du pergélisol au Québec nordique (Allard, 2012) (sous presse lors du Northern Forum, 19-20 avril 2012)

2.1.5 Infrastructures aéroportuaires du Nunavik

La Figure 7 présente une carte indiquant l'emplacement des infrastructures aéroportuaires du Nunavik. Parmi les 14 aéroports, 13 appartiennent au Ministère des Transports du Québec, et celui de Kuujjuaq appartient à Transport Canada.

La construction des pistes d'atterrissage du Ministère des Transports du Québec s'est déroulée entre 1984 et 1991. La majorité (11 piste sur 13) pistes d'atterrissage sont composées d'une surface en gravier d'une longueur de 1070 mètres et d'une largeur de 30 mètres. Parmi ces aéroports, deux sont construits sur dans la zone de pergélisol discontinu sporadique (Kuujjuarapik et Umiujaq), deux sont construits sur dans la zone de pergélisol discontinu étendu (Tasiujaq et Kangiqsualujjuaq) et neuf sont construits dans la zone de pergélisol continu (Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Ivujivik, Salluit, Kangiqsujuaq, Quaqtaq, Kangirsuk et Aupaluk). Lors de la construction de ces pistes, le pergélisol a été considéré comme un sol de fondation stable et aucune perspective de réchauffement climatique n'avait été envisagée (Guimond, 2012)



Figure 7- Carte indiquant l'emplacement des infrastructures aéroportuaires du Nunavik (Guimond, 2012)

2.2 Facteurs affectant le pergélisol

2.2.1 Température de l'air

Les réchauffements climatiques peuvent avoir une influence importante, et ce, spécialement dans les zones de pergélisol discontinu (Doré & Zubeck, 2009). Si la température moyenne annuelle de surface augmente, la courbe trompette se déplacera vers des températures plus chaudes. Ce réchauffement peut donc avoir comme conséquences, l'augmentation de la couche active et le réchauffement du pergélisol. Si la température augmente suffisamment, le pergélisol peut entièrement dégelé.

2.2.2 Couvert de neige

Le couvert de neige est un facteur très important affectant le régime thermique d'un sol (Gadek & Leszkiewicz, 2010; Williams & Smith, 1991) . Le couvert de neige empêche la chaleur d'être extraite du sol durant la saison hivernale. Cet effet provient de la très faible conductivité thermique (expliquée à la section 2.4.1) de la neige. La conductivité de la neige varie entre 0,08 et 0,7 W/m*K pour de la neige dont la densités varie respectivement de 85 et 500 Kg/m³ (Andersland & Ladanyi, 2004). En comparaison, les sols gelés ont des conductivités thermiques entre 2 et 3 W/m*K (Williams & Smith, 1991). La Figure 8 montre la température moyenne de la neige et du sol sur deux sites près de Schefferville lors d'une journée typique d'hiver. Il est possible de constater sur cette figure l'effet isolant qu'a la neige sur le régime thermique du sol sous-jacent.



Figure 8- Température moyenne de la neige et du sol sur deux sites lors d'une journée typique d'hiver (Nicholson & Granberg, 1973) cité par (Williams & Smith, 1991)

2.2.3 Couvert végétal

Le couvert végétal a une influence importante sur le régime thermique du sol. De façon générale, ce couvert végétal diminue la température moyenne annuelle. Ceci est principalement causé par la variation saisonnière de la conductivité thermique (faible conductivité dégelé et forte conductivité gelé) ainsi que par le régime d'évaporation (Williams & Smith, 1991).

Le type de végétation a également une influence sur la quantité de neige s'accumulant au sol (Williams & Smith, 1991). Les petits arbustes ont tendance à retenir une épaisseur de neige plus importante que les arbres plus matures, ce qui a une influence majeure sur le régime thermique du sol. La Figure 9 schématise l'effet du type de végétation sur l'accumulation de neige au sol ainsi que sur le pergélisol sous-jacent.



Figure 9- Effet du type de végétation sur l'accumulation de neige au sol ainsi que sur le pergélisol sous-jacent (Williams & Smith, 1991)

La Figure 10 présente les résultats d'une étude qui a été réalisée près de Fairbanks, Alaska. Trois sections étaient étudiées, soit une section naturelle avec arbres et tourbe, une seconde section où les arbres ont été retirés, mais où des petits arbustes et la tourbe sont encore présents et finalement une dernière section où les arbres et la mousse ont été retirés et où le sol a été scarifié sur 0,4 mètre. L'évolution de la couche active a été étudiée sur une période de 26 ans. Il est possible de remarquer que l'épaisseur de la couche active est restée constante pour la section intacte, soit d'environ 1,1 mètre. Par contre, pour les deux autres sections, les épaisseurs des couches actives ont augmenté à 4,7 mètres et à 6,7 mètres.



Figure 10- Dégradation du pergélisol sous différents traitements de la surface sur une période de 26 ans (Linell, 1973)

D'ailleurs, les feux de forêt, altérant le couvert végétal de façon significative, sont le facteur naturel le plus important qui influence le régime thermique du sol au Yukon (Burn, 2011).

2.2.4 Construction d'un remblai

La construction d'un remblai a une influence sur le régime thermique du pergélisol (Doré, 2011). La Figure 11 schématise la modification du régime thermique dans le sol d'infrastructure lors de la construction d'un remblai routier.

Avant la construction, le sol possède un régime thermique qui lui attribue une couche active dont l'épaisseur est stable. Durant la construction, les différentes modifications de la surface (modifications ou altération du couvert végétal, compaction des sols, modification au réseau de drainage, etc.) entraîneront des modifications de ce régime thermique. L'épaisseur de la couche active peut alors augmenter et des tassements peuvent en résulter.

Suite à la mise en place des matériaux granulaires, le régime thermique est de nouveau affecté. Les matériaux granulaires utilisés ont habituellement une conductivité thermique plus grande que le sol préalablement présent (Andersland & Ladanyi, 2004). Suite à la construction, le pergélisol a tendance à remonter dans la fondation granulaire au centre de la chaussée. Cette tendance est également accentuée par le déneigement du centre de la chaussée en saison hivernale. L'effet isolant de la neige n'est donc plus présent sur cette section. Par contre, la neige déblayée sur les côtés, isole le sol sous-jacent et l'épaisseur de la couche active augmentera.



Figure 11- Modification du régime thermique dans le sol d'infrastructure lors de la construction d'un remblai routier (modifié de (Doré, 2011))

L'augmentation de l'épaisseur de la couche active en bordure de remblai peut engendrer des dégradations importantes sur les épaulements des remblais routiers (Beaulac, 2006; Doré & Zubeck, 2009). Ces dégradations s'observent facilement à l'aide de fissures longitudinales sur les épaulements de la route, voir la Figure 12.



Figure 12- Fissure longitudinale observée suite à la dégradation du pergélisol sous l'épaulement de la route de l'Alaska (Doré, 2012)

2.3 Réponse du pergélisol face à un changement

Toutes modifications, dommage ou compaction du matériau de surface (végétation, tourbe ou sol) altérera le bilan de transfert de chaleur de la surface (Williams & Smith, 1991). En général, ces changements résulteront en une augmentation de la température moyenne de surface. Cette augmentation peut éventuellement être accompagnée par la fonte de la section supérieure de la couche de pergélisol.

La Figure 13 illustre la réponse d'un pergélisol riche en glace face à une perturbation. Lorsqu'une perturbation affecte le régime thermique du pergélisol, le sol quitte son état initial et entre dans un état transitoire (Mackay, 1970). La perturbation peut provenir d'un ou d'une combinaison des différents facteurs mentionnés précédemment. La température du sol augmentera au-dessus du point de congélation, la glace fondra et l'eau en excès sera expulsée, puis il y aura une consolidation de la couche de sol dégelé. Si le sol avait une teneur en glace élevée, des tassements importants sont possibles. Le régime thermique du sol se stabilisera ensuite et le sol atteindra son état final. Le sol aura une nouvelle couche active qui peut être plus épaisse que la précédente puisque l'effet isolant de la couche de végétation a été retiré.



Figure 13-Réponse d'un pergélisol riche en glace face à une perturbation (modifié de (Mackay, 1970))

La glace en excès dans un sol est définie comme la glace excédant du volume des pores du sol dégelé (Williams & Smith, 1991). Lors de la fonte, l'excès d'eau est expulsé et le sol se consolide (Mackay, 1970). Plusieurs types de glace en excès peuvent être présents dans un pergélisol, soit la glace de ségrégation (lentilles de glace), les coins de glace, la glace de cavité et la glace massive (Allard, 2010).

2.4 Propriétés thermiques et principaux modes de transfert de chaleur

2.4.1 Propriétés thermiques

La conductivité thermique k d'un corps peut être définie comme étant la quantité de chaleur qui traverse une masse par unité de temps, sous un gradient de température (Williams & Smith, 1991). Elle s'exprime donc en W/(m*K). La conductivité thermique peut être comparée à une propriété de transport, donnant une indication du taux à laquelle l'énergie est transférée (Incropera & DeWitt, 2007). La conductivité thermique est fonction de la densité du sol, de sa teneur en eau et de son état (Doré, 2011).

La chaleur spécifique C est la capacité d'un sol à emmagasiner de l'énergie thermique (Incropera & DeWitt, 2007). Cette propriété thermique s'exprime en kJ/kg*K. La capacité calorifique est donc la quantité de chaleur requise pour élever la température d'une unité de masse de 1 degré (Doré, 2011).

La diffusivité thermique est la mesure de l'habileté d'un matériel à conduire l'énergie thermique par rapport à son habilité à emmagasiner l'énergie thermique, et s'exprime en m^2/s (Incropera & DeWitt, 2007). La diffusivité est donc un indice de la facilité relative avec laquelle un matériel peut changer de température (Allard, 2010).

2.4.2 Modes de transfert de chaleur

La conduction est le mécanisme de transfert de chaleur par interaction moléculaire de la matière (Doré, 2011). Il est le principal mode de transfert de chaleur dans les sols. La caractéristique la plus importante à connaître, lorsque la conduction est le principal mode de transfert de chaleur, est la conductivité thermique k. La Figure 14 schématise le mécanisme de transfert de chaleur par conduction.



Froid

Figure 14- Schématisation du mécanisme de transfert de chaleur par conduction (Doré, 2011)

La convection est un mécanisme de transfert de chaleur qui se produit entre une surface et un fluide en mouvement (Doré, 2011). Une convection est forcée lorsqu'une force externe agit sur le fluide, par exemple le vent et le ruissellement. Une convection est naturelle lorsqu'elle se produit par gradient de densité. La convection naturelle se divise également en deux sous-catégories, soit la convection en cellule fermée et ouverte. La Figure 15 schématise les différents types de convection.



Figure 15- Différents types de convection a) Convection forcée b) Convection naturelle en cellule fermée c) Convection naturelle ouverte (Doré, 2011)

Le transfert de chaleur par radiation se fait par radiation électromagnétique (Doré, 2011). La principale source de radiation électromagnétique est le soleil. La quantité de chaleur transmise par ce mode dépend donc de la couverture neigeuse, de la latitude et de l'albédo d'une surface, c'est-à-dire sa capacité à refléter les radiations solaires. La Figure 16 schématise la chaleur absorbée par radiation durant la journée ainsi que la chaleur émise par radiation durant la nuit.



Figure 16- Schématisation de la chaleur absorbée par radiation durant la journée ainsi que la chaleur émise par radiation durant la nuit (Doré, 2011)

2.5 Mécanique des sols gelés, en dégel et dégelés

La section suivante traitera de la mécanique des sols gelés, en dégel et dégelés. Elle est divisée en cinq sections, soit l'état du sol, la capacité portante et comportement au dégel, la consolidation et le tassement au dégel, le fluage et finalement, l'influence de la salinisation.

2.5.1 État du sol

La Figure 17 montre les différentes phases présentes dans un sol gelé et un sol non gelé. Trois phases sont présentes dans un sol non gelé, soit le gaz, l'eau et les particules solides. Les sols gelés contiennent ces trois phases, mais contiennent une quatrième phase qui est l'eau gelée, la glace. La glace a une densité plus faible que celle de l'eau. Il y a donc un changement de volume associé au passage d'une phase gelée à non gelé, ou l'inverse. L'ampleur du changement de volume est déterminée par la teneur en eau ou en glace. La consolidation influence également les changements de volume associé à la fonte du pergélisol. Cet aspect sera traité dans une section subséquente.



Figure 17- Différentes phases présentes dans un sol gelé et un sol non gelé (Andersland & Ladanyi, 2004)

La chaleur latente est un principe très important en ingénierie du pergélisol. Il correspond à la quantité d'énergie libérée ou absorbée lors du changement de phase d'un matériau. Pour l'eau, la quantité de chaleur absorbée est de 333,7 kJ/kg pour transformer la glace en eau, et la quantité de chaleur libérée est de 333,7 kJ/kg pour transformer l'eau en glace. Pour les sols, l'énergie totale impliquée dans le processus de changement de phase dépend de la quantité d'eau dans le sol et de la fraction de cette eau qui change de phase. La Figure 18 représente l'effet de la chaleur latente sur le changement de phase de l'eau dans un sol.



Figure 18- Effet de la chaleur latente sur le changement de phase de l'eau dans un sol (Modifié de (Krahn, 2004))

2.5.2 Capacité portante et comportement au dégel

Différents auteurs (Ting, 1981; Ting, Martin, & Ladd, 1983) cités par (Andersland & Ladanyi, 2004) ont conclu que la résistance à la compression d'un sable gelé est essentiellement régit par quatre principaux mécanismes, soit la résistance de la glace dans les pores, la résistance du sol (constitué de la friction interparticules, l'interface des particules et les effets de dilatance), l'augmentation de la contrainte effective causée par les liens adhésifs de glace qui résistent durant le cisaillement d'un sol dense et finalement les effets synergiques du renforcement entre le sol et la matrice de glace qui empêche l'effondrement du squelette de sol. La Figure 19 décrit les mécanismes influençant la résistance à la compression d'un sable gelé contenant différente fraction de sable. En plus de la densité du sol et de la teneur en glace, plusieurs autres facteurs influencent la résistance d'un sol, dont la température, la contrainte de confinement et l'historique de déformation (Andersland & Ladanyi, 2004).



Figure 19- Mécanismes influençant la résistance à la compression d'un sable gelé à différente fraction de sable (Ting et al., 1983)

La Figure 20 représente le changement des propriétés mécaniques d'un sol en fonction de sa température. Il est possible de remarquer sur cette figure que la rigidité et la résistance au cisaillement sont plutôt constantes lorsque le sol est complètement gelé, soit à des températures inférieures à -2°C. Par contre, la rigidité et la résistance au cisaillement diminuent grandement avec le réchauffement du sol entre -2°C et 0°C. Lorsque le sol dégel, la rigidité et la résistance au cisaillement du sol diminuent très rapidement. Le sol recouvre ensuite ses propriétés mécaniques avec le temps.



Figure 20- Changement des propriétés mécaniques d'un sol dans un état gelé, partiellement gelé, et en dégel/dégelé (Doré 2011)

Le Tableau 2 présente les plages de valeurs et valeurs typiques de perte de capacité portante lors du dégel de différents types de sols.
Type de sol	Plages de pertes de capacité portante*	Valeur typique
Gravier et sable propre	0 – 15%	10%
Gravier et sable silteux-argileux	20 - 50%	35%
Silt	30 - 70%	50%
Argile	40 - 60%	50%

 Tableau 2- Plages de valeurs et valeurs typiques de perte de capacité portante lors du dégel de différents types de sols (Doré & Zubeck, 2009)

* Différences entre le module d'été et de printemps, divisé par le module d'été

2.5.3 Consolidation et tassement au dégel

Le comportement d'un pergélisol soumis au dégel est largement décrit par (Andersland & Ladanyi, 2004). Un changement de volume résultera du changement de volume de la glace à l'eau, et de l'expulsion de l'eau en excès présent dans un sol. Un sol saturé, à l'équilibre sous une contrainte en condition non drainée, va augmenter de volume lorsqu'il est gelé. Ce changement de volume est associé au changement de l'eau interstitielle en glace et peut être décrit par : [2-1]

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx 0,09n$$

où $\frac{\Delta V}{V_0}$ Déformation volumétrique
n = Porosité

Ce même sol retrouvera son volume initial s'il fond en condition non drainée. Le drainage d'un sol en dégel engendrera des changements de volume additionnel, qui dépendent de la consolidation et de la structure initiale du sol.

Si un sol contient de la glace en excès, la fonte de ce sol générera plus d'eau que le squelette du sol peut absorber. Le drainage de cette eau engendrera des tassements additionnels. Il existe une procédure simple afin de déterminer l'eau en excès contenu dans un sol. Il s'agit de placer le sol dans un contenant gradué et de le laisser fondre. Il est alors possible de mesurer l'eau en excès dans le sol et d'estimer le tassement engendré par le dégel du sol (Agergaard, Ingeman-Nielsen, & Foged, 2012; Andersland & Ladanyi, 2004; Stephani, Fortier, Doré, & Shur, 2008). Les silts et les argiles sont généralement riches en glace et donne un tassement au dégel important. La Figure 21 (A) montre la cryostructure microlenticulaire très riche en glace typique d'un pergélisol syngénétique

tandis que la Figure 21 (B) montre l'eau en excès suivant le dégel d'un échantillon dans une cellule de dégel-consolidation.



Figure 21- (A) Cryostructure microlenticulaire très riche en glace typique d'un pergélisol syngénétique (B) Essai de potentiel de consolidation au dégel montrant l'eau en excès, suite au dégel. (Stephani et al., 2008)

Les sols riches en glace sont communs dans les plaines alluviales, dans certains tills et dans des bassins glacio-lacustre (Andersland & Ladanyi, 2004). De plus, La présence de structure de pergélisol tel que les *hummocks*, les ostioles, les palses, les coins de glaces sont des indications de la présence de sols riches en glace (Doré & Zubeck, 2009).

Certains sables lâches contiennent peu de glace, mais subiront des tassements importants lors du dégel. La Figure 22 (a) montre un résultat typique de tassement et consolidation au dégel. Sous une contrainte constante σ'_0 , le sol est dégelé. Une diminution importante de l'indice des vides, de e_f à e_t , se produit dû au changement de phase et au drainage de l'eau en excès. Si la contrainte augmente $\Delta \sigma$, le sol consolidera et aura un indice des vides final e_c . La Figure 22 (b) montre une courbe typique de tassement (s) en fonction de la contrainte (σ) pour un sol soumis au dégel.



Figure 22- (a) Courbe d'indice des vides en fonction de la contrainte pour un sol soumis au dégel. (b) Courbe de tassement en fonction de la contrainte pour un sol soumis au dégel (Doré & Zubeck, 2009)

Le paramètre de tassement de fonte A_0 se définit comme suit :

[2-2]

$$A_{0=\frac{e_f - e_t}{1 + e_f}}$$

Le tassement dû au dégel peut être obtenu par :

[2-3]

$$S_t = A_0 D_f$$

où

S_t= Tassement dû au dégel D_f= Épaisseur de la couche de sol soumise au dégel

Et le tassement relatif à la consolidation :

[2-4]

$$S_{c} = \alpha_{v} \sigma'_{v} D_{f}$$

où S_{c} = Tassement relatif à la
consolidation
 α_{v} = Coefficient de compressibilité
 σ'_{v} = Contrainte effective verticale

Une évaluation rapide du potentiel de tassement au dégel peut être estimé par (B. Ladanyi, 1996) cité par (Doré & Zubeck, 2009):

[2-5]

$$s = \left[1 - \frac{\rho_{d,f}}{\rho_{d,th}}\right] D_f$$

où

s= Tassement dû au dégel estimé $\rho_{d,f}$ = Densité sèche gelée $\rho_{d,th}$ = Densité sèche dégelée (Leroueil, Dionne, & Allard, 1991) ont réalisé une étude afin de déterminer le tassement et la consolidation d'un silt argileux pergélisolé de la région de Kangiqsualujjuaq soumis au dégel. La bute minérale cryogène étudiée est composée d'un silt argileux contenant des lentilles de glaces à partir de 1,45 m qui semble marquer le plafond du pergélisol. Le pergélisol contient environ 50% d'eau, dont environ 25% de cette eau est non gelée. Une excavation a été réalisée sur le terrain afin de mesurer la compressibilité in-situ. Une excavation de 9 mètres par 9 mètres a été instrumentée de façon importante à l'aide de thermistances, de piézomètres et de tassomètres. Les valeurs du paramètre de fonte A_0 obtenues sur le terrain correspondent à celles obtenues en laboratoire. De plus, les niveaux d'eau observés dans les piézomètres indiquent que le dégel du pergélisol n'a pas généré de surpression interstitielle. Finalement, les tassomètres ont indiqué qu'une fois le front de dégel passé sous celui-ci, la compression de cette couche n'évoluait plus.

(Morgenstern & Nixon, 1971) ont développé un modèle de dégel-consolidation à partir des théories de transmission de chaleur et de consolidation linéaire d'un sol compressible. La limite mobile de dégel est définie par la solution de Neuman :

[2-6]

$$d = \alpha \sqrt{t}$$

où

d=	Profondeur du dégel
t=	Temps
α=	Constante selon les conditions
	aux limites ainsi que des
	propriétés du sol

La solution est formulée à l'aide du ratio de dégel-consolidation R.

[2-7]

$$R = \frac{\alpha}{2\sqrt{c_{\nu}}}$$

où R= Ration de dégel-consolidation c_v = Coefficient de consolidation

Ce ratio indique l'influence relative du taux à laquelle l'eau est produite par le dégel et le taux auquel elle peut être expulsée du sol dégelé au-dessus du front de gel (McRoberts & Morgenstern, 1974b). Pour une masse de sols infinie en dégel-consolidation sous son propre poids, la pression interstitielle peut être déterminée à l'aide de la fonction suivante :

$$u = \frac{\gamma' d}{\left(1 + \frac{1}{2R^2}\right)}$$

où

u= pression interstitielle
 γ'd= contrainte effective suivant la dissipation complète de la pression interstitielle en excès

2.5.4 Fluage

Parmi les principaux constituants d'un sol gelé, la glace est la première à subir le fluage puisqu'elle a la résistance au cisaillement la plus faible (Williams & Smith, 1991). Les processus impliqués dans la glace sont, la propagation des dislocations des cristaux, les processus de recristallisation conduisant à l'orientation des cristaux favorisant l'écoulement, et la mitigation du liquide intercristallin. Puisque la glace et l'eau coexistent en équilibre pour une température et une pression données, l'application d'une charge causera inévitablement une modification de cet équilibre, résultant en la fonte partielle de la phase de glace. Sous un gradient de contrainte, l'eau non gelée migre vers les régions où les contraintes sont plus faibles et gelées (Roggensack & Morgenstern, 1978). L'eau sera redistribuée, la glace se déformera, les liens structuraux seront brisés, le sol s'affaiblira et un fluage du pergélisol se produira.

Le fluage dans les sols gelés a été largement décrit par (Andersland & Ladanyi, 2004). Lorsqu'un sol gelé est soumis à une charge, il subira une déformation instantanée et une déformation relative au temps. Si la charge est suffisamment élevée, le sol offrira une résistance limite. Trois courbes typiques sont présentées à la Figure 23 (a), soit une courbe où le fluage primaire prédomine (sols pauvres en glace), une courbe où le fluage secondaire prédomine (sol riche en glace) et finalement une courbe présentant un fluage tertiaire (limite élastique dépassée). La Figure 23 (b) présente la courbe de fluage lors d'un chargement progressif sous une contrainte unixiale à température constante. Ce type de fluage est commun pour les sols gelés et pour de nombreux autres matériaux. La Figure 23 (c) présente le taux de fluage en fonction du temps. La courbe de fluage standard se divise en trois périodes ou le taux de fluage est (I) décroissant, (II) essentiellement constant et (III) en augmentation. Ces périodes sont nommées respectivement le fluage primaire, secondaire et tertiaire. Pour des contraintes faibles qui ne dépassent pas la résistance à long terme du sol gelé, les fluages secondaire et tertiaire ne se produisent pas nécessairement. Le fluage dans les sols gelés est influencé par la température, la contrainte appliquée, le type de sol et sa densité. Des sables de densité moyenne à élevée, saturés en glace, montreront un comportement semblable à la Figure

23 (b) et (c) lorsque soumis à une contrainte moyenne à élever. Une argile ou un silt riche en glace peut montrer un fluage primaire abrégé, un fluage secondaire allongé et peut ne jamais atteindre le fluage tertiaire.



Figure 23- Essai de fluage à contrainte constante (a) différentes courbes de fluage (b) courbe de fluage typique (c) vitesse de déformation en fonction du temps (Andersland & Ladanyi, 2004)

Pour des sols riches en glace soumis à des contraintes modérées, le fluage secondaire est dominant. Dans ce cas, le fluage primaire peut être négligé et l'ensemble du fluage est considéré comme étant linéaire (Hult, 1966; Branko Ladanyi, 1972) cités par (Andersland & Ladanyi, 2004).

Afin d'éviter les problèmes liés au fluage, une attention particulière doit être apportée lors de la conception d'un remblai de plus de 5 mètres construit sur un pergélisol chaud, riche en glace (Doré, 2011). La Figure 24 présente les effets du fluage du pergélisol endommageant la route suite à la construction d'un épais remblai. Lorsque ce type de dégradation survient, un entretien plus fréquent de la chaussée doit être effectué.



Figure 24- Fluage du pergélisol endommageant la route de l'Alaska suite à la construction d'un épais remblai (Doré, 2011)

Des essais de fluage sur sols gelés ont été réalisés afin de connaître le taux de fluage d'un till glaciaire et d'un silt argileux présent dans la région de Salluit (Allard, Doré, L'Hérault, Verreault et al., 2009). La Figure 25 présente le taux de déformation annuel au fluage du till glaciaire en fonction de la contrainte appliquée (σ_1) et de la température. Le taux de fluage observé augmente avec l'augmentation de la contrainte appliquée. Ce taux augmente également de façon très importante lorsque le sol atteint une température supérieure à -2°C, tout en restant près de 0°C, où le sol est alors considéré comme marginalement gelé.



Figure 25- Taux de déformation annuel au fluage du till glaciaire en fonction de la contrainte appliquée (σ₁) et de la température (Allard, Doré, L'Hérault, Verreault et al., 2009)

2.5.5 Influence de la salinisation

Les pergélisols salins sont très fréquents sur les côtes arctiques (Hivon & Sego, 1993). Le chlorure de sodium est le sel le plus fréquent dans les dépôts de type marin (Brouchkov, 2003). Il a été démontré que ce type de pergélisol présente des capacités portantes plus faibles que les pergélisols non salins (Andersland & Ladanyi, 2004; Hivon & Sego, 1993; Nixon & Lem, 1984; Ogata, Yasuda, & Kataoka, 1983). Cette propriété est largement contrôlée par la teneur en eau non gelée. La présence de sel dans le pergélisol diminue le point de fusion, autrement dit, il augmente la teneur en eau non gelée (Andersland & Ladanyi, 2004; Ingeman-Nielsen, Foged, Butzbach, & Jørgensen, 2008). En terme de comportement, il se situe entre les sols gelés et les sols dégelés (Brouchkov, 2003). Un sol est considéré salin s'il contient 0,05% de masse de sel par masse de sols secs. Cette propriété, la salinisation, ne varie pas en fonction du volume d'eau contrairement à la salinité. En effet, le volume d'eau change avec la température (rapport glace/eau), ce qui fait donc varier la salinité en fonction de la température. Une augmentation de la salinisation est généralement observée avec la profondeur puisque la couche active a habituellement été lessivée entre les différents cycles de gel/dégel (Brouchkov, 2003; Hivon & Sego, 1993).

Les problèmes les plus courants lors de construction sur le pergélisol salin sont la surestimation de la capacité portante et le changement de régime thermique du sol suite à la construction (émission de chaleur incontrôlée ou accumulation de neige) (Brouchkov, 2003). Des problèmes ponctuels, par exemple une inondation, peuvent également survenir et engendrer une dégradation importante du pergélisol.

De plus, certains résultats indiquent qu'un accroissement par un facteur 10 ou 100 du taux de fluage peut survenir lorsque le fluide interstitiel a une salinité qui se rapproche de celle de l'eau de mer (35 ppm) (Nixon & Lem, 1984).

2.6 Conception de remblai

Afin de limiter les problèmes causés par la dégradation du pergélisol, plusieurs types de remblai ont été conçus. Ces différents remblais utilisent trois principes fondamentaux, soit la réduction de l'induction de chaleur sous l'infrastructure, l'augmentation de l'extraction de chaleur et finalement le renforcement du remblai. La section suivante est divisée en deux sous-sections, la première traite de différentes mesures d'atténuation de la dégradation du pergélisol, et la seconde traite du remblai à convection d'air, technique utilisé sur la piste d'atterrissage de Puvirnituq.

2.6.1 Méthodes d'atténuation de la dégradation du pergélisol

Les méthodes d'atténuation de la dégradation du pergélisol utilisent deux principes, soit la réduction de l'induction de chaleur sous l'infrastructure et l'augmentation de l'extraction de chaleur. Le fonctionnement de chacune des méthodes sera discuté brièvement, le lecteur est encouragé à consulter les documents suivants pour plus de détails (Beaulac, Doré, Shur, & Allard, 2004; Doré & Zubeck, 2009; Transportation Association of Canada, 2010). L'efficacité des différentes techniques utilisées sur la section d'essai de Beaver Creek est également discutée par (M-Lepage et al., 2012)

2.6.1.1 Méthode de réduction de l'induction de chaleur sous l'infrastructure

Les principales conceptions utilisant la méthode de réduction de l'induction de chaleur sous l'infrastructure sont l'épaississement du remblai, l'isolation thermique des remblais, les surfaces réfléchissantes et les pare-soleil/pare-neige.

Dans les régions où le pergélisol est froid, l'épaississement du remblai est la méthode la plus commune pour protéger les remblais contre les tassements dus au dégel (Zarling, Braley, & Esch, 1988) cité par (Beaulac et al., 2004). Cette méthode vise à faire remonter le front de gel à l'intérieur du remblai routier. Le sol d'infrastructure possède alors des propriétés mécaniques stables et les tassements sont limités. Les remblais construits sur le pergélisol ont habituellement une hauteur de 2 mètres et plus (Doré, 2011).

L'isolation thermique des remblais permet de limiter la pénétration de chaleur dans le sol durant l'été (Doré & Zubeck, 2009). Les problèmes dus à l'augmentation de l'épaisseur de la couche active suite à la construction d'un remblai sont donc limités.

Les surfaces réfléchissantes permettent de réduire l'albédo de la surface du remblai. L'albédo est le rapport entre la radiation réfléchie et la radiation totale reçues. Différentes techniques ont été utilisées afin de réduire l'albédo, notamment l'application de peinture blanche (Esch, 1996) citée par (Beaulac et al., 2004), l'utilisation de granulats clairs (M-Lepage et al., 2012) et l'utilisation d'un bitume clair (Doré, 2011).

Les pare-soleil/pare-neige utilisent deux méthodes afin de limiter la dégradation du pergélisol, soit la réduction de l'induction de chaleur sous l'infrastructure et l'augmentation de l'extraction de chaleur (Kondratiev, 2010; M-Lepage et al., 2012). En été, les rayons de soleil sont reflétés par le pare-soleil. L'énergie transmise au sol par radiation est donc nulle. En hiver, le pare-neige permet de limiter l'accumulation de neige en surface, et donc, d'éliminer son effet isolant. La chaleur à l'intérieur du remblai est donc extraite. Les résultats obtenus sur une section d'essais à Beaver Creek (Yukon) montrent l'efficacité des pare-soleil/pare-neige (M-Lepage et al., 2012).Cependant, leurs coûts élevés limitent leurs utilisations à des zones restreintes où les risques de dégradation du pergélisol sont élevés. Lors de la construction de la section d'essai de Beaver Creek, les coûts engendrés pour la construction de la section d'essai de Geren Creek, les coûts engendrés pour la construction de la section d'essai de Creek, les coûts engendrés pour la construction de la section de contrôle (Reimchen, Dore, Fortier, & Walsh, 2009).

2.6.1.2 Méthodes augmentant l'extraction de chaleur

Les principales conceptions utilisant les méthodes augmentant l'extraction de chaleur sont les remblais à convection d'air, les conduits de ventilation, les thermosiphons, les drains thermiques, les pentes douces et le déneigement.

Puisque la méthode utilisée à la piste d'atterrissage de Puvirnituq est le remblai à convection, cette méthode sera traitée en détail dans la section suivante.

Les conduits de ventilation permettent d'extraire, par convection, la chaleur d'un remblai en saison hivernale. Ces conduits de ventilation peuvent être installés de façon transversale (Doré, 2011; Ma & Jin, 2009) ou de façon longitudinale avec des entrées et sorties d'air (Doré, 2011; M-Lepage et al., 2012). Afin de limiter l'apport de chaleur, ces conduits de ventilations doivent être fermés en été. Les résultats obtenus sur une section d'essais à Beaver Creek (Yukon) montrent l'efficacité des conduits de ventilation. Cependant, les coûts estimés pour la construction d'une section de 50 mètres avec conduits de ventilation sont de 8,2 fois (Reimchen et al., 2009). Cette contrainte limite leur utilisation à des zones où les risques de dégradation du pergélisol sont élevés.

Les thermosiphons utilisent plusieurs modes de transfert de chaleur afin d'extraire la chaleur contenue dans le sol en période hivernale, voir la Figure 26 (Doré, 2011; Forsstrom, Long, Zarling, & Knutsson, 2002). Les thermosiphons sont constitués de deux sections de tuyau, une section subhorizontale et une section verticale. Les deux sections de tuyaux sont bien étanches et contiennent un liquide libre de circuler entre ces deux sections. Ce liquide a la propriété de s'évaporer à une température inférieure au point de congélation (Sorensen, Smith, & Zarling, 2002). La chaleur présente dans le sol est transmise par conduction au liquide à l'intérieur du thermosiphon. Le liquide s'évapore et sa densité plus faible engendre son déplacement dans le tuyau subhorizontal en direction du tuyau vertical. La section verticale du thermosiphon est en contact avec l'air froid. Afin de maximiser l'échange de chaleur par convection, l'extrémité du thermosiphon est munie d'un radiateur (Forsstrom et al., 2002). Le liquide refroidi se condense alors et sa densité plus importante l'entraîne à nouveau dans la section subhorizontale du thermosiphon. Ce système fonctionne seulement lorsque la température est suffisamment froide à l'extérieur afin de permettre la condensation du liquide à l'intérieur du thermosiphon. En été, la condensation est impossible et le système ne fonctionne pas. Les thermosiphons ont un rayon d'influence qui est de l'ordre de 2 mètres. Plusieurs thermosiphons peuvent être utilisés en série afin d'augmenter la section couverte par cette mesure d'atténuation de la dégradation du pergélisol.



