



Stabilisation thermique des remblais construits sur le pergélisol sensible au dégel à l'aide d'une approche de conception tenant compte de l'accumulation de la neige

Mémoire

Florence Lanouette

Maîtrise en génie civil - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

**Stabilisation thermique des remblais construits sur
le pergélisol sensible au dégel à l'aide d'une
approche de conception tenant compte de
l'accumulation de la neige**

Mémoire

Florence Lanouette

Sous la direction de :

Guy Doré, directeur de recherche

Daniel Fortier, co-directeur de recherche

Résumé

Dans les régions nordiques, l'accumulation préférentielle d'un couvert neigeux isolant en bordure des infrastructures de transport linéaires limite l'extraction de la chaleur en hiver. En terrain pergélisolé, cette modification de l'équilibre thermique peut être une cause importante de la dégradation du pergélisol sous-jacent affectant grandement les propriétés structurales de la chaussée. Puisque les transferts de chaleur dans le manteau neigeux sont essentiellement gouvernés par le mécanisme de conduction, son effet isolant peut être contré en diminuant l'épaisseur de neige présente sur les pentes et aux pieds du remblai. Pour ce faire, l'adoucissement de la pente des talus favorise un écoulement laminaire du vent qui souffle plus facilement la neige loin du remblai et minimise son accumulation.

Les présents travaux de recherche ont pour objectif de mettre au point une méthode de conception visant la stabilisation thermique des infrastructures de transport linéaires construites sur le pergélisol en optimisant la géométrie du remblai de façon à prendre en compte l'accumulation de neige préférentielle. L'approche générale de l'étude repose sur l'utilisation d'un modèle bidimensionnel, réalisé à l'aide du logiciel de modélisation géothermique TEMP/W, qui simule l'effet du couvert neigeux sur le sol sous-jacent.

L'instrumentation d'un transect de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, au Nunavik, a permis d'y documenter le régime thermique du sol et l'évolution du couvert neigeux. À partir de ces données, le facteur n de gel a pu être exprimé en fonction de la hauteur de neige suivant une équation logarithmique. Cette relation empirique sert de condition limite à la surface du modèle géothermique. Le modèle, calibré et validé à l'aide de températures collectées au site d'essai de Tasiujaq, permet de quantifier l'impact de la géométrie du remblai sur le gradient de température dans le sol d'infrastructure. Ce dernier est calculé à partir de la température à l'interface entre le remblai et le sol et celle à la profondeur de variation d'amplitude annuelle nulle. Un gradient de température nul ou négatif est visé afin de préserver le pergélisol. Un tel régime thermique est obtenu en corrigeant la température à l'interface. Ainsi, afin d'obtenir les températures à l'interface correspondantes, des simulations numériques sont effectuées pour six pentes de talus variant de 45 à 14 % (11H : 5V à 7H : 1V), et ce, pour trois hauteurs de remblai. Ultimement, ces résultats sont présentés sous la forme d'un outil de calcul de la pente requise pour assurer la stabilité thermique d'un remblai en fonction de la hauteur du remblai pour des sites où le vent et l'orientation favorise l'accumulation de neige.

Abstract

In northern regions, preferential accumulation of an insulating snowpack along linear transportation infrastructures prevents the extraction of heat in winter. In permafrost terrain, this thermal equilibrium modification can be a significant cause of the underlying permafrost degradation, which affects the structural properties of the roadway. Since heat transfers through the snowpack are essentially controlled by the mechanism of conduction, its insulating effect can be counteracted by decreasing the thickness of snow on the slopes and at the toe of the embankment. To achieve this goal, the gentle slope promotes a laminar wind flow that blows snow away easily and, therefore, minimizes its accumulation.

The main objective of this research project is to develop a design method aiming for thermal stabilization of linear transportation infrastructures built on permafrost by optimizing the embankment geometry to consider the preferential accumulation of snow. The general approach of the study relies on the use of a 2D model (produced with the modeling software TEMP/W) simulating the snowpack effect on the underlying ground.

The monitoring of a transect at Tasiujaq airstrip, in Nunavik, documents the thermal regime in the ground and the evolution of the snowpack. Based on those data, the freezing n-factor was expressed as a function of the snow thickness following a logarithmic equation. This empirical relation is used as an upper boundary of the geothermal model. Once calibrated and validated with the data collected at the Tasiujaq test site, the model allows to quantify the impact of the embankment geometry on the temperature gradient in the natural subgrade ground. This gradient is calculated from the temperature at the interface between the embankment and the ground and the temperature at the depth of zero annual amplitude. A temperature gradient of zero or less is aimed to preserve the permafrost. This ground thermal regime is obtained by correcting the temperature at the interface. Therefore, numeric simulations are run for six slopes between 45 and 14 % and for three embankment thickness. Finally, these results are presented through an engineering tool calculating the slope needed to assure the thermal stability of the infrastructure depending of the embankment height.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des symboles et abréviations.....	xiv
Remerciements.....	xvi
Introduction.....	1
1 État des connaissances.....	4
1.1 Pergélisol.....	4
1.1.1 Types et zones de pergélisol.....	4
1.1.2 Régime thermique.....	5
1.1.3 Mode de représentation et caractérisation du régime thermique.....	7
1.1.4 Facteurs affectant le pergélisol.....	10
1.2 Impact des infrastructures de transport linéaires.....	11
1.2.1 Perturbation du régime thermique.....	11
1.2.2 Enneigement différentiel.....	12
1.2.3 Approche préventive.....	15
1.3 Propriétés thermiques des sols.....	16
1.3.1 Teneur en eau non gelée.....	16
1.3.2 Conductivité thermique.....	17
1.3.3 Capacité thermique et chaleur latente.....	22
1.4 Propriétés thermiques de la neige.....	23
1.4.1 Principes physiques.....	23
1.4.2 Influence des paramètres.....	26
1.4.3 Mesures in-situ.....	34
1.5 Modélisation du couvert neigeux.....	39
1.5.1 Modèles existants.....	39
1.5.2 Température à la surface du sol.....	41

1.6	Pertinence du projet de recherche.....	42
2	Description du site expérimental et instrumentation	43
2.1	Travaux passés et résultats.....	44
2.1.1	Synthèses des travaux et détériorations observées	44
2.1.2	Géomorphologie et caractéristiques de la piste	45
2.1.3	Capteurs de température	49
2.1.4	Enneigement	51
2.2	Instrumentations au chaînage 5+515 m.....	54
2.2.1	Localisation du transect.....	55
2.2.2	Instrumentation	55
2.2.3	Mode de mise en place.....	60
3	Analyse des données thermiques de Tasiujaq.....	61
3.1	Température de l'air.....	61
3.1.1	Cycle climatique 2014-2015	61
3.1.2	Dix derniers cycles climatiques : 2004 à 2015.....	62
3.2	Régime dans le terrain naturel.....	64
3.3	Régime thermique au chaînage 5+515 m.....	66
3.3.1	Température à la surface (TAC2597)	66
3.3.2	Température dans la pente du remblai (TAC2598).....	69
3.3.3	Température au pied du remblai (TAC2599).....	72
3.4	Évolution du couvert neigeux.....	75
3.4.1	Épaisseur du couvert neigeux (TAC2599).....	75
3.4.2	Répartition du couvert neigeux (TAC2597).....	77
3.4.3	Validation.....	78
3.5	Température à la surface du sol.....	80
3.5.1	Différence de température	80
3.5.2	Facteur n	81
4	Simulations numériques	83
4.1	Logiciel utilisé	83

4.1.1	Modèle thermique complet.....	84
4.2	Modèle	84
4.2.1	Paramètres du modèle.....	84
4.2.2	Géométrie du modèle	86
4.2.3	Maillage du modèle.....	87
4.2.4	Propriétés des matériaux	87
4.2.5	Conditions initiales	92
4.2.6	Conditions limites.....	93
4.3	Calibration du modèle	98
4.4	Impact de la géométrie du remblai.....	100
4.4.1	Modification des conditions limites en surface.....	100
4.4.2	Validation du modèle.....	101
5	Approche de stabilisation thermique	103
5.1	Correction de la température à l'interface	103
5.2	Résultats des simulations	105
5.3	Outil de conception	108
5.3.1	Application du modèle.....	110
5.3.2	Effet de la hauteur du remblai.....	111
6	Discussion	113
6.1	Limitations et recommandations	113
6.1.1	Instrumentation	113
6.1.2	Modèle géothermique	114
6.1.3	Approche de stabilisation thermique.....	115
6.2	Considérations pour l'application.....	117
	Conclusion.....	118
	Bibliographie	120
	Annexe	124