Figure 26- Fonctionnement d'un thermosiphon (Doré, 2011)

Puisque les thermosiphons ont un rayon d'influence limité, ils sont souvent utilisés lors de la construction de bâtiment. La section subhorizontale se trouve sous le bâtiment et la section verticale se trouve en bordure du bâtiment. Dans le cas des thermosiphons installés sous un remblai routier, la section subhorizontale se trouve sous la chaussée et la section verticale se trouve en bordure de la chaussée.

Le drain thermique (Figure 27) est une méthode d'extraction de chaleur qui a été développée à l'Université Laval. Un géocomposite à haute perméabilité, dont l'épaisseur est d'environ 25 mm, est installé dans le remblai. L'air entre par la base du géocomposite, se réchauffe progressivement dû au transfert de la chaleur du sol par conduction, ce qui provoque alors son ascension et son évacuation au sommet du remblai. Cette technique est présentement expérimentée sur deux sections d'essai, une section se trouve sur la piste d'atterrissage de Tasiujaq et une se trouve sur la route de Beaver Creek. Dans le cas de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, l'installation de drains thermiques sur une section de 50 mètres a engendré des coûts 1,6 fois supérieurs à ceux engendrés par un remblai standard (Ficheur, 2011). À Beaver Creek, les coûts estimés pour la construction d'une section de 50 mètres avec drain thermique sont de 5 à 10 fois supérieurs à un remblai normal selon le type de conception (Reimchen et al., 2009).



Figure 27- Fonctionnement du drain thermique

La technique de la pente douce (8 H : 1 V) a été testée à Tasiujaq (Ficheur, 2011). Cette pente correspond à la pente naturelle d'accumulation de la neige selon des relevés effectués par le Ministère des Transports. En d'autres termes, si la pente du remblai est moindre, la bordure du remblai se comblera jusqu'à ce que la pente soit de 6H : 1V. Par contre, si la pente du remblai a une pente de 6 H : 1 V, l'accumulation de neige sera limitée. L'effet isolant de la neige est donc diminué. Cette technique a montré d'excellents résultats lors de son expérimentation à l'aéroport de Tasiujaq. La faible épaisseur du remblai et la présence de vent dominant ont contribué au bon fonctionnement de cette technique. Dans le cas de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, cette technique a engendré des coûts 1,6 fois supérieurs à ceux engendrés par un remblai standard. Ces coûts découlent de la quantité de matériaux supplémentaires nécessaires pour la construction du remblai.

Le déneigement des bordures de remblai est également une technique qui permet l'augmentation de l'extraction de chaleur en période hivernale. Cette technique est simple et ne requiert aucun ajustement au niveau de la conception. Les accotements sont déneigés afin de limiter l'effet isolant de la neige.

2.6.2 Remblai à convection d'air (RCA)

Le remblai à convection d'air est une technique de protection du pergélisol qui a été développée en Alaska. Le remblai est composé de pierres de gros diamètre, ce qui lui procure une porosité importante. La dimension des pierres et l'étalement granulométrique peuvent varier selon la conception du remblai. Toutefois, la dimension des pierres se situe généralement entre 7 et 300 mm (Douglas J. Goering, 2002, 2003; Douglas J. Goering & Kumar, 1996; Jørgensen, Doré, Voyer, Chataigner, & Gosselin, 2008;

Saboundjian & Goering, 2003; Verreault & Doré, 2010; Yu, Lai, Zhang, Zhang, & Xiao, 2004).

La porosité d'un remblai convectif varie selon les spécifications du remblai, mais elle varie généralement entre 35% à 50% (Douglas J. Goering, 2002, 2003; Douglas J. Goering & Kumar, 1996; Jørgensen et al., 2008; Saboundjian & Goering, 2003; Yu et al., 2004). Cette porosité procure au remblai une importante perméabilité à l'air. En général, la perméabilité à l'air d'un matériau varie selon la dimension moyenne des particules, l'étalement granulométrique et l'angularité des pierres (Douglas J. Goering, 2003). Les remblais à convection ont également l'avantage d'avoir une densité plus faible d'environ 30%, ce que permet de réduire la contrainte appliquée sur le sol d'infrastructure (Douglas J. Goering, 2003).

La technique du remblai à convection vise à extraire la chaleur des remblais en période estivale. Son fonctionnement est schématisé à la Figure 28. Durant l'hiver, une stratification de densité instable se développe dans le remblai (Douglas J. Goering & Kumar, 1996). Ce gradient thermique engendre la formation de cellules de convection dans les pores d'un matériau granulaire grossier. L'air dans les pores de la partie supérieure du remblai refroidit et sa plus forte densité le fait descendre poussant vers le haut l'air plus chaud de la partie inférieure du remblai. Ce mouvement d'air augmente considérablement l'efficacité du transfert de chaleur de la partie inférieure du remblai et l'air durant l'hiver. La convection augmente le transfert de chaleur vers l'extérieur du remblai durant l'hiver et contribue donc à refroidir la partie inférieure du remblai et le sol d'infrastructure sous-jacent.

Par contre, en été, la stratification de densité est stable puisque l'air frais se situe à la base du remblai. Il n'y a donc pas de formation de cellule de convection. Conséquemment, le mode de transfert de chaleur prédominant est la conduction, qui transfère la chaleur de façon beaucoup moins efficace (Douglas J. Goering & Kumar, 1996). Cette méthode est intéressante puisqu'elle est simple et ne requiert pas d'entretien après sa construction.



Figure 28- Principes du remblai à convection d'air (RCA)

Il est bien connu qu'un fluide dans un matériau poreux subira une convection naturelle, si un nombre de Rayleigh critiques est dépassé (Nield & Bejan, 1992) cité par (Douglas J. Goering, 2002). Le nombre de Rayleigh est donné par :

[2-9]

$$Ra = \frac{C \Im g K H \Delta T}{v k}$$

où	Ra=	Nombre de Rayleigh
	C=	Capacité calorifique
		volumétrique
	ß=	Coefficient d'expansion
	g=	Accélération due à la gravité
	K=	Perméabilité intrinsèque du
		matériau
	H=	Épaisseur de la couche
	$\Delta T =$	Différence de température
		entre le sommet et la base de
		la couche
	v =	Viscosité cinétique
	k=	Conductivité thermique du
		matériau

Une étude de stabilité a démontré qu'une convection naturelle, dans une couche horizontale avec des limites imperméables de température constante, débutera lorsque le nombre de Rayleigh sera supérieur à $4\pi^2$, soit environ 40 (Douglas J. Goering, 2003). Dans un milieu poreux incliné, la convection naturelle commence théoriquement a un nombre de Rayleigh égal à $4\pi^2/(\cos \theta)$ où θ est l'angle du milieu poreux (Caltagirone & Bories, 1985). Par contre, une étude expérimentale a démontré que la convection commence à un nombre de Rayleigh inférieur à celui indiqué par la théorie (Kaneko, Mohtadi, & Aziz, 1974). De plus, la convection maximale est atteinte lorsque l'angle θ est de 10 degrés. L'étude a également démontré que lorsque l'angle augmente jusqu'à 20-30 degrés, la configuration du mouvement s'approche d'un mouvement unicellulaire.

De l'équation [2-9], il est possible d'isoler le gradient de température critique (ΔT_c) à partir duquel une convection naturelle débutera :

[2-10]

$$\Delta T_c = \frac{40vk}{C \&gKH}$$

Lorsque ΔT_c est excédé, l'air plus chaud des pores de la base du remblai commence à monter et l'air plus froid de la partie inférieure commence à descendre. C'est à ce moment que les cellules de convection se forment. Il est possible que certaines conditions rencontrées en milieu naturel diminuent le nombre de Rayleigh auquel la convection naturelle débutera. Ces conditions peuvent être, par exemple des limites perméables, des températures non uniformes horizontalement, etc. Les différents facteurs rencontrés sous des conditions de terrain pourraient produire un mouvement convectif à des nombres de Rayleigh de moitié et même du quart de la valeur précédemment mentionnée.

Par contre, la considération la plus importante à tenir compte dans la conception d'une méthode de mitigation de la dégradation de la fonte du pergélisol est la quantité de chaleur transférée par convection. Ce transfert de chaleur peut être déterminé à l'aide du nombre de Nusselt, qui est une mesure de l'augmentation du transfert de chaleur dû à la convection. Pour une couche poreuse horizontale, le nombre de Nusselt peut être défini comme :

[2-11]

$$Nu = \frac{q\Delta z}{k\Delta T}$$

où Nu= Nombre de Nusselt
q= Flux de chaleur à travers la
couche
 Δz = Épaisseur de la couche

En été, la chaleur est seulement transmise par conduction. Le nombre de Nusselt est alors égal à 1, soit la limite inférieure pour Nu. Pour un cas idéal, (Nield & Bejan, 1992) cité par (Douglas J. Goering, 2002) ont suggéré une corrélation linéaire entre le nombre de Rayleigh et le nombre de Nusselt lorsque Ra est supérieur à 40 :

$$Nu = \frac{Ra}{40}$$

Cette dernière équation permet d'estimer l'augmentation du transfert de chaleur lorsque la convection naturelle se produit dans le remblai.

Le remblai convectif peut être intégré de différente façon dans la conception d'infrastructure de transport. La Figure 29 montre plusieurs types de conception. La Figure 29 a) présente un remblai convectif complet sous une chaussée, la Figure 29 b) présente un remblai convectif sous la chaussée, à l'interface avec le sol naturel et également sur les accotements, la Figure 29 c) présente des remblais convectifs non couverts sur les accotements.



Figure 29- Différentes conceptions de remblai convectif a) remblai convectif complet sous une chaussée b) remblai convectif sous la chaussée, à l'interface avec le sol naturel et également sur les accotements c) remblais convectifs couverts sur les accotements d) remblais convectifs non couverts sur les accotements (modifié de (Doré, 2011)

Différentes simulations numériques ont été réalisées afin de déterminer l'efficacité des remblais à convection d'air. (Douglas J. Goering & Kumar, 1996) ont été les premiers à faire une simulation numérique sur la performance d'un remblai poreux. Ils ont entrepris cette simulation afin de connaître rapidement l'effet des propriétés des différents matériaux et géométries de remblai possibles. La convection naturelle dans le remblai poreux a été étudiée à l'aide d'une représentation numérique des équations bidimensionnelles d'énergie et de moment. L'étude avait pour but de déterminer la capacité de ce type de remblai de maintenir l'intégrité d'un pergélisol susceptible au dégel sur lequel serait construite une route ou une piste d'atterrissage. Les résultats de l'étude ont montré que la convection naturelle se produisant dans le remblai, pouvait

abaisser la température annuelle moyenne du sol d'infrastructure directement sous le remblai convectif de 5°C comparativement à un remblai de sable et gravier traditionnel.

Goering 2003 a également obtenu des résultats d'une simulation numérique à l'aide d'un modèle d'élément fini en deux dimensions capable de résoudre les équations de flux d'air dans les pores et de transport d'énergie. Il a déterminé que la vitesse moyenne de l'air dans les pores du remblai augmente lorsque la température de l'air diminue (Figure 30). Il a également obtenu une diminution de la température moyenne annuelle à la base du remblai de 3,9°C à 5,6°C, comparativement à un remblai standard de sable et gravier (remblai non convectif). Selon l'auteur, cette différence est supérieure à celle normalement associée au changement des conditions de surface lors de la construction d'un remblai.



Figure 30- Variation annuelle de la température de l'air et de la vitesse moyenne de l'air dans les pores du remblai convectif (Goering 2003)

Différents logiciels de la suite GeoStudio 2012 (SEEP/W, AIR/W et TEMP/W) de la compagnie GEO-SLOPE International Ltd ont été utilisés afin de simuler l'effet d'un remblai à convection d'air pour le refroidissement du pergélisol (GEO-SLOPE International Ltd, 2012). La géométrie du remblai ainsi que les propriétés mécaniques du sol d'infrastructure et du remblai convectif sont les mêmes que celles utilisées lors d'une simulation précédente ((D. J. Goering, 2000), similaire à (Douglas J. Goering, 2003)). Les résultats obtenus à l'aide de cette suite de logiciels faciles d'utilisation sont très semblables à ceux obtenus lors de la simulation de Goering 2000. La Figure 31 présente une comparaison des résultats obtenus par Goering et par la modélisation à l'aide des différents logiciels de GEO-SLOPE International Ltd pour le 1^{er} février et le 1^{er} août du second cycle. Les résultats des deux modélisations sont très semblables. Un refroidissement provenant de la convection passive dans les matériaux granulaires grossiers, ainsi qu'un refroidissement du sol d'infrastructure ont été observés.



Figure 31- Comparaison des résultats obtenus par Goering et par la modélisation à l'aide des différents logiciels de GEO-SLOPE International ltd. A) Pour le 1^{er} février du second cycle B) Pour le 1^{er} août du second cycle (GEO-SLOPE International Ltd, 2012)

Plusieurs remblais à convection d'air ont été construits afin de déterminer l'efficacité de cette méthode d'atténuation de la dégradation du pergélisol.

Un remblai convectif a été construit à l'aide de matériaux grossiers de granulométrie peu étalée (25 à 150 mm) sur une section d'essai à Fairbanks, Alaska (Saboundjian & Goering, 2003). Des séries de thermistances ont été installées à l'intérieur du remblai convectif ainsi que dans la section de référence adjacente. La section de référence a été construite à l'aide de matériaux granulaires standard. Les résultats ont montré que cette technique d'extraction de chaleur pouvait générer un effet de refroidissement passif. La température moyenne annuelle de la base du remblai convectif était inférieure de 4°C comparativement à la température moyenne annuelle du sommet du remblai convectif. La Figure 32 montre l'évolution des températures dans le sol d'infrastructure sous la section de référence et sous la section de remblai convectif. La température minimale atteinte du sol d'infrastructure sous la section de référence est de -0,3°C tandis qu'elle est de -9,4°C pour le sol d'infrastructure sous la section de remblai à convection. La température maximale à la base du remblai a également diminué de 4,4°C durant les cinq années de suivies. Les auteurs croient que le plafond du pergélisol va même remonter jusqu'à la base du remblai convectif, éliminant ainsi la fonte saisonnière du sol d'infrastructure sous la section de remblai convectif.



Figure 32- Comparaison des températures sous la section de référence et sous la section de remblai convectif, de septembre 1999 à novembre 2001 (Saboundjian & Goering, 2003)

Afin de mieux comprendre la dégradation du pergélisol sous une infrastructure de transport et l'efficacité des différentes méthodes d'atténuation de la fonte du pergélisol, 12 sections d'essai ont été construites sur la route de l'Alaska, près de Beaver Creek au Yukon. Ces sections expérimentent une ou plusieurs méthodes d'atténuation de la fonte du pergélisol. Ces méthodes sont les remblais à convection, les drains thermiques, le couvert végétal, la surface réfléchissante, le déneigement des accotements et un pare soleil/neige. Trois types de remblai à convection ont été testés, soit le remblai convectif sur accotement ouvert et le remblai convectif sur accotement fermé avec système de ventilation. La Figure 33 présente ces différentes conceptions de remblais convectifs construits à Beaver Creek.



Figure 33- Différentes conception de remblai à convection d'air construit sur la section expérimentale de la route de l'Alaska dans le secteur de Beaver Creek, Yukon (M-Lepage et al., 2012)

Afin d'évaluer l'efficacité des différentes techniques de mitigation de la fonte du pergélisol, une méthode utilisant les flux de chaleur à l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure a été utilisée (M-Lepage et al., 2012).Cette méthode consiste à calculer les indices d'induction (H_i) et d'extraction (H_x) de chaleur. Trois hypothèses importantes sont faites lors de ce calcul. D'abord, les auteurs émettent l'hypothèse que les deux premiers mètres de sol naturel sous le remblai sont homogènes et que la conduction est le seul moyen qui gouverne le transfert de chaleur dans le sol naturel. Finalement, l'hypothèse qu'il n'y a pas d'écoulement d'eau sous le remblai doit être émise afin que cette méthode soit valide.

La loi de Fourier est utilisée :

[2-13]

$$q = k_{sol} \frac{\delta T}{\delta z}$$

où

q= Flux de chaleur k_{sol} = Conductivité thermique du sol $\frac{\delta T}{\delta z}$ = Gradient de température La conductivité thermique du sol (k_{sol}) utilisée peut être soit $k_{non-gelé}$ ou $k_{gelé}$ dépendamment de son état. Lorsque la partie supérieure du sol commence à geler, $k_{gelé}$ est utilisée. De façon similaire, lorsque la partie inférieure du sol commence à dégeler, $k_{non-gelé}$ est utilisée.

Les indices d'induction (H_i) de chaleur sont calculés en additionnant les flux de chaleur positifs obtenus avec les gradients thermiques mesurés tous les 14 jours, voir l'équation [2-14]. Les indices d'extraction de chaleur (H_x) sont calculés en additionnant les flux de chaleur négatifs obtenus avec les gradients thermiques mesurés tous les 14 jours, voir l'équation [2-15].

[2-14]

$$H_{i} = k_{\text{non-gelé}} \times \frac{\delta T}{\delta z} \times \Delta t$$

où Hi= Indice d'induction $k_{non-gelé}$ = Conductivité thermique du sol non gelé Δt = Intervalle de temps

[2-15]

$$H_{x} = k_{gelé} \times -\frac{\delta T}{\delta z} \times \Delta t$$

où Hi= Indice d'extraction
$$k_{gelé} = Conductivité thermique du solgelé$$

Le bilan thermique annuel est obtenu en additionnant les indices d'induction (H_i) et d'extraction (H_x) de chaleur obtenus durant l'année. Si le bilan thermique est positif (H_x + H_i > 0), de la chaleur est induite dans le système. Par contre si le bilan thermique est négatif (H_x + H_i < 0), de la chaleur est extraite du système.

Cette méthode a donc été utilisée pour quantifier l'effet des 12 sections d'essai, dont les 3 sections à remblai convectif. Pour l'année 2010, ces trois sections ont eu des bilans thermiques en bordure de remblai inférieurs à celui de la section de contrôle. De plus, une section avait un bilan thermique négatif, c'est-à-dire que cette section a extrait plus de chaleur qu'elle n'en a induite. Pour ce qui est du centre de la chaussée, deux sections ont des bilans thermiques inférieurs à celui de la section de contrôle et ces bilans sont négatifs.

Un remblai expérimental a été construit dans une chambre à température variable de l'Université Laval (Jørgensen et al., 2008). Les résultats de laboratoire ont montré qu'il est possible d'augmenter l'efficacité du remblai à convection lors de conditions hivernales en ajoutant un système de ventilation au sommet et à la base du remblai. Ce système permet à l'air froid de pénétrer par la base du remblai tandis que l'air chaud est dissipé par le haut. L'expérimentation d'un réchauffement à montrer que la convection dans un remblai ouvert est très sensible au changement de température et que l'effet refroidissant est rapidement perdu lorsque la température augmente. Cette situation rend le remblai convectif ouvert plus vulnérable durant la saison estivale lorsque de l'air chaud est forcé dans le remblai par le côté et augmente la température de façon significative.

Différente sections d'essais d'une longueur 50 m ont été construites en bordure du remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, dont un remblai convectif fermé. Les résultats de cette étude ont montrés que le remblai à convection a eu un impact limité sur les conditions du pergélisol. La faible hauteur du remblai limitant les mécanismes de convection à de la convection libre dans un faible volume et le sous-dimensionnement du système de ventilation ont amoindri l'efficacité du système.

Des essais en laboratoire ont été réalisés afin d'observer l'effet d'un remblai composé de pierres grossières (diamètre moyen des pierres 22 cm) et de pierres fines (diamètre moyen des pierres 7 cm) (Yu et al., 2004). Le montage expérimental était composé de trois limites isolées, soit la base et les deux côtés du remblai. La surface était libre et soumise à un vent constant de 2,5 m/s (9 km/h). Ils ont observé que la température à la base du remblai composé de pierres fines est plus froide que la température à la base du remblai composé de pierres grossières. Les auteurs expliquent les résultats de la façon suivante. La convection d'air dans le remblai à pierres grossières est plus grande, tant pour des températures positives que négatives. Par contre, dans le remblai à pierres fines, la force du courant convectif est plus forte lors des températures négatives que lors de températures positives. L'effet combiné lors des périodes de températures positives et négatives procure au remblai à pierres fines un effet refroidissant plus grand que celui du remblai composé de pierres grossières.

2.7 Mouvement de pente et stabilité

Dans des cas d'instabilités de terrain où du pergélisol est présent, la plupart des problèmes se produisent lorsque le dégel survient (Johnston, 1981). Le cisaillement à travers un sol gelé a été remarqué dans certaines pentes, mais reste un phénomène relativement rare. La Figure 34 présente la classification des différents mouvements de masse en terrain pergélisolé.



Figure 34- Classification des mouvements de masse en terrain pergélisolé (Johnston, 1981)

Dans cette classification, le terme coulé fait référence à un mouvement de masse qui présente les caractéristiques d'un fluide visqueux (Andersland & Ladanyi, 2004). Le mouvement est réparti uniformément dans le matériau contrairement au glissement, où le mouvement consiste en une contrainte en cisaillement et un déplacement le long d'une ou de plusieurs surfaces. La masse en mouvement reste plus cohérente, il y a une apparence de mouvement de corps rigide. Le terme chutes est généralement utilisé pour décrire le mouvement d'une masse qui se détache d'une pente ou d'une falaise.

2.7.1 Types de mouvements de masse

Les mouvements de masse de types solifluction se produisent à de faibles profondeurs, soit aussi faibles que quelques centimètres, mais généralement entre 0,5 mètre et 2,0 mètres (Johnston, 1981). La solifluction se produit normalement en haute altitude et dans des régions nordiques, mais elle n'est pas strictement associé à la couche active d'un terrain pergélisolé, elle se retrouve également dans la toundra (Williams & Smith, 1991). La solifluction est un mouvement de masse causé par le fluage et la gélifluction (Harris, Kern-Luetschg, Smith, & Isaksen, 2008). Ces deux processus fonctionnent en tandem puisqu'ils résultent directement du soulèvement au gel et du tassement de consolidation. La contrainte en cisaillement mobilisé de ces sols en dégel est largement fonction de la pression interstitielle. Le soulèvement au gel se produit de façon perpendiculaire à la

pente, tandis que le tassement au dégel se produit de façon verticale (Washburn, 1967) cité par (McRoberts & Morgenstern, 1974b). La Figure 35 schématise le déplacement résultant des phénomènes de soulèvement au gel et de tassement au dégel. Ces phénomènes se répètent chaque année et peuvent engendrer des déplacements importants (Doré, 2011).



Figure 35- Déplacement résultant des phénomènes de soulèvement au gel et de tassement au dégel (Doré, 2011)

Les mouvements de type «skin flows» impliquent le détachement d'une mince couche de végétation et de sol. Cette catégorie de coulée est peu profonde par rapport à leur longueur (McRoberts & Morgenstern, 1974b). Les déplacements se produisent le long d'une surface plane inclinée (Johnston, 1981). Les «skin flows» se développent habituellement sur des pentes raides, mais peuvent également se produire sur des pentes plus faibles. Ce type de mouvement de masse est fréquent dans les sols riches en glace dont le couvert végétal a été altéré suite à un feu de forêt. Le dégel des sols riches en glace engendre une augmentation des pressions interstitielles, ce qui diminue la résistance au cisaillement du sol. Si la contrainte induite par la masse de sol est suffisamment élevée, le mouvement se produit.

Le terme coulé bimodales fait référence à un mouvement de masse qui a un profil biangulaire, ce qui indique que deux modes de mouvement de masse sont impliqués (McRoberts & Morgenstern, 1974b). Les mécanismes de mouvement ne sont pas les mêmes à l'escarpement et à la base. Une coulée bimodale a un escarpement abrupt et une base avec un angle faible. La Figure 36 présente la géométrie d'une coulée bimodale. Dans la plupart des coulées bimodales actives, le pergélisol présent dans l'escarpement est exposé à l'atmosphère et dégradé par ablation (Johnston, 1981). Dans certains cas, le sol n'est pas assez riche en glace pour permettre un processus d'ablation et une couche active se forme sur la paroi inclinée. Lorsque le dégel atteint une profondeur critique, l'escarpement rupture par développement d'un «skin flow». Dans la base de la coulée

bimodales, la résistance au cisaillement des matériaux est très faible due à la présence de fortes pressions interstitielles. La teneur en eau peut approcher de la limite de liquidité, ce qui augmente la mobilité de la base. Les coulées bimodales sont initiées par un ou plusieurs processus qui retirent le couvert de végétation et le sol dégelé, exposant le sol riche en glace. Une excavation dans un sol riche en glace est un exemple de processus qui peut engendrer des coulées bimodales. Lorsqu'une coulée bimodale est débutée, l'ablation peut amener une grande quantité de matériau vers la base.



Figure 36- La géométrie d'une coulée bimodale (Johnston, 1981)

Les mouvements de masse de types rétrogressif multiple ont une forme générale de coulée, mais maintiennent une partie de leur relief prérupture (Johnston, 1981). Même si le profile est biangulaire, leur forme suggère une série de ruptures rétrogressives provenant de l'escarpement.

Les mouvements de masse de types glissement peuvent être classés en glissement en blocs ou en glissement rétrogressif multiple (Johnston, 1981). Les glissements en blocs impliquent un large bloc qui se déplace vers le bas de la pente. Les glissements rétrogressifs multiples sont caractérisés par une série d'arcs de cercle, concaves vers le pied de talus qui remonte vers l'escarpement. Ces glissements se produisent à grande échelle, 45 à 60 mètres de hauteur, et sont associés à une surface de rupture par cisaillement dans le sol gelé. Par contre, la base du glissement serait située dans un sol non gelé (McRoberts & Morgenstern, 1974a).

Les mouvements de masse de types chutes se produisent lorsqu'un bloc se détache d'une falaise sous l'influence de la gravité (Johnston, 1981). Le déplacement se fait généralement par chute libre, rebond et roulement. Les chutes sont communes le long des rivières ou des lacs, où le dégel et l'érosion coupent la rive et des blocs de matériaux gelés chutent.

2.7.2 Modélisation d'un glissement à l'aide du logiciel GEO-SLOPE

Un glissement de terrain près de Lac Travaillant (Territoires du Nord-Ouest) a été étudié à l'été 2005 (Su, Wang, & Nichol, 2007). La région a été brûlée par un feu de forêt en 1998. D'après les informations disponibles à partir des photos aériennes, les observations de terrain et les photographies récentes, les auteurs ont déterminé que le glissement était plutôt récent (probablement un an ou deux). Les essais effectués sur le terrain et en laboratoire ont permis de caractériser le sol en place. La teneur en eau de la couche organique est de 110%. Dans la couche active, la teneur en eau augmente avec la profondeur, soit de 27% à 40%. Le pergélisol a quant à lui une teneur en eau très élevée qui atteint plus de 200%, soit une teneur en eau volumique entre 0,8 et 0,9. Il n'est pas rare de voir des teneurs en eau supérieurs à 150% (Andersland & Ladanyi, 2004). Le sol présent dans la région est composé de silt argileux. Des essais de résistance au cisaillement ont été réalisés à l'aide d'un scissomètre portable. Les résultats d'essais en chantier indiquent que la résistance au cisaillement non drainé de la couche active varie de 4,9 kPa à 11 kPa au pic, et de 1,6 à 4 kPa une fois remaniés. Il a été observé que la résistance au pic diminue avec la profondeur, ce qui était attendu avec l'augmentation de la teneur en eau.

Les résultats des essais de résistance au cisaillement ont été utilisés pour réaliser une étude de stabilité à l'aide du logiciel GEO-SLOPE. L'analyse comporte trois types de matériaux. Le premier matériau, le pergélisol, possède une résistance au cisaillement élevée. La couche active est quant à elle divisée en deux, soit une couche inférieure en dégel dont la résistance au cisaillement est faible, et une couche supérieure dont la résistance au cisaillement est plus élevée. La Figure 37 présente le résultat de l'analyse de stabilité à l'aide du logiciel GEO-SLOPE. Le résultat montre que la pente à la limite de l'équilibre a un facteur de sécurité de 1,004. Les auteurs concluent que le feu de forêt a engendré une dégradation du pergélisol, qui a augmenté la teneur en eau à la base de la couche active, réduisant du même coût sa résistance au cisaillement. Le mouvement de masse a donc débuté en condition non drainée, suivi de mouvement rétrogressif de l'escarpement.



Figure 37- Résultat de l'analyse de stabilité de la pente près du lac Travaillant à l'aide du logiciel GEO-SLOPE (Su et al., 2007)

3 Mise en contexte de la piste d'atterrissage de Puvirnituq et objectifs du projet de recherche

Dans le cadre de la Convention de la Baie-James et du Nord québécois, les gouvernements du Québec et du Canada ont conclu une entente afin de construire un réseau de 13 aéroports pour desservir les villages inuits (Tremblay & Doré, 1988). Ce projet, dont le budget était de 100 millions de dollars, s'est déroulé entre 1984 et 1992. La construction de l'aéroport de Puvirnituq s'est terminée en 1990.

3.1 Géomorphologie et caractéristiques de la piste d'atterrissage

La Figure 38 présente la planche synthèse de la piste d'atterrissage de Puvirnituq, effectuée par le Centre d'études nordiques, dans le cadre du projet d'investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik (L'Hérault, Allard, Barrette, Doré, & Sarrazin, 2012). Le type de dépôt influence grandement la distribution du pergélisol et permet, à une échelle locale, de déterminer les zones potentiellement riches en glace (Doré, 2011). Le Tableau 3 présente la légende de la planche synthèse. Les dépôts de surface rencontrés dans la région de Puvirnituq se divisent en cinq groupes, soit les sédiments lacustres, les sédiments marins, les sédiments glaciaires, les substrats rocheux et les remblais anthropiques. Le rapport final du projet peut être consulté afin d'obtenir des descriptions détaillés des dépôts de surface.



Figure 38- Planche synthèse de la piste d'atterrissage de Puvirnituq (L'Hérault et al., 2012)

Tableau 3- Légende de la planche synthèse de la piste d'atterrissage de Puvirnituq (L'Hérault et al., 2012)

Dépôts de surface		
Sédiment	s lacustres	
L	SÉDIMENTS LACUSTRES: Sédiments mis en place dans littoraux, prélittoraux et deltaïques; pouvant aussi inclure	un lac comprenant principalement des sables et graviers des sédiments remaniés à partir d'unités sous-jacentes.
Sédiment	s marins	
Mb	SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX: Sable, sil peu profonde lors de la phase plénimarine et lors de l'exe surface.	t sableux, sable graveleux et graviers; mis en place en eau ondation, présence occasionnelle de fentes de gel à la
Mb/Ma	SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR SÉD sable graveleux et graviers, d'une épaisseur supérieure a	IMENTS FINS D'EAU PROFONDE: Sable, silt sableux, à 2 m; reposent sur des sédiments fins d'origine marine.
Mb/R	SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX SUR ROC épaisseur supérieure à 2 m; reposent directement sur le	: Sable, silt sableux, sable graveleux et graviers, d'une roc.
Mm/Ma	SÉDIMENTS LITTORAUX ET PRÉLITTORAUX MINCES S silt sableux, sable graveleux et graviers de moins de 2 m et la présence d'une mince couche de matière organique marine.	SUR SÉDIMENTS FINS D'EAU PROFONDE: Sable, d'épaisseur; caractérisés par un mauvais drainage en surface. reposent sur des sédiments fins d'origine
Ma SÉDIMENTS FINS D'EAU PROFONDE: Sable silteux, silt et argile; mis en place principalement par décantation durant la phase d'inondation marine; présence éparse de graviers, de cailloux et de fragments de coquillages.		
Sédiments glaciaires TLL REMANIÉ: Dépôt hétérométrique non-trié composé principalement de sable et de silt avec un peu de graviers anguleux; diamicton dont la partie superficielle a été remaniée par les vagues et les courants lors de la phase plénimarine; repose directement sur la roche en place; présence d'ostioles en surface par endroit		
Substrat	roohouv	
Substrat rocheux R ROCHE EN PLACE: Affleurements rocheux et roc à mince couverture de sédiments meubles.		
Anthropic	que	
Rb	ANTHROPIQUE: Remblai.	
Hydrogra	phie	Infrastructures
\sim	Ruisseaux	Centre-piste
\sim	Plans d'eau	Chaînage
		Aéroport
	de l'infrastructure	Limite du pied de remblais
<u>Formes d</u>	e terrain	Identification des défectuosités
12	Sols structurés (ostioles, ostioles à bourrelets, sols striés sur les pentes, cercles de pierres, etc.)	Accumulation d'eau en bordure de piste
<u>Forages</u>		
•	Sondage	
•	Forages géotechniques instrumentés avec un câble à thermistances	Nesure d'enneigement
•	Forages géotechniques avec récupération	Borne de tassement
20	Courbe de niveau (1m)	

La piste d'atterrissage de Puvirnituq avait initialement une longueur de 1070 mètres, avant d'être agrandie, en 2009, à une longueur de 1644 mètres. La surface nivelée a une largeur de 90 mètres (piste 60 m et accotement 30m). La piste est orientée selon un axe nord-nord-ouest sud-sud-est, et a une élévation d'environ 16 mètres, dans sa portion sud, et 23 mètres du côté nord. Le remblai a une hauteur maximale de 8 mètres au centre de la vallée argileuse qu'il traverse.

La piste est presque entièrement construite sur des affleurements rocheux (Allard et al., 2007). Par contre, la piste traverse une vallée orientée nord-ouest sud-est, d'une largeur d'environ 120 mètres à l'ouest et 165 mètres à l'est. Avant la caractérisation géotechnique par le Centre d'études nordiques en 2008, les sédiments dans la vallée étaient décrits comme étant du sable mal drainé sur argile. Un écoulement d'eau a été observé dans la vallée tout l'été jusqu'à tard l'automne (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al., 2009). L'écoulement suit le sens de la pente, soit du nord-ouest vers le sud-est et le débit est assez rapide.

Des affaissements majeurs, d'une amplitude variant entre 200 et 300 mm, ont été observés de chaque côté de la piste au centre de la vallée (Beaulac, 2006). Un enneigement important dans la vallée a également été observé. Plusieurs facteurs peuvent expliquer les tassements observés. Le fluage du pergélisol tiède sous le poids du remblai, ainsi que la dégradation du pergélisol causé par l'accumulation de la neige sur le talus du remblai et par un écoulement d'eau important sous le remblai sont les facteurs qui semblent contribuer au problème observé.

3.2 Forages et essais géotechniques

Dans le cadre d'un mandat octroyé par le Ministère des Transports du Québec (MTQ), le Centre d'études nordiques (CEN) a procédé à une étude visant à accroître les connaissances sur l'étendue et les propriétés exactes des sols sensibles au dégel, sous certaines pistes jugées à risque. Durant l'été et l'automne 2008, des investigations géotechniques ont eu lieu en bordure des infrastructures aéroportuaires et infrastructures connexes, dans cinq communautés du Nunavik, dont Puvirnituq.

Techmat Inc. a été mandaté afin de fournir l'équipement ainsi que le personnel nécessaire pour effectuer les forages géotechniques. Une foreuse rotative à diamants de marque Acker, modèle Ace, a été utilisée. L'équipement de forage permettait de réaliser des forages jusqu'à une profondeur maximale de 15 mètres. Un système de circulation des boues de forages, doté d'une unité de refroidissement, permettait de refroidir le fluide de forage jusqu'à des températures inférieures à -15 °C. Le système avait été mis au point et testé lors de l'échantillonnage d'une moraine gelée constituant le noyau d'un barrage à la Baie James (Bouchard, Ladet, & Langlois, 2001). Le fluide est composé d'eau, d'un antigel (qui abaissent le point de fusion du fluide) et d'un agent thixotropique (qui augmente la densité et permet le transport des débris). La proportion eau/glycol dans le fluide de forage était d'environ de 1 :1.

Un échantillonnage en continu était réalisé à l'aide de cuillères fendues jusqu'à l'atteinte du front de dégel. Un carottage du pergélisol à l'aide d'un carottier de calibre HQ était ensuite réalisé. Le fluide de forage réfrigéré (entre -7 °C et -17 °C) a permis de réduire la perturbation thermique des échantillons. Lorsque le socle rocheux était atteint, celui-ci était confirmé en le carottant sur une profondeur de plus de 1 mètre.

La Figure 39 présente la localisation des cinq forages instrumentés et non instrumentés le long de la piste d'atterrissage de Puvirnituq (PUV_F1 à PUV_F5). L'étude géotechnique visait à caractériser les dépôts meubles composant deux vallées transversales à la piste d'atterrissage. Au moment de la réalisation des forages géotechniques, la piste traversait une des deux vallées et des signes de dégradation avaient été observés à cet endroit (Beaulac, 2006). Les forages PUV_F1, PUV_F2 et PUV_F5 ont permis de caractériser les sédiments de cette vallée. La seconde vallée est traversée par la piste depuis son agrandissement en 2009. Les sédiments composant cette deuxième vallée ont été étudiés à l'aide des forages PUV_F3 et PUV_F4 en vue d'un allongement potentiel de la piste dans ce secteur. Toutefois, ces investigations ne font pas l'objet de ce projet de recherche.



Figure 39- Localisation des forages le long de la piste d'atterrissage de Puvirnituq (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al., 2009)

Trois de ces forages ont été réalisés à l'endroit où les remblais convectifs ont été construits, soit les forages PUV_F1, PUV_F2 et PUV_F5. Les Tableau 4, Tableau 5 et Tableau 6 présentent la stratigraphie de ces différents forages ainsi que les commentaires du professionnel de recherche qui a effectué les forages, Emmanuel L'Hérault. Ces commentaires proviennent du rapport *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 présentés au Ministère des Transports du Québec par le Centre d'études nordiques (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al., 2009).*

Profondeur	Stratigraphie
0,00 à 0,12 m	Gravier en surface (remblai)
0,12 à 0,20 m	Couche de M.O.
0,20 à 0,60 m	Couche de cailloux pluricentimétriques avec
	matrice de sable moyen à grossier et
	trace de silt.
0,60 à 1,60 m	Sable moyen à fin beige avec un peu de silt et
	gravier grossier.
1,60 à 3,20 m	Sable moyen silteux grisâtre avec quelques
	fragments de coquillages. On retrouve
	beaucoup de morceaux de coquillages au
	sommet de cette unité. À la base de cette
	unité, le matériel a une consistance très molle
	et est majoritairement composé de
	sable fin silteux avec quelques cailloux
	centimétriques.
3,20 à 8,28 m	Silt et argile grisâtre avec quelques lits de
	coquilles. Consistance molle. Quelques
	graviers à la base de cette unité.
8,28 à 12,92 m	Diamicton grisâtre composé de sable silteux
	avec un peu de gravier anguleux
	(probablement du till). Présence de blocs
	pluridécimétriques.
12,92 à 15,00 m	Socle rocheux

Tableau 4- Stratigraphie du sondage PUV_F1 (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al., 2009)

Commentaires : «Dans ce forage, l'échantillonnage a été réalisé exclusivement à la cuillière fendue jusqu'à une profondeur de 8,28 m. Il a été impossible d'identifier la position du front de dégel, ainsi que la section du sol pergélisolé. De plus, aucune évidence de glace en excès n'a été notée. L'unité de silt et d'argile, sur l'ensemble de son épaisseur, c'est-à-dire sur plus de 5 m, présente une consistance molle. En effet, les indices n obtenus lors de l'échantillonnage de cette unité ont tous été inférieurs à 10 coups/300 mm, et ont même atteint des valeurs aussi basses que 2 coups/300 mm. Les teneurs en eau mesurées dans cette

unité à différentes profondeurs sont toutes inférieures à 34 %. En ce qui concerne l'unité sous-jacente, qui consiste en un diamicton grisâtre hétérométrique, les teneurs en eau mesurées sont nettement plus faibles et ne dépassent pas les 10 %. Cette unité ne contient pas de glace en excès.»

Profondeur	Stratigraphie
0,00 à 0,10 m	Couverture de matière organique avec gravier
	0-3/4 en surface.
0,10 à 0,80 m	Sable moyen à fin brunâtre avec un peu de
	gravier et de silt.
0,80 à 1,98 m	Sable silteux grisâtre avec trace de gravier et de
	fragments de coquillage. Très forte
	concentration de fragments de coquillage dans
	la section supérieure de cette unité.
1,98 à 9,50 m	Silt et argile grisâtre avec quelques fragments
	de coquillages. Consistance molle. La
	position du front de dégel a été estimée à 6 m.
	Sous le front de dégel, quelques
	cristaux et lentilles de glace millimétriques
	épars ont été observés.
9,50 à 11,24 m	Sable moyen à grossier grisâtre avec un peu de
	silt et trace de gravier. Présence de
	poches de sable fin silteux avec quelques
	fragments de coquillages. Pas de glace
	apparente.
11,24 à 15,60 m	Diamicton grisâtre composé de sable moyen à
	fin silteux avec un peu de gravier
	hétérométrique anguleux (probablement du
	till).
	Le socle rocheux n'a pas été atteint.

Tableau 5- Stratigraphie du sondage PUV_F2 (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al., 2009)

Commentaires : «Limité par une longueur maximale de casing de 15 m, ce forage a atteint une profondeur maximale de 15,6 m et n'a pas atteint le roc. La stratigraphie rencontrée à ce forage est similaire à celle au puit PUV_F1. Tel qu'observé lors du forage PUV_F1, le dépôt de silt et d'argile présente des indices n très faibles généralement inférieurs à 10 coups/300 mm et qui peuvent atteindre des valeurs aussi basses que 2 coups/300 mm. Entre 3 et 3,6 m de profondeur, le dépôt de silt et d'argile grisâtre s'est liquéfié lors de son prélèvement, le même phénomène a été observé à une profondeur similaire au puit PUV_F1. À une profondeur supérieure à 6 mètres, des petites lentilles de glace millimétriques ont été observées sur environ 1,8 m d'épaisseur. Ces petites lentilles de glace se trouvent dans un sol au comportement similaire à celui d'un sol dégelé. Ce comportement peut s'expliquer par une salinité importante du dépôt ou par un dégel provoqué par les opérations de forage. Les teneurs en eau mesurées dans cette unité sont légèrement plus élevées que celles obtenues au puit PUV_F1, mais ne dépassent pas les 38 %. Le forage PUV_F2 s'est terminé dans un diamicton grisâtre assez dense qui correspond probablement à du till. Aucune lentille de glace ou glace interstitielle n'a été observée dans ce dépôt et les teneurs en eau mesurées oscillent entre 7 et 18 %.»

Profondeur	Stratigraphie
0,00 à 0,30 m	Couche matière organique
0,30 à 1,33 m	Sable moyen à grossier avec gravier grisâtre et
	trace de silt. Présence de nombreux
	cailloux (5-10 cm de diamètre) entre 0,60 et
	0,90 m. Nappe d'eau à environ 54 cm.
1,33 à 5,61 m	Silt et argile avec trace de sable fin, de
	coquilles et de gravier fin. Matériel qui se
	liquéfie après manipulation. Le sol a une
	structure en polyèdre avec des espaces
	subhorizontaux plurimillimétriques à
	pluricentimétriques possiblement occupés par
	des lentilles de glace qui ont fondu.
5,61 à 7,42 m	Socle rocheux

Tableau 6- Stratigraphie du sondage PUV_F5 (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al., 2009)

Commentaires : «À l'intérieur de ce forage, la position du front de dégel n'a pu être identifiée. Les échantillons extraits se comportaient tous comme un sol dégelé très sensible à la moindre manipulation. La structure du sol semble démontrer la présence d'anciennes lentilles de glace qui ont fondu. Il reste à déterminer si la fonte de celles-ci découle des opérations de forages, ou d'une dégradation progressive du pergélisol en bordure de piste sous de très faibles contraintes, limitant ainsi sa consolidation.»

3.2.1 Essais laboratoire

Des essais de laboratoire ont été réalisés dans le cadre de la caractérisation géotechnique menée par le Centre d'études nordiques. L'Annexe A présente les résultats des teneurs en eau, des teneurs en matières organiques, des essais granulométriques ainsi que des limites de consistance. Puisqu'aucun échantillon gelé n'a pu être prélevé à Puvirnituq, aucun essai sur sol gelé n'a été réalisé.

3.2.2 MASW et essais au scissomètre

La firme *Études et Investigations GÉOWAVE Inc.* a été mandatée afin de réaliser des relevés MASW (Modal Analysis of Surface Waves) sur la piste d'atterrissage de Puvirnituq. Ces relevés ont été réalisés les 28 et 29 septembre 2009, soit à une période

correspondant au dégel maximal. Le but des relevés était de déterminer la profondeur de la zone dégelée.

Les relevés MASW permettent de déterminer, à partir de la surface, des profils de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s) (Karray, Ethier, & Lefebvre, 2009). La valeur de V_s est directement reliée à la rigidité du matériau (module de cisaillement dans le domaine élastique $G_{max}=\rho V_s^2$), et dépend essentiellement de la contrainte effective et de la compacité. Les sols gelés ont des modules élevés et le contact du pergélisol avec une zone non gelée offre donc un contraste de rigidité facilement détectable par une caractérisation en termes de V_s .

Des essais à l'aide d'un scissomètre de chantier ont permis de déterminer la résistance au cisaillement du sol silt argileux de Puvirnituq. Un couple de torsion est appliqué à un moulinet de dimensions définies qui a été préalablement enfoncé dans le sol à l'aide d'un train de tiges. La résistance au cisaillement non drainé est déterminée à l'aide du couple de torsion maximal mesuré au sommet du train de tiges.

La Figure 40 présente les résultats du MASW et des essais au scissomètre de chantier effectués du côté est de la piste d'atterrissage. Les résultats du MASW permettent d'observer une remontée du plafond du pergélisol sous le remblai constituant la piste d'atterrissage. Par contre, il est possible de remarquer une dégradation en bordure du remblai. À cet endroit, le sol est dégelé jusqu'à une profondeur maximale de 10 mètres, mais le bulbe de dégel a une profondeur moyenne de 8 mètres. Le plafond du pergélisol remonte en s'éloignant du remblai. À l'extrémité est du relevé MASW, le plafond du pergélisol se situe à environ 2 mètres de profondeur. Les essais au scissomètre de chantier ont permis d'obtenir des résistances au cisaillement variant entre 50,9 kPa et 89,8 kPa. Ces valeurs sont relativement élevées. Des refus à l'enfoncement du scissomètre ont également été obtenus dans la couche de pergélisol.


Figure 40- Résultat du MASW et des essais au scissomètre (modifié de (Verreault & Doré, 2010))

3.2.3 Essai au pénétromètre dynamique (DCP)

Des essais au pénétromètre dynamique ont été réalisés du côté est de la piste d'atterrissage (Verreault & Doré, 2010). La Figure 41 présente le profil typique d'un relevé DCP avec pergélisol peu profond à Puvirnituq. Ce profil permet de déterminer la profondeur de la couche active ainsi que l'indice de pénétration dynamique moyen de la couche active. Il est possible de remarquer la présence de deux couches dont les indices de pénétration sont plus élevés, soit une près de la surface du sol et une à la base de la couche active. Ces résultats s'expliquent probablement par la densité du sol combinée à une forte teneur en eau. Le sol à la base de la couche active correspond vraisemblablement à la couche de sol en dégel, dont la teneur en eau est plus élevée ce qui diminue la résistance au cisaillement. L'annexe B présente la localisation des différents essais ainsi que les résultats obtenus.



Figure 41- Profil typique d'un relevé DCP avec pergélisol peu profond à Puvirnituq (Verreault & Doré, 2010)

3.3 Description des travaux effectués à Puvirnituq

En 2009, la piste de Puvirnituq a été allongée pour permettre notamment l'atterrissage d'un Boeing 737 de la compagnie Air Inuit. Suite aux différentes observations et travaux de terrain, une stratégie de protection a été développée pour la portion existante (Allard, Doré, L'Hérault, Verreault et al., 2009), et a également été appliquée en marge des travaux d'agrandissement. Cette stratégie comporte les objectifs suivants:

- 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.
- Stabiliser ou restaurer le régime thermique du pergélisol à l'aide d'une technique d'ingénierie de protection.
- Assurer la stabilité mécanique du remblai à l'aide d'une berme placée au pied du talus.

Afin de répondre à ces objectifs, un remblai convectif avec ventilation a été construit de chacun des côtés de la piste d'atterrissage. De plus, le ruisseau s'écoulant sous le remblai dans la vallée argileuse a été dévié vers un lac à proximité de la piste.

3.3.1 Construction d'un remblai convectif avec ventilation

Le système de protection proposé pour le remblai de Puvirnituq est un remblai à convection traditionnel avec l'ajout d'un système de ventilation. Il a été développé par

une équipe de l'Université Laval en collaboration avec le Ministère des Transports du Québec dans le cadre de projets expérimentaux et de simulations numériques. L'ajout d'un système de ventilation permettant de transformer le mouvement convectif normalement en cellules fermées, en un mouvement convectif ouvert (avec apport d'air de l'extérieur), fait partie des améliorations apportées au système par les chercheurs de l'Université Laval. La Figure 42 présente la conception du système de protection mis en place en bordure de la piste de Puvirnituq. Le remblai convectif a été conçu de façon à maximiser la convection d'air dans le remblai en hiver et d'ainsi extraire le maximum de chaleur. L'objectif est de stabiliser ou de restaurer le régime thermique. De plus, la stabilité mécanique du remblai a été assurée du côté est par l'ajout d'une berme. La berme a été construite à l'aide des mêmes matériaux granulaires que le remblai à convection, soit des pierres de dimension 150 -300 mm. Les travaux ont eu lieu à l'été 2009.



Figure 42- Conception du système de protection mis en place en bordure de la piste de Puvirnituq (Verreault & Doré, 2010)

3.3.2 Déviation du ruisseau

Les travaux d'agrandissement de la piste de Puvirnituq comprenaient également la déviation du ruisseau qui coulait sous le remblai dans le secteur de la vallée argileuse. La Figure 43 présente le tracé initial ainsi que la déviation effectuée lors des travaux. La ligne rouge pointillé indique le secteur où l'on retrouve du ruissellement sous le remblai de la piste. Afin de permettre la déviation, 826 m³ de roc présent au sud-ouest a été dynamité pour créer une tranchée qui permet de rediriger l'eau vers un lac à proximité. La tranchée dans le roc a une largeur de 2 m et une hauteur de 1 à 4 m. Un canal de déviation a également été creusé dans la vallée afin d'éloigner l'eau du pied du remblai.

Les travaux ont eu lieu à la fin de l'été 2010, soit un an après la construction du remblai convectif.



Figure 43- Tracé initial du ruissellement et déviation suite aux travaux

3.4 Instrumentation

Afin de suivre le comportement thermique du remblai, des thermistances ont été installées dans le remblai convectif ainsi que dans le sol naturel. La Figure 44 présente la position des thermistances installées du côté ouest (amont) et du côté est (aval). Du côté ouest, deux séries de thermistances ont été installées à l'intérieur du remblai convectif. Une troisième série a été installée dans le sol, sous le remblai, jusqu'à une profondeur de 6,5 mètres. Du côté est, trois séries de thermistances ont été installées a été placé horizontalement, à l'interface sol naturel/remblai. De plus, trois séries ont été installées dans le sol naturel : la première, la plus près du remblai, à une profondeur de 15 mètres; les deux autres séries (F et G) ont été installées à deux mètres de profondeur. Toutes ces thermistances sont reliées à deux Datataker de type CR1000 de la compagnie *Campbell Scientific*. Les deux CR1000 sont installés dans des boîtiers de part et d'autre de la piste d'atterrissage.

Afin de suivre le comportement mécanique du remblai, un inclinomètre automatisé de marque « Measurand Inc. » a été installé au pied du remblai, à l'endroit où des tassements importants avaient été observés depuis quelques années. L'inclinomètre est composé de 32 segments de 500 mm chacun, pour une longueur totale de 16,0 m. Il atteint une profondeur de 14,0 m, et ses 2,0 m supérieurs sont installés dans le remblai convectif. L'inclinomètre mesure les mouvements angulaires de chacun des joints (aux 500 mm) à l'aide de trois accéléromètres de précision. La précision à chacun des segments est de

±1,5 mm. Les données sont enregistrées à l'aide d'un CR1000 de la compagnie Campbell Scientific à un intervalle de 30 minutes.



Figure 44- Position de l'instrumentation installée à Puvirnituq

3.5 Objectifs du projet de recherche

Le projet de recherche entrepris suite aux travaux de stabilisation vise à faire le suivi de la performance des systèmes d'extraction de chaleur, pour en raffiner la conception et pour valider leur efficacité, notamment lorsque la hauteur d'un remblai est importante, comme c'est le cas pour le remblai de Puvirnituq. Il vise également à documenter les caractéristiques mécaniques du sol en bordure du remblai, pour raffiner les outils d'évaluation de la stabilité dans le contexte d'un pergélisol en voie de dégradation. Le projet porte donc sur l'analyse des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq. Ce suivi devrait permettre d'évaluer si les solutions appliquées, soit le détournement du ruisseau, la mise en place d'un remblai convectif, et la mise en place d'un contrepoids, étaient appropriées dans les conditions qui prévalaient sur le site.

L'urgence de procéder à ces travaux n'a pas permis de finaliser le développement de méthodes de dimensionnement des systèmes de protection thermique entrepris dans le cadre d'autres projets de recherche. Le système choisi n'a donc pu être optimisé. Par ailleurs, de nombreuses questions relatives aux mécanismes de rupture d'un remblai reposant sur un pergélisol en voie de dégradation, et à l'applicabilité des méthodes d'analyse de la stabilité dans ce contexte, restent encore à documenter.

4 Visites de terrain

Deux visites de terrain ont eu lieu lors du projet de suivi du comportement thermique et mécanique de la piste d'atterrissage de Puvirnituq. Ces visites avaient pour but d'inspecter de façon visuelle l'état de la piste. Ainsi, les signes de dégradation et leurs évolution était relevés. La première visite a été effectuée les 6-7 juillet 2011 et la deuxième visite a été effectuée les 12-13 septembre 2012. L'état de la piste et l'évolution des dégradations seront discutés en comparant des photos prises lors des deux visites.

4.1 Visite effectué le 6-7 juillet 2011

Lors de la première visite, les données ont été téléchargées à partir des différentes stations (côté est et côté ouest). Une inspection générale des installations a également été effectuée afin d'en déterminer leur état.

4.1.1 Côté Est (aval)

La Figure 45 présente le téléchargement des données enregistrées par les CR1000 installé dans le boitier d'acquisition du côté est de la piste d'atterrissage.



Figure 45- Téléchargement de données enregistrées par les CR1000 (côté est)

La Figure 46 présente une vue d'ensemble du remblai convectif du côté est (aval). Cette section est généralement en très bon état. Quelques fissures ont été observées à l'extrémité de la berme. Une pente 2H:1V a été construite en pied de remblai. Il n'est donc pas surprenant d'observer une accumulation de neige et d'eau en pied de talus. Cette accumulation à contribuer à la dégradation du pergélisol à cet endroit. La dégradation du pergélisol a engendré des tassements qui ont causé ces fissures

longitudinales. Ces fissures étaient anticipées et n'affectent en rien la stabilité du remblai ni le fonctionnement du remblai à convection étant donné qu'elles se retrouvent à environ 18 m du pied du remblai.



Figure 46- Installation côté est (aval)

La Figure 47 expose la présence d'eau au pied de la berme du côté est. L'eau se trouve principalement dans la section sud de la berme, mais sa présence est visible tout au long de la berme à moindre importance. L'eau semble provenir d'un problème de drainage localisé.



Figure 47- Présence d'eau au pied de la berme (côté est)

Les matériaux granulaires à l'extrémité est de la berme exposent des fissures longitudinales (Figure 48). La largeur de ces fissures varie de quelques millimètres à 2-3 centimètres. Ces fissures sont visibles sur toute la longueur de la berme et sont le résultat du même phénomène décrit précédemment. Aucune fissure n'a été observée du côté ouest.



Figure 48- Fissuration des matériaux granulaires à l'extrémité est de la berme (côté est)

4.1.2 Côté Ouest (amont)

La Figure 49 présente une vue d'ensemble du remblai convectif du côté ouest (amont). Cette section est également en bonne condition. Elle présente cependant un léger déplacement au pied du remblai. Les limites MG-20/remblai convectif sont également moins bien définies que du côté est. Il serait intéressant de comparer ces photos à des photos prises immédiatement suite à la construction.



Figure 49-Installation côté ouest (amont)

La Figure 50 présente le canal de déviation du ruisseau en amont (côté ouest). Le canal de déviation présentait des traces d'eau sans toutefois avoir de ruissellement. Le canal de déviation (non visible sur la photo) creusé dans les sédiments longeant le remblai présentait également des traces d'eau, sans ruissellement.



Figure 50- Déviation du ruisseau (côté ouest)

La Figure 51 montre la présence d'eau au pied du remblai convectif du côté ouest (amont), à l'extrémité nord. Ce petit étang se trouve à une distance d'environ un mètre du remblai. Des traces d'eau sont cependant visibles jusqu'au pied du remblai. La Figure 52 montre la présence importante d'eau au pied du remblai de la berme (côté ouest) avant les travaux de construction. Ces deux figures permettent de remarquer que le canal de déviation longeant le remblai a bien fonctionné.



Figure 51-Présence d'eau au pied de la berme (côté ouest)



Figure 52- Présence importante d'eau au pied de la berme (côté ouest) avant les travaux de construction

Au niveau du matériel installé, un déplacement vertical de la cheminée de ventilation par rapport à la tige métallique de support a été observé pour deux conduites, du côté ouest de la piste d'atterrissage (Figure 53 A). Ce déplacement n'a pas occasionné de bris important du matériel et ne semble pas diminuer la circulation d'air. Seul un couvert de ventilation est brisé, côté ouest, extrémité nord (Figure 53 B). La partie manquante de la pièce n'a pas été retrouvée.

Le soulèvement dû au gel est la cause la plus vraisemblable du déplacement des tuyaux par rapport aux tiges de soutien. Il est également possible qu'une partie de ce déplacement soit dû au tassement des matériaux granulaires sous le système de ventilation. Il est difficile de déterminer la part de chacun de ces processus. Un dernier point important à mentionner est que les tassements peuvent affecter autant les tiges de soutien que les tuyaux de ventilation. La solution à ce problème est d'installer une rallonge ajustable sur le tuyau de la cheminée de ventilation.



Figure 53- A) Déplacement de la ventilation par rapport à la tige de métal (côté ouest) B) Couvert de ventilation brisé (côté ouest)

4.2 Visite effectuée le 12-13 septembre 2012

Une visite de la piste d'atterrissage de Puvirnituq a été effectuée les 12 et 13 septembre 2012. Lors de cette visite, une inspection générale des installations a été effectuée afin d'en déterminer l'état général.

4.2.1 Côté Est (aval)

Un écoulement d'eau a été observé à l'extrémité sud, à la limite entre le MG-20 et le remblai convectif, voir la Figure 54. L'eau s'écoule d'abord en bordure du remblai et

s'écoule ensuite au centre de la vallée en s'éloignant de la piste (direction est). La flèche rouge indique le sens de l'écoulement. Cette eau provient vraisemblablement des précipitations qui ont eu lieu dans les heures précédant la visite. Toute l'eau récoltée par le remblai à convection doit suivre la pente, jusqu'à l'extrémité est où des matériaux granulaires compactés recouvrent les systèmes de ventilation. L'eau s'écoule alors vers l'extrémité sud pour finalement longer le remblai et retourner au centre de la vallée.



Figure 54- Écoulement d'eau à l'extrémité sud du remblai, à la limite entre le MG-20 et le remblai convectif (côté est)

Le glissement du MG-20 adjacent à la berme convective a exposé le système de ventilation. La Figure 55 montre l'exposition du demi-ponceau du système de ventilation à deux endroits, soit à la base d'un tuyau de ventilation ainsi qu'entre deux tuyaux de ventilation.



Figure 55- Exposition du demi-ponceau du système de ventilation à deux endroits suite au glissement du MG-20 (côté est)

Des fissures longitudinales du MG-20 ont été observées à l'extrémité est de la berme, du côté est de la piste d'atterrissage. Ces fissures sont observées sur la majorité du couvert granulaire recouvrant le système de ventilation.



Figure 56- Fissuration des matériaux granulaires à l'extrémité est de la berme (côté est)

Une couche de matériaux granulaire recouvre de façon générale le remblai convectif, voir la zone orange pâle sur la Figure 57 A). Ces matériaux granulaires ne semblent pas

affecter la porosité de façon significative. Par contre, une zone présente une quantité significative de matériaux granulaires sur le remblai, voir la zone orange foncé sur la Figure 57 B). La porosité de cette zone en est réduite et la convection d'air peut en être affectée.



Figure 57- A) Présence de matériaux granulaires sur le remblai convectif (côté est) B) Zone présentant une quantité significative de matériaux granulaires sur le remblai (côté est)

Le système de ventilation situé en bordure de la piste d'atterrissage est en très bonne condition, Figure 58. Aucun mouvement des tuyaux de ventilation par rapport aux tiges de support n'a été observé.



Figure 58- Le système de ventilation situé en bordure de la piste d'atterrissage (côté est)

Un déplacement vertical des tuyaux de ventilation par rapport aux tiges de support a été observé sur tous les tuyaux adjacents à la berme convective à des niveaux différents, voir la Figure 59. Deux couvercles protecteurs ont été arrachés lors de ces déplacements.



Figure 59- État des tuyaux de ventilation adjacent à la berme convective (côté est)

4.2.2 Côté Ouest (amont)

Une résurgence d'eau a été observée en bordure du MG-20, voir la Figure 60. Cette eau sort du sol et rejoint l'eau qui s'écoule dans le canal de déviation. Sur la figure, le sens de l'écoulement est indiqué par les flèches rouges. La provenance de cette eau est probablement la même que celle du côté est, soit de l'eau de précipitation. Par contre, de ce côté, l'eau ne peut s'écouler par les extrémités et s'écoule probablement sous terre au point le plus bas du remblai.



Figure 60- Résurgence d'eau en bordure du MG-20 (côté ouest)

Un déplacement vertical important du tuyau de ventilation par rapport à la tige de soutien a été observé près de la résurgence décrite précédemment. Le déplacement relatif est de l'ordre de 30 centimètres, voir la Figure 61. Le couvercle protecteur a été arraché par ce déplacement.



Figure 61- Déplacement important du tuyau de ventilation par rapport à la tige de soutien (côté ouest)

Un canal d'écoulement s'est formé en bordure de la piste d'atterrissage, à l'extrémité sud du remblai. Ce canal de ruissellement s'est creusé en repoussant les matériaux granulaires vers le bas du remblai, voir la Figure 62 A). L'érosion a exposé le demi-ponceau du système de ventilation de la partie supérieure du remblai, voir la Figure 62 B).



Figure 62- A) Canal de ruissellement formé par l'érosion des matériaux granulaires (côté ouest) B) Exposition du demi-ponceau du système de ventilation supérieur (côté ouest)

Le système de ventilation se situant en bordure de la piste d'atterrissage est en très bonne condition, Figure 63.



Figure 63- Système de ventilation situé en bordure de piste (côté ouest)

Les tuyaux du système de ventilation situé à la base du remblai convectif ont tous subi des déplacements, par rapport aux tiges de support, à des degrés différents, Figure 64.



Figure 64- Déplacement des tuyaux de ventilation par rapport aux tiges de ventilation à des degrés différents (côté ouest)

Un écoulement d'eau a été observé dans le canal de déviation du côté ouest de la piste d'atterrissage, voir la Figure 65. Sur la figure, le sens de l'écoulement est indiqué par une flèche bleue.



Figure 65- Écoulement d'eau dans le canal de déviation (côté ouest)

Une accumulation d'eau a été observée en bordure du remblai convectif, Figure 66. Cette eau se situe entre le remblai convectif et le canal de déviation. L'eau est stagnante et ne semble pas affecter la stabilité du remblai de façon significative.



Figure 66- Accumulation d'eau en bordure du remblai convectif (côté ouest)

4.3 Comparaison de l'état des installations entre les visites de juillet 2011 et de septembre 2012

Les photos prises lors des visites de juillet 2011 et de septembre 2012 ont été comparées entre elles afin d'évaluer l'évolution des dégradations dans le temps. Sauf quelques exceptions, ces photos ont été prises en respectant un angle de vue similaire, facilitant ainsi la comparaison.

4.3.1 Côté Est (aval)

Les Figure 67 et Figure 68 présentent des vues d'ensemble du remblai convectif côté est, respectivement en direction sud et en direction nord, pour les visites effectuées en juillet 2011 et en septembre 2012. Ces deux figures permettent de remarquer que l'état général des installations du côté est n'a pas vraiment évolué entre les deux visites.



Figure 67- Vue d'ensemble du remblai en direction sud pour les visites effectuées en juillet 2011 et septembre 2012 (côté est)



Figure 68- Vue d'ensemble du remblai en direction nord pour les visites effectuées en juillet 2011 et septembre 2012 (côté est)

La Figure 69 expose l'extrémité sud du remblai convectif. En septembre 2012, il était possible de remarquer un écoulement à la limite entre le matériau granulaire et le remblai convectif. Cet écoulement n'est pas visible en juillet 2011, par contre, des traces d'eau étaient alors visibles à cet endroit. La visite de septembre 2012 s'est effectuée suite à d'intenses averses. Il est possible que l'écoulement observé à ce moment soit le résultat temporaire de ces averses. Tandis que la photo de juillet 2011 a été prise suite à plusieurs jours sans précipitation.



Figure 69- Comparaison de l'extrémité sud du remblai convectif (côté est).

La Figure 70 présente l'évolution de la détérioration à l'extrémité est du remblai convectif. Sur la photo de juillet 2011, il est possible de remarquer des fissures longitudinales le long du remblai ainsi que de l'eau au pied du remblai. Sur la photo de septembre 2012, il est possible de remarquer que le matériau granulaire a glissé par endroits pour exposer le demi-ponceau du système de ventilation. Il est cependant important de mentionner l'effet de d'ombre qui accentue le relief sur la photo de 2011, et l'adoucit sur celle de 2012. Il est également possible de remarquer que l'eau en pied de remblai a été remplacée par de la végétation. Finalement, il est possible de remarquer que le couvercle de ventilation au centre de la photo est en place lors de la visite de juillet 2011 et qu'il se retrouve au sol lors de la visite de septembre 2012, indiquant un possible tassement.



Figure 70- Évolution de la détérioration à l'extrémité est du remblai convectif (côté est)

4.3.2 Côté Ouest (amont)

La Figure 71 présente deux photos du canal de déviation prises lors des visites de juillet 2011 et de septembre 2012. Lors de la première visite, aucun ruissellement n'avait été observé dans la vallée, uniquement des traces d'eau. Tel que mentionné précédemment, plusieurs jours s'était écoulés depuis la dernière averse. Par contre, un ruissellement était observable lors de la deuxième visite. Cette observation permet de mentionner que l'eau s'écoulant dans la vallée est bien déviée dans le canal en direction du lac. Une différence majeure est cependant notable entre la première et la deuxième visite, soit la résurgence d'eau en bordure du remblai. Cette résurgence peut avoir affecté le régime thermique du sol et causé des tassements qui seront discutés ultérieurement.



Figure 71- Canal de déviation (côté ouest)

La Figure 72 présente une vue d'ensemble du remblai convectif situé à l'ouest de la piste d'atterrissage. Un tassement semble survenir en pied de remblai, de chacun des côtés du boîtier d'acquisition de données. Ce tassement se situe près de la résurgence d'eau et n'affecte que le pied du remblai. Le haut du remblai, soit la section immédiatement adjacente à la piste ne présente aucun signe de tassement. Cette observation a été réalisée lors de la visite, mais n'est pas visible sur les différentes photos. La proximité d'une résurgence d'eau peut être une des causes de la dégradation du pergélisol qui a pu engendrer les tassements.



Figure 72- Vue d'ensemble du remblai convectif situé à l'ouest du remblai convectif (côté ouest)

La Figure 73 permet d'observer la présence d'eau en bordure du remblai convectif lors des deux visites. La présence d'eau ne semble pas affecter la stabilité du remblai de façon significative. Il est possible d'observer un léger déplacement du tuyau de ventilation par rapport à la tige de soutien sur le tuyau au premier plan. Ce déplacement pourrait être causé par un léger tassement du remblai ou un soulèvement dû au gel.



Septembre 2012



Figure 73- Présence d'eau en bordure du remblai convectif (côté ouest)

5 Suivi du comportement thermique de la piste d'atterrissage de Puvirnituq

Ce chapitre traitera du suivi thermique des remblais convectifs et de la berme convective de Puvirnituq. Les données de température de l'air seront d'abord traitées dans la section 5.1 afin de comparer le climat lors des trois années de suivi (2009-2010, 2010-2011 et 2011-2012). Les années de suivi ont été séparées afin d'avoir trois années complètes à la fin du projet. Les premières données ont été enregistrées à la fin du mois de septembre 2009, suivant la fin de l'installation de l'instrumentation. Les années de suivi sont donc divisées du mois de septembre, au mois de septembre de l'année suivante, pour les années 2009 à 2012.