Liste des figures

Figure 1 : Schématisation de la problématique (L'Hérault et al., 2013)	1
Figure 2 : Distribution du pergélisol au Canada (modifié de Ressources naturelles Canada, 1993)	5
Figure 3 : Schématisation du régime thermique du pergélisol (modifiée de Robitaille, 1996)	6
Figure 4 : Exemple de profils de température pour différents mois (traits pointillés) et d'enveloppes de températures minimales et maximales (traits pleins), Quaqaq, Québec (modifiée de Allard, 2016).....	8
Figure 5 : Exemple typique de diagramme des températures en fonction du temps, Salluit, Québec (Allard, 2016)	9
Figure 6 : Schématisation des indices de gel et de dégel (Dumais, 2014, modifiée de Doré et Zubeck, 2009)	10
Figure 7 : Évolution du régime thermique suivant la construction d'un remblai sur pergélisol (Doré et Burn, 2014).....	11
Figure 8 : Réponse d'un pergélisol riche en glace à la perturbation du régime thermique (modifié de Mackay, 1970 tel que cité par Gaumond et al., 2013).....	12
Figure 9 : Variation du profil de l'écoulement du vent (U) au-dessus d'une surface courbe montrant l'inversion du gradient de pression (dU/dZ) formant des zones de turbulence (Tabler, 1994).....	13
Figure 10 : Impact de l'enneigement le long du remblai de la piste de Tasiujaq, Québec. A) Construction du remblai sur la toundra en 1989. B) Accumulation importante de neige le long du remblai. C) Signes de dégradation en pied de remblai en 2004. (Allard, 2016).....	14
Figure 11 : Accumulation de neige le long d'un remblai, Salluit, Québec (Allard, 2016)	14
Figure 12 : Schématisation de l'eau non gelé dans le sol gelé (Konrad, 2014)	17
Figure 13 : Variation de la teneur en eau non gelée en fonction de la température et de la classification de sol (Konrad, 2014).....	17
Figure 14 : Schématisation de l'angle zénithal solaire (z) et de l'élévation solaire (h) (modifiée de Boudhar,2009).....	24
Figure 15 : Schématisation de l'évolution de l'élévation solaire à une latitude de 50° N (Boudhar, 2009)	24
Figure 16: Différence de température entre la température moyenne quotidienne à la surface du sol et la température moyenne quotidienne de l'air ($\Delta T = T_s - T_a$) de mi-mars 1997 à mi-mars 1998 à Franklin Bluffs, au nord de l'Alaska (Zhang, 2005).....	28
Figure 17 : Relation entre la température moyenne quotidienne à la surface du sol et la température moyenne quotidienne de l'air durant la période sans neige (A) et la période avec neige (B), de 1992 à 1997, à divers sites en Alaska (Zhang, 2005)	28

Figure 18 : Amplitude journalière de la température de l'air (ligne pâle) et de la température à la surface du sol (ligne foncé) à Franklin Bluffs, au nord de l'Alaska pour la période de mi-mars 1997 à mi-mars 1998 (Zhang, 2005)	29
Figure 19 : Différence entre les températures moyennes mensuelles du sol et les températures moyennes mensuelles de l'air à West Dock (WD), Deadhorse (DH) et Franklin Bluffs (FB), soit trois sites en Alaska, pour la période de 1987 à 1992 (Zhang, 2005)	30
Figure 20 : Relation entre la température moyenne annuelle à la surface du sol et la température moyenne annuelle de l'air à West Dock (WD), Deadhorse (DH), Franklin Bluffs (FB), Sagwon (SH) et Toolik Lake (IB), soit cinq sites au nord de l'Alaska, pour la période de 1987 à 1992 (Zhang, 2005).....	30
Figure 21 : Comparaison entre l'effet d'une mise en place rapide de la neige au printemps (trait plein) et une mise en place progressive (trait pointillé) pour une même hauteur de neige maximale et le même sol (modifiée de Goodrich, 1982)	31
Figure 22 : Relation entre l'épaisseur du manteau neigeux et la température à l'interface neige-sol à Ivotuk en Alaska en novembre 1998. Le trait épais identifie l'épaisseur de neige optimale (modifiée de Zhang, 2005)	32
Figure 23 : Schématisation du profil de température dans le manteau de neige en régime permanent.....	32
Figure 24 : Équations de régression linéaire du log de la conductivité thermique effective en fonction de la densité de la neige selon différentes publications (Zhang, 2005)	33
Figure 25 : Divers types de «density cutters». De gauche à droite : boîte (Hydro-Tech 100 cm ³), coin (Snow Research Associates 200 cm ³) et tube (Wasatch Touring 100 cm ³) (Conger et McClung, 2009) .	35
Figure 26 : Schéma d'une aiguille munie de sondes communément utilisée. T _r est la sonde de température de référence et T _h , la sonde au centre de la zone chauffée. Leur différence de température enregistrée permet de déterminer la conductivité thermique (modifiée de Domine et al., 2010).....	37
Figure 27 : Exemple de profil de température enregistrée sur une période de 24h, du 12 au 13 février 2008. La «TCT Probe» correspond à la sonde munie de thermocouples espacés de 2,5 à 40 cm les uns des autres. Les traits pointillés indiquent leur position relative (Oldroyd et al., 2012).....	38
Figure 28 : Évolution de la densité et de la hauteur de la neige au cours de l'expérimentation. La densité est mesurée à chaque 5 cm de profondeur (Oldroyd et al., 2012)	39
Figure 29 : Processus physiques considérés lors de la modélisation du couvert neigeux par le modèle SNOWPACK (Bartelt et Lehning, 2002).	40
Figure 30 : Image satellite de la piste d'atterrissage de Tasiujaq (modifiée de Google Earth, 2013)	43
Figure 31 : Adoucissement de la pente à la section d'essai de Tasiujaq, été 2007 (Jørgensen et Doré, 2009)	45
Figure 32 : A) Photographie aérienne avant la construction. B) Unités géologiques de surface et emplacement de la piste, des forages et des sections d'essais. C) Coupe sous le remblai. A sédiments	

alluviaux, Mb sédiments marins littoraux et pré littoraux, Mi sédiments intertidaux et MG glaciomarins (L'Hérault et al., 2012)	47
Figure 33 : Coupe stratigraphique de la terrasse de l'aéroport de Tasiujaq incluant les granulométries (Allard <i>et al.</i> , 2007)	48
Figure 34 : Station de référence HT304 dans le milieu naturel, Tasiujaq (Allard et al., 2013)	50
Figure 35 : Accumulation de neige en bordure de la piste d'atterrissage a) du côté nord-est et b) du côté sud-ouest, Tasiujaq, avril 2005 (Allard et al., 2007).....	52
Figure 36 : Vitesse cumulée (en km/h) et fréquence cumulée (en jours) du vent en fonction de la direction de provenance, aéroport de Tasiujaq, 2006 à 2009 (modifiée de Ficheur, 2011).....	52
Figure 37 : Direction et vitesse du vent a) de mai 2015 à septembre 2015 ainsi que b) d'octobre 2014 à avril 2015 à Tasiujaq.....	53
Figure 38 : Profils de l'épaisseur de neige en avril a) du côté nord-ouest, b) du côté sud-est ainsi que les températures à la surface, Tasiujaq, 2005 (Allard et al., 2007). Les emplacements des câbles à thermistances 180, 181 et 304, ainsi que le chaînage 5+580 m sont indiqués à la figure 32b.....	54
Figure 39 : Coupe transversale de la piste de Tasiujaq montrant l'instrumentation au chaînage 5+515 m	56
Figure 40 : Montage du système d'acquisition et de transition D405 de BeadedStream au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, septembre 2014.....	58
Figure 41 : Instrumentation au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, septembre 2014	59
Figure 42 : Instrumentation au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, avril 2015	59
Figure 43 : Excavation du remblai en vue de la mise en place du TAC2598 au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, septembre 2014.....	60
Figure 44 : Comparaison entre les moyennes quotidiennes de la température de l'air enregistrées à la station HT304 et au câble à thermistance TAC2599. a) Température de l'air en fonction du temps. b) Corrélation entre les moyennes quotidiennes aux deux sites.	62
Figure 45 : Évolution de la température de l'air sur les 11 dernières années (station HT304)	63
Figure 46 : Profils verticaux des moyennes quotidiennes des températures maximales, minimales et moyennes dans le sol à la station HT304 d'octobre 2014 à septembre 2015, aéroport de Tasiujaq.....	64
Figure 47 : Profils verticaux des températures du sol montrant les moyennes quotidiennes (station HT304).....	65
Figure 48 : Moyennes quotidiennes de la température de l'air et du sol en fonction du temps à la station HT304	66
Figure 49 : Maximum, minimum et moyenne des moyennes quotidiennes des températures à la surface du sol en fonction de la position par rapport au pied du remblai (0 m) d'octobre 2014 à août 2015	

(TAC2597). Les abscisses négatives et positives représentent respectivement le terrain naturel et le remblai.....	67
Figure 50 : Moyennes quotidiennes de la température de l'air et à la surface du sol en fonction du temps et de la position par rapport au pied du remblai d'octobre 2014 à septembre 2015 (TAC2597)	68
Figure 51 : Profils verticaux des moyennes quotidiennes des températures maximales, minimales et moyennes à la moitié de la pente du remblai d'octobre 2014 à septembre 2015 (TAC2598).....	70
Figure 52 : Moyennes quotidiennes de la température de l'air et du sol à la moitié de la pente du remblai en fonction du temps (TAC2598).....	71
Figure 53 : Profils verticaux des moyennes quotidiennes des températures maximales, minimales et moyennes au pied du remblai d'octobre 2014 à septembre 2015 (TAC2599).....	72
Figure 54 : Profils verticaux des moyennes mensuelles des températures maximales, minimales et moyennes au pied du remblai d'octobre 2014 à septembre 2015 (TAC2599).....	73
Figure 55 : Moyennes quotidiennes de la température de l'air et du sol au pied du remblai en fonction du temps (TAC2599).....	74
Figure 56 : a) Différence avec la température de l'air le long d'un profil vertical au-dessus du sol; b) Estimation de l'évolution du couvert neigeux au pied du remblai au chaînage 5+515 m de l'aéroport de Tasiujaq	76
Figure 57 : Occurrence du couvert neigeux au sud-est de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, au chaînage 5+515 m.....	77
Figure 58 : Comparaison entre les estimations de l'évolution du manteau neigeux et l'occurrence d'épisodes de précipitations archivés par Environnement Canada. Les lignes bleues et rouges correspondent respectivement à des événements de neige et de pluie.....	79
Figure 59 : Différence de température entre l'air et la surface du sol en fonction de la hauteur de neige accumulée au site d'étude de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, hiver 2014-2015.....	81
Figure 60 : Valeur de facteur n en fonction de la hauteur de neige accumulée au site d'étude de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, hiver 2014-2015.....	82
Figure 61 : Pourcentage du nombre d'itérations nécessaires pour que la convergence de chacune des 74 460 solutions soit atteinte au cours des 50 de simulation.....	85
Figure 62 : Géométrie du modèle réalisé sur TEMP/W.....	86
Figure 63 : Fonctions de la teneur en eau non gelée volumique proposée par TEMP/W pour différent type de matériaux granulaires	89
Figure 64 : Relations de la conductivité thermique en fonction de la température utilisées pour les matériaux du modèle.....	91
Figure 65 : Résultats de l'analyse en régime permanent montrant les conditions limites initiales appliquées	93