Chacune des années de suivi sera d'abord traitée séparément. Dans chacun des cas, les données de température provenant des thermistances situées dans le remblai convectif ouest (séries A et B) sont d'abord traitées. Ensuite, les données recueillies dans le remblai et la berme à convection du côté est (séries C, D et E) sont présentées. Finalement, les résultats des séries de thermistances installées dans le sol naturel du côté ouest (série PUV-F5) et du côté est (série F, G, et PUV-F2) ainsi que ceux de la série installée horizontalement à l'interface sol/remblai (série H) sont présentés. La Figure 74 rappelle le positionnement des séries de thermistances.



Figure 74- Positionnement des séries de thermistances

Dans chacune de ces sections, l'évolution de la température en fonction du temps, à différentes profondeurs, sera présentée. Les courbes trompettes seront par la suite présentées pour les séries installées dans le sol naturel. Au besoin, des régimes thermiques seront présentés afin d'exposer un phénomène à un moment précis.

Il est d'abord important de mentionner que la thermistance à 7,0 m de la série F2 est défectueuse. La température enregistrée par cette thermistance augmente constamment à partir de la mi-mai 2010. La Figure 75 montre les courbes trompettes de la série F2 avec la thermistance à 7,0 m et sans la thermistance à 7,0 m. Les valeurs de températures de la thermistance à 7,0 m de profondeur ont donc été retirées de l'analyse, à partir du moment où elles augmentent de façon anormale.



Figure 75- Courbe trompette de la série F2 pour l'année 2010-2011 (I) avec la thermistance défectueuse à 7 m (II) sans la thermistance défectueuse à 7,0 m

5.1 Comparaison des données climatiques

Afin de comparer les données climatiques des trois années de suivi du remblai, les indices de dégel de l'air et les indices de gel de l'air ont été calculés à l'aide de la méthode présentée dans (Doré & Zubeck, 2009). L'indice de gel est calculé en additionnant les valeurs de température de l'air négative durant l'année et l'indice de dégel est calculé en additionnant les valeurs de température de l'air positive durant la même période. Cette méthode simple permet d'effectuer une comparaison rapide des différentes années de suivi. Le Tableau 7 présente les indices de dégel et de gel de l'air pour les trois années de suivi.

	Indice de dégel de l'air	Indice de gel de l'air
	(°C*jour)	(°C*jour)
Année 1 (2009-2010)	1196	2641
Année 2 (2010-2011)	1092	2859
Année 3 (2011-2012)	1123	3308

Tableau 7- Indice de gel et de dégel pour les trois années de suivi

L'indice de dégel est plutôt stable depuis le début du suivi du comportement thermique avec une différence maximale d'environ 100 °C*jour entre l'année 1 et l'année 2. Par contre, l'indice de gel a une tendance à l'augmentation depuis le début du suivi. Une augmentation de 200 °C*jour a été observée entre l'année 1 et l'année 2 et une augmentation de 450 °C*jour a été observée entre l'année 2 et l'année 3. L'augmentation totale de l'indice de gel est donc d'environ 650 °C*jour depuis le début du suivi.

Il est important de mentionner qu'un indice de gel élevé correspond à un hiver généralement plus froid. À l'aide de ces indices, il est possible d'affirmer que le climat de la troisième année de suivi a été le plus favorable aux conditions de pergélisol et au fonctionnement du remblai à convection. La deuxième année de suivi a quant à elle été plus favorable que la première année.

La Figure 76 présente les températures mensuelles moyennes de l'air. Cette figure permet de comparer la température de l'air entre les années de suivi et de déterminer d'où proviennent les différences dans les indices de gel et de dégel. Il est possible de remarquer par exemple que la différence de l'indice de gel entre la deuxième année (2010-2011) et la troisième année (2011-2012) provient principalement de la période avant le mois de février. Le mois de janvier 2012 a été particulièrement plus froid. Par la suite, les températures moyennes mensuelles sont plutôt similaires durant le reste de l'hiver.



Figure 76- Températures mensuelles moyennes de l'air pour les trois années de suivi

La température de l'air n'est pas le seul facteur météorologique affectant le pergélisol, les précipitations sont également très importantes. Malheureusement, aucune station météorologique mesurant les précipitations n'est installée à Puvirnituq. Aucune information n'est donc disponible sur les précipitations totales des trois années de suivi.

5.2 Année 1 : 2009-2010

5.2.1 Évolution des températures dans le remblai convectif amont (ouest) : séries de thermistances (A et B)

Tel qu'illustré sur la Figure 74, les séries de thermistances A et B sont placées dans le remblai convectif. La série A est placée dans la partie inférieure du talus en contact, à sa base avec le sol naturel (thermistance à 0 cm). La série B est placée dans la partie supérieure du talus en contact, à sa base, avec le talus de l'ancien remblai. La Figure 77 et la Figure 78 illustrent l'évolution des températures dans le remblai à convection ouest de la piste. Il est important de noter qu'un andin de pierres a été mis en place par l'entrepreneur à l'automne 2009 afin de permettre l'installation des thermistances dans le remblai, et les systèmes de ventilation, ont été mis en place. Les données recueillies sont donc peu représentatives, mais leur analyse apporte cependant des informations intéressantes.



Figure 77- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série A entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010



Figure 78- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série B entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010

Il est possible d'observer sur la Figure 77 et sur la Figure 78 un faible refroidissement dans le remblai convectif au cours de l'hiver avec des températures qui varient entre -1 et -5 °C. De plus, la température est relativement uniforme à l'intérieur du remblai au cours de cette période. La Figure 79 a), qui représente le régime thermique dans le remblai convectif au premier mars, illustre particulièrement bien cette observation. Ces observations suggèrent que la masse de matériau convectif était alors insuffisante pour générer un effet convectif significatif, et qu'en l'absence d'un système de ventilation, la masse d'air était plutôt stagnante dans le remblai, et l'effet d'isolation par la neige en surface dominait tout autre effet thermique.

Il est intéressant de noter l'effet de stagnation thermique à 0 °C qui prévaut aux alentours du 1er mai pour une période qui varie de quelques jours pour la série B à quelques semaines pour la série A. Cette stagnation est notable sur la Figure 77 et la Figure 78 et est particulièrement remarquable sur la Figure 79 b). Cette situation est attribuable au changement de phase de la glace en l'eau, présente sous le remblai, et de la neige en l'eau, présente au-dessus du remblai, qui a pour effet de stabiliser la température de l'ensemble du remblai au point de fusion. Il est possible de constater sur la Figure 78 que les thermistances les plus hautes dans le remblai convectif subissent d'abord un refroidissement, puis un réchauffement alors que la thermistance en contact avec la piste

stagne à 0 °C pour une période additionnelle d'environ une semaine. Cette observation suggère que la neige qui couvrait le remblai a alors fondu ce qui permet des variations de température dans la partie supérieure du remblai convectif.

On note également sur la Figure 79 c) que la thermistance située en contact avec le sol (0 cm) subit un réchauffement important en été. Bien que ce réchauffement soit en phase avec celui observé pour les autres thermistances, il paraît anormalement élevé, si bien que la température à ce niveau est généralement supérieure à celle observée pour la thermistance placée à 60 cm au-dessus du sol. À l'inverse, durant l'hiver, la température au niveau du sol est généralement inférieure à celle observée 60 cm au-dessus du sol. Ce comportement pourrait être causé par des effets convectifs associés à un écoulement d'eau et/ou à des mouvements d'air dans le remblai convectif.

La Figure 79 d) illustre pour sa part le régime thermique du remblai expérimental au 1er octobre 2010. À cette date, le remblai convectif a été complété et les systèmes de ventilation ont été installés. On devrait donc s'attendre à un fonctionnement normal du remblai convectif en début de saison. On note alors que l'apport de chaleur causé par l'écoulement semble disparu, ce qui concorde avec la fin des travaux de drainage effectués en 2010 dans ce secteur. On note également un refroidissement uniforme dans le remblai sans effet convectif apparent. Ces signes devraient normalement apparaître aux premiers grands froids de l'automne, en novembre ou en décembre. Le régime thermique du mois d'octobre semble donc indiquer un fonctionnement normal du remblai convectif, à cette période de l'année.



Figure 79- Profils thermiques dans les séries de thermistances A et B a) au 01/03/2010; b) au 01/05/2010; c) au 01/07/2010; au 01/10/2010

5.2.2 Évolution des températures dans le remblai convectif aval (est) : séries de thermistances (C, D et E)

Tel qu'illustré sur la Figure 74, les séries de thermistances C, D et E sont placées dans le remblai convectif. La série C est placée dans le haut du talus et la série D est placée dans la partie inférieure du talus. Les deux séries ont leur base située 30 cm au-dessus du contact entre le remblai convectif et la surface de l'ancien talus. La série E est pour sa part placée dans la berme convective en contact, à sa base, avec le sol naturel. Le remblai convectif et la berme de ce côté de la piste ont été essentiellement complétés à l'automne 2009. Le système de ventilation n'a par contre été installé qu'à l'été 2010. Un

fonctionnement presque normal est donc attendu au cours de la première saison de suivi, mais avec une efficacité réduite en raison de l'absence de ventilation.

Les Figure 80, Figure 81 et Figure 82 donnent l'évolution des températures dans le temps à trois niveaux dans les séries C, D et E.



Figure 80- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série C entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010



Figure 81- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série D entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010



Figure 82- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série E entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010

En comparant les comportements hivernaux de la série D (Figure 81) à celle de la série de thermistances équivalente dans le remblai ouest, soit la série B sur la Figure 78, on note que la série D maintient une température de 2 à 3 °C plus froide en hiver. En considérant que le remblai convectif ouest (amont) était probablement peu efficace, on constate que le remblai convectif est (aval) refroidit significativement la surface du remblai sous la neige malgré l'absence de ventilation. En comparant les deux mêmes séries en été, on constate que le remblai est (aval) semble conserver des températures plus uniformes et, en moyenne, plus fraîches en été également.

Au cœur de l'hiver (1er mars ; Figure 83 a)), on constate que les températures sont relativement froides, considérant la présence d'un important couvert de neige et l'absence de ventilation. On note que pour la série D, les températures sont légèrement plus froides à la base du remblai, ce qui indique un mouvement convectif dans le remblai. Cette tendance est l'inverse de celle de la série B, soit la série de thermistances équivalente dans le remblai ouest. Pour ce qui est de la berme (série E), malgré une température relativement froide pour l'ensemble des thermistances de la série, on se serait normalement attendu à observer une inversion des températures indiquant la présence de convection à cette période de l'année.

On observe au début mai 2010 dans la berme (série E) et le remblai convectifs (séries C et D), le même phénomène de stagnation des températures de fusion observé dans le remblai convectif du côté ouest de la piste. Ce phénomène qui dure quelques semaines est observable sur les Figure 80, la Figure 81 et la Figure 82. Cette situation est également bien illustrée sur la Figure 83 b). Le phénomène est probablement explicable par la présence d'eau mélangée à la glace et à la neige, qui sont présentes respectivement en dessous et au-dessus du matériau convectif.

Au cours de l'été 2010, on observe des régimes thermiques typiques de matériaux affectés uniquement par la conduction. Il est possible de constater qu'au 1er juillet 2010 (Figure 83 c)), les températures demeurent relativement fraiches en surface du sol ce qui est une indication de l'effet bénéfique de l'empierrement qui protège la surface du sol du rayonnement solaire. Il est intéressant de noter que la thermistance de la série E qui est en contact direct avec le sol, indique une température enlignée avec celles observées plus haut dans cette série, et similaire à celles observées à la base des séries C et D. Cette observation suggère donc qu'il n'y a aucun apport de chaleur par écoulement d'eau sous la berme.

À la fin de la première saison d'observation (1er octobre 2010 ; Figure 83 d)), on observe que les trois séries de thermistances indiquent des températures uniformes et en voie de refroidissement dans la berme (série E) et le remblai convectif (séries C et D). À cette date, on observe un décalage dans la température de la série C par rapport aux deux autres.



Figure 83- Profils thermiques dans les séries de thermistances C, D et E a) au 01/03/2010; b) au 01/05/2010; c) au 01/07/2010; d) au 01/10/2010

5.2.3 Évolution des régimes thermiques dans les séries de thermistances placées dans le sol sous les remblais à convection et la berme (F, G, F2 et F5) ainsi qu'en surface du sol sous la berme (série H)

Tel que présenté à la Figure 74, les séries de thermistances F, G, F2 et H se trouve du côté est de la piste, tandis que la série de thermistance F5 se trouve du côté ouest de la piste. La série de thermistance F2 se trouve au pied du remblai et est composée de quinze thermistances installées à des profondeurs entre 0 et 15 m. La série de thermistances F se situe quatre mètres à l'est de la série F2 et se compose de quatre thermistances installées entre 0 et 2 mètres de profondeur. La série G est également composée de quatre
thermistances entre 0 et 2 mètres de profondeur, mais celle-ci est installée au centre de la berme, soit 6,0 m à l'est de la série F. La série de thermistances H est une série horizontale installée sous la berme convective à des distances entre 62,5 m et 76,5 m du centre de la piste. L'espacement entre chacune des thermistances est de 2 mètres. Finalement, la série de thermistance F5, la seule série installée dans le sol à l'ouest de la piste, est composée de 12 thermistances positionnées entre 0 et 6,5 m.

Les Figure 84, Figure 85 et Figure 86 représentent respectivement l'évolution dans le temps des températures à 0 cm, 100 cm et 200 cm dans le sol support, aux points de mesure F2, F et G respectivement. Ces trois points de mesure sont positionnés en ordre croissant de distance sous la berme, à partir du pied de l'ancien talus du côté est de la piste.



Figure 84- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F2 situées à l'interface remblai/sol ainsi qu'à 1m et 2 m de profondeur entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010



Figure 85- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F situées à l'interface remblai/sol ainsi qu'à 1m et 2 m de profondeur entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010



Figure 86- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série G situées à l'interface remblai/sol ainsi qu'à 1m et 2 m de profondeur entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010

La Figure 87 illustre pour sa part l'évolution des températures dans le temps pour les mêmes trois profondeurs, sous le remblai convectif, du côté ouest de la piste.



Figure 87- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F5 situées à l'interface remblai/sol ainsi qu'à 1m et 2 m de profondeur entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010

On note qu'au cours du premier hiver, un refroidissement significatif se produit à faible profondeur dans le sol, pour l'ensemble des points de mesure. Le refroidissement est plus marqué en fin d'hiver. Le pic de refroidissement observé à faible profondeur dans la série F5 en début d'hiver est difficile à expliquer autrement que par une intervention de l'entrepreneur (excavation ou autres) à proximité des thermistances. Les températures mesurées à faible profondeur par les séries F2 (0 cm) et F (50 cm) approchent -3 °C. Il est intéressant de noter qu'à l'interface entre la berme et le sol, la température dans le remblai atteint -4 °C à la base de la série E (Figure 82) et la température minimale enregistrée dans la série H est de -6 °C (Figure 91). La différence s'explique probablement par le fait que les températures mesurées par les thermistances des séries F, G et F2 situées dans le sol influencées par sa capacité calorifique.

On note également sur les Figure 84, Figure 85 et Figure 86 que le sol à 2 m de profondeur avait une température d'environ 2 °C au début du suivi, que cette température s'est rabattue sous 0 °C lors du premier hiver, et s'est ensuite maintenue sous le point de fusion lors de l'été, et même au début de l'automne subséquent, et ce pour deux des trois points de mesure (séries F et G). On peut constater sur la Figure 87 que le sol à 2 m de profondeur, sous le remblai convectif non finalisé du côté ouest, n'a gelé que marginalement et a rapidement dégelé au cours de l'été 2010.

Les Figure 88, Figure 89 et Figure 90 illustrent les régimes thermiques dans le sol sous les remblais convectifs ouest (F5) et est (F2) pour les mois d'octobre 2009 ainsi que mars, juillet, août et octobre 2010 respectivement. On constate d'abord au 1er octobre 2009 (Figure 88) qu'à partir de 1 m de profondeur dans le sol du forage F5, la température initiale est nettement plus élevée que celle mesurée dans le forage F2.



Figure 88- Profils thermiques dans les séries de thermistances F2 et F5 en octobre 2009

On peut ensuite observer au 1er mars 2010 (Figure 89) que les deux profils thermiques sont similaires avec des températures légèrement plus chaudes pour le forage F5. Ce décalage peut s'expliquer par la quantité plus importante de chaleur à évacuer dans le sol, considérant la température initiale du régime thermique dans F5. On se serait attendu à observer des températures plus froides en surface dans la série F2, puisque plusieurs autres observations indiquent que le matériau convectif sus-jacent semble fonctionner.



Figure 89 : Profils thermiques dans les séries de thermistances F2 et F5 en mars 2010

On peut observer au 1er juillet (Figure 90 a) et au 1er août 2010 (Figure 90 b) l'effet probable de l'écoulement d'eau évoqué dans la section 3.3.2. On peut voir sur la Figure 90 a) que l'écoulement semble se manifester en juillet par une augmentation importante (près de 6 °C), localisée en surface, de la température dans la série F5. Cet écart de température persiste en août (Figure 90 b) entraînant la hausse des températures du sol sous-jacent. À partir du début octobre, la température du sol en surface commence à diminuer. (Figure 90 c). Bien que les températures à faible profondeur des deux séries de thermistances tendent à se rejoindre, on constate encore un écart significatif de température dans le sol des deux emplacements, vraisemblablement associé à un écoulement persistant à cet endroit.

Finalement, en comparant la Figure 90 c) à la Figure 88, qui donnent le régime thermique dans les forages F2 et F5 au premier octobre à un an d'intervalle, on constate que l'isotherme 0 °C semble avoir remonté de près de 0,5 m dans le forage F2 (coté est); alors qu'il est resté au même niveau pour le forage F5 (côté ouest). Il est important de noter qu'il s'agit de l'isotherme 0 °C et non du contact avec le sol gelé. La salinité du dépôt argileux à Puvirnituq a pour effet d'abaisser le point de congélation d'environ 1 °C, ce qui fait que l'on observe généralement le sol gelé à une plus grande profondeur à cet endroit. Donc, à Puvirnituq, compte tenu de la salinité des dépôts, le plafond de gel est plutôt estimé à l'isotherme -1 °C.



Figure 90- Profils thermiques dans les séries de thermistances F2 et F5 a) en juillet 2010 b) en août 2010 c) en octobre 2010

98

La série de thermistances H est particulièrement intéressante puisqu'elle est placée à l'horizontale, au contact entre le sol naturel et la berme, du côté est de la piste. On constate sur la Figure 91 que le comportement de la série en été est assez uniforme, mais on observe un écart significatif de température entre les séries en hiver. L'examen détaillé de la figure nous indique que la température semble diminuer lorsqu'on s'éloigne de la piste. Les Figure 92, Figure 93 et Figure 94 illustrent cet effet dans l'espace à intervalle de deux semaines. On constate au cours de l'hiver (Figure 93 et Figure 94) une différence de température de l'ordre de 2,5 °C entre le pied du remblai et l'extrémité de la berme.



Figure 91- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série H entre le 25 septembre 2009 et le 19 octobre 2010



Figure 92 : profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme convective pour la période de décembre 2009 et janvier 2010



Figure 93 : profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme convective pour la période de février et mars 2010



Figure 94 : profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme convective pour la période d'avril et mai 2010

5.3 Année 2 : 2010-2011

5.3.1 Évolution des températures dans le remblai convectif amont (ouest) : séries de thermistances (A et B)

Tel que mentionné dans la section précédente, un andin de pierres a été mis en place par l'entrepreneur à l'automne 2009, pour permettre l'installation des thermistances dans le remblai convectif. Ce n'est donc qu'à l'été 2010 que le reste du remblai et les systèmes de ventilation ont été mis en place. Les résultats de la section précédente étaient moins représentatifs que les données présentées dans cette section. Celles-ci correspondent donc à la première année complète de fonctionnement du système de remblai convectif avec ventilation.

La Figure 95 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série A entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011. Il est possible de remarquer que les températures sont influencées par la température de l'air. Cet effet est particulièrement visible en été, mais la tendance de refroidissement de la température de l'air se fait également ressentir dans le remblai convectif. Il est possible de constater que la température des différentes thermistances varie entre -1 °C et -7,5 °C durant l'hiver 2010-2011. La température minimale atteinte est inférieure à celle atteinte lors de l'hiver précédant (-5 °C), soit une différence d'environ 2,5 °C. La température reste plutôt uniforme dans le remblai à l'exception de la période entre le début février et le début mars, où un gradient thermique est observé. À partir de la mi-mai, la température dans les trois thermistances stagne à 0 °C. Ce comportement survient juste avant que la neige sur le remblai ne fonde, lorsque la chaleur latente empêche des variations de température. Il est également intéressant de remarquer que cette stagnation débute à quelques jours d'intervalle, et qu'elle se termine pratiquement au même moment, indépendamment de la hauteur des thermistances. Il est également possible de remarquer que cette stagnation se termine environ deux semaines plus tard que l'année précédente. Le comportement du remblai convectif en été est semblable à celui observé lors de l'été précédent, soit des températures variant entre 5 °C à la base et 15 °C au sommet.

La température maximale observée par la thermistance à 0 cm est de 12,25 °C pour l'été 2011, tandis qu'elle était de 13,25 °C pour l'été 2010. Ces valeurs sont plutôt similaires. Tel qu'indiqué sur la Figure 74, la thermistance à 0 cm de la série A est installée à l'interface remblai/sol naturel, du côté amont de la piste d'atterrissage. C'est à cet endroit que l'eau s'accumule en premier lieu lors du ruissellement. Puisque les températures maximales atteintes à cet emplacement sont pratiquement les mêmes lors des deux premières années de suivi, il est possible d'affirmer que la déviation du ruisseau n'a pas eu d'impact majeur sur les températures à l'interface remblai/ sol naturel du côté amont. La déviation du ruisseau n'a donc pas abaissé la température du sol comme c'est

le cas pour le sol entre 0 et 2 m de profondeur de la série F5, qui est également du côté amont.



Figure 95- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série A entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011

La Figure 96 présente les profils thermiques dans les séries de thermistances A et B, en date du 15 février 2011 et du 15 août 2011. Il est d'abord possible de constater que les thermistances à 0,3 m et 0,6 m de hauteur de la série A, ont des températures plus élevées ou plus faibles que celle à 0 mètre. Cette situation se reproduit pour la majorité des profils d'hiver et d'été. Il est possible que cette série de thermistances soit directement influencée par la ventilation. En effet, il se pourrait que le système de ventilation permette une entrée d'air froid en hiver, et une entrée d'air chaud en été. La proximité de la série A par rapport à la ventilation permettrait d'observer directement ces effets de courant d'air.



Figure 96- Profils thermiques des séries de thermistances A et B (I) au 15-02-2011(II) et au 15-08-2011

L'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série B, entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011, est présentée à la Figure 97. En premier lieu, il est possible de constater que les températures dans le remblai à partir de la mi-janvier sont beaucoup plus froides que celles observées lors du dernier hiver de suivi. La température minimale atteinte est de -8,75 °C comparativement à -4,5 °C pour la même période pour l'hiver 2010. La température reste relativement froide (sous -2,5 °C) jusqu'au début mai. Un gradient est également observable entre les différentes thermistances. La Figure 98 a) illustre bien le gradient de température dans la série B, en date du 1er avril 2011. Ce gradient correspond à un gradient normal en hiver, c'est-à-dire une température plus chaude à la base qu'au sommet. La base du remblai est réchauffée par le sol tandis que le sommet est influencé par la température de l'air. Ce type de gradient ne montre pas la présence de courant convectif.

Les thermistances de cette série stagnent également pendant un certain moment à 0 °C. La Figure 98 b) illustre bien l'uniformité des températures à 0 °C dans les différentes thermistances des séries A et B. Tel qu'observé durant la précédente année de suivi, cette situation dure quelques jours pour la série B tandis qu'elle dure plusieurs semaines pour la série A. Une accumulation de neige plus importante en pied de remblai pourrait être la cause de cette différence. Il est intéressant de remarquer que la thermistance à 0 cm de la série B quitte cet état de stagnation 17 jours plus tard que l'année précédente. Le printemps plus froid pourrait être la cause de cette observation.

Les températures enregistrées en été sont légèrement plus fraîches que celle de l'année précédente. Les températures sont inférieures de l'ordre de 2 à 4 °C. Il est également intéressant de mentionner la différence de température importante entre les deux thermistances à 0 cm des séries A et B. La température est en moyenne plus élevée de 5,4 °C lors des mois de juillet et août pour la thermistance de la série A comparativement à celle de la série B. Cette différence est probablement causée par la présence d'eau au pied du remblai à l'emplacement de la série A. Cette valeur illustre bien l'importante quantité d'énergie que l'eau peut apporter par convection.



Figure 97-Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série B entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011



Figure 98- Profils thermiques des séries de thermistances A et B (I) au 01-04-2011 (II) et au 01-06-2011

5.3.2 Évolution des températures dans le remblai convectif aval (est) : séries de thermistances (C, D et E)

L'évolution de la température enregistrée par les thermistances de la série C lors de la deuxième année de suivi est présentée à la Figure 99. La température minimale atteinte lors de l'hiver 2010-2011 est plus basse que celle atteinte lors de l'hiver précédent, soit - 11 °C comparativement à -5,5 °C. Les températures sont, en général, plus froides que lors de l'année précédente. Au printemps 2011, les températures enregistrées par les thermistances de cette série avaient stagné à 0 °C pendant plus de deux semaines, et même plus d'un mois pour la thermistance à 0 cm. Ce n'est pas le cas lors de la deuxième année de suivi. La thermistance à 0 cm stagne environ deux semaines, la thermistance à 60 cm stagne quelques jours, et la thermistance à 120 cm ne stagne pas du tout. Un couvert de neige plus faible au-dessus de cette série pourrait expliquer ce comportement.



Figure 99-Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série C entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011

La Figure 100 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série D entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011. Cette série montre un comportement différent à l'automne et au début de l'hiver comparativement à l'année précédente. Il est en effet étrange de voir la température stagner à 0 °C, sur toute la hauteur du remblai, pendant plus d'un mois. Ce comportement est normalement observé au printemps avant que la neige sur le remblai ne fonde et que la chaleur latente empêche toutes variations de température. Cette série est la seule à montrer ce comportement lors de cette période de l'année.

La série D montre également un comportement intéressant lors de l'hiver 2010-2011. Deux situations sont observables. La première situation survient lorsque les températures demeurent les mêmes dans tout le remblai, donc lorsqu'aucun gradient n'est observable (Figure 100 a)). La deuxième situation survient lorsque la température dans le bas du remblai est plus faible que la température dans le haut du remblai, voir la Figure 100 b).



Figure 100-Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série D entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011



Figure 101-Profils thermiques des séries de thermistances C, D et E (I) au 01-03-2011 (II) et au 01-04-2011

Ces deux situations indiquent qu'il y a convection dans le remblai. En hiver, le comportement normal consiste à avoir des températures plus froides dans la partie supérieure du remblai et des températures plus chaudes dans la partie inférieure du remblai. La chaleur dégagée par le sol naturel réchauffe le bas du remblai. Un gradient de température normale devrait ressembler à la Figure 102 a). Par contre, si une légère convection survient dans le remblai, l'air se mélange et le gradient devient nul. Le gradient de température devrait donc ressembler à la Figure 102 b). Finalement, si un courant convectif important se produit dans le remblai, le gradient de température observé est l'inverse de la situation normale, voir la Figure 102 c).



Figure 102- Schémas décrivant le gradient thermique à l'intérieur du remblai convectif : (I) gradient lorsqu'il y a peu ou pas de convection (II) gradient lorsqu'il y a convection (III) gradient lorsqu'il y a une convection importante

Finalement, la Figure 103 expose le mouvement convectif dans la berme qui pourrait expliquer le gradient de température observé dans la série de thermistances D. Cette figure ne tient pas compte des températures observées dans les séries de thermistances C et E.



Figure 103-Mouvement convectif dans la berme qui pourrait expliquer le gradient de température observé dans la série de thermistance D

La Figure 104 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série E entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011. Il est d'abord possible de remarquer que le dégel se produit environ deux semaines plus tard que l'année précédente, soit à la mi-mai. De plus, les températures enregistrées par les thermistances entre le mois de février et de mai sont en moyenne 2 °C inférieures à l'année précédente.



Figure 104- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série E entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011

5.3.3 Évolution des régimes thermiques dans les séries de thermistances placées dans le sol sous les remblais a convection et la berme (F, G, F2 et F5) ainsi qu'en surface du sol sous la berme (série H)

La Figure 105 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F2 entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011. Les températures enregistrées par la thermistance à 0 cm sont sensiblement les mêmes que celle de l'année de suivi précédente. Le minimum atteint durant l'hiver est près de -3 °C et le maximum atteint durant l'été est près de 7 °C. Le moment où cette thermistance

cesse de stagner à 0 °C est approximativement le 1er juillet, date qui correspond au même comportement observé à l'été 2010. La série à 100 cm de profondeur stagne à 0 °C durant la majeure partie de l'année, soit du début décembre 2010 au début de septembre 2011. Il est à noter que le sol quitte l'état de stagnation environ deux semaines plus tard que l'année précédente et que la température du sol reste sous 2 °C, contrairement à l'année précédente où le sol avait atteint 2,5 °C. La thermistance à 200 cm est particulièrement intéressante. La température maximale atteinte par le sol lors de l'été 2011, à cette profondeur, est de 0,25 °C. En comparaison, la température maximale atteinte à 200 cm, lors de l'été 2010, était de 0,75 °C, et de plus de 2 °C lors de l'été 2009.



Figure 105- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F2 entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011

Les courbes trompettes de la série F2 pour les années de suivis 2009-2010 et 2010-2011 sont présentées à la Figure 106. Les températures minimales atteintes (en bleu) sont semblables pour les deux années de suivi. Par contre, les températures maximales atteintes (en rouge) sont significativement plus basses à l'été 2011. Le pic de température maximale atteint à 1 mètre de profondeur à l'été 2010 n'est pas présent à l'été 2011. Ce pic était associé à un écoulement d'eau qui apportait une quantité de chaleur importante

dans le système. Le changement du régime thermique maximal serait donc associé à la déviation du ruisseau en amont. Il est possible de croire qu'il n'y a plus d'écoulement important sous le remblai. Il est également possible de remarquer une légère remontée du pergélisol, de l'ordre de 60 cm, entre ces deux années.



Figure 106- Courbes trompettes de la série F2 pour les années de suivi 2009-2010 et 2010-2011

La série F5 montre des résultats très intéressants. La Figure 107 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de cette série entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011. D'abord, il est possible de remarquer que le sol à 1,0 m quitte l'état stagnant à 0 °C durant l'hiver 2011. À cette profondeur, la température du sol atteint un minimum à -2 °C qui se maintient pendant environ 1 mois. Ce comportement diffère de celui observé à l'hiver 2010, où la température du sol était restée constante à environ 0 °C durant tout l'hiver. La température du sol à 2 mètres de profondeur est restée constante à 0 °C, comme c'était le cas lors de l'hiver 2009-2010.



Figure 107- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F5 entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011

Les observations les plus intéressantes sur ces séries se font à l'été. En effet, les thermistances à 100 cm et 200 cm ont des comportements significativement différents comparativement à ceux de l'été 2010, voir la Figure 108. Lors de l'été 2010, le réchauffement du sol au-dessus de 0 °C s'était fait de façon très rapide. Le sol à 200 cm avait même atteint une température supérieure à 0 °C, trois jours avant le sol à 100 cm, soit le 6 et le 9 juillet. Ce comportement est tout à fait différent à l'été 2011. Le sol à 100 cm atteint une température supérieure à 0 °C le 11 août 2011, tandis que le sol à 200 cm atteint cette température le 26 août 2011. Il y a donc un décalage dans le temps du réchauffement du sol, ce qui laisse croire que l'apport de chaleur est beaucoup moins intense et rapide. Il est possible de croire que le mode de transfert de chaleur prédominant dans le sol est différent entre les deux étés. L'apport de chaleur par convection, causé par le ruissellement à l'été 2010, n'est plus dominant et la chaleur est maintenant transférée par conduction. Il est également possible de remarquer la différence entre les températures maximales atteintes lors des étés 2010 et 2011. La température atteignait un maximum à 5,25 °C à 100 cm lors de l'été 2010, alors que ce maximum n'est que de 2,25 °C lors de l'été 2011. Il est possible de voir le même effet sur la température du sol à

200 cm, puisque celui-ci est 2,5 °C inférieur comparativement à la même date l'année précédente.



Figure 108- Évolution de la température du sol à 1 m et 2 m de la série F5 entre le 15 juin et le 25 septembre pour les étés 2010 et 2011

La Figure 109 présente les courbes trompettes de la série F5 pour les années de suivi 2009-2010 et 2010-2011. Les températures minimales du sol dans les deux premiers mètres sont inférieures lors de l'hiver 2010-2011. Il est également possible de constater que le régime thermique maximal est moins élevé durant l'été 2011. Cette différence est observable dans les cinq premiers mètres de sol. Par contre, aucune remontée du pergélisol n'a été observée. Le plafond du pergélisol était à 6,92 m de profondeur lors de l'année de suivi 2009-2010, et il était à 7,0 m lors de l'année de suivi 2010-2011. Ces valeurs ont été interpolées à l'aide des températures des deux dernières thermistances puisque la série de thermistances F5 a une profondeur maximale de 6,5 m.



Figure 109- Courbes trompettes de la série F5 pour les années de suivi 2009-2010 et 2010-2011

L'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F, entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011, est présentée à la Figure 110. La série a 0 cm atteint une température minimale inférieure à celle observée en 2010, soit de -4,5 °C comparativement à -3,5 °C. Le même comportement est observable à l'aide de la thermistance installée à 100 cm de profondeur. La température atteinte est de -2 °C comparativement à -1,25 °C à l'hiver 2010. La thermistance à 200 cm a une température constante sous 0 °C depuis maintenant deux étés consécutifs. Il est important de mentionner que la température maximale atteinte à 200 cm, au début d'octobre 2009, était de 1,8 °C. Il s'agit donc d'une baisse de température importante du sol à cette profondeur. Par contre, la température du sol n'est pas encore descendue sous cette limite. Le sol n'a pas encore libéré assez d'énergie pour quitter cet état de latence.



Figure 110- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011

Les différentes courbes trompettes de la série F sont présentées à la Figure 111. La même tendance est observable sur cette série que pour les séries F2 et F5, soit plus froide en hiver et moins chaude en été. Il est évident à l'observation de ce graphique que le plafond du pergélisol à remonter, puisque cette série a une différence importante au niveau du régime thermique maximal. Par contre, cette série n'a que deux mètres de profondeur, et la profondeur du plafond du pergélisol pour l'année 2009-2010 a dû être estimée à l'aide de la tendance entre les thermistances à 1 et 2 mètres de profondeur. Cette profondeur est estimée à 3,4 m, soit une profondeur du plafond du pergélisol légèrement supérieure à celle observée sur la série F2, situé 4,0 m à l'ouest de la série F. Le plafond du pergélisol de l'année 2010-2011 est observable sur ce graphique et est estimé à 1,8 m. Il y a donc eu une remontée significative d'environ 1,6 m, entre les deux années de suivi.



Figure 111- Courbes trompettes de la série F pour les années de suivi 2009-2010 et 2010-2011

La Figure 112 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série G, entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011. D'abord, la température atteinte par la thermistance à 0 °C est significativement plus basse que celle atteinte l'hiver précédent, soit une différence de 4 °C. La thermistance à 100 cm quitte légèrement l'état stagnant comme c'était le cas l'année précédente. La thermistance à 200 cm a le même comportement que celle de la série F, soit une température stagnante à 0 °C depuis plus de deux ans.



Figure 112-Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série G entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011

La Figure 113 présente les courbes trompettes de la série G. Le régime thermique minimal observé en 2010-2011 est plus froid dans le premier mètre. Les températures maximales observées sont inférieures à toutes les profondeurs où des thermistances sont installées. Comme estimés pour la série F, les plafonds du pergélisol ont été obtenus à l'aide de la tendance donnée par les thermistances à 1 et 2 mètres de profondeur. Le plafond était approximativement à 4,1 m en 2009-2010, et est remonté à 2,1 m en 2010-2011, soit une différence de 2 mètres. Cette remontée bien qu'elle soit estimée, est importante.



Figure 113- Courbes trompettes de la série G pour les années de suivi 2009-2010 et 2010-2011

La Figure 114 présente l'évolution de la température en fonction du temps, pour les thermistances de la série horizontale H, entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011. Tel qu'observé lors de l'année précédente, les différentes thermistances de la série H ont des températures semblables en été, voir la Figure 115. Par contre, les thermistances présentent des températures très différentes en hiver variant selon leurs positions par rapport au centre de la piste. En effet, il est possible d'observer que les températures enregistrées par les thermistances diminuent en s'éloignant du centre de la piste. La Figure 116 montre bien cette tendance pour les mois de février et mars 2011. La différence maximale observée d'une extrémité à l'autre de la série de thermistance H, est de 6,25 °C. Cette tendance pourrait s'expliquer par un couvert de neige plus important au pied du remblai. La neige aurait pour effet d'isoler cette section du remblai convectif et ainsi garder la chaleur extraite du sol.

La Figure 114 montre également que la température minimale atteinte lors de l'hiver 2011 est de -10,75 °C. Cette température est considérablement plus froide que celle atteinte lors de l'hiver précédent, soit -7 °C. Les températures atteintes en été sont semblables à celle de l'année précédente.



Figure 114- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série horizontale H entre le 26 septembre 2010 et le 25 septembre 2011



Figure 115- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme convective pour la période d'août et septembre 2011.



Figure 116- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme convective pour la période de février et mars 2011.

5.4 Année 3 : 2011-2012

5.4.1 Évolution des températures dans le remblai convectif amont (ouest) : séries de thermistances (A et B)

La Figure 117 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série A, entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012. À la minovembre 2011, la température dans le remblai convectif descend à des températures comprises entre -2,5 °C et -5 °C. La température minimale atteinte (-5 °C) est supérieure à celle atteinte lors de l'hiver précédent (-7,5 °C). Les températures dans le remblai convectif restent plutôt stables durant l'hiver et sont sensibles à une augmentation rapide des températures qui survient à la mi-février. Une fois de plus, l'effet de la chaleur latente est visible au mois de mai. Cette remarque indique une présence de neige dans le remblai

convectif. Par la suite, les températures dans le remblai sont représentatives des températures de l'air.



Figure 117- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série A entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012

La Figure 118 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série B, entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012. Cette série a un comportement très semblable à celui de l'année précédente, avec des températures légèrement plus chaudes en hiver. Par contre, à deux reprises durant l'hiver, la température à 200 cm dans le remblai convectif est supérieure à celle à 80 cm. De plus, lors du mois de février 2012, la température à 200 cm est égale à celle à 0 cm, ce qui signifie que la température est sensiblement la même dans tout le remblai. Ce gradient nul, voir la Figure 119, est probablement causé par un mouvement convectif à l'intérieur du remblai.



Figure 118- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série B entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012



Figure 119- Profils thermiques des séries de thermistances A et B au 2012-02-15

5.4.2 Évolution des températures dans le remblai convectif aval (est) : séries de thermistances (C, D et E)

L'évolution de la température de trois différentes thermistances de la série C lors de la troisième année de suivi est présentée à la Figure 120. La température minimale atteinte lors de cet hiver est légèrement plus élevée que lors de l'hiver précédent, soit -9,8 °C, comparativement à -11 °C. Cependant, la tendance générale des températures de cette série est semblable à celle de l'hiver précédent. La température dans le remblai convectif descend plutôt constamment jusqu'au mois de mars. La température remonte par la suite et stagne à 0 °C. Un gradient normal, soit des températures plus chaudes à la base, est observé tout au long de l'hiver. Les températures estivales sont par la suite représentatives de la température de l'air, avec une atténuation des variations de température vers la base du remblai.



Figure 120- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série C entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012

La Figure 121 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série D, entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012. La série D montre, elle aussi, un comportement similaire à celui de l'hiver précédent. À partir du moment où les températures descendent sous 0 °C, la température est relativement

constante dans tout le remblai (gradient nul), voir la Figure 122 a). Il est également possible d'observer un léger gradient inverse, au mois de janvier 2012, voir le Figure 122 b). Tel que mentionné lors de la deuxième année de suivi, ces deux situations (gradient nul et inverse) sont des indications de convection dans le remblai convectif. Ce gradient inverse est plus faible que celui observé lors de l'année précédente, voir la Figure 101. Sur ces mêmes figures, il est possible de remarquer que les gradients des séries C et E sont normaux, soit des températures plus froides au sommet comparativement à la base.



Figure 121- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série D entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012



Figure 122- Profils thermiques des séries de thermistances C, D et E au A) 2012-03-15 et au B) 2012-01-15

Le comportement thermique à l'intérieur de la berme convective (Série E) est significativement différent de l'année précédente. Cette différence sera commentée en détail à la section 5.5, puisqu'elle peut expliquer le régime thermique observé dans le sol naturel.



Figure 123- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série E entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012

5.4.3 Évolution des régimes thermiques dans les séries de thermistances placées dans le sol sous les remblais à convection et la berme (F, G, F2 et F5) ainsi qu'en surface du sol sous la berme (série H)

Cette section traitera de l'évolution des régimes thermiques des séries de thermistances dans le sol naturel lors de la troisième année de suivi. Les phénomènes observés sont discutés et une comparaison avec les résultats de l'année précédente est réalisée. Par contre, une comparaison détaillée des trois années de suivi se trouve dans la section suivante.

La Figure 124 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F2 entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012. Il est possible de remarquer que la température de la thermistance à 0 m descend rapidement sous 0 °C lorsque la température de l'air descend sous cette limite. Par la suite, le comportement thermique du sol diffère de celui de l'air. La température de l'air entre les mois de décembre et janvier descend considérablement tandis que la température du sol semble stagner à -0,5 °C. Puis, la température du sol descend de façon constante jusqu'à l'atteinte d'une température minimale, entre la mi-mars et la mi-avril. La température du sol à 1 mètre de profondeur descend très légèrement sous 0 °C, soit -0,2 °C, et se

maintient durant tout l'hiver. La température ne raugmente au-dessus de 0 °C qu'à la fin août 2012. Le sol à 2 mètres de profondeur ne dépasse pas l'effet de latence et reste donc à 0 °C durant l'hiver, et ce, jusqu'au début septembre.



Figure 124- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F2 entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012

La Figure 125 présente les courbes trompettes de la série F2 pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012. Dans les premiers 50 cm, les températures minimales sont inférieures et les températures maximales sont supérieures, lors de la dernière année de suivi. En dessous de cette couche, les températures minimales observées sont légèrement inférieures. Les températures maximales sont inférieures à 1 mètre de profondeur, et supérieures à 2 mètres de profondeur lors de la dernière année de suivi. Les deux courbes trompettes sont très semblables à partir de 3,0 m de profondeur. Les courbes de l'année de suivi 2011-2012 est légèrement décalée vers des températures plus chaudes. Le plafond du pergélisol est stable entre ces deux années de suivi.



Figure 125- Courbes trompettes de la série F2 pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012

La Figure 126 présente l'évolution de la température en fonction du temps, pour les thermistances de la série F5, entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012. Le sol en surface (0 m) descend rapidement sous 0 °C lorsque la température de l'air se refroidit. La température minimale du sol atteinte est de -5 °C, au mois de mars. Durant la même période, le sol à 1 mètre de profondeur quitte l'état de latence et descend à environ -1,5 °C. Le sol retourne dans un état de latence entre la mi-juin et le début du mois d'août. La température maximale atteinte lors de l'été 2012 est d'environ 2 °C. La température à 2 mètres de profondeur reste constante à 0 °C durant tout l'hiver 2012 et ne raugmente qu'à la fin août, jusqu'à un maximum d'environ 1,5 °C.


Figure 126- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F5 entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012

La Figure 127 présente les courbes trompettes de la série F5 pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012. Les températures minimales observées lors de l'année de suivi 2011-2012 sont supérieures, entre 0 et 2 mètres de profondeur, et sont presque identiques plus en profondeur. La température minimale observée en surface est supérieure de plus de 1 °C, comparativement à l'année de suivi précédente. Les températures maximales observées sont supérieures dans les premiers 50 cm et sont toutes inférieures plus en profondeur. Le plafond du pergélisol a remonté d'environ 50 cm lors de la dernière année de suivi.



Figure 127- Courbes trompettes de la série F5 pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012

La Figure 128 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012. La température du sol en surface de la série F descend sous 0 °C à la fin octobre. Le sol refroidit légèrement par la suite, jusqu'à l'atteinte d'une température minimale de - 1,4 °C. Entre la mi-mai et la mi-juin, le sol a une température de 0 °C jusqu'à ce qu'il quitte l'état de latence. La température augmente jusqu'à un maximum de 10,5 °C, ce qui est environ 2,5 °C supérieur à la température maximale de l'année précédente. La température à 1 mètre de profondeur oscille légèrement autour de 0 °C à la fin de l'automne 2011. Elle se stabilise par la suite à 0 °C durant l'hiver, et augmente à la miaoût jusqu'à une température maximale de 1 °C. Finalement, la température du sol à 2 mètres de profondeur est constante durant l'année entière.



Figure 128- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série F entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012

La Figure 129 présente les courbes trompettes de la série F pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012. Les températures minimales et maximales observées durant la dernière année de suivi sont toutes plus élevées que lors de la deuxième année de suivi. Il est important de mentionner que la différence de température minimale atteinte est significativement plus élevée lors de l'année de suivi 2011-2012. Cette différence est de 3,1 °C à 0m, 2,8 °C à 0,5 m et 1,9 °C à 1 m. Cependant, le plafond du pergélisol est resté stable durant cette période, puisque la température maximale atteinte à 2 mètres de profondeur est la même.



Figure 129- Courbes trompettes de la série F pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012

La Figure 130 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série G, entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012. Au contact sol-remblai, la température diminue de façon constante à la fin de l'automne sans toutefois descendre sous -1,3 °C durant l'hiver 2012, ce qui est considérablement plus élevé que la température minimale atteinte l'année précédente qui est de -8,8 °C. Il est important de remarquer que la température de la thermistance à 0 m stagne à 0,25 °C, entre la mi-mai et la mi-juin, alors qu'elle devrait normalement stagner à une température légèrement inférieure à 0 °C. Cette différence n'est présente que lors de la dernière année de suivi. Il est donc possible que la calibration de cette thermistance soit légèrement déficiente. Cependant, l'erreur induite par la différence de température n'est pas majeure. La température du sol à 1 mètre de profondeur atteint une température maximale de 0,5 °C à la fin de l'été 2011. La température descend ensuite à 0 °C et reste à cette température jusqu'au début août 2012. La température maximale atteinte est de 3,4 °C à l'été 2012, ce qui est significativement plus élevé que lors de l'été précédent. La température du sol à 2 m stagne durant toute l'année de suivi jusqu'au mois de septembre 2012, où elle augmente jusqu'à une température de 1,7 °C. La température du sol n'avait pas quitté l'état stagnant, durant l'été 2011.



Figure 130- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série G entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012

La Figure 131 présente les courbes trompettes de la série G pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012. Tel qu'observé sur la série de thermistances adjacente (série F), les températures minimales et maximales observées durant la troisième année de suivi sont toutes plus élevées que lors de la deuxième année de suivi. Les températures minimales atteintes lors de l'année de suivi 2011-2012 sont supérieures de 7,5 °C à 0 m et de 1,6 °C à 0,5 m. Les températures maximales atteintes lors de 1,4 °C à 0m; 2,5 °C à 0,5 m; 2,6 °C à 1 m; et 1,5 °C à 2 m. Ces températures sont significativement plus élevées que celles observées précédemment. Une augmentation de la couche active du pergélisol de 0,77 m a été estimée.



Figure 131- Courbes trompettes de la série G pour les années de suivi 2010-2011 et 2011-2012

La Figure 132 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série H entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012. Les températures de cette série ont toutes un comportement semblable lors de cette année de suivi. La différence maximale observée entre deux thermistances est d'environ 1,0 °C pour la troisième année de suivi (le 5 mars 2012, entre les thermistances situées à 62,5 m et 70,5 m du centre de la piste), tandis qu'elle était de 6,25 °C lors de l'année précédente. La tendance observée lors des années précédentes, soit une diminution de la température en s'éloignant du centre de la piste, n'a pas été observé lors de la dernière année de suivi.

De plus, la température minimale atteinte est environ -2,25 °C, comparativement à -10,75 °C lors de l'année précédente. La Figure 133 et la Figure 134 présentent les profils horizontaux des températures à la surface du sol naturel, sous la berme convective, respectivement lors de l'hiver 2012 et de l'été 2012. Il est possible de remarquer que la température à l'interface sol naturel/remblai, est la même peu importante la distance par rapport à la piste d'atterrissage. Ce comportement est très différent de celui observé lors des deux premières années de suivi et sera traité plus en détail dans la section suivante.



Figure 132- Évolution de la température en fonction du temps pour les thermistances de la série H entre le 26 septembre 2011 et le 2 octobre 2012



Figure 133- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme convective pour la période de février et mars 2012.



Figure 134- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme convective pour la période d'août et septembre 2012.

5.5 Évolution du comportement thermique de Puvirnituq

Cette section traitera de l'évolution des températures sous les remblais convectifs et la berme convective, à partir des séries F2, F, G et F5 pour les trois années de suivi. Afin de bien visualiser l'évolution des températures, des interpolations ont été réalisées à l'aide du logiciel Surfer. Une interpolation de type *krigeage* a été réalisée afin d'obtenir une grille d'interpolation à l'aide des données. Une échelle de couleur a été associée à cette grille d'interpolation. Cette échelle de couleur se divise en trois catégories. D'abord, les valeurs positives ont une couleur jaune près de 0 °C et rougissent en augmentant. Ensuite, les valeurs entre 0 °C (exclusivement) et -2 °C ont des couleurs de mauve foncé vers violet pâle. Ces températures sont représentatives d'un sol partiellement gelé ou dégelé si la salinité du sol est assez élevée pour faire varier le point de fusion de la glace. Finalement, la troisième catégorie comprend les températures sous -2 °C qui sont représentées par un bleu foncé et palissent avec le refroidissement de la température.

La Figure 135 représente l'évolution des températures de la série F2, entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012. La Figure 136 représente également l'évolution des températures de la série F2, mais uniquement entre 0 et 2 mètres. Le dégel précoce de la thermistance à 50 cm de profondeur au mois de mai, qui survient durant les deux premières années de suivi est difficilement explicable autrement que par un écoulement d'eau souterraine. Un écoulement localisé à cette profondeur pourrait expliquer le dégel rapide à l'été 2010 ainsi que le regel plus lent à l'hiver suivant. Il est également possible de voir que cet effet a diminué à l'été 2011 et disparu à l'été 2012, ce qui est cohérent avec les effets observés de la déviation du ruisseau.

Les sections précédentes traitaient en détail de la zone entre 0 et 2 mètres pour les trois années de suivi. Les mêmes observations peuvent être réalisées à l'aide de ces figures. De plus, il est possible de remarquer que la profondeur à laquelle le sol est complètement gelé (inférieur à -2 °C) à tendance à descendre. Cette profondeur était initialement à environ 12,5 m et se situe maintenant à plus de 15 m.

Une remontée du plafond du pergélisol peut être observée à l'aide de la ligne jaune sur la Figure 135. Ce point sera discuté plus en détail ultérieurement.



Figure 135- Évolution des températures de la série F2 entre 0 et 15,0 m de profondeur pour les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012



Figure 136- Évolution des températures de la série F2 entre 0 et 2,0 m de profondeur pour les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012

La Figure 137 représente l'évolution des températures de la série F5, entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012. Cette figure permet d'observer que le sol reste non gelé (talik) à une certaine profondeur durant les hivers 2010 et 2012. La Figure 138 représente également l'évolution des températures de la série F5, mais uniquement entre 0 et 2 mètres. Ces deux figures permettent d'observer très clairement que l'isotherme - 2 °C atteint une profondeur plus importante lors du deuxième hiver de suivi. Lors du troisième hiver, il est possible de remarquer que l'isotherme -2 °C atteint une profondeur tout de même environ 80 cm plus profond que lors de la première année de suivi. De plus, l'isotherme -2 °C pénètre dans le sol avant de remonter lors du mois de février suivant une température de l'air plus chaude. La température redescend par la suite.



Figure 137- Évolution des températures de la série F5 entre 0 et 6,5 m de profondeur pour les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012



Figure 138- Évolution des températures de la série F5 entre 0 et 2,0 m de profondeur pour les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012

Les Figure 139 et Figure 140 représentent respectivement l'évolution des températures, entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012, des séries F et G. Ces deux figures permettent de bien visualiser les différents comportements lors des trois années de suivi. Les deux séries de thermistances ont des comportements semblables et les mêmes observations peuvent être réalisées. Une diminution de la profondeur de l'isotherme 0 °C a été observée entre les étés 2009 à 2011. Cependant cette tendance s'est inversée lors de l'été 2012. C'est également le cas pour l'isotherme -2 °C, dont la profondeur a augmenté lors des deux premiers hivers. Lors de l'hiver 2012, la température du sol entre 0 et 2 m n'a même pas diminuée sous -2 °C. Il s'agit d'un changement de comportement thermique majeur.



Figure 139- Évolution des températures de la série F entre 0 et 2,0 m de profondeur pour les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012



Figure 140- Évolution des températures de la série G entre 0 et 2,0 m de profondeur pour les trois années de suivi, soit entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012

La température moyenne annuelle du sol est un bon indicateur de l'évolution du comportement thermique d'un sol. Les Tableau 8, Tableau 9 et Tableau 10 présentent les températures moyennes du sol à différentes profondeurs pour les séries F, G, F2 et F5. Une flèche vers le haut indique que la température moyenne annuelle augmente, par rapport à celle de l'année précédente tandis qu'une flèche vers le bas indique que la température moyenne annuelle diminue, par rapport à celle de l'année précédente.

Un comportement thermique semblable peut encore une fois être associé aux séries de thermistances F et G, à l'aide des températures moyennes annuelles (Tableau 8). La température moyenne, à toutes les profondeurs, a diminué entre la première et la deuxième année de suivi. Par contre, la température moyenne a augmenté entre la deuxième et la troisième année de suivi, à l'exception de la thermistance à 2 mètres de profondeur de la série F. Un point important à mentionner, est le fait que la température moyenne du sol entre 0 et 1 mètre de profondeur est plus élevée lors de la troisième année de suivi que lors de la première année. Par exemple, la température moyenne annuelle de la série G à 0,5 m en 2009-2010 est de 0,10 °C et de 0,65 °C en 2011-2012. Cette différence est significative.

	Те	empér	ature de la	a série F Température de la série G					G	
Profondeur			(°C)					(°C)		
(m)	2009-		2010-		2011-	2009-		2010-		2011-
	2010		2011		2012	2010		2011		2012
0	0,29	7	0,13	7	1,19	-0,03	7	-0,52	7	1,14
0,5	-0,14	7	-0,69	7	0,26	0,10	7	-0,15	7	0,65
1	-0,01	7	-0,51	7	-0,01	0,14	7	-0,15	7	0,35
2	0,13	У	-0,15	7	-0,17	0,23	7	-0,06	7	0,02

Tableau 8- Températures moyennes annuelles du sol à différente profondeur pour les séries F et G

Augmentation de la température moyenne
 Diminution de la température moyenne

Les températures moyennes annuelles entre 0 et 20 cm de la série F2 augmentent depuis la première année (Tableau 9). Cette augmentation est de l'ordre de 0,5 °C. Pour ce qui est des températures moyennes annuelles entre 0,5 mètre et 5,0 m, la tendance annuelle n'est pas toujours la même, c'est-à-dire qu'il y a une augmentation ou une diminution dépendamment de la profondeur ou de l'année. Par contre, les températures moyennes annuelles de la troisième année sont inférieures à celles de la première année. Finalement, à partir de 6,0 m de profondeur, une tendance constante d'augmentation de température est observée. La Figure 141 présente l'évolution des températures de la série F2, entre 8 et 15,0 m de profondeur, entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012. La tendance est lente, mais constante. Il est finalement possible de remarquer que la température déterminée par la thermistance la plus profonde (15,0 m) augmente au-dessus de -2 °C, soit la température d'un sol complètement gelé, lors de l'hiver 2012. Il est possible d'émettre l'hypothèse que la tendance de réchauffement en profondeur n'a pas eu le temps de s'inverser comme c'est le cas à plus faible profondeur. Il s'agit d'une sorte d'inertie thermique. Autrement dit, les modifications apportées au régime thermique en surface n'ont pas encore eu de répercussion sur le régime thermique plus en profondeur.



Figure 141- Évolution des températures de la série F2 entre 8 et 15,0 m de profondeur entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012

Une diminution significative des températures moyennes annuelles de la série F5 est observée depuis le début du suivi du comportement thermique de la piste de Puvirnituq, malgré une augmentation entre 0 et 0,5 m (Tableau 9). La température moyenne annuelle a diminué de plus de 1 °C à 0,5 m de profondeur, depuis le début du suivi. À cette profondeur, l'écoulement d'eau avait certainement une influence sur la température du sol et la déviation du ruisseau a un effet majeur sur cette température. Sur toutes les thermistances de la série, la température moyenne annuelle a diminué, en moyenne de 0,6 °C.

Profondeur	Température de la série F2 (°C)					Température de la série F5 (°C)				
(m)	2009-2010		2010-2011		2011-2012	2009-2010		2010-2011		2011-2012
0	0,26	1	0,36	1	0,77	1,36	7	0,07	1	0,42
0,2	0,23	1	0,34	7	0,79					
0,5	0,50	7	0,31	1	0,38	1,21	7	0,06	1	0,17
1	0,18	2	0,10	1	0,14	1,09	7	0,29	7	0,13
1,5						1,11	7	0,43	7	0,21
2	0,13	7	0,04	7	0,07	1,06	7	0,50	7	0,24
2,5						0,98	7	0,52	7	0,23
3	0,11	7	0,05	-	0,05	0,84	7	0,48	7	0,19
3,5						0,79	7	0,53	7	0,29
4	-0,06	7	-0,11	7	-0,15	0,48	7	0,33	7	0,11
5	-0,39	7	-0,46	7	-0,49	0,20	7	0,18	7	0,04
6	-0,93	1	-0,91	7	-0,85	-0,05	1	-0,00	7	-0,05
6,5						-0,11	1	-0,06	7	-0,13
8	-1,56	1	-1,46	1	-1,37					
10	-1,80	1	-1,66	1	-1,57					
12	-1,93	1	-1,86	1	-1,79					
14	-2,05	1	-1,97	1	-1,91					
15	-2,14	1	-2,07	1	-2,02					

 Tableau 9- Températures moyennes annuelles du sol à différente profondeur pour les séries F2 et F5

≯= Augmentation de la température moyenne

▶= Diminution de la température moyenne

Finalement, les températures moyennes annuelles de la série H sont beaucoup plus sensibles à la convection à l'intérieur du remblai, puisqu'elle se trouve à l'interface entre le remblai convectif et le sol naturel. Entre la première et la deuxième année de suivi, toutes les températures moyennes sont plus faibles à l'exception de la thermistance située à 62,5 m. Par contre, les températures moyennes, lors de la troisième année de suivi, sont toutes supérieures à celles des deux autres années de suivi.

Distance du centre de la	Température de la série H (°C)							
piste (m)	2009-2010		2010-2011		2011-2012			
62,5	0,20	7	0,28	1	0,98			
64,5	0,30	7	0,14	7	1,19			
66,5	0,21	۲	-0,09	7	1,21			
68,5	0,03	۲	-0,48	7	0,96			
70,5	-0,03	٦	-0,52	1	1,14			
72,5	-0,10	7	-0,86	1	0,91			
74,5	-0,19	٦	-1,03	1	0,83			
76,5	-0,31	7	-1,12	1	0,73			

Tableau 10- Températures moyennes annuelles du sol pour la série H

Augmentation de la température moyenne
 Diminution de la température moyenne

La Figure 142 présente l'évolution de la température des thermistances à faible profondeur, soit à 1 et 2 mètres, pour les trois années de suivi. Il est possible d'observer que le type de transfert de chaleur associé à la série F2 est de type conductif, lors des trois années de suivi (a-1, a-2 et a-3). Les valeurs maximales atteintes diminuent entre les étés 2009 et 2011. Par contre, elles sont supérieures lors de l'été 2012.

Pour la série de thermistances F5, un transfert de chaleur de type convectif a été observé lors de l'été 2010 (b-2) et s'est transformé en transfert de type conductif lors des étés subséquents (b-3 et b-4). Une diminution des températures maximales a suivi ce changement de mode de transfert de chaleur. Sur cette même série, il est possible d'observer que la température du sol, à 1 mètre de profondeur, ne descend pas sous 0 °C lors de l'hiver 2010 (b-1), tandis qu'une température minimale de près de -2 °C est atteinte à la même profondeur lors des hivers suivants.

Les séries F et G montrent un comportement significativement différent lors du dernier hiver de suivi, soit l'hiver 2012. Lors de cette période, le sol à 1 mètre de profondeur reste à une température constante près du point de congélation (c-1 et d-1). Cette observation est compatible avec les observations réalisées précédemment. Le fait que la température ne soit pas descendue sous le point de congélation a certainement joué un rôle important lors de l'été suivant, en permettant à la température du sol, à une profondeur de 2 mètres (série G), d'augmenter au-dessus de 0 °C (d-2), ce qui ne s'était pas produit depuis l'été 2009. Un tel comportement est également envisageable pour la série F si l'extraction de chaleur n'est pas suffisante lors des hivers à venir. Le sol, à une profondeur de 1 mètre, atteint une température maximale de 3,4 °C lors de l'été 2012 (d-3). La température à cette profondeur était restée sous 0,5 °C lors des deux étés précédents. Cette température maximale est équivalente à celle de l'été 2009, soit l'été de la construction du remblai convectif. Cette observation montre que la température du sol, à cette profondeur, est directement reliée au fonctionnement du remblai à convection. Un mauvais fonctionnement pendant un hiver est immédiatement visible sur les températures à faibles profondeurs.



Figure 142- Évolution de la température à 1 m et 2 m de profondeur entre le 26 septembre 2009 et le 2 octobre 2012 a) pour la série F2 b) pour la série F5 c) pour la série F d) pour la série G

La Figure 143 présente l'évolution de la température des thermistances à des profondeurs moyennes, soit entre 3 et 5,0 m, pour les trois années de suivi. Il est d'abord possible de constater que les deux séries de thermistances ont des comportements très différents, dépendant si elles sont situées du côté aval (F2) ou amont (F5). L'amplitude des variations de température de la série F5 est beaucoup plus importante que celle de la série F2. Dans les deux cas, il est possible de constater une diminution de la température maximale atteinte. Pour la thermistance installée à 4,0 m de profondeur sur la série F2, la température est descendue sous 0 °C suite à l'été 2009, avec une faible tendance à la baisse par la suite (figure 141 a)). Une légère augmentation de la température à la fin de l'été 2012 est compatible avec les observations à plus faibles profondeurs. Pour ce qui est de la thermistance à 5,0 m de profondeur, la température a une légère tendance à la baisse durant les trois années de suivi.

La température maximale atteinte à 3,0 m de profondeur de la série F5, lors de l'été 2009, est supérieur à 4 °C, alors qu'elle est inférieure à 1 °C lors de l'été 2012 (figure 141 b)). La température à 4,0 m de profondeur suit la même tendance, et la température maximale atteinte lors de l'été 2012 est légèrement au-dessus de 0 °C. Finalement, pour la thermistance à 5,0 m, le sol a atteint une température légèrement supérieure à 0 °C lors de sétés 2009 à 2011, mais est demeuré sous 0 °C lors de l'été 2012. Il est donc fort possible de voir le plafond du pergélisol remonter jusqu'à une profondeur de moins de 5,0 m lors de la prochaine année de suivi.



Figure 143- Évolution de la température entre 3 et 5 m de profondeur entre le 26 septembre 2009 et le 2 octobre 2012 a) pour la série F2 b) pour la série F5

La Figure 144 présente l'évolution de la température du sol à 1 m et 2 m de la série F5, entre le 15 juin et le 2 octobre pour les étés 2009, 2010, 2011 et 2012. Tel que mentionné à l'aide des Figure 108 et Figure 142 a), un changement du type de transfert de chaleur a été observé entre l'été 2010 et 2011. La déviation du ruisseau a transformé le type de transfert de chaleur dans le sol de convectif à conductif. La Figure 144 permet de remarquer que l'évolution et l'amplitude de la température maximale sont très similaires, entre les étés 2011 et 2012. Des données sont également disponibles pour la fin septembre 2009. L'évolution complète ne peut être décrite, mais il est possible d'affirmer que les températures maximales atteintes à 1 et 2 mètres étaient encore plus élevées que celles atteintes lors de l'été 2010.



Figure 144- Évolution de la température du sol à 1 m et 2 m de la série F5 entre le 15 juin et le 2 octobre pour les étés 2009, 2010, 2011 et 2012

La Figure 145 présente l'évolution de la température des thermistances de la série H à 66,5, 72,5 et 76,5 m de distance du centre de la piste, entre le 26 septembre 2009 et le 2 octobre 2012. Trois thermistances de la série ont été choisies afin de bien représenter l'étendue des valeurs sans toutefois surcharger la figure. Ce graphique permet de visualiser la différence entre les trois hivers de suivi. Une différence évidente est observable entre l'hiver 2011 et l'hiver 2012. Lors de l'hiver 2012, les températures de la série H sont plutôt stables et ne descendent que très légèrement sous -2 °C, tandis qu'elle descendait entre -6 °C et -10 °C lors de l'hiver 2011. Puisque la température à l'interface entre le remblai convectif et le sol naturel ne descend pas comme c'était le cas lors de l'hiver 2011, il n'est pas surprenant d'observer que le sol sous-jacent n'atteigne pas les mêmes températures minimales. L'extraction de chaleur lors de l'hiver 2012 n'a pas été

aussi efficace que lors de l'hiver 2011 malgré le fait que l'hiver 2012 ait été plus froid. Ce mauvais fonctionnement évident du système de ventilation peut être causé par une ou une combinaison de trois observations effectuées lors de la visite hivernale de mars 2013. Premièrement, un couvert de glace a été observé directement sous le couvert de ventilation. Deuxièmement, un bouchon de glace a été observé à l'intérieur des tuyaux de ventilation. Ce bouchon est formé à partir de la glace se condensant sur les parois de la cheminée. Troisièmement, certaines cheminées de ventilation se situent sous le niveau du couvert neigeux. Le rapport de la visite effectuée en mars 2013 se trouve à l'annexe C



Figure 145- Évolution de la température des thermistances de la série H à 66,5, 72,5 et 76,5 m du centre de la piste entre le 26 septembre 2009 et le 2 octobre 2012

La Figure 146 présente les profils horizontaux des températures à l'interface entre le remblai à convection et le sol naturel, en date du 15/02/2011 et du 15/02/2012. Lors de l'hiver 2011, les températures diminuent en s'éloignant du centre de la piste d'atterrissage. Cette tendance peut être associée avec l'entrée d'air froid par les cheminées de ventilation. Les thermistances les plus près de l'entrée d'air sont celles qui mesurent les températures les plus froides, à l'exception de la dernière thermistance à

76,5 m du centre de la piste. À pareille date lors de l'hiver 2012, les températures sont constantes en s'éloignant du centre de la piste d'atterrissage. Cette observation permet de poser l'hypothèse qu'un mauvais fonctionnement des cheminées de ventilation a pu affecter l'entrée d'air froid. Les températures sont alors beaucoup moins dépendantes de l'entrée d'air, et sont donc constante peu importe leur distance par rapport à la cheminée de ventilation. Cette figure permet de remarquer que le système de ventilation a une grande influence sur la température à l'intérieur du remblai convectif.



Figure 146- Profil horizontal des températures à la surface du sol naturel sous la berme convective en date du 15/02/2011 et du 15/02/2012

La Figure 147 présente l'évolution de la température au centre de la berme convective (hauteur de 0,9 m de la série E) lors du deuxième et du troisième hiver de suivi. À l'hiver 2012, la température à l'intérieur du remblai est stable entre -2,5 °C et -5 °C, entre les mois de décembre et de mai. Ce comportement est significativement différent lors de l'hiver 2011, où la température descend sous -10 °C lors du mois le plus froid de l'hiver. La différence de température maximale entre les deux hivers est d'environ -9 °C. De plus, entre le 20 janvier et le 28 avril, la différence moyenne entre les deux années de suivi est de 4,3 °C. La tendance observée à l'intérieur de la berme convective est donc la même que celle observée à l'interface sol naturel/remblai à l'aide de la série H.



Figure 147- Évolution de la température au centre du remblai convectif (hauteur de 0,9 m) lors du deuxième et du troisième hiver de suivi

L'observation des différentes courbes trompettes a permis d'observer des différences importantes entre les trois années de suivi. Le Tableau 11 résume les observations concernant les profondeurs du plafond du pergélisol, la variation de celui-ci entre chacune des années, ainsi que la variation totale depuis le début du suivi. Entre la première et la deuxième année de suivi, le plafond du pergélisol a remonté dans les séries de thermistances F, G, F2 et est resté plutôt stable pour la série F5. Entre la deuxième et la troisième année de suivi, le plafond du pergélisol est resté stable pour les séries F et F2, il a descendu pour la série G et a remonté pour la série F5. Par contre, depuis le début du suivi du comportement thermique, le plafond du pergélisol a remonté pour toutes les séries de thermistances. Ces remontées sont de 1,53 m, 1,16 m, 0,53 m et 0,44 m respectivement pour les séries F, G, F2, F5.