Figure 66 : Cycle climatique annuel du modèle (ligne rouge) basée sur les moyennes mensuelles d'octobre 2014 à septembre 2015 (points bleus).....	94
Figure 67 : Schématisation des conditions limites appliquées à la surface du modèle	95
Figure 68 : Exemples de cycles climatiques annuel de l'air (trait pointillé) corrigé par un facteur n appliqués comme condition limite dans la pente du remblai (4 à 5 m), au pied du remblai (-2 à -1 m), dans le terrain naturel affecté par le remblai (-11 à -10 m) et dans le terrain naturel (-25 à -40 m).....	97
Figure 69 : Temps nécessaires pour la stabilisation des conditions limites du modèle.....	98
Figure 70 : Comparaison du profil thermique modélisé (traits pointillés) avec le profil thermique mesuré (traits pleins) par le câble à thermistances HT304 dans le terrain naturel.....	99
Figure 71 : Comparaison des profils thermiques modélisés (traits pointillés) avec les profils thermiques mesurés (traits pleins) en pied de remblai (TAC2599) et dans la pente du remblai (TAC2598)	100
Figure 72 : Schématisation des conditions limites appliquées à la surface du modèle ayant une pente adoucie de 6H : 1V.....	101
Figure 73 : Comparaison entre les moyennes mensuelles des températures minimales, maximales et moyennes des valeurs simulées et des données collectées à la mi-pente de la section de la pente adoucie d'octobre 2012 à septembre 2013, aéroport de Tasiujaq	102
Figure 74 : Marge de sécurité nécessaire en fonction de l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) et de la hauteur du remblai (modifiée de Doré et Kong (2019)).....	104
Figure 75 : Schématisation de l'approche de stabilisation employée (modifiée de Doré et Kong, 2019)	105
Figure 76 : Résultat du modèle en date du 15 mai pour la géométrie originale du remblai (environ 11H : 5V)	106
Figure 77 : Résultat du modèle en date du 15 mai pour la géométrie d'une pente adoucie de 6H : 1V	106
Figure 78 : Décalage des enveloppes de températures de la pente originale de 11H : 5V (traits pleins) à celles d'un remblai ayant une pente de 6H : 1V (traits pointillés)	107
Figure 79 : Pente du remblai permettant d'atteindre le décalage thermique dans le sol naturel requis .	108
Figure 80 : Comparaison avec l'abaque de conception proposé par Doré et Kong (2019)	110
Figure 81 : Abaque de conception en fonction de la hauteur du remblai	111

Liste des tableaux

Tableau 1 : Facteur κ en fonction du type de sol et de l'état du sol (Côté et Konrad, 2005).....	21
Tableau 2 : Paramètres pour déterminer k_{sec} en fonction du type de particules comprises dans le sol (Côté et Konrad, 2005).....	21
Tableau 3: Résumé des facteurs favorisant le refroidissement et le réchauffement à la surface du sol....	26
Tableau 4 : Stratigraphie des unités géologiques au chaînage 5+515 m.....	55
Tableau 5 : Comparaison des températures de l'air mesurées à la station HT304 et au câble à thermistances TAC2599 de septembre 2014 à août 2015	62
Tableau 6 : Propriétés géotechniques attribuées à chacun des matériaux du modèle	88
Tableau 7 : Propriétés des matériaux utilisées lors de la modélisation au site de Tasiujaq.....	92
Tableau 8 : Facteurs de gel et de dégel des surfaces n'étant pas affectées par la présence de neige	95
Tableau 9 : Statistiques des régressions pour les trois hauteurs de remblai	111
Tableau 10 : Observations météorologiques quotidiennes archivées du 1 ^{er} octobre 2014 au 31 mai 2015, à la station de mesure Tasiujaq A (Environnement Canada, 2015).....	124

Liste des symboles et abréviations

Symbole	Symbole de grandeur	Définition
α	L^2/t	Diffusivité thermique
ΔT_{requis}	T	Décalage thermique requis
θ_w	L^3/L^3	Teneur en eau volumique
θ_a	L^3/L^3	Teneur en air
θ_i	L^3/L^3	Teneur en glace volumique
θ_s	L^3/L^3	Fraction volumique des particules solides
θ_u	L^3/L^3	Teneur en eau non gelée volumique
ρ	M/L^3	Masse volumique
ρ_n	M/L^3	Masse volumique de la neige
ρ_s	M/L^3	Masse volumique des particules solides
ρ_d	M/L^3	Masse volumique du sol sec
c	E/L^3T	Capacité thermique massique
C	E/L^3T	Capacité thermique volumique
C_a	E/L^3T	Capacité thermique volumique de l'air
C_f	E/L^3T	Capacité thermique volumique du matériel gelé
C_i	E/L^3T	Capacité thermique volumique de la glace
C_s	E/L^3T	Capacité thermique volumique des particules solides
C_u	E/L^3T	Capacité thermique volumique du matériel non gelé
C_w	E/L^3T	Capacité thermique volumique de l'eau
CTI	T	Correction de la température à l'interface remblai/sol
dT/dz	T/L	Gradient de température dans la direction de z
$\acute{E}EN$	L	Équivalent en eau contenue dans la neige
G_s	---	Densité des grains solides
h_n	E/tL^2T	Coefficient de transfert thermique de la neige
H_n	L	Épaisseur du couvert neigeux
$H_{remblai}$	L	Hauteur du remblai
ID_a	$T \cdot t$	Indice de dégel de l'air
ID_s	$T \cdot t$	Indice de dégel du sol
IG_a	$T \cdot t$	Indice de gel de l'air

IG_s	T·t	Indice de gel du sol
k	E/t·L·T	Conductivité thermique
K_e	---	Nombre adimensionnel de Kersten
k_f	E/t·L·T	Conductivité thermique du sol gelé
k_n	E/t·L·T	Conductivité thermique de la neige
k_{sat}	E/t·L·T	Conductivité thermique du sol saturé
k_{sec}	E/t·L·T	Conductivité thermique du sol sec
k_u	E/t·L·T	Conductivité thermique du sol non gelé
$l_{remblai}$	L	Largeur du talus du remblai
L_s	E/L ³	Chaleur latente de fusion volumique d'un sol
L_w	E/L ³	Chaleur latente de fusion volumique de l'eau
MS	T	Marge de sécurité
n	---	Porosité
n_f	---	Facteur n de gel
n_t	---	Facteur n de dégel
Q	E/t·L ²	Flux de chaleur
S_r	---	Degré de saturation
T_a	T	Température de l'air
$T_{interface}$	T	Température à l'interface entre le remblai et le sol naturel
$T_{pergélisol}$	T	Température du pergélisol
T_s	T	Température à la surface du sol
TMAA	T	Température moyenne annuelle de l'air
TMAS	T	Température moyenne annuelle à la surface du sol
w	M/M	Teneur en eau gravimétrique
w_i	M/M	Teneur en glace gravimétrique
w_u	M/M	Teneur en eau non gelée gravimétrique

Remerciements

Ce mémoire de maîtrise doit son existence à la contribution et au soutien de nombreuses personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je tiens d'abord à remercier mon superviseur, Guy Doré, pour m'avoir offert la chance de faire partie de son équipe de recherche aux projets plus passionnants les uns que les autres et de participer à des expériences hautement enrichissantes. Le chemin n'aura pas été sans quelques trébuchements, mais le temps et la confiance qu'il a su m'accorder m'auront permis de conduire mon projet à terme. J'aimerais aussi remercier Chantal Lemieux pour son soutien administratif, technique, mais également humain.

De plus, je me dois d'offrir mes remerciements à tous les partenaires du groupe de recherche ARQULUK, en particulier au support du Ministère des Transports du Québec.

Parmi mes amis et collègues, je tiens particulièrement à remercier Julie M.-Lepage qui a su stimuler mon intérêt pour la recherche en ingénierie dans les régions nordiques, Heather Brooks qui m'a fait voir la pertinence et l'intérêt de cette science en essor, et Caroline Richard qui m'a inspirée et convaincue de mener mon projet jusqu'au bout.

J'adresse aussi mes remerciements à tous mes amis proches qui auront parfois douté, mais toujours su me redonner confiance dans les moments critiques. Un merci particulier à Frédéric Laurin-Lalonde pour avoir cru en moi et conservé la bouteille de Veuve Clicquot pendant aussi longtemps. Merci aussi à ma meilleure amie, Fannie Dufour, pour sa capacité à me motiver via de véhéments encouragements, et ce, de prêt ou de loin.

Je termine en exprimant mon immense reconnaissance à mes parents pour leur soutien inestimable et la confiance inébranlable qu'ils ont su m'accorder depuis le tout début. Je dédie cette pièce marquante de mon éducation à mon cher papa, parti trop tôt.

Introduction

Dans les régions froides, l'action isolante du couvert neigeux est un des principaux facteurs influençant le flux d'énergie à la surface du sol ainsi que le régime thermique dans le sol. Grâce à divers modèles numériques, plusieurs auteurs ont tenté d'évaluer et de quantifier l'impact thermique de la neige en milieu naturel afin de vérifier l'effet de sa présence sur la dégradation du pergélisol en régions arctiques et subarctiques (Goodrich, 1982; Nicholson et Granberg, 1973; Ling et Zhang, 2006).