Série	F Variation annuelle	G Variation annuelle	F2 Variation annuelle	F5 Variation annuelle
Année de suivi		Épaisseur de la c	couche active (m)	
2009-2010	3,40*	4,05*	4,34	^{6,92*}
2010-2011	1,79	2,12* - 1,97 ↑	3,78	7,00*
2011-2012	1,87 J 0,08↓	2,89* ∫ 0,77↓	3,81 ∫ 0,03 ↓	6,48 J 0,52 T
Variation totale (m)	1,53 ↑	1,16 ↑	0,53 ↑	0,44 ↑

Tableau 11- Profondeurs du plafond du pergélisol ainsi que la variation du plafond du pergélisol depuis le début du suivi du comportement thermique

*= extrapolation linéaire à partir des deux dernières mesures de la série

La Figure 148 présente les courbes trompettes de la série F5 pour la première année de suivi (2009-2010), et la dernière année de suivi (2011-2012). Le régime thermique du sol situé du côté ouest de la piste a considérablement changé depuis le début du suivi. Une diminution importante des températures maximales a été observée durant cette période. La différence des températures maximales atteintes est de 2,9 °C à 1 mètre; de 3,2 °C à 2,0 m; 3,1 °C à 3,0 m; et de 1,9 °C à 4,0 m. La diminution des températures maximales observées est directement reliée à la déviation du ruisseau. La différence des températures est de 2,3 °C à 0,5 mètre. À l'aide de cette figure, il est possible de remarquer que la remontée du plafond du pergélisol n'est pas vraiment importante, même si la différence entre les températures maximales et minimales de la première et de la dernière année de suivi est très importante. La chaleur latente empêche une remontée rapide du plafond du pergélisol, mais si la tendance se maintient, le plafond du pergélisol pourrait migrer vers le haut de façon significative au fil des années à venir.



Figure 148- Courbes trompettes de la série F5 (côté amont) pour la première année de suivi (2009-2010) et la dernière année de suivi (2011-2012) ainsi que la différence de température à différente profondeur

La Figure 149 présente les courbes trompettes de la série F2 pour la première année de suivi (2009-2010), et la dernière année de suivi (2011-2012). La tendance à plus faible profondeur n'est pas facilement perceptible puisqu'elle est davantage influencée par la température de surface. Le régime thermique du sol situé du côté est de la piste a changé depuis le début du suivi. Les températures maximales observées sont plus faibles lors de la dernière année de suivi. À 1 mètre de profondeur, la température maximale atteinte est inférieure de 1,0 °C; à 2 mètres de profondeur, la température maximale atteinte est inférieure de 1,1 °C; et finalement, à 3 mètres de profondeur, la température maximale atteinte est sensiblement la même que lors de la première année.



Figure 149- Courbes trompettes de la série F2 (côté aval) pour la première année de suivi (2009-2010) et la dernière année de suivi (2011-2012) ainsi que la différence de température à différente profondeur

La diminution significative des températures maximales du côté amont (F5) et du côté aval (F2) peuvent être reliée à la déviation du ruisseau. Il est possible de remarquer que la diminution des températures maximales est plus importante du côté amont, ce qui permet d'émettre l'hypothèse que l'eau qui ruisselait dans la vallée réchauffait d'abord le sol du côté amont, puis se refroidit lors de l'écoulement sous la piste d'atterrissage. Une fois du côté aval, l'apport de chaleur causé par le ruissellement était moins important, mais tout de même perceptible. Donc, la déviation du ruisseau a eu un effet plus significatif du côté ouest (amont) que du côté est (aval).

Une diminution des températures minimales était attendue suite à l'ajout du remblai à convection. Ce type de système extrait la chaleur du sol en hiver. Une migration de la courbe des températures minimales vers des températures plus froides aurait dû se produire. Cependant, cette situation n'est pas survenue du côté aval (F2).

Afin de comparer le comportement dans le remblai convectif lors des trois hivers de suivi, divers paramètres ont été comparés. La Figure 150 présente les indices de gel de l'air; les indices de gel à différents emplacements dans le remblai convectif; les températures moyennes hivernales; les températures minimales atteintes; ainsi que les courbes trompettes minimales pour les hivers 2010 à 2012. Des valeurs comparatives provenant de la station de référence sont également présentées pour des fins de comparaison. Malgré le fait que les indices de gel de l'air augmentent lors des trois

années de suivi, les indices de gel, les températures minimales et les températures moyennes à l'interface entre le remblai convectif et le sol naturel ne suivent pas cette tendance. Les indices de gel à l'interface sol/remblai de l'hiver 2012 sont les plus faibles malgré le fait que l'indice de gel de l'air est le plus élevé. La station de référence permet de remarquer que l'indice de gel, à très faible profondeur (5cm), suit la tendance de l'indice de gel de l'air.

De plus, l'hiver 2012 est le seul à présenter un indice de gel plus faible à l'est du remblai convectif (série G). Lors des hivers précédents, les indices de gel augmentent en direction de l'extrémité est du remblai, soit une augmentation à l'approche de la ventilation. Ceci permet d'émettre l'hypothèse qu'un mauvais fonctionnement de la ventilation aurait eu lieu lors de l'hiver 2012.

Les indices de gel dans le remblai convectif vont dans le même sens que ceux à l'interface sol/remblai, c'est-à-dire que les indices sont plus faibles lors de la dernière année de suivi comparativement aux deux premières.

Les courbes trompettes minimales du sol à faibles profondeurs peuvent être corrélées avec les régimes thermiques à l'interface remblai/sol naturel. Plus les indices à l'interface sol naturel/remblai sont favorables (indice de gel élévé, température hivernale moyenne faible et température minimale faible), plus l'extraction de chaleur est importante et plus le refroidissement du sol naturel est important. Ce refroidissement peut s'observer à l'aide des courbes trompettes.

Hiver 2010



Hiver 2011



Hiver 2012

3308 Neige	°C*jours	Station de référence:
Série E(150 cm)Remblai convectif(90 cm)Série F (0 cm)(0 cm) $-10 - 8 - 6 - 4 - 2$ $173 \circ C^*$ jours $\bar{x}_h = -0, 7 \circ C$ min= $-1, 4 \circ C$ Sol naturel	$ \begin{array}{c} 707 \ ^{\circ}C*jours \\ 576 \ ^{\circ}C*jours \\ \underline{205 \ ^{\circ}C*jours} \\ \overline{x}_{h} = .0,9 \ ^{\circ}C \\ min= -1,8 \ ^{\circ}C \\ \end{array} \xrightarrow{10 \ .8 \ .6 \ -4 \ .2} \left\{ \begin{array}{c} 141 \ ^{\circ}C*jours \\ \overline{x}_{h} = .0,7 \ ^{\circ}C \\ min= -1,3 \ ^{\circ}C \\ \end{array} \right. $	3308 °C*jours Neige <u>PUV_Ref(5 cm)</u> 2668 °C*jours $\overline{x}_h = -13,0$ °C min= -28,1 °C naturel

Figure 150- Indices permettant de commenter le fonctionnement du remblai convectif et indices comparables pour la station de référence

6 Suivi du comportement mécanique de la piste d'atterrissage de Puvirnituq

Tel que mentionné dans la mise en contexte, le suivi de la piste d'atterrissage de Puvirnituq comporte une analyse du comportement mécanique du remblai. Un inclinomètre vertical a été installé au pied du remblai, à l'endroit où des tassements importants avaient été observés depuis quelques années.

Les données sont traitées par le logiciel SAA3D fourni par la compagnie Measurand, constructeur de l'inclinomètre automatisé. La Figure 151 présente la sortie graphique des données inclinométriques enregistrées à Puvirnitug entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012. La section de gauche représente le déplacement cumulatif en fonction de la profondeur. La section supérieure droite représente le déplacement en fonction du temps pour les deux profondeurs ayant subi les déplacements maximaux. Ces profondeurs sont indiquées sur la figure de gauche à l'aide d'une ligne de couleur qui correspond à celle sur la figure de droite. L'évolution des déplacements en fonction du temps à 5,5 m (correspondant à 3,5 m de profondeur dans le sol naturel) et à 7,0 m (correspondant à 5,0 m de profondeur dans le sol naturel) est exposée. Le logiciel permet également d'exporter les données inclinométriques afin de les analyser à l'aide des différents logiciels. Un problème est survenu lors de l'utilisation de l'inclinomètre. Puisque l'intervalle de temps entre chacune des lectures de l'inclinomètre est relativement court et que le délai entre chacun des téléchargements de données est long, soit une fois par année, les lectures les plus anciennes sont remplacées par les plus récentes, dues à un manque de mémoire du système d'acquisition. Il y a donc trois périodes où les données ne sont pas disponibles, soit entre novembre 2009 et janvier 2010, entre novembre 2010 et mai 2011 et finalement entre novembre 2011 et mai 2012. Par contre, les données recueillies couvrent la période de dégel ainsi que le dégel maximal, soit l'intervalle de temps où des déplacements importants sont les plus propices de survenir. Les différentes séries de données peuvent cependant être collées l'une à l'autre. Sur la section supérieure droite de la Figure 151, ces intervalles où les données sont manquantes sont représentés par des traits continus de couleur vert ou jaune.



Filter[PreFilt,days,z]=[0, 0,0],Ref=Near,Dir,XupYleft,AzOffset=-90,[1-34474]/34474 Frames,OpenGL=ON

Figure 151- Sortie graphique des données inclinométriques enregistrées à Puvirnituq entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012

Les déplacements cumulatifs en fonction de la profondeur en date du 26 septembre 2009, du 26 septembre 2010, du 25 septembre 2011 et du 26 septembre 2012 sont présentés à la Figure 152. Cette figure permet d'observer que les principaux mouvements s'effectuent principalement à trois endroits, soit dans le centre du remblai convectif (1,0 mètre), entre 2,5 et 4,0 m de profondeur et entre 4,5 et 6,5 m de profondeur. Il est à noter que ces deux derniers mouvements s'effectuent dans des directions opposées. Finalement, les mouvements observés à une profondeur entre 7 et 14 mètres sont probablement dû au fluage du sol qui est partiellement gelé.



Figure 152- Déplacement en fonction de la profondeur en date du 26 septembre 2009, du 26 septembre 2010, du 25 septembre 2011 et du 26 septembre 2012

Le mouvement général qu'on observe lors des trois années de suivi ne s'apparente pas à un mouvement d'initiation d'une rupture sous le remblai (voir la Figure 153 a), mais plutôt à un mouvement de compression verticale (voir la Figure 153 b). Il semble se produire une consolidation de la couche de silt argileux dégelée résultant de l'augmentation de la contrainte verticale, causée par la construction du remblai convectif au-dessus du sol instrumenté. Considérant que l'inclinomètre était initialement rectiligne et considérant sa géométrie à la fin de la période de suivi (suite au flambage), le tassement total qui se serait produit dans la couche de silt argileux serait d'environ 10,8 mm. La charge ajoutée par le remblai à convection est estimée à 40 kPa, ce qui est suffisant pour causer des tassements comme ceux observés.



Figure 153 : a) mouvement anticipé en cas de rupture sous le poids du remblai et b) mouvement observé

La Figure 154 présente le déplacement relatif lors de chacune des années de suivies, soit l'année de suivi 1 (Figure 154 a); l'année de suivi 2 (Figure 154 b); et l'année de suivi 3 (Figure 154 c). D'abord, il est possible de remarquer que les plus grands déplacements se sont produits lors de la première année de suivi. Les déplacements maximaux se sont produits à 3,5 et 5,0 m de profondeur, avec des déplacements respectifs de 26 mm et de 38 mm. Les déplacements observés lors de la deuxième année de suivi sont de plus faible amplitude, soit un déplacement maximal de 16 mm observé à 2,5 m de profondeur. Un déplacement maximal de 27 mm a été observé à 2,5 m de profondeur lors de la troisième année de suivi. Les déplacements sont relativement importants à des profondeurs comprises entre 2,5 et 3,5 m, mais sont pratiquement nuls à partir de 4,5 m. Les déplacements de suivi ont tous la particularité de se produire dans des directions différentes selon la profondeur. Ils sont donc tous interprétés comme des mouvements de compression verticale. Le fait que le mouvement se produise relativement rapidement suite à la construction et qu'il se stabilise par la suite tend à confirmer l'hypothèse d'une consolidation de la couche d'argile.



Figure 154- Déplacement lors de a) année de suivi 1 (septembre 2009 à septembre 2010); b) année de suivi 2 (septembre 2010 à septembre 2011); c) année de suivi 3 (septembre 2011 à septembre 2012)

La Figure 155 présente le déplacement de la section supérieure de l'inclinomètre par rapport à la section inférieure de celui-ci. Le déplacement est d'environ 8,5 mm depuis l'installation de l'inclinomètre, ce qui est très minime. Cette observation écarte à nouveau un mouvement d'initiation d'une rupture sous le remblai tel que présenté à la Figure 153 a).



Figure 155- Déplacement de la section supérieure de l'inclinomètre par rapport à la section inférieure de celui-ci

La Figure 156 présente l'évolution du déplacement relatif à 3,5 m de profondeur ainsi que la température à la profondeur correspondante entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012. Il n'est pas possible de faire une corrélation directe entre la température (donnée par les thermistances de la série F2) et les déplacements observés. Les déplacements survenant à 3,5 m de profondeur entre le début juillet et le début septembre 2010 et 2012 ne sont pas directement associés à une augmentation de la température du sol. La température du sol à cette profondeur est légèrement sous 0°C lorsque ces déplacements se produisent. Puis, lorsque la température augmente au-dessus de 0°C, les déplacements sont de moindre amplitude, ou inexistants. Les déplacements à cette profondeur sont peut-être associés au dégel du sol plus en surface. Les déplacements observés ne sont pas compromettants pour l'infrastructure puisqu'ils sont modestes, à faibles profondeurs et se produisent à un rythme lent. Finalement, il est possible d'affirmer que ce n'est pas la température qui gouverne le tassement.



Figure 156-Évolution du déplacement relatif à 3,5 m de profondeur ainsi que la température à la profondeur correspondante entre le 25 septembre 2009 et le 2 octobre 2012
7 Simulations numériques

7.1 Introduction

Ce chapitre prend en compte une situation hypothétique dans laquelle aucuns travaux de construction n'auraient été entrepris pour stabiliser le remblai de la piste du point de vue thermique et mécanique. Il est important de mentionner que le risque d'instabilité du remblai de la piste de Puvirnituq était un problème post-construction. En hiver, de la neige s'accumulait en bordure du remblai (Figure 157 a). Cette accumulation a causé une dégradation du pergélisol sous le pied du remblai. À la base de la couche active, une augmentation de la pression interstitielle était susceptible de se produire dans la couche de sol en dégel. Un cercle de rupture aurait éventuellement pu se développer dans cette couche de sol présentant une résistance au cisaillement plus faible, suite à une dégradation importante du pergélisol (Figure 157 b).



Figure 157- Problème possible d'instabilité du remblai causé par la dégradation du pergélisol en bordure du remblai

La géométrie du pergélisol évolue dans le temps puisque le front de dégel se déplace en fonction des conditions de surface. Dans le but de décrire l'évolution de ce front de dégel et de déterminer si un cercle de rupture peut potentiellement se former, une modélisation thermique du remblai a été réalisée. La Figure 158 présente les étapes de la modélisation thermique du pergélisol à l'aide du logiciel TEMP/W, qui permettront ensuite de réaliser une analyse de stabilité, à l'aide du logiciel SLOPE/W. La première étape consistera à

appliquer des cycles de température et de couverture de neige aux conditions prévalant immédiatement suite à la construction du remblai de la piste d'atterrissage. Cette simulation permet de recréer le bulbe de dégel tel qu'observé à l'aide du MASW en 2009 réalisé avant l'élargissement de la piste (Figure 40). Cette étape est également appelée la calibration. L'obtention de cette géométrie permet de valider les propriétés thermiques des sols utilisées dans le modèle ainsi que les cycles de température et de couverture neigeuse.

L'évolution du pergélisol lors des 20 prochaines années peut alors être simulée. Cette analyse permettra de déterminer le taux de dégel ainsi que la géométrie du pergélisol pour différents intervalles de temps. Ces deux facteurs seront introduits dans l'analyse de stabilité.



Figure 158- Étapes de la modélisation thermique du pergélisol à l'aide du logiciel TEMP/W

7.2 Propriétés des matériaux et géométrie du remblai

Afin de réaliser les simulations numériques, des propriétés thermiques et mécaniques ont été assignées aux différentes couches de sol. Une stratigraphie simplifiée, semblable à celle décrite à partir du sondage PUV_F2 présenté dans le rapport final *Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik* (L'Hérault et al., 2012) a été utilisée lors de ces simulations numériques. La Figure 159 présente la géométrie, la stratigraphie, ainsi que l'étendue de la simulation.

Dans cette étude réalisée par le Centre d'étude nordique, 8 des 13 infrastructures aéroportuaires du Nunavik ont fait l'objet d'une investigation géotechnique et d'une caractérisation approfondies du pergélisol. Cette étude avait pour but d'élaborer une stratégie d'adaptation des infrastructures aéroportuaires dans un contexte de changements climatiques afin d'assurer la pérennité des infrastructures et la sécurité des usagers. Afin de répondre à cet objectif, des simulations numériques ont été réalisées pour prédire l'évolution du front de dégel au cours des prochaines années. Sept pistes d'atterrissage ont fait l'objet de simulation, soit celles des villages d'Umiujaq, d'Inukjuak, d'Akulivik, de Salluit, de Quaqtaq, de Kangirsuk et de Tasiujaq.



64,0 m

Figure 159- Stratigraphie et géométrie de la simulation numérique

7.2.1 Propriétés thermiques des matériaux

Le sol organique présent en bordure de la piste n'a pas fait l'objet de caractérisation lors de l'étude géotechnique. Des propriétés thermiques caractéristiques de tourbes en milieu arctique ont été utilisées (Romanovsky & Osterkamp, 1997, 2000). Ces études portaient principalement sur le dégel de la couche active ainsi que sur l'effet de l'eau non gelée dans cette couche active. Les valeurs présentes dans le Tableau 12 sont semblables à celle des sites Deadhorse et Barrow, en Alaska. Ces deux sites ont été choisis en fonction de leur ressemblance avec la tourbe présente à Puvirnituq. La courbe de teneur en eau non gelée en fonction de la température utilisée dans la modélisation provient également de la deuxième de ces études.

ChaleStratigraphieK		spécifique n ³ /°C	Condu KJ/jou	ıctivité ır/m/°C	Teneur en eau vol.
	Gelé	Non-gelé	Gelé	Non-gelé	(m^{3}/m^{3})
1- Sol organique ^a	1500	3000	120	50	0,65
2- Neige ^b	0	120000	180,84	-	1
3- Remblai ^c	2000	2500	150	160	0,05
4- Sable fin ^c	2300	3300	250	120	0,20
5- Silt et argile ^c	2000	3400	290	200	0,35
6- Sable moyen à grossier ^c	1800	3000	340	230	0,10
7- Sable silteux ^c	2200	3000	250	240	0,15

Tableau 12- Propriétés thermiques des matériaux utilisés pour la simulation

^a (Konovalov & Roman, 1973; Romanovsky & Osterkamp, 1997, 2000)

^b (Andersland & Ladanyi, 2004)

^c (L'Hérault et al., 2012)

Dans la simulation numérique, lorsque la température de l'air descend sous 0°C, une couche de neige est ajoutée au modèle. Ce couvert neigeux disparaît lorsque la température redevient supérieure à 0°C. Le couvert de neige introduit dans le modèle a une pente de 6H : 1V à partir du sommet du remblai. Cette pente est une estimation réaliste basée sur les relevés d'accumulation de neige effectués par le MTQ, en hiver. Il est important de mentionner que le couvert neigeux apparaît et disparaît instantanément lorsque le seuil 0°C est dépassé. Des propriétés thermiques caractéristiques pour une neige dans un état entre lâche et compact ont été assignées à la neige, à l'aide du tableau 2-11 du livre *Frozen Ground Engineering* (Andersland & Ladanyi, 2004), voir Tableau 12.

Les propriétés thermiques (chaleurs spécifiques et conductivités thermiques) des matériaux 3 à 7 proviennent du rapport final *Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik* (L'Hérault et al., 2012), voir Tableau 12. Les valeurs des propriétés thermiques des sols utilisés pour Puvirnituq ont été estimées à l'aide des valeurs utilisées dans les simulations du Centre d'études nordiques. Les teneurs en eau proviennent des essais de laboratoire réalisés dans le cadre de l'investigation géotechnique et de la caractérisation du pergélisol (Allard, Doré, L'Hérault, Sarrazin et al., 2009). Par contre, les courbes de teneur en eau en fonction de la température ont été déterminées à l'aide du logiciel TEMP/W, où des courbes caractéristiques pour différents types de matériaux sont disponibles.

Le remblai de la piste d'atterrissage de Puvirnituq est composé principalement de roc concassé. Ce matériau se retrouve également sur plusieurs pistes d'atterrissage du Nunavik. Les valeurs de la piste d'Inukjuak ont été utilisées dans le cadre de cette simulation en raison de sa proximité avec l'aéroport de Puvirnituq. Les propriétés thermiques du sable fin sont également celles de l'aéroport d'Inukjuak, où un type de sol similaire se trouve en bordure de la piste d'atterrissage.

Les propriétés thermiques des silt et argile, du sable moyen à grossier et du sable silteux sont basés sur les valeurs des différentes couches stratigraphiques du sol en bordure de la piste de Tasiujaq. Ces sols sont ceux qui représentent le mieux ceux rencontrés à l'aéroport de Puvirnituq.

7.2.2 Propriétés mécaniques des sols

Afin de réaliser une étude de stabilité, des propriétés mécaniques caractéristiques ont été assignées aux différentes couches de sols, à partir du livre *Soil Mechanics and Foundations* (Budhu, 2011). La neige et la tourbe ont été exclues de l'étude de stabilité puisque ces deux éléments, composant la stratigraphie du modèle thermique, ont peu d'influence sur le comportement mécanique du remblai.

Un type de matériau a été ajouté pour l'étude de stabilité, il s'agit du pergélisol. Ce type de matériau correspond à un état des sols, plutôt qu'à une composition spécifique. Ainsi, tous les types de sols peuvent être caractérisés par les propriétés mécaniques du pergélisol, si leur température est inférieure à 0°C. L'utilisation de ce type de matériaux (impénétrable) peut modifier la forme du cercle de rupture. Le cercle de rupture peut glisser sur ce type de matériaux au lieu d'être tangent. Cette situation peut être représentative de la réalité puisque la couche à l'interface entre le pergélisol et le sol nongelé est susceptible d'avoir la résistance au cisaillement la plus faible. Il est donc possible que le cercle de rupture se forme dans cette couche qui suit la forme du matériau impénétrable. Dans cette situation, le cercle de rupture ne serait pas tangent au pergélisol.

Afin de simplifier l'analyse, les couches stratigraphiques 5 à 7 (silt et argile, sable moyen à grossier et sable silteux) ont été regroupées. En condition drainée, ces matériaux ont des propriétés mécaniques semblables. Ce regroupement limite les points d'interceptions des différentes couches avec le pergélisol qui a une forme particulière. Le Tableau 13 présente les propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans l'étude de stabilité.

Type de sol	Modèle de sol	Poids	Cohésion	Phi
		volumique	(kPa)	(°)
		(kN/m^3)		
3- Remblai	Mohr-	22	0	40
	Coulomb			
4- Sable	Mohr-	17	0	35
	Coulomb			
5 à 7- Silt et argile à	Mohr-	16	0	32
sable silteux	Coulomb			
Pergélisol	Bedrock	-	-	-
	(Impenetrable)			

Tableau 13- Propriétés mécaniques des matériaux utilisés pour l'étude de stabilité à l'aide du logiciel SLOPE/W

7.3 Conditions initiales, maillage et calibration du modèle

7.3.1 Conditions initiales et maillage

À la surface du modèle, la température de l'air est imposée. Des capteurs installés en bordure de piste permettent d'obtenir la température horaire depuis le mois de juillet 2005. Les données provenant de l'intervalle entre juillet 2005 et juillet 2011, ont été utilisées afin de calibrer le modèle géothermique, voir la Figure 160. Ces données sont représentatives de la période suivant la construction de la piste d'atterrissage, jusqu'aux travaux de construction qui ont eu lieu en 2009. Une température moyenne journalière a été utilisée afin de simplifier le modèle. Puisque cette calibration s'est effectuée sur une durée de 19 ans, le cycle de 6 ans a été utilisé en boucle.



Figure 160- Température de l'air en fonction du temps utilisée pour la calibration de la simulation

En été, la région représentant la neige est désactivée et la température de l'air s'applique directement sur le sol, représentée par la ligne rouge sur la Figure 161 a). En hiver, les éléments composant la couche de neige sont activés et la température de l'air est appliquée à la surface telle que présentée sur la Figure 161 b).



Figure 161- Conditions initiales du modèle et maillage a) en été b) en hiver

Des conditions initiales correspondant à celles prévalant immédiatement suite à la construction du remblai sont imposées au modèle. Le plafond du pergélisol a été estimé à 2,0 m de profondeur, en été, ce qui correspond à la profondeur de l'interface entre le sable fin et le silt et argile. Une condition initiale de 0 °C à 2,0 m de profondeur est donc imposée au modèle, représentée par la ligne bleue sur la Figure 161 a).

Une condition a également été imposée à la limite inférieure du modèle. Une température constante de -2,4 °C a été assignée au modèle, représentée par une ligne verte sur les

Figure 161 a) et b). Cette température est représentative des conditions prévalant à cette profondeur, d'après les températures observées à l'aide de la série F2.

Un maillage fin a été généré dans les couches supérieures et un maillage plus grossier a été généré dans les couches profondes du modèle. Les couches superficielles subissent des variations de température plus importantes que celle en profondeur. Un maillage plus fin en surface permet donc d'augmenter la précision dans ces couches. En tout, 1394 éléments sont composés à l'aide de 1442 nœuds. Le détail de ces nœuds et de ces éléments sont présentés à la Figure 161 a) et b).

7.3.2 Résultat de la calibration

La simulation a été réalisée sur une période de 19 ans, soit la période entre la construction de la piste d'atterrissage (1990) et les travaux d'agrandissement et de stabilisation (2009). Les résultats du MASW et la série de thermistances F2 donnent des informations sur le plafond du pergélisol au moment où des travaux d'agrandissement ont été réalisés. Ces informations ont permis de calibrer le modèle. Le résultat de la simulation thermique, ainsi que le plafond du pergélisol déterminé à l'aide du MASW et de la série F2 sont présentés à la Figure 162. Le dégel obtenu grâce à la simulation s'étend plus à l'est par rapport à celui observé par le MASW. Cette différence peut s'expliquer par le fait que dans la simulation, une couverture de neige complète est appliquée lorsque la température de l'air descend sous 0 °C, ce qui représente une simplification de la réalité. En hiver, la hauteur du couvert neigeux augmente au fil des précipitations et la neige s'accumule d'abord directement en bordure du remblai. Le couvert neigeux complet peut être atteint beaucoup plus tard que celui imposé dans la simulation. L'effet isolant de la neige empêche donc l'extraction de chaleur du sol dans la zone la plus éloignée du remblai.

Par contre, la profondeur du bulbe de dégel simulé au pied du remblai est très acceptable. Il se trouve entre celui déterminé par le MASW et celui déterminé par la série F2. Il est important de mentionner que le MASW donne le plafond du pergélisol à l'aide de l'état du sol (vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s) et non à l'aide de la température, contrairement à la série F2. La simulation donne donc un résultat qui se situe entre le plafond du pergélisol déterminé à l'aide de la température et le plafond du pergélisol déterminé à l'aide de la température et le plafond du pergélisol déterminé à l'aide de la température et le plafond du pergélisol déterminé par l'état du sol.



Figure 162-Résultat de la simulation thermique ainsi que le plafond du pergélisol déterminé à l'aide du MASW et de la série F2

7.3.3 Évolution future de la température de l'air

Le résultat de la simulation précédente a été utilisé comme point de départ pour simuler l'évolution future du plafond du pergélisol, en considérant les conditions initiales de construction, c'est-à-dire sans les travaux d'agrandissement et de stabilisation effectués en 2009. Les conditions thermiques résultant de cette analyse sont donc les conditions initiales pour la simulation thermique du pergélisol, entre 2010 et 2030.

Afin de réaliser une simulation réaliste, une valeur moyenne d'augmentation de la température de l'air a été ajoutée. Pour l'aéroport de Puvirnituq, le changement de température de l'air projeté pour l'horizon 2050 est de +3,1 °C (L'Hérault et al., 2012). Cette valeur correspond à la moyenne des six sorties de température de l'air provenant du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC). Un scénario de gaz à effet de serre pessimiste, le scénario A2 ((Nakicenovic et al., 2000) cité par (L'Hérault et al., 2012)), a été utilisé pour toutes ces sorties. La condition imposée à la limite inférieure du modèle et le maillage utilisé pour l'évolution future du pergélisol sont les mêmes que ceux utilisés lors de la calibration.

7.4 Résultats de l'évolution future du plafond du pergélisol

La Figure 163 présente les résultats de la simulation thermique en bordure du remblai de Puvirnituq. Cette figure reprend de façon schématique les résultats obtenus à l'aide du logiciel TEMP/W. La ligne bleue représente le plafond du pergélisol simulé pour l'année 2030. Il est important de mentionner que la simulation obtenue pour l'année 2030 est représentative des conditions initiales de construction, c'est-à-dire sans les travaux d'agrandissement et de stabilisation effectués en 2009. Cette simulation montre que le dégel du sol dans le bulbe de dégel est pratiquement symétrique. Durant la période de 20 ans, le dégel s'accentue d'environ 1,0 mètre sous le bulbe de dégel et de 0,25 à 0,5 m dans le remblai et le terrain naturel. De plus, la simulation permet de remarquer que le dégel s'effectue de façon constante au cours des années, soit environ 0,05 mètre additionnels par année.



Figure 163- Résultat de l'évolution future du pergélisol

7.5 Délai et taux de dégel à la base de la couche active

La Figure 164 permet d'estimer le temps pendant lequel la température du sol, près de l'interface pergélisol/sol dégelé, augmente avant de diminuer. Ces observations sont réalisées à l'aide de la série de thermistances F2. Cette figure donne des indications sur le temps que dure le dégel à cette profondeur. À 3 mètres de profondeur, le dégel se produit sur une période variant entre 30 à 35 jours selon l'année observée.



Figure 164- Estimation du temps de dégel au front de dégel

La simulation a permis de déterminer l'épaisseur de sol en dégel lors de chaque été, et les observations réalisées à l'aide de la série de thermistances F2 ont permis d'estimer la durée de ce dégel. Il est donc possible de calculer le taux de dégel à la base de la couche active à l'aide de la formule [2-6].

Épaisseur	Temps de	Temps de	$\sqrt{\text{Temps de dégel}}$	Taux de dégel
dégelée	dégel	dégel (s)	(s ^{1/2})	α
(m)	(Jours)			(m/s^{2})
0,05	30	2 592 000	1 610	3,106 x 10 ⁻⁵
0,05	35	3 024 00	1 739	2,875 x 10 ⁻⁵

7.6 Coefficient de consolidation C_v

Puisqu'aucun échantillon gelé n'a été récupéré à Puvirnituq, aucun essai de consolidation au dégel n'a pu être effectué. Afin d'estimer un coefficient de consolidation, les résultats d'un essai de consolidation au dégel d'un silt argileux de Salluit (SAL_F6_290_304) ont été utilisés (Figure 165). Parmi les échantillons sur lesquelles des essais de consolidation au dégel ont été réalisés, celui de Salluit est le plus représentatif du silt argileux de Puvirnituq. Le drainage de l'échantillon s'effectuait uniquement par le haut, la longueur de drainage égale donc la hauteur moyenne de l'échantillon durant l'essai. À l'aide de la méthode de Casagrande, il est possible de déterminer le coefficient de consolidation ;

$$C_{v} = \frac{TH_{dr}^{2}}{t} = \frac{T_{50}H_{dr}^{2}}{t_{50}} = \frac{0.197 \ (126.27 \ mm)^{2}}{9060 \ s} \ x \ \frac{(1m^{2})}{(1x10^{6}mm^{2})} = 3.5 \ x \ 10^{-7} \frac{m^{2}}{s}$$



Figure 165- Résultats d'un essai de consolidation au dégel d'un silt argileux de Salluit, prélevé au forage SAL_F6_290_304 en 2008

7.7 Détermination de la pression interstitielle

La Figure 166 présente, de façon schématique, la situation au front de dégel. À la fin de l'hiver, la température du sol à faible profondeur descend sous zéro, mais une partie du sol demeure près de 0 °C. Lors du dégel maximal, le sol à faible profondeur dégel. Le front de dégel progresse ensuite dans la partie supérieure du pergélisol. La pression interstitielle à cette interface doit être déterminée.



Figure 166- Schéma de la situation au front de dégel a) à la fin de l'hiver b) au dégel maximal

La simulation thermique précédente a permis d'estimer une progression du front de dégel. À l'aide du coefficient de consolidation du silt argileux de Salluit, il est possible de déterminer l'indice de dégel consolidation R (Tableau 14).

Taux de dégel calculé à l'aide de la modélisation α (m/s ^{1/2})	Coefficient de consolidation $C_v (m^2/s)$	Indice de dégel consolidation R
3,106 x 10 ⁻⁵ (30 jours)	3,5 x 10 ⁻⁷	0,026
2,875 x 10 ⁻⁵ (35 jours)	3,5 x 10 ⁻⁷	0,024

Tableau 14- Détermination de l'indice de dégel consolidation R

Ces indices R sont très faibles et n'indiquent pas la génération de surpression interstitielle à l'interface sol gelé/sol dégelé. Il est important de mentionner que ces indices R sont spécifiques à la situation présentée à la Figure 166, c'est-à-dire lorsqu'il reste une couche de sol non-gelée au-dessus du pergélisol.

7.8 Résultats des simulations - SLOPE/W

Cinq scénarios ont été simulés à l'aide du logiciel SLOPE/W, soit :

- un scénario avec la géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour l'année 2009;
- un scénario avec la géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour l'année 2030;
- un scénario avec la géométrie obtenue à l'aide du MASW;
- un scénario avec la géométrie initiale du MASW tenant compte de la progression du front de dégel;
- un scénario avec une géométrie fictive comportant des surpressions interstitielles importantes.

Les propriétés des matériaux utilisés dans chacun des scénarios ont été présentées à la section 7.2.2.