En faisant obstacle au vent, les infrastructures de transport linéaires (routes, pistes d'atterrissages ou chemins de fer) favorisent l'accumulation de neige le long de la pente du remblai à l'abri des vents dominants. Cet épaissement du couvert neigeux accroît significativement la rétention de chaleur dans le sol en hiver. Conséquemment, une dégradation importante du pergélisol se produit sous les pentes et le pied du remblai affectant la capacité portante du sol d'infrastructure et pouvant causer des tassements importants endommageant significativement les infrastructures. La figure 1 illustre ce phénomène.

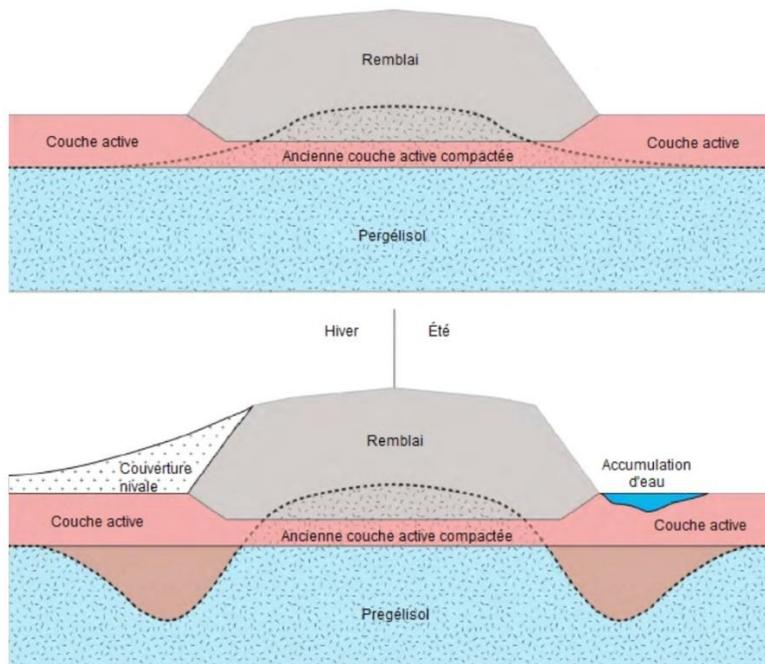


Figure 1 : Schématisation de la problématique (L'Hérault et al., 2013)

Le cas de la piste d'atterrissage de Tasiujaq illustre très bien cette problématique (Doré et Beaulac, 2007; Allard et coll., 2009; Ficheur et Doré, 2010; L'Hérault et coll., 2012). En effet, en hiver, l'orientation des vents dominants est quasi perpendiculaire à l'axe longitudinal du remblai. Des accumulations pouvant

atteindre jusqu'à 175 cm ont été observées le long du remblai. Cette valeur est largement supérieure aux valeurs habituellement mesurées dans la toundra. D'importantes dépressions le long du remblai ainsi que des fissures sur la surface de roulement ont été répertoriées. Un exercice de simulations numériques a été réalisé par L'Hérault et coll. (2012). Toutefois, l'absence d'informations thermiques en pied de remblai ne permettait pas de comprendre pleinement la problématique associée à l'accumulation de neige.

Le projet de recherche a pour objectif général de mettre au point une méthode de conception visant la stabilisation thermique des infrastructures de transport linéaires construites sur le pergélisol en optimisant la géométrie du remblai de façon à prendre en compte l'accumulation de neige préférentielle. Pour y parvenir, six objectifs spécifiques ont été identifiés. Ces derniers sont détaillés ci-dessous, de même que les chapitres qui y sont associés.

Dans un premier temps, une synthèse de l'état des connaissances actuelles sur le thème de la recherche a été effectuée afin de situer les travaux et d'en justifier la pertinence. À cette fin, le chapitre 2 inclut des informations sur le pergélisol ainsi que l'impact des infrastructures de transport linéaires sur sa dégradation, particulièrement en lien avec l'accumulation de neige le long du remblai. Parallèlement, divers mécanismes de transferts de chaleur dans le sol et le couvert neigeux sont abordés.

Le second objectif spécifique est de collecter des données fiables sur le régime thermique dans le sol et sur l'évolution du couvert neigeux le long d'un transect perpendiculaire à un remblai construit sur le pergélisol au cours d'un cycle climatique complet. Le chapitre 3 documente le site d'études de l'aéroport de Tasiujaq en rappelant les résultats des travaux antérieurs réalisés et en expliquant l'instrumentation mise en place dans le cadre de la présente étude. Le chapitre 4 analyse les résultats collectés au site d'étude.

Les informations collectées au cours de l'hiver 2014-2015 permettent d'établir la relation entre l'évolution du couvert neigeux et la température à la surface du sol dans le cadre du troisième objectif spécifique. Les résultats sont présentés à la fin du chapitre 4.

Le quatrième objectif spécifique du projet est de mettre au point un modèle numérique bidimensionnel capable de simuler adéquatement l'effet du couvert neigeux sur le sol sous-jacent, et ce, dans la pente et au pied du remblai d'une infrastructure de transport linéaire. Ce modèle, basé sur le site d'essai de Tasiujaq, est calibré à l'aide des données recueillies. Le chapitre 5 évoque le logiciel d'analyses numériques par éléments finis utilisé, les paramètres et caractéristiques du modèle ainsi que sa validation.

Le modèle calibré a permis de quantifier l'impact des paramètres géométriques du remblai tels que la hauteur et l'angle des pentes. Les résultats de ce cinquième objectif spécifique sont présentés au chapitre 6.

Ces résultats ont permis d'établir la relation entre la pente du remblai, la hauteur du remblai et le gradient de température dans le sol d'infrastructure dans le cadre du sixième objectif spécifique. Cette relation est ultimement présentée sous la forme d'un outil de calcul de l'angle de la pente requise pour assurer la stabilité thermique d'un ouvrage en fonction de l'épaisseur du remblai. La mise au point et l'utilisation de cet outil est détaillé à la section 6.

Finalement le chapitre 7 offre une revue critique des travaux de recherche réalisés, discute des travaux futurs recommandés et émet des considérations quant à l'application de l'approche de conception proposée. Les principales conclusions du projet de recherche sont synthétisées dans la conclusion.

1 État des connaissances

1.1 Pergélisol

Le pergélisol est défini comme étant un sol ou une roche qui se maintient à une température égale ou au-dessous de 0 °C pendant au moins deux ans (Comité Associé de Recherches Géotechniques, 1988). Cette définition est uniquement fonction de la température, faisant fi de la lithologie, de la granulométrie, ainsi que de la teneur en eau et en glace. De plus, pour les mêmes raisons, le pergélisol n'est pas nécessairement gelé étant donné que l'eau qu'il contient peut posséder un point de congélation inférieur à 0 °C. Le pergélisol ne doit pas être considéré comme un état permanent. En effet, des perturbations naturelles (climatiques, géomorphologiques, écologiques) ou anthropiques peuvent provoquer l'élévation de la température moyenne annuelle du sol au-dessus de 0 °C. Le pergélisol est un phénomène qui existe depuis plusieurs siècles. Plus précisément, en Amérique du Nord, il s'agit du résultat du climat ayant provoqué la dernière glaciation qui s'est terminée il y a 7 000 à 8 000 ans, ou encore le « Petit Âge Glaciaire » qui a débuté il y a 1 900 ans et s'est terminé il y a 1 300 ans (Allard, 2016).

1.1.1 Types et zones de pergélisol

La figure 2 illustre les connaissances actuelles sur la répartition et les limites du pergélisol au Canada. Les zones de pergélisol dit continu sont caractérisées par la présence de pergélisol sur la presque totalité du territoire. Jusqu'à 10% de secteurs non pergélisolés peuvent exister dans les zones de pergélisol continu. Les secteurs non pergélisolés sont appelées taliks (Comité Associé de Recherches Géotechniques, 1988) et subsistent principalement sous les lacs et cours d'eau profonds. Lorsque le pergélisol est présent dans certaines parties du sous-sol d'une région où des zones non pergélisolées sont également existantes, il est alors question de pergélisol discontinu. La zone de pergélisol discontinue est limitée au nord par la zone de pergélisol continu et, au sud, par la limite méridionale du pergélisol. Il n'existe toutefois pas de démarcation nette entre la zone de pergélisol continu et discontinu. Près de la limite septentrionale, le pergélisol discontinu est dit étendu et couvre entre 50 à 90 % du territoire, tandis que près de la limite méridionale, il se présente sous forme d'îlots isolés et est alors appelé pergélisol sporadique. Il ne représente alors que 10 à 50 % du territoire (Comité Associé de Recherches Géotechniques, 1988).

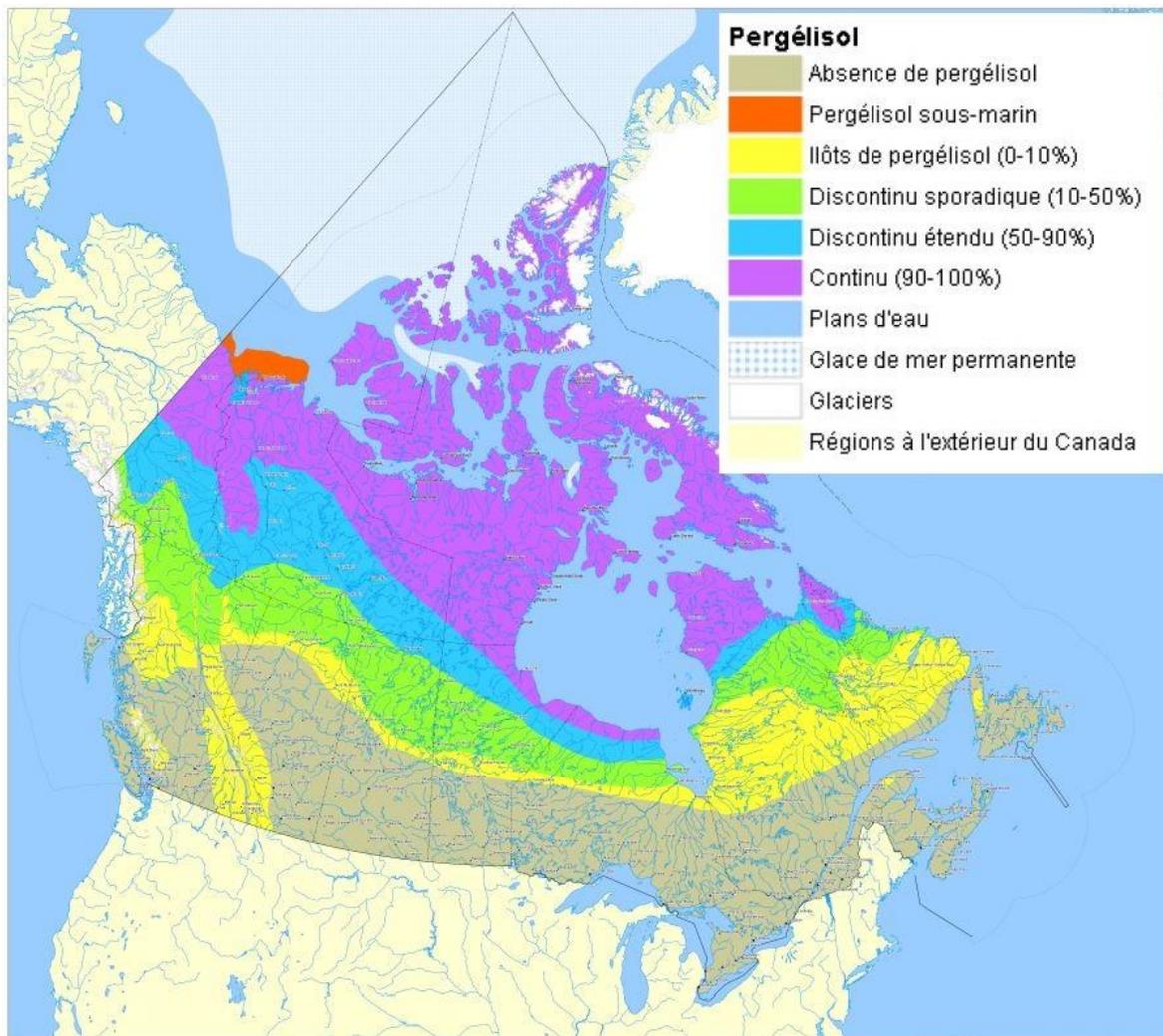


Figure 2 : Distribution du pergélisol au Canada (modifié de Ressources naturelles Canada, 1993)

1.1.2 Régime thermique

Le régime thermique du pergélisol, défini comme l'ensemble des changements de température l'affectant (Beaulac, 2006), est adéquatement représenté par une courbe trompette (figure 3). Cette dernière illustre les enveloppes de températures annuelles maximales et minimales en fonction de la profondeur. Suivant le cycle annuel de variation de la température de l'air, la température dans le sol tend à varier saisonnièrement jusqu'à la profondeur de l'amplitude annuelle nulle se trouvant approximativement entre 10 et 20 m (O.B. Andersland et Ladanyi, 2004). Il s'agit de la profondeur à laquelle la fluctuation annuelle est minimale, soit inférieure à 0,1 °C. En-dessous de ce point, l'influence du cycle annuel de la température de l'air n'est plus ressentie et le régime thermique du sol ne varie qu'en réponse à des changements à long terme s'étendant sur plusieurs centaines ou milliers d'années (Andersland et Anderson, 1978). Comme le

montre la figure 3, à de telles profondeurs, la température du sol augmente avec la profondeur suivant le gradient géothermique local. En se fiant à la définition du pergélisol énoncée précédemment, la température du pergélisol doit être inférieure à 0 °C. Ainsi, lorsque la température du sol en profondeur devient positive, cela marque la base du pergélisol. De même, le plafond du pergélisol correspond à la profondeur superficielle à laquelle la température maximale annuelle atteint 0 °C. Le pergélisol est donc délimité par ces deux profondeurs qui contrôlent son épaisseur. Celle-ci varie grandement selon les conditions climatiques et l'environnement. En effet, au sud de l'aire de distribution du pergélisol, son épaisseur est de seulement quelques mètres, alors qu'elle peut atteindre plusieurs centaines de mètres dans les zones de pergélisol continu (Allard, 2016). Généralement, plus le climat est froid, plus le pergélisol est épais. Cependant, plusieurs facteurs régionaux et locaux contrôlent aussi cette épaisseur, dont les propriétés physiques et thermiques du sol, ainsi que le couvert de neige, le type de végétation et la topographie qui affectent grandement la différence entre la température de l'air et la température à la surface du sol.

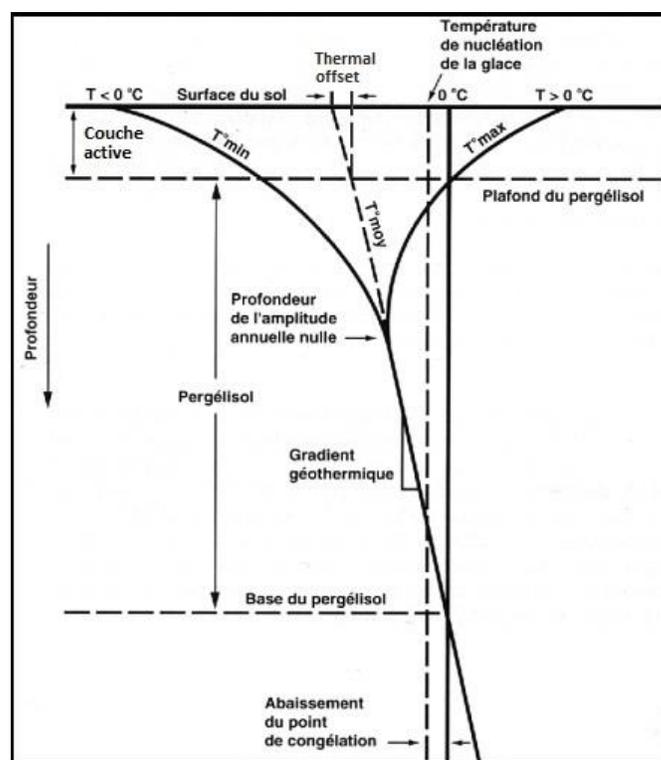


Figure 3 : Schématisation du régime thermique du pergélisol (modifiée de Robitaille, 1996)

Au-dessus du plafond du pergélisol se trouve une couche superficielle du terrain soumise au gel et au dégel saisonnier, nommée la couche active. La profondeur de la couche active varie temporellement, soit d'une année à l'autre, ainsi que spatialement, allant de moins de 15 cm à de hautes latitudes jusqu'à plus

d'un mètre plus au sud. La différence entre les températures moyennes annuelles à la surface du sol et au bas de la couche active est désignée par le terme « thermal offset » (figure 3). Comme c'est habituellement le cas, le « thermal offset » est négatif puisque la conductivité thermique du sol gelé est plus grande que celle du sol non gelé. Ainsi, la magnitude de l'écart est déterminée par le ratio entre les conductivités thermiques du sol gelé et non gelé, ainsi que par l'épaisseur de la couche active pour des conditions de surface données (Goodrich, 1982).

1.1.3 Mode de représentation et caractérisation du régime thermique

De façon général, la température du pergélisol peut être représentée par deux principaux graphiques mettant chacun en lumière différents éléments du régime thermique. Ces modes de représentation sont les profils de température verticaux et les courbes d'évolution de la température en fonction du temps.

La représentation de la température en fonction de la profondeur permet d'observer le régime thermique du sol à un moment quelconque. Par exemple, en utilisant des moyennes de températures journalières, mensuelles ou saisonnières, le régime thermique pour une journée donnée, un mois donné ou une saison donnée peut être examiné (figure 4). La courbe trompette évoquée précédemment est aussi une façon de représenter la température du sol le long d'un profil vertical (figure 3 et figure 4). Dans les deux cas, il est possible d'apprécier la diminution de l'amplitude des variations de température avec l'augmentation de la profondeur. Ce phénomène est associé à une propriété fondamentale représentant la facilité du sol à subir des changements de température, soit sa diffusivité thermique qui est définie par le rapport de la conductivité thermique sur la capacité calorifique volumique du sol (Comité Associé de Recherches Géotechniques, 1988). Comme discuté précédemment, l'enveloppe des températures maximales d'une courbe trompette permet de déterminer l'épaisseur de la couche active. Le profil des températures à la fin de l'été, soit au moment où le dégel a atteint sa profondeur maximale, permet la même déduction (figure 4).