Les différentes analyses de stabilité sont de type Morgenstern-Price qui satisfait à la fois l'équilibre des moments et des forces. Les zones d'entrée et de sortie des cercles de ruptures ont été imposées dans l'analyse. L'option *«optimize critical slip surface location»* a été utilisée. Cette option permet d'obtenir un facteur de sécurité optimisé en modifiant la forme du cercle de rupture. La forme du cercle de rupture change dans les matériaux granulaires où la rupture est droite et non circulaire. La différence de facteur de sécurité avec et sans cette option est présentée à l'aide du scénario 1.

7.8.1 Scénario 1- Géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour l'année 2009

Le premier scénario utilise la géométrie obtenue pour l'année 2009 à l'aide de la modélisation thermique (Figure 163). Aucune pression interstitielle en excès n'a été imposée à l'interface sol gelé/sol dégelé suivant les résultats de l'indice R. Des conditions de nappe phréatique à la surface du terrain naturel et légèrement au-dessus du pergélisol dans le remblai en matériaux granulaire ont été introduites dans l'analyse. Le résultat de l'étude de stabilité donne un facteur de sécurité de 1,422 avec l'option *«optimize critical slip surface location»* (Figure 167) et 1,509 sans l'option *«optimize critical slip surface location»* (Figure 168). Il est possible de remarquer que le cercle de rupture (en vert) atteint à peine la couche de silt argileux avec l'option *«optimize critical slip surface location»* et n'atteint pas la couche de silt argileux sans l'option *«optimize critical slip surface location»*. De plus, la remontée du pergélisol dans le remblai semble favoriser la stabilité de celui-ci, puisque le cercle de rupture ne peut traverser le pergélisol. La profondeur et la dimension du glissement en sont donc grandement diminuées.





Figure 167- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour l'année 2009 avec l'option *«optimize critical slip surface location»*



Figure 168- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour l'année 2009 sans l'option *«optimize critical slip surface location»*

7.8.2 Scénario 2- Géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour l'année 2030

Le deuxième scénario utilise la géométrie obtenue pour l'année 2030 à l'aide de la modélisation thermique (Figure 163). Aucune pression interstitielle en excès n'a été imposée à l'interface sol gelé/sol dégelé Des conditions de nappe phréatique à la surface du terrain naturel et légèrement au-dessus du pergélisol dans le remblai en matériaux granulaire ont été introduites dans l'analyse. Le résultat de l'étude de stabilité donne un facteur de sécurité de 1,365 (Figure 169). Le facteur de sécurité a légèrement diminué, mais demeure élevé. Il est encore possible de remarquer que la dimension du cercle de

rupture est limitée par la remontée du pergélisol dans le remblai de la piste. Le cercle de rupture optimale atteint uniquement la partie supérieure du silt argileux.



Figure 169- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie obtenue à l'aide de la simulation thermique pour l'année 2030

7.8.3 Scénario 3- Géométrie obtenue à l'aide du MASW

Le troisième scénario prend en compte la géométrie du pergélisol observée à l'aide du MASW, en 2009. Cette géométrie est semblable à celle obtenue à l'aide de la modélisation, mais la largeur du bulbe de dégel est moins importante. Des conditions de nappe phréatique à la surface du terrain naturel et légèrement au-dessus du pergélisol dans le remblai en matériaux granulaire ont été introduites dans l'analyse. Le résultat de l'étude de stabilité est présenté à la Figure 170. Le facteur de sécurité obtenu est de 1,528, ce qui est légèrement supérieur à celui obtenu à partir de la géométrie modélisée. La forme du cercle de rupture est similaire, c'est-à-dire qu'il est peu profond et qu'il est limité par la géométrie du pergélisol dans le remblai. La faible différence entre les facteurs de sécurité (géométrie simulée et géométrie MASW) peut être expliquée par la forme que prend le pergélisol dans le remblai.



Figure 170- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie obtenue à l'aide du MASW

7.8.4 Scénario 4- Géométrie initiale du MASW tenant compte de la progression du front de dégel

Le quatrième scénario tient compte de l'évolution modélisée du front de dégel qui progresse d'environ 1 mètre, entre 2010 et 2030, sous le bulbe de dégel et de 0,25 à 0,5 m dans le remblai et le terrain naturel. Un mètre de dégel a donc été ajouté à la géométrie du pergélisol, déterminée à l'aide du MASW en 2009, pour ainsi obtenir la géométrie projetée du pergélisol pour 2030. Aucune pression interstitielle en excès n'a été imposée à l'interface sol gelé/sol dégelé. Des conditions de nappe phréatique à la surface ont été introduites dans l'analyse. Le résultat de l'étude de stabilité donne un facteur de sécurité de 1,494 (Figure 169). Le cercle de rupture suit la forme du pergélisol. Des cercles de ruptures comme celui-ci ont été observés dans tous les autres analyses. Cependant, c'est seulement dans ce scénario que le cercle de rupture ayant le plus faible facteur de sécurité a une forme qui n'est pas tangent au pergélisol. Encore une fois, l'agrandissement du bulbe de dégel n'a pas une influence majeure sur le facteur de sécurité a très peu diminué entre 2009 et 2030.



Figure 171- Résultat de l'étude de stabilité avec la géométrie projetée du pergélisol pour 2030

7.8.5 Scénario 5- Géométrie fictive comportant des surpressions interstitielles importantes

Un dernier scénario a été simulé afin de connaître l'effet de possibles pressions interstitielles en excès sur le facteur de sécurité avant la formation d'une couche non gelé en permanence. Une géométrie fictive représentant le début de la formation du bulbe de dégel a été utilisée. Dans ce scénario, le dégel atteint 2 mètres de profondeur dans la couche de silt et argile, soit un dégel d'une profondeur totale de 4 mètres. Le sable ajoute une contrainte sur la couche de silt et argile en dégel. Des pressions interstitielles en excès ont été introduites dans l'analyse de stabilité, à l'aide d'une fonction spatiale de type «Pressure head». Cette fonction permet d'imposer une pression interstitielle à l'interface sol gelé/dégelé et de la faire diminuer de façon linéaire jusqu'à un autre point où la pression interstitielle est imposée. La Figure 172 présente la suppression interstitielle imposée dans le bulbe de dégel.



Figure 172- Suppression interstitielle imposée dans le bulbe de dégel

La surpression interstitielle à l'interface de sol en dégel a été modifiée jusqu'à l'obtention d'un facteur de sécurité égale à 1. Pour obtenir un facteur de sécurité de 1, la surpression

interstitielle à l'interface de sol en dégel doit être de 52 kPa. Le résultat de l'étude de stabilité avec une surpression interstitielle importante est présenté à la Figure 173.



Figure 173- Résultat de l'étude de stabilité avec une surpression interstitielle à l'interface de sol en dégel équivalente à 52 kPa

À l'aide de la formule [2-7], il est possible d'obtenir l'indice R nécessaire pour qu'une telle situation survienne. Lorsque le sol dégèle jusqu'à une profondeur de 4 mètres (soit 2 mètres dans la couche de silt et argile), l'indice R doit être de 1,4 pour obtenir une surpression interstitielle de 52 kPa.

Un indice R de 1,4 est très élevé. Pour atteindre une telle valeur, la couche de silt et argile située entre 2 et 4 mètres de profondeur doit dégeler en 17 jours, ce qui est beaucoup plus rapide que le dégèle attendu à cette profondeur. Lors du suivi du comportement thermique de la piste de Puvirnituq, la température à 4 mètres de profondeur à descendue sous 0 °C lors de la première année de suivi et est en constante diminution depuis. Aucune période de dégel complète entre 2 et 4 mètres de profondeur n'a été observée.

Il s'agit de suppressions interstitielles importantes très élevées qui ne sont probablement pas atteignables dans le cas de Puvirnituq. Cette situation permet cependant d'établir les conditions limites auxquelles le remblai est stable pour cette géométrie particulière. Il important de mentionner que ce facteur de sécurité n'est représentatif que pour cette géométrie du pergélisol.

8 Discussion

8.1 Suivi thermique du remblai de la piste de Puvirnituq

Les remblais à convection d'air ont été instrumentés de façon à faire un suivi détaillé du comportement à l'intérieur du remblai ainsi que dans le sol naturel. La température de l'air en bordure de piste est également disponible. Puisque le projet de Puvirnituq est un projet pilote, aucune section témoin n'a été construite. Par contre, il est possible de comparer les trois années de comportements thermiques entre elles, ou avec des comportements typiques provenant de la littérature, ou d'autres sites d'essais tels que Tasiujaq et Beaver Creek. Il a été possible de faire des observations sur l'impact de la déviation du ruisseau, sur le fonctionnement du remblai à convection ainsi que sur la remontée du pergélisol.

8.1.1 Déviation du ruisseau

La déviation du ruisseau a été réalisée dans l'année suivant la construction du remblai et l'installation de l'instrumentation, soit en 2010. Cette chronologie des évènements a permis de bien qualifier l'ampleur du changement de régime thermique, spécialement du côté amont. Il a été observé que l'eau qui s'écoulait dans la vallée, transférait de la chaleur par convection au sol naturel. Suite à la déviation du ruisseau, le type de transfert de chaleur dans le sol a été modifié de convectif à conductif. La gestion de l'eau est un problème majeur lié à l'ingénierie des infrastructures de transport construit sur pergélisol. Une attention particulière doit être apportée à cet élément lors de la conception d'ouvrage. Plusieurs problèmes peuvent être évités avec une bonne gestion des eaux de drainage.

Lorsque les ouvrages sont déjà construits, des correctifs peuvent être apportés afin de limiter les dommages. Ce type de problème est connu et le ministère des Transports du Québec y accorde une grande importance. C'est dans cette optique que plusieurs pistes d'atterrissage ont, ou feront, l'objet de stratégies d'adaptation.

8.1.2 Fonctionnement et effet du remblai à convection d'air

Le remblai à convection a comme fonction principale la formation de cellule de convection dans le remblai, et l'augmentation de l'extraction de chaleur du sol. Trois questions peuvent être posées afin de commenter l'utilisation du remblai à convection dans le remblai de la piste d'atterrissage de Puvirnituq. Est-ce qu'il y a de la convection dans le remblai à convection et dans la berme convective? Si oui, où et quand a eu lieu cette convection? Et finalement, quel est l'effet de cette convection sur les conditions de pergélisol (remonté du plafond du pergélisol ou non)?

D'abord, une série de thermistance a permis de remarquer, de façon claire, la présence de convection dans le remblai. Il s'agit de la série de thermistance D, située en milieu de talus du côté est (côté de la berme) de la piste. Cette série est la seule à avoir montré un gradient de température nul ou inverse. Il est donc possible d'affirmer qu'une convection a eu lieu dans la pente du remblai de la piste. Le suivi a permis de remarquer que la convection a eu lieu durant les trois hivers couverts par le suivi.

Les séries A et B (côtés ouest) et les séries C et E (côtés est) ont toutes montrées des gradients normaux, c'est-à-dire, des températures plus chaudes à la base, comparativement au sommet du remblai qui est refroidit par l'air. Des mouvements convectifs se sont possiblement développés, sans toutefois être suffisamment fort pour modifier le gradient à l'intérieur du remblai. Mais, aucune évidence de convection n'a été observée à l'aide des autres séries de thermistances installées dans les remblais convectifs.

Finalement, l'effet de cette convection sur la température du sol naturel est difficile à déterminer. D'abord, les séries de thermistances directement en contact avec le sol, n'ont montré aucun signe de convection évident. La température du sol naturel à ces endroits a cependant montré des signes importants de refroidissement au niveau des températures maximales atteintes. Ces bons résultats sont directement associés à la déviation du ruisseau. Par ailleurs, un changement de régime thermique était attendu en hiver, c'est-à-dire des températures minimales inférieures, suite à l'installation du remblai à convection. Une légère diminution des températures a été observée du côté amont, mais pas du côté aval. Toutefois, aucune série de thermistances n'est installée dans le sol naturel, sous la seule série ayant montré des signes évidents de convection (série D). Il n'est donc pas possible de voir l'effet de cette convection sur la température du remblai de la piste qui est sous-jacent à cette série de thermistance. La série de thermistance H, à l'interface entre le sol naturel et le remblai convectif, a montré une entrée d'air froid dans le remblai convectif par le système de ventilation lors de l'hiver 2011.

8.1.3 Remontée du plafond du pergélisol

Une remontée du plafond du pergélisol moyenne de 0,92 m a été observée suite aux trois années de suivi. Cette indication est très importante et confirme que les travaux réalisés ont eu un impact positif sur la température du sol. Tel que mentionné précédemment, les températures maximales atteintes du côté ouest (amont) sont beaucoup moins élevées à la fin du suivi, comparativement aux valeurs maximales observées au début du suivi. Pourtant, cet important changement de régime thermique résulte qu'en une faible remontée du plafond du pergélisol. Une remontée plus importante du pergélisol pourrait possiblement se produire dans les années à venir.

Un autre point important à mentionner est la variation rapide du plafond du pergélisol en fonction des températures à l'interface sol naturel/remblai, pour les séries sous la berme

convective. Il a été possible de remarquer une remontée rapide du plafond suite à la deuxième année de suivi, lorsque les températures atteintes à l'interface sol/remblai ont été plus froides. Par contre, une descente rapide du plafond du pergélisol a été remarquée, suite à la troisième année de suivi, lorsque les températures atteintes à l'interface sol/remblai étaient beaucoup plus chaudes. Il est également important de mentionner qu'aucun lien entre l'indice de gel et la température à l'interface sol/remblai n'est observable.

8.2 Discussion sur le suivi mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq

L'instrumentation installée a très bien fonctionné et a donné des résultats détaillés. L'évolution des déplacements en fonction du temps est très précise, peut-être même trop détaillée pour le système d'acquisition installé, ce qui a causé la perte de certaines données.

Le suivi du comportement mécanique du remblai a permis de déterminer que celui-ci est stable. Les déplacements les plus importants ont été observés immédiatement suite à la construction du remblai convectif et de la berme convective. Les déplacements observés sont associés à un mouvement de compression.

Il est possible d'observer en parallèle les déplacements et les températures du sol à différentes profondeurs. Par contre, aucune corrélation n'a été établie entre ces deux paramètres. L'augmentation des températures n'a pas d'influence sur les déplacements observés. Les déplacements les plus importants se produisent lorsque le sol a une température près de 0 °C et non lorsqu'il se réchauffe. Ces mouvements sont dus à la consolidation de la couche de silt et argile. Le remblai demeure bien protégé par le contrepoids mise en place et aucun signe d'instabilité n'a été observé.

L'inclinomètre est un bon indicateur de la stabilité du remblai. Le déplacement de la section supérieure de l'inclinomètre par rapport à la section inférieure de celui-ci est très faible, ce qui écarte l'hypothèse d'un mouvement de rupture.

8.3 Discussion sur la modélisation thermique

La modélisation thermique du remblai de la piste de Puvirnituq a fourni une évolution réaliste du front de dégel. Il s'agit d'une bonne approximation de la progression du plafond du pergélisol, qui aurait pu se produire sans les modifications apportées à la piste d'atterrissage en 2009.

Malgré les bons résultats de cette modélisation, des correctifs pourraient être apportés afin de l'améliorer. D'abord, les propriétés thermiques utilisées proviennent de la littérature, ou d'autres sites au Nunavik. Une caractérisation thermique des sols en place permettrait certainement de raffiner le modèle.

La modélisation ne tient pas compte de l'apport de chaleur par ruissellement qui se produit dans les sédiments de la vallée. Tel qu'observé à l'aide du suivi du comportement thermique, cet apport de chaleur a une influence majeure sur les températures observées. Par contre, du côté est de la piste, l'apport de chaleur se fait principalement dans les deux premiers mètres et n'a peut-être pas le même effet sur l'approfondissement du bulbe de dégel.

La forme que prend le bulbe de dégel lors de la modélisation est plus large que celui observé à l'aide du MASW. Tel que discuté précédemment, lorsque la température de l'air descend sous 0 °C, un couvert de neige complet est ajouté à la modélisation, jusqu'à ce que la température remonte au-dessus de 0 °C. Ceci a pour effet d'isoler une partie du sol plus longtemps qu'il ne l'est en réalité. Si une fonction simulant l'accumulation de la neige au cours de la saison existait, la largeur du bulbe de dégel serait probablement plus petite.

8.4 Discussion sur l'utilisation de l'indice R

L'indice de dégel/consolidation R (représentant l'influence relative du taux à laquelle l'eau est produite par le dégel et le taux auquel elle peut être expulsée du sol dégelé audessus du front de gel) obtenu est très faible puisque la progression du front de dégel est également très faible. Un indice R plus grand que l'unité permet de prédire des pressions d'eau en excès au front de dégel, et une possible instabilité (Morgenstern & Nixon, 1971), ce qui n'est pas le cas pour Puvirnituq. Afin de vérifier la variabilité de l'indice R, différents facteurs affectant cet indice, ont été introduits dans le calcul. Le

Tableau 15 présente la variation de l'indice R et de la pression interstitielle, en fonction de l'épaisseur de sol en dégel. Le Tableau 16 présente la variation de l'indice R et de la pression interstitielle en fonction du temps de dégel. Puis, le Tableau 17 présente la variation de l'indice R et de la pression interstitielle, en fonction du coefficient de consolidation. Ces valeurs sont représentatives pour une interface sol gelé/sol dégelé à 8 mètres de profondeur.

Épaisseur du sol dégelé (m)	Indice R	μ (kPa)
0,05	0,026	0,072
0,1	0,053	0,289
0,5	0,264	6,670
1	0,527	20,632
2	1,055	44,091

Tableau 15- Variation de l'indice R et de la pression interstitielle en fonction de l'épaisseur de sol en dégel (30
jours de dégel, C_{v(Salluit)}= 3,5 x10⁻⁷)

 $\label{eq:constraint} \begin{array}{c} \mbox{Tableau 16- Variation de l'indice R et de la pression interstitielle en fonction du temps de dégel (épaisseur du sol dégelé= 0,5m; $C_{v(Salluit)}= 3,5 \ x10^{-7}$) \end{array}$

Temps de dégel (jour)	Indice R	μ (kPa)
30	0,264	6,670
20	0,323	9,429
10	0,457	16,082
5	0,646	24,847

Tableau 17- Variation de l'indice R et de la pression interstitielle en fonction du coefficient de consolidation (30jours de dégel, épaisseur du sol dégelé= 0,5m)

Type de sol	C_v	Indice R	μ (kPa)
Silt argileux (Salluit)	3,47 x10 ⁻⁷	0,264	6,670
Silt argileux (Tasiujaq)	1,41 x10 ⁻⁷	0,413	13,888
Silt (Norman Wells) *	2,67 x10 ⁻⁶	0,088	0,833
Argile (Mountain River) *	6,10 x10 ⁻⁸	0,582	22,060

* (Nixon & Morgenstern, 1973)

Ces tableaux permettent de remarquer la variabilité de l'indice R, et donc la pression interstitielle à l'interface en dégel. La plupart des combinaisons testées donnent des indices R inférieurs à 1. Afin de déterminer l'indice R le plus exactement possible, il est primordial de bien connaître le taux de dégel, ainsi que le coefficient de consolidation (c_v) . La détermination du coefficient de consolidation nécessiterait le prélèvement d'échantillons intacts et la réalisation d'essai en laboratoire.

8.5 Discussion sur l'étude de stabilité

Tous les scénarios analysés, à l'exception de celui avec de très fortes pressions interstitielles, ont donné des facteurs de sécurité élevés. Ces scénarios ont permis de remarquer que les résultats sont très dépendants de la géométrie du pergélisol dans le remblai de la piste. La remontée du pergélisol dans le remblai a tendance à empêcher la formation de cercle de rupture de grande dimension. Ces cercles de rupture passent dans la partie supérieure du silt argileux et ont des facteurs de sécurité élevés.

Le dernier scénario analysé, comportant des surpressions interstitielles importantes, a permis de tester l'utilisation de celles-ci dans le logiciel SLOPE/W. Tel que prévu, un cercle de rupture s'est formé dans la couche de sol où les pressions étaient les plus fortes. La résistance des sols est diminuée par la présence de surpressions interstitielles. Ce scénario montre bien l'importance de la détermination de l'indice R, et de l'estimation des pressions interstitielles à la base de la couche active.

Finalement, la présence d'une couche de sol non gelé (talik) aide la consolidation de cette couche de sol. Si des surpressions interstitielles sont générées dans le bulbe de dégel, elles peuvent être dissipées si le sol ne regèle pas durant l'hiver. Par contre, si le sol gèle, ces pressions interstitielles ne se dissiperont pas. Finalement, l'épaisseur de la couche en dégel diminue significativement s'il y a présence d'une couche non gelé, ce qui a pour effet de diminuer l'indice R. La génération de surpression interstitielle est donc moins probable.

8.6 Coûts des travaux

Les coûts des travaux de la piste de Puvirnituq peuvent se détailler à l'aide des neuf bordereaux suivants : 01- Organisation du chantier; 02- Prolongement et rechargement de la piste et mises en réserve; 03- Mesures d'atténuation du pergélisol; 04- Déplacement des équipements de Nav Canada-partie génie civil; 05- Clôtures et barrières de type treillis pour gibiers; 06- Réfection du balisage et équipement divers- division électrique; 07- Balisage temporaire du prolongement de la piste; 08- Déplacement des équipements de Nav Canada-division électricité; et 09- Maintien de la circulation aérienne et signalisation.

Le coût total des travaux de réfection de la piste d'atterrissage est de 12,5 millions de dollars. Les travaux effectués dans la zone couverte par ce rapport sont contenus dans le bordereau 03-Mesures d'atténuation du pergélisol. Le coût total lié aux mesures d'atténuation du dégel du pergélisol est de 897 910,00\$. Le Tableau 18 présente les coûts des différents éléments du remblai à convection. Ces éléments composent majoritairement le coût total associé aux mesures d'atténuation. Le Tableau 19 présente les coûts des travaux effectués pour la déviation du ruisseau. Pour compléter le montant total des travaux, il faut ajouter les coûts pour le déneigement, l'installation de l'instrumentation, les boîtiers d'acquisition de données, etc.

Éléments du rembla	Coût total (\$)	
Granulats	Pierres calibre 150- 300 mm, 50% > 225 mm	555 520,00
	Granulats concassés MG 20b modifié	103 200,00
	Total=	658 720,00
Système de ventilation	Demi-tuyau (polyéthylène ondulé avec intérieur lisse) 525 mm de diamètre	109 274,00
	Cheminée de ventilation	22 100,00
	Total=	131 374,00

Tableau 18- Coûts des éléments du remblai à convection

Travaux à effectuer		Coût total (\$)
Déviation du ruisseau	Déblai de 1 ^{ère} classe	41 310,00
	Fossé de décharge 2 ^e classe	946,00
	Total=	42 256,00

Puisqu'il s'agit d'un projet pilote, et que la seule technique de mitigation de la fonte du pergélisol installée à Puvirnituq est le remblai à convection, il est difficile de faire une analyse coûts/bénéfice.

Par contre, il est possible de rapporter les coûts totaux de construction par unité d'aire de piste d'atterrissage stabilisé. La superficie stabilisée par les travaux de construction est égale à 10 300 m². Les coûts engendrés par la stabilisation thermique et mécanique de la piste d'atterrissage de Puvirnituq sont donc de 87, 18 m^2 .

Finalement, tel que mentionné précédemment, la déviation du ruisseau a eu un effet bénéfique immédiat sur le régime thermique du sol naturel. Compte tenu des faibles coûts engendrés par ces travaux, il est possible d'affirmer qu'ils ont été très profitables.

9 Recommandations

Suite au projet de recherche, les recommandations suivantes sont proposées pour la piste d'atterrissage de Puvirnituq :

- Visites hivernales. Un mauvais fonctionnement du remblai convectif s'est produit à l'hiver 2012. Une visite de la piste d'atterrissage a eu lieu en mars 2013. Le rapport complet se trouve à l'annexe C. Lors de cette visite, un mauvais fonctionnement évident du système de ventilation a été observé. Trois causes principales peuvent expliquer ce problème :
 - Un couvert de glace se forme directement sous le couvert de ventilation dans la très grande majorité des cas.
 - Un bouchon de glace se forme dans les tuyaux de ventilation à l'aide de la glace qui se condense sur les parois et qui tombe dans les tuyaux.
 - Toutes les cheminées de ventilation au pied du remblai du côté ouest se situent sous le couvert de neige.

Une vérification de l'état des cheminées de ventilation lors de visites hivernales permettraient de constater l'état du système de ventilation lorsque celui devrait être le plus fonctionnel.

- Quatrième année de suivi. Les bons résultats suivant la deuxième année de suivi ont été attribués, soit à la température de l'air, la convection dans le remblai, la déviation du ruisseau, ou une combinaison de ces facteurs. Les résultats de la troisième année de suivi sont significativement moins bons, probablement dus à un mauvais fonctionnement du système de ventilation du remblai à convection. Le comportement thermique du sol sous la berme convective est complètement différent au cours de l'hiver 2012. Une année de suivi supplémentaire pourrait aider à déterminer si les tendances observées à l'hiver 2012 se répètent. Des liens pourraient également être établis avec les observations réalisées lors de la visite à l'hiver 2013.
- Un suivi des dégradations des cheminées de ventilation aux extrémités du remblai convectif est également recommandé pour les années à venir. Ces éléments du système à convection sont particulièrement vulnérables, puisque des dégradations ont été observées trois ans après la construction. La ventilation joue un rôle important dans le processus d'extraction de chaleur, et son mauvais fonctionnement pourrait affecter directement la température du sol à faible profondeur. Des répercussions plus en profondeur sont également possibles.

- **Diminution du nombre de lectures de l'inclinomètre.** L'intervalle de temps entre chacune des lectures est trop court pour le système d'acquisition en place. Entre deux collectes de données, soit une période d'environ un an, les données les plus anciennes sont effacées par manque d'espace dans le système d'acquisition. Une augmentation de l'intervalle de temps entre les acquisitions à 6 heures serait acceptable. Cette modification du programme d'acquisition éviterait la perte de données, sans toutefois diminuer les informations relatives à l'évolution des déplacements dans le sol naturel.
- L'installation d'une sonde à neige aurait pu aider à mieux comprendre le comportement hivernal du remblai. Le couvert de neige a probablement été différent au cours des trois années de suivi et a peut-être joué un rôle sur le fonctionnement du remblai à convection. Cet instrument permettrait également de raffiner la modélisation thermique. Lorsque la température descend sous 0 °C, un couvert de neige avec une pente 6H : 1V est alors ajouté. Cette simplification a un effet sur la dimension du bulbe de dégel. Puisque le projet de suivi de la piste de Puvirnituq est pratiquement terminé, l'installation d'une telle sonde ne serait pas nécessairement utile. Par contre, ce type d'instrument est à considérer dans d'éventuel projet de recherche où le couvert de neige pourrait avoir une influence sur le comportement des systèmes de protection, et que l'accès au site est limité.
- **Installer de rallonges ajustables sur le tuyau de la cheminée** de ventilation lorsqu'un déplacement des tuyaux par rapport aux tiges de soutien a été observé.
- **Retirer les grillages directement sous les couverts de ventilation** afin de limiter la formation de couverts de glace condensés.
- Une étude de stabilité avec la géométrie actuelle du remblai (avec la berme) n'est pas recommandée. La dégradation du pergélisol a engendré la formation d'une couche de sol non gelé (talik) qui permet la consolidation du sol. Des surpressions interstitielles ne sont pas susceptibles de se générer. De plus, les différents scénarios analysés tenant compte de la géométrie sans les travaux de stabilisation ont données des facteurs de sécurité acceptable. L'ajout d'une berme a très certainement augmenté le facteur de sécurité du remblai de la piste de Puvirnituq.

Les recommandations suivantes sont proposées dans le cas d'une possible instabilité de remblai sur d'autres infrastructures de transport sur pergélisol au Nunavik :

- Échantillonnage et essais sur sol gelé. En plus d'une caractérisation géotechnique conventionelle, une attention particulière doit être portée sur la récupération du sol à l'interface sol gelé/sol dégelé. Des essais de consolidation au dégel permettent de déterminer le coefficient de consolidation (C_v) ainsi que le potentiel de surpression interstitielle du sol qui risque de dégeler.
- Un relevé MASW peut être recommendé afin de connaître la géométrie du bulbe de dégel et la remontée du pergélisol dans le remblai. La géométrie du pergélisol a une grande importance sur le facteur de sécurité.
- Détermination des propriétés thermiques des matériaux (conductivité thermique et capacité calorifique). Ces propriétés thermiques peuvent être introduites dans un modèle d'évolution du front de dégel. Il est possible de déterminer ces propriétés à l'aide d'essai de laboratoire ou de les estimer à l'aide de modèle existant. Ces propriétés sont également necessaire pour la détermination de l'indice R.
- Modélisation de l'évolution du front de dégel. La progression du front du dégel est importante afin d'obtenir l'indice R. Une modélisation du comportement thermique est également utile afin de déterminer la remontée du pergélisol dans le remblai. La géométrie du pergélisol a une grande importance sur le facteur de sécurité déterminé à l'aide d'une analyse de stabilité.
- Détermination de l'indice R, le plus précisément possible. Cet indice permet de prédire si des surpressions interstitielles peuvent survenir. Cet indice est facile à obtenir et donne des indications sur les risques que peuvent causer le dégel d'une couche de sol.
- **Installation des piézomètres** afin de valider les pressions interstitielles prédites. Ces pressions interstitielles sont très importantes dans l'analyse de stabilité. Les piezomètres devraient être installés le plus près possible de la couche de sol en dégel. Ces piezomètres pourraient indiquer la génération de supression interstielle dans la couche en dégel. Les données recueillis sur le terrain pourraient raffiner l'étude de stabilité et l'estimation des surpressions interstitielles.

- **Profils scissométriques verticals**. Ces profils permettraient de déterminer la resistance en cisaillement par rapport à la distance du front de dégel. Si une tendance est observée, elle pourrait être introduite dans l'étude de stabilité.
- Suivi du comportement thermique du sol où une instabilité est susceptible de se produire. Ce suivi permet de valider la modélisation de l'évolution du régime thermique. De plus, il permet de réajuster l'étude de stabilité en fonction de la géométrie réelle du pergélisol.

10 Conclusion

Les trois années de suivi ont permis de faire des observations intéressantes au niveau du suivi thermique du remblai :

- La température moyenne du sol observé lors de la deuxième année de suivi est plus froide que celle de la première année. Par contre, la température moyenne du sol lors de la troisième année de suivi est plus élevée que lors de la deuxième année.
- Entre la première et la deuxième année de suivi, une remontée du plafond du pergélisol a été observée, pour trois des quatre séries de thermistances installées dans le sol naturel (entre 0,59 et 1,97 m). Entre la deuxième et la troisième année de suivi, une descente du plafond du pergélisol se situant entre 0,03 à 0,77 m a été observée pour trois des quatre séries de thermistances et une remontée du plafond du pergélisol de 0,52 m a été observée sur la quatrième série de thermistances. Depuis le début du suivi, toutes les séries de thermistances ont montré une remontée globale du plafond du pergélisol qui se situe entre 0,44 et 1,53 mètre.
- Des preuves de convection dans le remblai convectif ont été remarquées uniquement dans la série de thermistances D (section aval), lors des trois hivers de suivi.
- Un mauvais fonctionnement du système de ventilation du remblai convectif s'est produit lors de l'hiver 2012. Ce mauvais fonctionement a vraisemenblament limité l'entrée d'air froid, ce qui a diminué l'extraction de chaleur.

Le suivi du comportement mécanique du remblai de Puvirnituq a également permis de faire des observations intéressantes :

- Les déplacements observés au début du suivi s'apparentent à un mouvement de compression verticale, suite à l'élargissement du remblai et à la mise en place du remblai et de la berme convective. Le remblai s'est par la suite stabilisé.
- Les déplacements observés ne sont pas compromettants pour l'infrastructure, puisqu'ils ne sont pas associés à une rupture de remblai, mais plutôt à un mouvement de compression, qu'ils sont modestes à faibles profondeurs et qu'ils se produisent à un rythme lent. Toutefois, le contrepoids mis en place est efficace pour stabiliser mécaniquement l'ouvrage.

L'évaluation de l'indice R donne de bonnes indications sur la génération de surpressions interstitielles à l'interface de sol en dégel. Sa valeur est très variable des conditions et doit être estimé le plus exactement possible.

Les simulations numériques ont permis de :

- Déterminer que le front de dégel, sans travaux de mitigation de la fonte du pergélisol, aurait progressé d'environ 1 mètre au cours des 20 prochaines années.
- Les analyses de stabilité ont permis de remarquer que les résultats sont très dépendants de la géométrie que prend le pergélisol dans le remblai de la piste. La remontée du pergélisol dans le remblai a tendance à empêcher la formation de cercle de rupture de grande dimension.

Bibliographie

- Agergaard, F. A., Ingeman-Nielsen, T., & Foged, N. (2012). Suggested best practice for geotechnical characterisation of permafrost in the Nordic countries. Paper presented at the Proceedings of Nordic Geotechnical Meeting, Copenhagen, Denmark.
- Allard, M. (2010). Note du cours GGR-7011- Géomorphologie Avancée, Université Laval, Québec, Canada.
- Allard, M. (2012). Permafrost and climate change in Nunavik and Nunavut: Significance for municipal and transportation infrastructures On *Northern Forum*. Québec.
- Allard, M., Calmels, F., Fortier, D., Laurent, C., L'Hérault, E., & Vinet, F. (2007). Cartographie des conditions de pergélisol dans les communautés du Nunavik en vue de l'adaptation au réchauffement climatique. Québec: Université Laval.
- Allard, M., Doré, G., L'Hérault, E., Sarrazin, D., & Verreault, J. (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, Québec, Canada: Centre d'étude nordique, Université Laval.
- 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. Québec, Québec, Canada: Centre d'étude nordique, Université Laval.
- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2004). Frozen ground engineering (2nd edition ed.). Hoboken, New Jersey: American Society of Civil Engineers et John Wiley & Sons Inc.
- Beaulac, I. (2006). Impacts de la fonte du pergélisol et adaptations des infrastructures de transports routier et aérien au Nunavik. Université Laval, Québec.
- Beaulac, I., Doré, G., Shur, Y., & Allard, M. (2004). Permafrost Thawing Impacts on Road and Airfields- Problem Assessment and Review of Possible Solutions. Paper presented at the International Specialty Conference on Cold Regions Engineering, Edmonton.
- Bouchard, R., Ladet, R., & Langlois, P. (2001). *Development and application of frozen till dam core drilling method usig a refrigerated fluid*. Paper presented at the 2001 odyssée de la terre : 54e conférence canadienne de géotechnique/2ième conférence conjointe AIH et SCG sur l'eau souterraine, Alliston, Ontario.
- Brouchkov, A. (2003, 21-25 juillet 2003). *Frozen saline soils of the Arctic coast: their distribution and engineering properties.* Paper presented at the 8th International Conference on Permafrost, Zürich, Suisse.
- Budhu, M. (2011). Soil Mechanics and Foundations (3rd Edition): John Wiley & Sons.
- Burn, C. R. (2011). Field trip- Advanced Course on Permafrost Engineering. Whitehorse, Yukon.
- Caltagirone, J. P., & Bories, S. (1985). Solutions and stability criteria of natural convective flow in an inclined porous layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 155, 267-287.
- Doré, G. (2011). Note du cours Advanced course on permafrost engineering applied to transportation infrastructure, Yukon College, Whitehorse, Yukon.