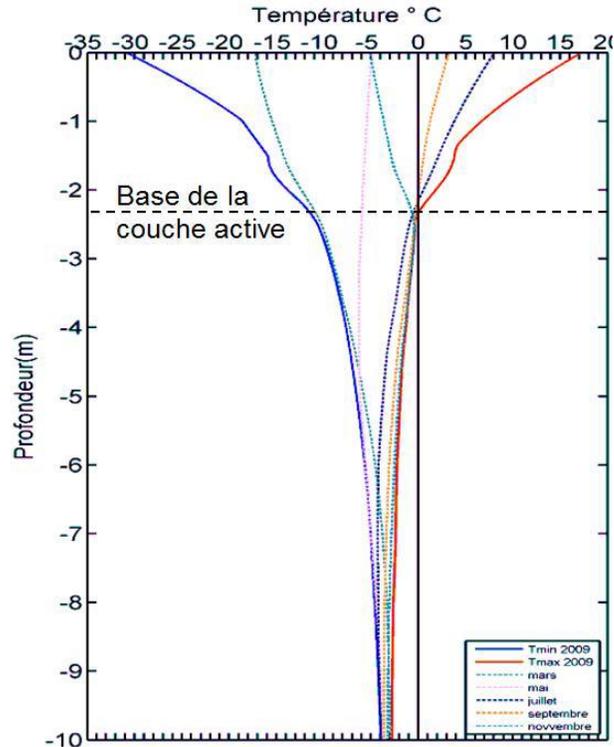


Figure 4 : Exemple de profils de température pour différents mois (traits pointillés) et d’enveloppes de températures minimales et maximales (traits pleins), Quaqtaq, Québec (modifiée de Allard, 2016)

La température à la surface du sol est soumise à des fluctuations périodiques, autant sur une période journalière (24 heures) qu’annuelle (365 jours). La représentation des courbes de températures du sol en fonction du temps permet d’examiner l’impact de ces variations de température à différentes profondeurs au cours d’un cycle climatique. Afin d’analyser la réaction du sol au climat, la température de l’air est généralement aussi représentée (figure 5). De cette façon, l’impact de facteurs ponctuels, comme la présence d’un couvert neigeux ou l’infiltration subite d’eau dans le sol, peut être observé. De plus, lors des périodes de gel et de dégel, le diagramme montre que la température du sol reste stationnaire lors du changement de phase de l’eau (figure 5). Ce phénomène, contrôlé par la chaleur latente de fusion de l’eau, est appelé la période zéro et met en évidence la présence d’eau dans le sol. Joint à la diffusivité thermique, la période zéro induit un déphasage des courbes qui s’accroît avec la profondeur. Tout comme les profils verticaux, l’évolution de la température du sol montre aussi la diminution de l’amplitude de la variation de température avec l’augmentation de la profondeur lorsque plusieurs profondeurs sont représentées (figure 5).

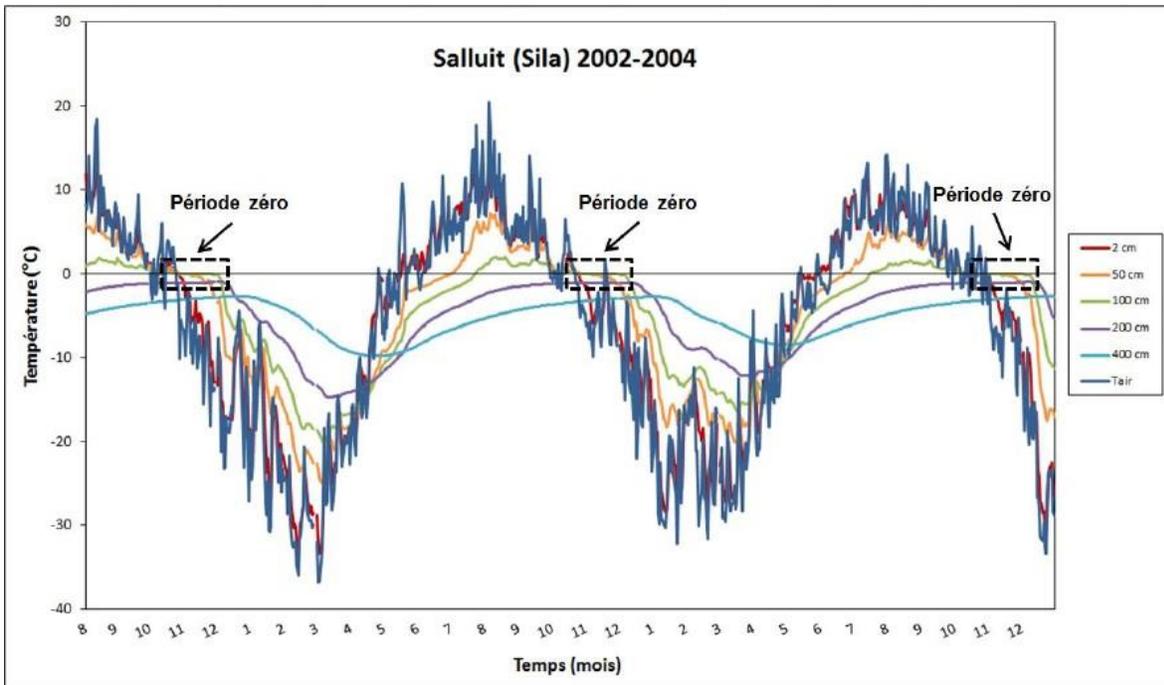


Figure 5 : Exemple typique de diagramme des températures en fonction du temps, Salluit, Québec (Allard, 2016)

En considérant l'évolution de la température de l'air en fonction du temps, le régime thermique du sol peut être caractérisé par les indices de gel et de dégel. Ceux-ci sont des paramètres d'ingénierie permettant de déterminer la sévérité du climat en fonction de la température de l'air (Doré et Zubeck, 2009). Plus précisément, pour une période donnée, l'indice de gel correspond au nombre cumulatif de degrés-jours au-dessous de 0°C et l'indice de dégel correspond au nombre cumulatif de degrés-jour au-dessus de 0 °C (Comité Associé de Recherches Géotechniques, 1988). Ainsi, graphiquement, ces indices peuvent être définis par la surface entre la droite de 0 °C et la courbe des températures moyennes quotidiennes au cours d'une période de temps qui correspond généralement à une année climatologique (figure 6). Cette définition des indices de gel et de dégel correspond aux indices annuels totaux. Ces derniers sont utilisés dans plusieurs modèles pour prédire la répartition du pergélisol.

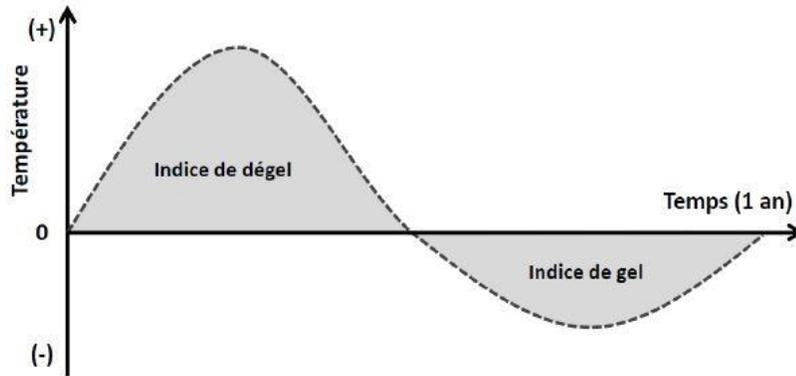


Figure 6 : Schématisation des indices de gel et de dégel (Dumais, 2014, modifiée de Doré et Zubeck, 2009)

Les indices de dégel et de gel nominaux de l'air sont obtenus en calculant la moyenne des indices saisonniers des trois étés les plus chauds ou des trois hivers les plus froids enregistrés au cours des 30 dernières années. Étant donné que la température de l'air est distincte de la température à la surface du sol, il existe aussi des indices de gel et de dégel nominaux de surface. Ces derniers sont couramment employés dans les études géotechniques afin d'évaluer respectivement la profondeur maximale de dégel et la pénétration du gel dans le sol (Comité Associé de Recherches Géotechniques, 1988).

1.1.4 Facteurs affectant le pergélisol

Une condition essentielle pour que le pergélisol existe ou soit maintenu est que la température moyenne annuelle à la surface du sol soit égale ou inférieure à 0 °C. En terrain naturel, la température à la surface du sol est contrôlée par divers facteurs. À l'échelle régionale, le régime thermique du pergélisol est régi par des facteurs associés au climat, tel que la température de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et les précipitations. La température de l'air est la composante du climat qui influence le plus le profil de température dans le pergélisol, ainsi que l'épaisseur et les variations de la couche active (Allard, 2016). Localement, des facteurs interdépendants régissent les échanges de chaleur entre l'atmosphère et la surface du terrain. Les plus importants sont la couverture de neige, la hauteur et la densité du couvert végétal, la présence d'humidité en surface du terrain, ainsi que la nature de la surface qui peut être minérale ou composée d'un horizon organique. Ainsi, ponctuellement ces caractéristiques en surface peuvent amortir considérablement l'influence des températures de l'air sur le sol et réchauffer la température annuelle moyenne en surface jusqu'à ce que cette dernière soit supérieure à 0 °C. Dans de telle circonstance, il n'y aura pas de pergélisol malgré une température moyenne de l'air négative (Allard, 2016).

1.2 Impact des infrastructures de transport linéaires

1.2.1 Perturbation du régime thermique

Tel que discuté précédemment, le pergélisol est un milieu physique en équilibre fragile avec son environnement (Doré et Burn, 2014). Ainsi, la construction d'une infrastructure linéaire de transport perturbe grandement le régime thermique existant. Tel que schématisé à la figure 7a, avant la construction, le régime thermique dans un sol naturel, ayant des propriétés thermiques et géotechniques données, est en équilibre avec le climat et les caractéristiques de surface.

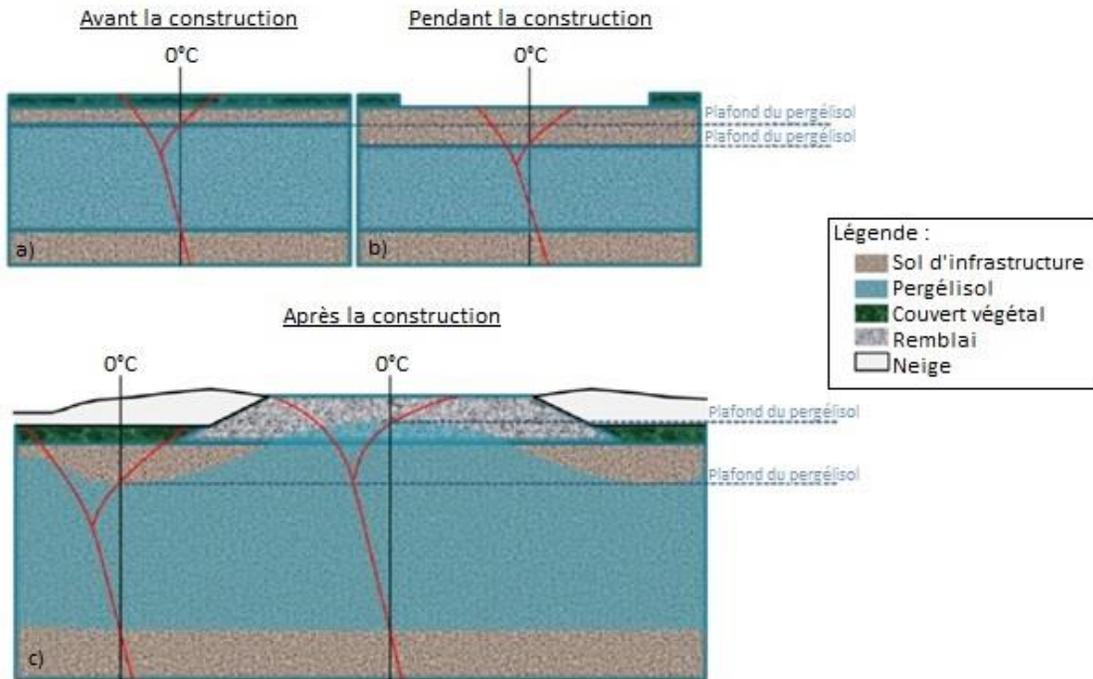


Figure 7 : Évolution du régime thermique suivant la construction d'un remblai sur pergélisol (Doré et Burn, 2014)

Au cours de la construction, l'altération du couvert végétal, la compaction des sols ou encore la modification du réseau de drainage perturbent le régime thermique du pergélisol sous-jacent (Gaumond et Doré, 2013). Ce dérangement se manifeste par l'approfondissement de la couche active (figure 7b). Finalement, la construction du remblai induit la remontée du plafond du pergélisol dans la fondation granulaire au centre de la chaussée (figure 7c). Le déneigement de la surface de roulement favorise aussi la remontée du plafond du pergélisol en permettant l'extraction de la chaleur durant l'hiver. Toutefois, la conductivité thermique élevée et la faible teneur en eau des matériaux granulaires contribue à l'épaississement de la couche active par rapport au régime thermique initial. De même, lorsque la surface

de roulement est revêtue, la température maximale à la surface augmente, favorisant aussi l'épaississement de la couche active (Dumais, 2014). Le long du remblai, l'épaississement du couvert neigeux isolant en comparaison aux conditions initiales prévient l'extraction de chaleur en hiver et, conséquemment, s'en suit l'approfondissement de la couche active sous les épaulements du remblai (figure 7c). Si le pergélisol contient de la glace en excès, soit un volume de glace souterraine supérieur au volume total des pores, l'approfondissement du front de dégel engendre la consolidation de la couche de sol dégelé au cours d'un état transitoire (figure 8). À la suite du drainage de l'eau en excès engendrant des tassements, un régime thermique à l'équilibre avec les nouvelles caractéristiques de surface, où la couche active est plus épaisse qu'à l'état initial, se crée. Ces tassements importants risquent alors de créer localement des dépressions au pied du remblai, puis au niveau de la surface de roulement (Dumais, 2014). S'en suit un effet rétroactif positif sur la dégradation du pergélisol puisque ces dépressions favorisent encore davantage l'accumulation de neige en hiver et d'eau en été.

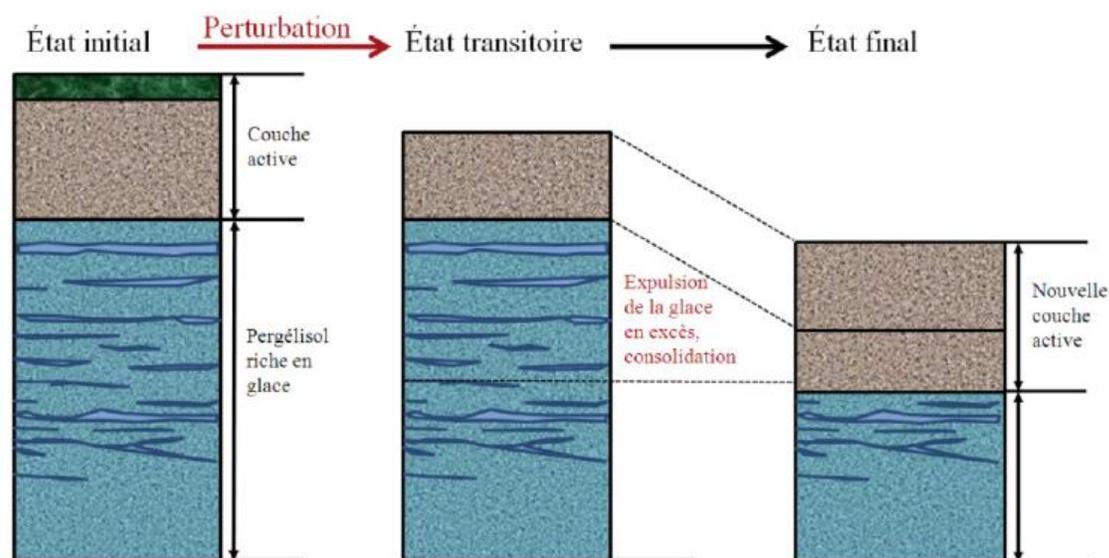


Figure 8 : Réponse d'un pergélisol riche en glace à la perturbation du régime thermique (modifié de Mackay, 1970 tel que cité par Gaumont et al., 2013)

1.2.2 Enneigement différentiel

Selon Allard (2016), la principale cause d'impact thermique à l'échelle locale est l'accumulation différentielle de neige. Lorsqu'il est question de la construction d'une infrastructure de transport, il existe deux causes distinctes provoquant de l'enneigement différentiel. En premier lieu, la neige est préférentiellement redistribuée le long du remblai sur le côté sous le vent suivant l'orientation de l'infrastructure de transport par rapport à la direction des vents en hiver. En effet, dans les zones où le

terrain s'abaisse soudainement, comme l'épaule d'un remblai, le gradient de pression inverse près de la surface favorise la déposition de la neige ventée dans la région où l'écoulement de l'air est ralenti (figure 9). Un angle de pente critique de 10 à 12 degrés est requis pour que l'inversion du gradient de pression se produise (Tabler, 1994).

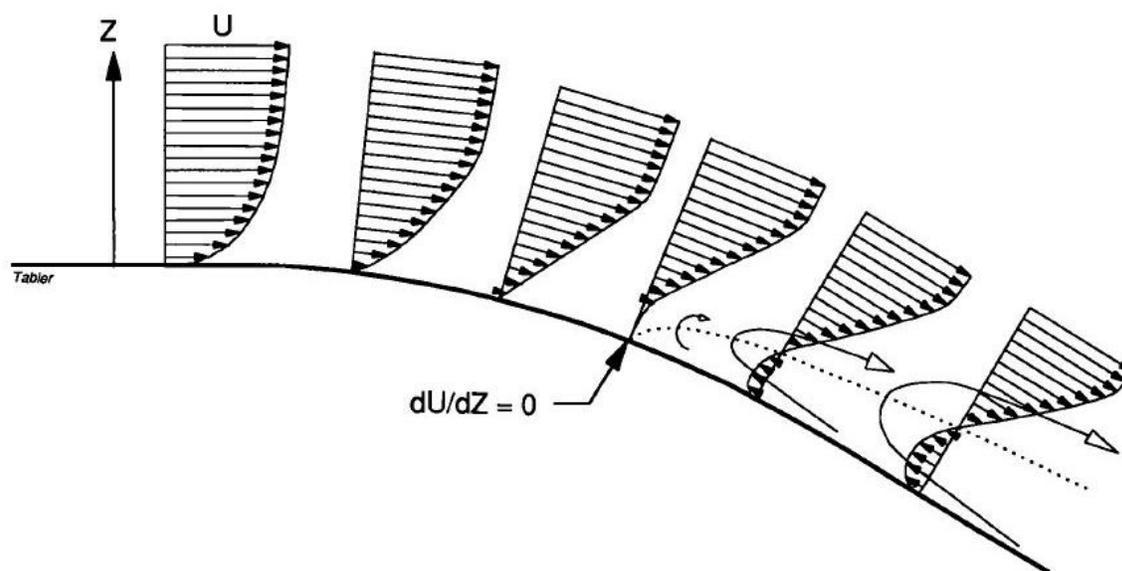


Figure 9 : Variation du profil de l'écoulement du vent (U) au-dessus d'une surface courbe montrant l'inversion du gradient de pression (dU/dZ) formant des zones de turbulence (Tabler, 1994)

Par exemple, à la piste d'atterrissage de Tasiujaq dans le nord du Québec, des accumulations de neige de 1,75 m ont été mesurées le long du remblai (figure 10b) (Allard, 2016). Sous la congère, la couche active a atteint jusqu'à 7 à 8 m de profondeur. Conséquemment, 15 ans après la construction de la piste d'atterrissage, le terrain naturel au pied du remblai montre d'importantes dépressions remplies d'eau, ainsi qu'une colonisation arbustive (figure 10c). Ces signes de dégradation du pergélisol n'étaient évidemment pas visibles directement après la construction en 1989 (figure 10a). L'autre cause d'enneigement dommageable au pergélisol est l'empilement localisé de neige en bordure des routes découlant des opérations de déneigement (figure 11). Malgré la masse volumique plus importante de cette neige compactée diminuant les propriétés isolantes du couvert neigeux, les grandes épaisseurs de neige entassée réduisent tout de même l'extraction de chaleur en hiver comparativement aux conditions initiales, avant la construction du remblai. De plus, la grande quantité d'eau relâchée suite à la fonte contribue aussi à la dégradation du pergélisol sous les épaulements en ralentissant le regel lors des hivers subséquents et en augmentant les risques de thermo-érosion (Allard, 2016).