- Doré, G. (2012). Adaptation des infrastructures de transport construites sur pergélisol sensible. On *Northern Forum*. Québec.
- Doré, G., & Zubeck, H. K. (2009). Cold Regions Pavement Engineering: McGraw-Hill.
- Esch, D. (1996). Road and Airfield Design for Permafrost Conditions. New York.
- Ficheur, A. (2011). Expérimentation de techniques de mitigation des effets de la fonte du Pergelisol sur les infrastructures de transport du Nunavik: Aéroport de Tasiujaq. Université Laval, Québec.
- Forsstrom, A., Long, E. L., Zarling, J. P., & Knutsson, S. (2002). *Thermosyphon cooling* of Chena Hot Springs Road, Anchorage, AK, United states.
- Gadek, B., & Leszkiewicz, J. (2010). Influence of snow cover on ground surface temperature in the zone of sporadic permafrost, Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Cold Regions Science and Technology*, *60*(3), 205-211.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2012). *Case History Passive Cooling Of Permafrost By Air Convection*. Calgary, Alberta, Canada: GEO-SLOPE International Ltd.
- Goering, D. J. (2000). Passive Cooling of Permafrost Foundation Soils Using Porous Embankment Structures. *ASME-PUBLICATIONS-HTD*, *366*, 103-112.
- Goering, D. J. (2002). *Convective cooling in open rock embankments*, Anchorage, AK, United states.
- Goering, D. J. (2003). Passively cooled railway embankments for use in permafrost areas. *Journal of Cold Regions Engineering*, 17(3), 119-133.
- Goering, D. J., & Kumar, P. (1996). Winter-time convection in open-graded embankments. *Cold Regions Science and Technology*, 24(1), [d]57-74.
- Guimond, A. (2012). Nouvelle approche de planification et de gestion des infrastructures aéroportuaires du Nunavik- Vers une stratégie d'adaptation. On *Northern Forum*. Québec.
- Harris, C., Kern-Luetschg, M., Smith, F., & Isaksen, K. (2008). Solifluction processes in an area of seasonal ground freezing, Dovrefjell, Norway. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(1), 31-47.
- Hivon, E. G., & Sego, D. C. (1993). Distribution of saline permafrost in the North west Territories, Canada. *Canadian geotechnical journal*, *30*(3), 506-514.
- Hult, J. A. H. (1966). Creep in engineering structures: Blaisdell Pub. Co.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). Fundamentals of heat and mass transfer: John Wiley.
- Ingeman-Nielsen, T., Foged, N. N., Butzbach, R., & Jørgensen, A. S. (2008). *Geophysical Investigations of Saline Permafrost at Ilulissat, Greenland.* Paper presented at the Ninth International Conference on Permafrost., Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks.
- Johnston, G. H. (1981). *Permafrost: engineering design and construction*. Toronto: John Wiley & Sons Inc.
- Jørgensen, A. S., Doré, G., Voyer, E., Chataigner, Y., & Gosselin, L. (2008). Assessment of the effectiveness of two heat removal techniques for permafrost protection. *Cold Regions Science and Technology*, 53(2), 179-192.
- Kaneko, T., Mohtadi, M. F., & Aziz, K. (1974). An experimental study of natural convection in inclined porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 17(4), 485-496.

- Karray, M., Ethier, Y., & Lefebvre, G. (2009). *Relevés MASW au site de l'aéroport de Puvirnituq*. Granby, Québec: .
- Kondratiev, V. G. (2010, September 12-16, 2010). *Some geocryological problems of railways and highways on permafrost of Transbaikal and Tibet.* Paper presented at the 63rd Canadian Geotechnical Conference & 6th Canadian Permafrost Conference, Calgary, Canada.
- Konovalov, A. A., & Roman, L. T. (1973). The thermophysical properties of peat soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 10(3), 179-181.
- Krahn, J. (2004). *Thermal Modeling with TEMP/W*. Calgary, Alberta, Canada: GEO-SLOPE International, Ltd.
- L'Hérault, E., Allard, M., Barrette, C., Doré, G., & Sarrazin, D. (2012). *Investigations* géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik: Rapport final. Québec, Québec, Canada: Centre d'étude nordique, Université Laval.
- Ladanyi, B. (1972). An Engineering Theory of Creep of Frozen Soils. *Canadian* geotechnical journal, 9(1), 63-80.
- Ladanyi, B. (1996). La conception et la réhabilitation des infrastructures de transports en régions nordiques (No. Rapport RTQ-94-07). Montréal, Canada: Ministère des Transports du Québec, Direction des communications.
- Leroueil, S., Dionne, G., & Allard, M. (1991). Tassement et consolidation au dégel d'un silt argileux à Kangiqsualujjuaq. *Canadian geotechnical journal*, 28(5), 678-689.
- Linell, K. A. (1973). *Long-term effects of vegetative cover on permafrost stability in an area of discontinuous permafrost.* Paper presented at the 2nd International Conference on Permafrost, Yakutsk, USSR.
- M-Lepage, J., Doré, G., Fortier, D., & Murchison, P. (2012, 25-29 juin 2012). *Thermal Performance of the Permafrost Protection Techniques at Beaver Creek Experimental Road Site, Yukon, Canada.* Paper presented at the Tenth International Conference on Permafrost, Salekhard, Russie.
- Ma, W., & Jin, H. (2009). News From Members: China. Frozen Ground, The News Bulletin of the International Permafrost Association(Numéro 33), 15-17.
- Mackay, J. R. (1970). Disturbances to the tundra and forest tundra environment of the western Arctic. *Canadian geotechnical journal*, 7(4), 420-432.
- McRoberts, E. C., & Morgenstern, N. R. (1974a). Stability of slopes in frozen soil, Mackenzie Valley, N. W. T. *Canadian geotechnical journal*, 11(4), 554-573.
- McRoberts, E. C., & Morgenstern, N. R. (1974b). The Stability of Thawing Slopes. *Canadian geotechnical journal*, 11(4), 447-469.
- Morgenstern, N. R., & Nixon, J. F. (1971). One-dimensional consolidation of thawing soils. *Canadian geotechnical journal*, 8(4), 558-565.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., et al. (2000). Special Report on Emissions Scenarios : a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Nicholson, F. H., & Granberg, H. B. (1973). *Permafrost and snow cover relationships near Schefferville*. Paper presented at the 2nd International Conference on Permafrost, Yakutsk, USSR.
- Nield, D. A., & Bejan, A. (1992). Convection in Porous Media. New York: Springer.
- Nixon, J. F., & Lem, G. (1984). Creep and strength testing of frozen saline fine-grained soils. *Canadian geotechnical journal*, 21(3), 518-529.
- Nixon, J. F., & Morgenstern, N. R. (1973). Thaw Consolidation Tests on Undisturbed Fine-grained Permafrost. *Canadian geotechnical journal*, 11(1), 202-214.
- Ogata, N., Yasuda, M., & Kataoka, T. (1983). Effects of salt concentration on strength and creep behavior of artificially frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*, 8(2), 139-153.
- Reimchen, D., Dore, G., Fortier, D., & Walsh, R. (2009). Cost and Constructability of Permafrost Test Sections Along the Alaska Highway, Yukon.
- Roggensack, W. D., & Morgenstern, N. R. (1978). Direct shear tests on natural finegrained permafrost soils. 728-735.
- Romanovsky, V. E., & Osterkamp, T. E. (1997). Thawing of the Active Layer on the Coastal Plain of the Alaskan Arctic. *Permafrost and Periglacial Processes*, 8(1), 1-22.
- Romanovsky, V. E., & Osterkamp, T. E. (2000). Effects of unfrozen water on heat and mass transport processes in the active layer and permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*, 11(3), 219-239.
- Saboundjian, S., & Goering, D. J. (2003). Air Convection Embankment for Roadways: Field Experimental Study in Alaska.
- Sorensen, S., Smith, J., & Zarling, J. (2002). *Thermal performance of TAPS heat pipes* with non condensable gas blockage, Anchorage, AK, United states.
- Stephani, E., Fortier, D., Doré, G., Stanley, B., & Shur, Y. (2008, June 29- July 3 2008). Preservation of the Alaska Highway: Permafrost conditions at experimental road site. Paper presented at the Proceedings of the Nine International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska.
- Su, X., Wang, B., & Nichol, S. (2007). *Back analysis of a slope failure in permafrost in the Mackenzie Valley, Canada*, Orono, ME, United states.
- Ting, J. M. (1981). The creep of frozen sands: qualitative and quantitative models: Part 2. *Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, Dept of Civil Engineering.*
- Ting, J. M., Martin, R. T., & Ladd, C. C. (1983). Mechanisms of strength for frozen sand. *Journal of Geotechnical Engineering - ASCE, 109*(10), 1286-1302.
- Transportation Association of Canada. (2010). *Guidelines for development and* management of transportation infrastructure in permafrost regions.
- Tremblay, C., & Doré, G. (1988). Airport Network and Housing Construction Programs in Northern Québec, Canada, Ministère des Transports du Québec. Paper presented at the Fifth International Permafrost Conference, Trondheim, Norway.
- Verreault, J., & Doré, G. (2010). Suivi des comportement thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq: Rapport d'étape 1, version finale, Rapport GCT-2010-05. Québec, Québec, Canada: Groupe de recherche en ingénierie des chaussées, Département de génie civil, Université Laval.
- Voyer, É. (2009). Expérimentation des méthodes de mitigation de la dégradation du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik, Nord du Québec. Université Laval, Québec.
- Washburn, A. L. (1967). Instrumental observations of mass-wasting in the Mesters Vig district, Northeast Greenland: C. A. Reitzel.

- Williams, P. J., & Smith, M. W. (1991). *The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology*: Cambridge University Press.
- Yu, W., Lai, Y., Zhang, X., Zhang, S., & Xiao, J. (2004). Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 38(1), 31-42.
- Zarling, J. P., Braley, W. A., & Esch, D. (1988, 2-5 août 1988). *Thaw stabilization of roadway embankments*. Paper presented at the Fifth International Conference on Permafrost, Trondheim, Norway.

Annexes

ANNEXE A

Résultats des teneurs en eau, des teneurs en matières organiques, des essais granulométriques ainsi que des limites de consistance



2. Normes britanniques et du Massachusetts Institute of Technology.



2. Normes britanniques et du Massachusetts Institute of Technology.



Nom de l'échantillen	Profondeur (m)		w	NaCl	мо	CO ₃	Granulométrie (%)			Distrik	oution						
Nom de l'échantilion	Sommet	Base	(%)	(ppt)	(%)	(%)	Gr	Sa	Si-Ar	Ar	Cu	۲	WL	WP	Ι _Ρ	١L	0303
PUV_F1_150-163	-1,50	-1,63	9,78	n.d	0,00	n.d	48,91	39,38	11,71	0,05	236,95	3 <i>,</i> 58	n.d	n.d	n.d	n.d	GP-GM
PUV_F1_163-172	-1,63	-1,72	13,24	n.d	0,00	n.d	14,16	71,09	14,75	0,50	44,87	4,31	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_187-197	-1,87	-1,97	15,35	n.d	0,00	n.d	19,23	65,41	15,36	1,26	187,53	1,82	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_197-210	-1,97	-2,10	16,75	n.d	0,00	n.d	1,61	62,59	35,79	5,45	36,25	1,55	9,72	NP	n.a	n.a	SM
PUV_F1_251-261	-2,51	-2,61	20,37	n.d	0,00	n.d	0,69	56,92	42,39	5,94	25,05	2,03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_300-360	-3,00	-3,60	18,94	n.d	0,00	n.d	20,03	67,32	12,65	0,62	50,10	0,33	18,80	NP	n.a	n.a	SM
PUV_F1_400-420	-4,00	-4,20	25,93	n.d	0,00	n.d	0,66	27,87	71,47	11,12	37,61	2,48	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_420-430	-4,20	-4,30	29,86	n.d	0,00	n.d	7,90	13,91	78,19	13,34	46,62	3,68	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_430-440	-4,30	-4,40	34,56	n.d	0,00	n.d	1,69	17,17	81,14	5,54	10,82	1,17	22,97	17,51	5,46	3,12	ML-CL
PUV_F1_440-446	-4,40	-4,46	33,63	n.d	0,00	n.d	10,94	15,66	73,40	8,22	14,77	1,39	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_530-540	-5,30	-5,40	37,44	n.d	1,23	n.d	0,03	27,71	72,26	0,76	7,72	0,98	24,19	19,43	4,76	3,78	ML-CL
PUV_F1_540-555	-5,40	-5,55	29,48	n.d	0,00	n.d	2,25	22,53	75,22	2,32	11,03	1,09	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_562-569	-5,62	-5,69	32,59	n.d	1,48	n.d	0,00	24,39	75,61	0,81	7,42	0,86	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_576-583	-5,76	-5,83	34,87	n.d	1,41	n.d	0,00	25,98	74,02	0,46	7,27	0,81	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_590-597	-5 <i>,</i> 90	-5,97	31,16	n.d	0,00	n.d	0.00	8.00	02.00	14.00	27.40	2.04	20.27	20.45	7.02	1.00	4
PUV_F1_600-610	-6,00	-6,10	29,08	n.d	0,90	n.d	0,00	8,00	92,00	14,83	27,49	3,04	20,57	20,45	7,93	1,09	
PUV_F1_650-653	-6 <i>,</i> 50	-6,53	23,66	n.d	0,77	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_705-713	-7,05	-7,13	20,62	n.d	0,93	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_730-740	-7,30	-7,40	30,21	n.d	1,02	n.d	0,15	13,45	86,40	4,91	7,87	1,13	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_750-760	-7,50	-7,60	17,40	n.d	0,51	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.a	n.a	19,03	13,97	5,06	0,68	ML-CL
PUV_F1_810-820	-8,10	-8,20	12,95	n.d	0,96	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_910-920	-9,10	-9,20	9,38	n.d	0,00	n.d	10,42	49,85	39,73	0,01	31,73	0,36	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_940-950	-9,40	-9,50	4,64	n.d	0,00	n.d	55 <i>,</i> 05	28,97	15,98	0,01	n.a	n.a	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_966-976	-9,66	-9,76	8,62	n.d	0,00	n.d	16,39	45,09	38,52	0,15	67,52	0,20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_1152-1159	-11,52	-11,59	8,90	n.d	0,00	n.d	21,77	57,41	20,81	0,03	95,69	1,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F1_1218-1238	-12,18	-12,38	6,87	n.d	0,00	n.d	14,34	51,34	34,32	0,21	95,81	0,22	13,39	NP	n.a	n.a	SM

Tableau 38: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F1.

Nove de lléchenstiller	Profonde	Profondeur (m)		NaCl	мо	CO3	0	Granulométrie (%)			Distrik						
Nom de l'échantilion	Sommet	Base	(%)	(ppt)	(%)	(%)	Gr	Sa	Si-Ar	Ar	Cu	Cc	WL	WP	I _P	IL.	USCS
PUV_F2_75-80	-0,75	-0,80	11,95	n.d	0,00	n.d	21,81	55,25	22,94	0,00	27,26	1,09	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_90-99	-0,90	-0,99	10,84	n.d	1,86	n.d	22,46	56,90	20,64	0,75	178,16	1,29	12,03	NP	n.a	n.a	SM
PUV_F2_123-133	-1,23	-1,33	13,37	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_188-198	-1,88	-1,98	15,94	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_230-240	-2,30	-2,40	23,61	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	18,11	NP	n.a	n.a	n.d
PUV_F2_280-290	-2,80	-2,90	26,99	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_330-360	-3,30	-3,60	23,82	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	20,82	18,02	2,80	2,07	n.d
PUV_F2_430-440	-4,30	-4,40	37,08	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	29,41	22,54	6,87	2,12	n.d
PUV_F2_460-470	-4,60	-4,70	38,47	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_490-500	-4,90	-5,00	31,32	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_550-560	-5 <i>,</i> 50	-5,60	38,91	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_608-610	-6,08	-6,10	32,91	n.d	1,37	n.d	0,00	33,68	66,32	3,34	12,40	0,89	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_660-670	-6,60	-6,70	28,75	n.d	0,00	n.d	0,00	34,11	65,89	2,12	11,56	0,85	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_680-690	-6,80	-6,90	31,23	n.d	1,03	n.d	0,00	20,28	79,72	1,89	7,72	1,00	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_700-710	-7,00	-7,10	27,25	n.d	1,24	n.d	0,00	16,38	83,62	1,21	7,03	1,01	25,69	19,30	6,38	1,25	ML-CL
PUV_F2_750-760	-7,50	-7,60	27,31	n.d	1,33	n.d	0,00	17,51	82,49	2,82	8,93	1,10	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_770-780	-7,70	-7,80	26,18	n.d	0,76	n.d	0,04	17,01	82,94	4,78	10,42	1,08	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_780-840#2	-7,80	-8,40	24,18	n.d	1,17	n.d	0,60	30,16	69,23	3,77	14,39	1,05	23,21	18,05	5,16	1,38	ML-CL
PUV_F2_780-840#4	-7,80	-8,40	26,54	n.d	1,10	n.d	0,12	29,86	70,02	2,52	11,29	1,02	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_780-840#6	-7,80	-8,40	23,49	n.d	1,00	n.d	0,04	31,17	68,79	3,05	14,05	1,11	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_780-840#8	-7,80	-8,40	27,43	n.d	0,80	n.d	0,00	32,54	67,46	3,08	13,64	1,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_910-920	-9,10	-9,20	17,67	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	18,78	14,83	3,95	0,72	n.d
PUV_F2_1045-1056	-10,45	-10,56	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	12,59	NP	n.a	n.a	n.d
PUV_F2_1080-1090	-10,80	-10,90	26,64	n.d	0,38	n.d	0,05	89,81	10,15	0,00	3,55	1,13	n.d	n.d	n.d	n.d	SP-SM
PUV_F2_1112-1124	-11,12	-11,24	8,56	n.d	0,00	n.d	17,46	57,47	25,07	0,06	44,03	1,12	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_1150-1160	-11,50	-11,60	11,88	n.d	0,26	n.d	3,90	69,65	26,45	0,01	20,17	1,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_1170-1184	-11,70	-11,84	12,30	n.d	0,26	n.d	2,59	67,14	30,27	0,00	14,70	1,34	15,36	NP	n.a	n.a	SM
PUV_F2_1204-1214	-12,04	-12,14	15,17	n.d	0,29	n.d	8,67	85,16	6,17	0,00	6,17	1,03	n.d	n.d	n.d	n.d	SW-SM
PUV F2 1238-1248	-12,38	-12,48	11,58	n.d	0,00	n.d	8,15	45,56	46,29	0,34	17,88	0,56	14,90	NP	n.a	n.a	SM-ML
PUV_F2_1304-1315	-13,04	-13,15	11,37	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	16,09	NP	n.a	n.a	n.d
PUV F2 1358-1368	-13,58	-13,68	17,57	n.d	0,22	n.d	0,00	50,90	49,10	0,00	5,96	1,28	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_1387-1397	-13,87	-13,97	8,22	n.d	0,31	n.d	35,62	49,98	14,40	0,00	95,80	2,20	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F2_1458-1468	-14,58	-14,68	10,23	n.d	0,23	n.d	12,69	49,67	37,63	0,01	21,48	0,62	13,07	NP	n.a	n.a	SM-ML
PUV_F2_1503-1513	-15,03	-15,13	6,95	n.d	0,19	n.d	32,43	33,61	33,96	0,00	151,09	0,10	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tableau 39: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F2.

Nous de lléchautilleu	Profonde	Profondeur (m)		NaCl	мо	CO3	0	Granulométrie (%)			Distrik	oution					
Nom de l'échantilion	Sommet	Base	(%)	(ppt)	(%)	(%)	Gr	Sa	Si-Ar	Ar	Cu	Cc	WL	W _P	Ι _Ρ	١L	USCS
PUV_F3_26-36	-0,26	-0,36	16,59	n.d	0,00	n.d	0,00	26,39	73,61	3,98	13,16	1,18	17,34	12,71	4,63	0,84	ML-CL
PUV_F3_60-65	-0,60	-0,65	17,57	n.d	0,87	n.d	0,00	39,72	60,28	6,15	22,11	1,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F3_130-135	-1,30	-1,35	16,16	n.d	0,66	n.d	7,50	45,22	47,28	0,62	15,22	0,93	13,41	11,69	1,72	2,60	SM-ML
PUV_F3_245-250	-2,45	-2,50	10,87	n.d	0,09	n.d	21,96	50,87	27,17	0,00	47,40	0,41	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F3_260-270	-2,60	-2,70	9,54	n.d	0,12	n.d	15,57	52,29	32,14	0,01	18,62	0,87	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_20-30	-0,20	-0,30	18,21	n.d	1,47	n.d	14,65	51,65	33,69	0,00	18,58	0,75	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_81-86	-0,81	-0,86	11,59	n.d	0,45	n.d	8,59	51,74	39,66	0,03	20,29	0,60	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_120-128	-1,20	-1,28	8,76	n.d	0,53	n.d	23,91	51,23	24,86	0,00	63,31	0,44	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_190-200	-1,90	-2,00	7,81	n.d	0,15	n.d	29,13	48,56	22,31	0,00	73,80	0,37	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_242-252	-2,42	-2,52	8,47	n.d	0,18	n.d	22,93	57,08	19,99	0,00	39,09	0,52	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_252-266	-2,52	-2,66	9,75	n.d	0,16	n.d	26,80	56,41	16,78	0,00	57,16	0,64	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_270-275	-2,70	-2,75	12,15	n.d	0,22	n.d	7,51	50,75	41,74	0,00	12,23	0,77	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F4_283-293	-2,83	-2,93	10,78	n.d	0,12	n.d	n.d	n.d	0,00	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_128-133	-1,28	-1,33	8,89	n.d	0,71	n.d	44,21	48,88	6,91	0,00	49,70	1,34	n.d	n.d	n.d	n.d	SW-SM
PUV_F5_133-138	-1,33	-1,38	11,70	n.d	0,58	n.d	11,85	70,87	17,29	0,34	88,89	1,39	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_195-205	-1,95	-2,05	27,71	n.d	1,19	n.d	0,00	21,12	78,88	0,56	6,77	0,88	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_215-225	-2,15	-2,25	27,34	n.d	1,09	n.d	0,00	15,80	84,20	1,08	6,70	0,98	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_260-270	-2,60	-2,70	25,04	n.d	0,83	n.d	0,00	13,84	86,16	3,25	7,75	1,09	21,19	17,70	3,48	2,11	ML
PUV_F5_280-290	-2,80	-2,90	10,10	n.d	0,85	n.d	16,93	11,69	71,38	1,91	9,87	0,98	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_324-334	-3,24	-3,34	22,14	n.d	0,51	n.d	0,00	14,69	85,31	3,74	8,64	1,06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_344-354	-3,44	-3,54	25,04	n.d	0,70	n.d	0,00	15,21	84,79	4,36	9,30	1,07	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_398-418	-3 <i>,</i> 98	-4,18	23,92	n.d	0,67	n.d	1,60	25,57	72,84	2,42	10,57	1,00	14,68	9,82	4,85	2,91	ML-CL
PUV_F5_420-437	-4,20	-4,37	9,67	n.d	0,10	n.d	25,50	52,93	21,57	0,19	88,39	0,47	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_480-492	-4,80	-4,92	18,77	n.d	0,18	n.d	6,35	16,20	77,45	0,13	4,24	1,11	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_502-512	-5,02	-5,12	20,68	n.d	0,85	n.d	0,35	27,17	72,48	0,14	4,30	1,24	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_540-550	-5,40	-5,50	14,48	n.d	0,14	n.d	11,93	17,60	70,46	0,13	4,95	1,03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
PUV_F5_550-557	-5,50	-5,57	8,38	n.d	0,19	n.d	18,11	59,81	22,09	0,10	100,35	0,64	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

Tableau 40: Synthèse des propriétés géotechniques mesurées sur les échantillons de sol prélevés au forage PUV_F3, PUV_F4 et PUV_F5.

ANNEXE B

Localisation des différents essais au pénétromètre dynamique (DCP) ainsi que les résultats obtenus



Figure 20 : Schéma des résultats mesurés avec le pénétromètre dynamique sur l'axe 6+196, côté est de la piste

ANNEXE C

Rapport de la visite hivernale de la piste d'atterrissage de Puvirnituq- Mars 2013

Visite PUV 12-13-14 mars 2013

Une visite de la piste d'atterrissage a eu lieu les 12-13-14 mars 2013 suite aux recommandations du rapport final du projet de suivi des comportements thermique et mécanique de la piste d'atterrissage de Puvirnituq. Cette visite avait pour objectif de déterminer les causes probables du mauvais fonctionnement du système lors de l'hiver 2012. Afin de répondre à ces objectifs, les activités suivantes ont été réalisées; observations générales des installations, mesure des températures aux différentes cheminées de ventilation (haut et bas de remblai) et détermination de l'épaisseur du couvert neigeux.

La visite a été effectuée au mois de mars afin d'observer le fonctionnement du système de ventilation dans une période où les échanges de chaleur devraient être maximaux. La température de l'air lors des travaux de terrain a varié entre -20 et -30 °C. La Figure 1 présente une vue d'ensemble de la piste d'atterrissage ainsi qu'une partie du village de Puvirnituq.



Figure 1- Vue d'ensemble de la piste d'atterrissage ainsi qu'une partie du village de Puvirnituq

Observations générales des installations du côté est

Les Figure 2 et Figure 3 comparent le remblai convectif du côté est lors de différentes visites, respectivement avec des vues en direction nord et sud. Ces photos permettent de remarquer que le couvert neigeux forme une pente plutôt uniforme entre la piste d'atterrissage et la base du remblai à convection. Il est également possible d'observer que toutes les cheminées de ventilation se trouvent au-dessus du couvert neigeux. Par contre, le sommet de la cheminée de ventilation se situant le plus au sud se trouve à seulement 40 cm du couvert neigeux, voir la Figure 4.



Figure 2- Comparaison du remblai convectif, côté est en direction nord, lors des visites de juillet 2011, septembre 2012 et mars 2013



Figure 3- Comparaison du remblai convectif, côté est en direction sud, lors des visites de juillet 2011 et mars 2013



Figure 4- Couvert de ventilation se trouvant à environ 40 cm du couvert neigeux

Observations générales des installations du côté ouest

Les Figure 5 et Figure 6 comparent le remblai convectif du côté est lors de différentes visites, respectivement avec des vues en direction du canal de déviation et en direction sud. Il est possible de remarquer que beaucoup de neige s'est accumulée, à un tel point que toutes les cheminées de ventilation à la base du remblai convectif sont complètement recouvertes de neige. Le boîtier d'acquisition de données est également complètement recouvert de neige. Il est à noter que le point noir sur la Figure 6 est un sac à dos et non un élément du système de ventilation.



Figure 5- Comparaison du remblai convectif, côté ouest en direction du canal de déviation, lors des visites de juillet 2011, septembre 2012 et mars 2013



Figure 6- Comparaison du remblai convectif, côté ouest en direction sud, lors des visites de juillet 2011 et mars 2013

Observations générales du système de ventilation

Lors de la visite, plusieurs couverts de ventilation ont été retirés afin de vérifier l'intérieur du système de ventilation. La Figure 7 présente quatre cas où les cheminées de ventilations sont bouchées directement sous le couvert, mais cette situation a été observé sous presque tous les couverts retirés. L'épaisseur des bouchons de glace varie de quelques millimètres à plus de deux centimètres. Lorsqu'aucun couvert de glace n'a été observé, il est fort possible que celui-ci se soit brisé et qu'il soit tombé lors de l'enlèvement du couvert puisque cette opération n'est pas très délicate.



Figure 7- Couche de glace se formant sous le couvert de ventilation

À l'intérieur des cheminées de ventilation, à une profondeur correspondant approximativement au couvert de neige, une accumulation de glace bouche les cheminées, voir la Figure 8. Ce bouchon de glace a été observé dans la plupart des cheminées de ventilation, notamment dans toutes celles se situant au sommet du remblai convectif du côté est. Une accumulation de glace est également observable sur les parois de la cheminée de ventilation.



Figure 8- Accumulation de glace bouchant une cheminée de ventilation

Le détail des morceaux de glace s'accumulant dans les cheminées de ventilations est présenté à la Figure 9. Il s'agit vraisemblablement de glace qui se forme par condensation sur les parois de la cheminée et qui finit par tomber dans la cheminée, formant ainsi un bouchon.



Figure 9- Morceaux de glace s'accumulant dans les cheminées de ventilations.

Relevés de l'épaisseur de neige

Des relevés de neige ont été réalisés des deux côtés de la piste à l'aide d'une sonde à avalanche et d'un ruban à mesurer, voir la Figure 10. Les relevés ont été réalisés sur des sections représentatives du couvert neigeux et situé au-dessus des séries de thermistances installées dans le remblai convectif et dans le sol naturel. La localisation et la direction de

ces relevés sont présentées à la Figure 11. Il est à noter que le couvert de neige est très compact.



Figure 10- Relevé de l'épaisseur de neige, côté est



Figure 11- Emplacement et direction des relevés d'épaisseur de neige (schéma à titre indicatif, l'échelle et la localisation exacte ne sont pas respectées)

Les Figure 12 et Figure 13 présente les profils d'épaisseur de neige du côté est ainsi que du côté ouest. Deux points importants peuvent être mentionnés; la pente du couvert neigeux se trouvant sur la section plate du remblai à convection côté est est d'environ 1V : 6H; l'épaisseur maximale de neige dans la vallée du côté ouest est d'environ 3 mètres.



Figure 12- Profil d'épaisseur de neige du côté est de la piste d'atterrissage



Figure 13- Profil d'épaisseur de neige du côté ouest de la piste d'atterrissage

Selon le gérant de l'hôtel coop de Puvirnituq et l'employé en charge de la maintenance de la piste d'atterrissage, l'hiver 2012-2013 a été marqué par une accumulation de neige plus importante qu'à l'habitude. La Figure 14 présente des accumulations importantes de neige dans le village.



Figure 14- Accumulations importantes de neige dans le village de Puvirnituq

Température dans les cheminées de ventilation

Afin de faire un suivi de la température dans les cheminées de ventilations, des datalogger de type TidbiT v2 de la compagnie *Onset* ont été utilisés, voir la Figure 15. Afin d'éviter un contact direct entre l'appareil et la paroi de la cheminée, les TidbiT ont été insérés dans une «frite» coupée. Ils ont ensuite été attachés à l'aide d'un fil de fer permettant de les descendre dans le système de ventilation.



Figure 15- Préparation des TidbiT

Les Tidbit ont été installés le 12 mars vers 18h00 et ont été retirés vers 14h00 le 13 mars. Initialement, un Tidbit devait être installé dans une cheminée au sommet du remblai et un Tidbit devait être installé dans une cheminée à la base du remblai, tous du côté est. Cependant, toutes les cheminées aux sommets étaient bloquées par un bouchon de glace. Les deux TidbiT ont été installés à la base du remblai. La Figure 16 présente l'emplacement des cheminées dans lesquelles ont été insérés les Tidbits.



Figure 16- Emplacement des cheminées dans lesquelles ont été insérés les Tidbits entre le 12 et le 13 mars 2013

Les Figure 17 et Figure 18 présente l'évolution des températures entre le 12 et le 13 mars, respectivement pour les cheminées EB-2 et EB-6. Une valeur de température était enregistrée toutes les 30 minutes. Il est possible de remarquer un écart de température important entre les deux séries de température enregistrées dans les cheminées de ventilation. La température minimale atteinte dans la cheminée EB-2 est d'environ -30 °C. La température minimale atteinte dans la cheminée de ventilation EB-6 est de -16 °C.



Figure 17- Température en fonction du temps dans la cheminée EB-2



Figure 18- Température en fonction du temps dans la cheminée EB-6

La cheminée EB-2 avait un bouchon de glace située légèrement sous le couvert de neige. Les températures recueillies ne donnent pas vraiment d'indication pertinente sur le fonctionnement du système. Les températures enregistrées durant la nuit sont celles de l'air. Il est possible de remarquer que la température augmente durant l'après-midi, probablement dû au réchauffement du tuyau par les rayons du soleil.

La cheminée EB-6 n'avait pas de bouchon à sa base et il a été possible de descendre l'appareil jusque dans le coude de la ventilation. Par contre un bouchon de glace était collé sur la grille du couvercle de la ventilation. Ce bouchon a été laissé en place durant la nuit afin d'observer l'influence de celui-ci sur la température dans le système de ventilation. La présence de ce bouchon a donc provoqué une différence d'environ 15°C dans le système de ventilation.

Afin de faire un suivi à plus long terme des températures dans les cheminées de ventilation, les TidbiT ont été réinstallés dans deux cheminées de ventilations différentes. La cheminée EB-6 a été choisie puisqu'elle est la seule à ne pas présenter de bouchon de glace du côté est. La cheminée OH-6 a été choisie puisqu'il a été possible de descendre l'appareil sous le couvert de neige. Par contre, il n'a pas été possible de descendre l'appareil plus profondément, ce qui laisse croire qu'il a probablement un bouchon de glace. Afin de retirer les TidbiT lors de la prochaine visite, deux outils seront nécessaires, soit un tournevis à tête plate et un *ratchet* 8 mm.



Figure 19- Emplacement des cheminées dans lesquelles ont été insérés les Tidbits pour le suivi à long terme

Conclusions et recommandations

Un mauvais fonctionnement évident du système de ventilation a été observé. Trois causes principales peuvent expliquer ce problème :

- Un couvert de glace se forme directement sous le couvert de ventilation dans la très grande majorité des cas.
- Un bouchon de glace se forme dans les tuyaux de ventilation à l'aide de la glace qui se condense sur les parois et qui tombe dans les tuyaux.
- Toutes les cheminées de ventilation au pied du remblai du côté ouest se situent sous le couvert de neige.

Des correctifs devraient être apportés afin de corriger les causes mentionnées précédemment. Pour le moment, seule une solution peut être proposée afin d'éviter qu'un couvert de glace ne se forme directement sous le couvert de ventilation. La grille du couvert de ventilation semble favoriser la formation de cette couche de glace et cette grille est facile a retiré, voir la Figure 20.



Figure 20- Retrait de la grille des couverts de ventilation