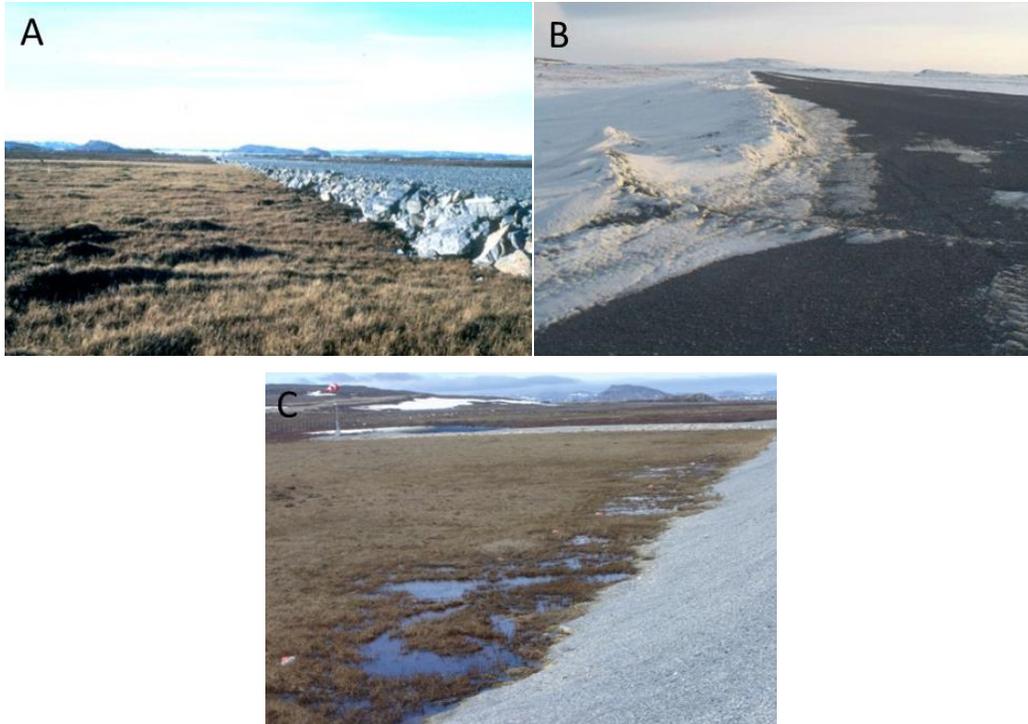


Figure 10 : Impact de l'enneigement le long du remblai de la piste de Tasiujaq, Québec. A) Construction du remblai sur la toundra en 1989. B) Accumulation importante de neige le long du remblai. C) Signes de dégradation en pied de remblai en 2004. (Allard, 2016)



Figure 11 : Accumulation de neige le long d'un remblai, Salluit, Québec (Allard, 2016)

Toute zone d'accumulation topographique possède une capacité maximale de rétention de la neige qui ne peut être dépassée indépendamment de la quantité de neige qui est transportée. La surface de la neige concordant avec ce maximum est considérée comme étant à l'équilibre et correspond conséquemment à la pente à l'équilibre. Dans la nature, il est impossible de déterminer si l'équilibre a été atteint puisque le transport de la neige est toujours limité. En ingénierie, il peut toutefois être assumé que la différence entre le profil apparent et le profil à l'équilibre n'est pas significative (Tabler, 1994).

La proportion de neige déposée par le vent qui peut être retenue en permanence par un élément topographique correspond à l'efficacité de piégeage. Le principal facteur affectant l'efficacité de piégeage est la pente de la surface immédiatement au vent (Tabler, 1994). L'équation 1 peut être utilisée afin d'estimer la pente du dépôt de neige (Y_s) causé par la topographie du terrain dont les angles de pente sont connus.

$$Y_s = 0,25X_1 + 0,55X_2 + 0,15X_3 + 0,05X_4 \quad (1)$$

La variable X_1 représente la pente moyenne du sol en amont de l'élément topographique par rapport à la direction du vent. Les variables X_2 , X_3 et X_4 correspondent à la pente moyenne du sol sous le vent de l'élément topographique à différentes distances, soit respectivement entre 0 et 15 m, entre 15 et 30 m et entre 30 et 45 m. À l'équation 1, toutes les pentes sont exprimées en pourcentage.

1.2.3 Approche préventive

Lors de la conception d'une route, il existe quatre façons de considérer le pergélisol : 1) négliger les conditions du pergélisol, 2) préserver les conditions de gel pour la durée de vie de la structure, 3) éliminer la condition de gel ou le matériel gelé avant la construction ou 4) dégel du sol gelé au cours de la durée de vie de l'infrastructure en prévoyant des tassements subséquents, soit la conception d'une fondation qui peut s'accommoder au mouvement (Brown, 1970).

Afin de pallier le problème d'enneigement différentiel, une première solution est simplement de procéder au déneigement de la route et des épaulements du remblai. L'efficacité de cette méthode dépend de la fréquence de l'entretien et de l'expertise de l'opérateur. En effet, si la neige est simplement déplacée vers le pied du remblai, le problème est, lui-aussi, simplement déplacé (Ficheur et Doré, 2010). Une deuxième technique de mitigation consiste à adapter le design du remblai lors de la conception ou à la suite de sa construction. Plusieurs études reconnaissent qu'une conception adéquate d'une infrastructure de transport est efficace afin de prévenir la formation de congères (Tabler, 1994). En adoucissant les pentes du remblai, le vent est plus apte à souffler au loin la neige s'accumulant du côté du remblai à l'abri des

vents dominants. Ainsi, l'épaisseur de la couche isolante est diminuée et la chaleur peut plus facilement être évacuée en hiver. En règle générale, l'Association des transports du Canada suggère l'utilisation d'une pente suivant un ratio de 6H : 1V (Ficheur et Doré, 2010). Cette méthode de mitigation est d'autant plus efficace lorsque la région d'intérêt est caractérisée par un couvert neigeux initial important. À l'inverse, il ne s'agit probablement pas de la solution optimale lorsque peu de neige s'accumule le long du remblai ou que le vent n'est pas assez puissant pour provoquer un enneigement préférentiel au pied du remblai. Afin de tester en conditions réelles d'exploitation l'utilisation de pentes douces, une section d'essai a été mise en place sur une portion de la piste d'atterrissage de Tasiujaq. Les données thermiques collectées ont révélé une très bonne performance au niveau de l'évacuation de la chaleur. En effet, entre 0 et 0,5 m de profondeur dans le sol naturel sous le remblai, la valeur nette du flux de chaleur annuel atteignait $-8,9 \text{ W/m}^2$ (Ficheur et Doré, 2010). La mise en place de pentes douces présente aussi l'avantage de n'utiliser qu'un simple apport de matériaux de remblai. De plus, lorsque le remblai est déjà construit, il n'est pas nécessaire de l'excaver contrairement à l'utilisation de drain thermique par exemple. Ainsi, le pergélisol n'est pas exposé et un apport thermique est évité (Ficheur et Doré, 2009). Toutefois, pour un remblai assez haut, il s'agit d'une technique très coûteuse vu l'important volume de matériel de remblayage nécessaire. C'est pourquoi, il est nécessaire d'optimiser l'angle de la pente choisie.

1.3 Propriétés thermiques des sols

L'induction ou l'extraction de chaleur, l'augmentation ou la diminution de la température du sol sont contrôlés par ses propriétés physiques et thermiques. Cette sous-section passera en revue les principales d'entre elles, soit la teneur en eau non gelée, la conductivité thermique, la capacité calorifique et la chaleur latente (Andersland et Ladanyi, 2004).

1.3.1 Teneur en eau non gelée

Le sol gelé est un système composé de 4 phases, soient des particules solides, de la glace, de l'eau, ainsi que des gaz ou de l'air (Andersland et Ladanyi, 2004). Les particules, minérales ou organiques, sont entourées d'une mince pellicule d'eau non gelée (figure 12). La teneur en eau non gelée correspond à la quantité d'eau liquide contenue dans un sol ou une roche gelée, donc sous $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Elle comprend l'eau libre qui est susceptible de se déplacer, que ce soit par gravité ou par succion, ainsi que l'eau adsorbée à l'interface des grains. Comme la teneur en eau, la teneur en eau non gelée peut s'exprimer en fonction de la masse (teneur en eau gravimétrique) ou du volume (teneur en eau volumétrique) (Comité Associé de Recherches Géotechniques, 1988).

Ainsi dans un sol gelé, la teneur en eau gravimétrique (w) s'exprime comme la somme de la teneur en eau non gelée (w_u) et de de la teneur en glace (w_g) (équation 2).

$$w = w_u + w_i \quad (2)$$

Un des facteurs affectant grandement la teneur en eau non gelée est la dimension des pores. Celle-ci est directement liée à la dimension des grains (Holtz et Kovacks, 1991). Le type de minéral et la surface spécifique influence aussi la teneur en eau non gelée. Sous 0 °C, la teneur en eau non gelée est élevée dans les argiles. Elle diminue lorsque la température ou la proportion d'argile diminue, ou encore, lorsque la dimension des particules augmente (figure 13).

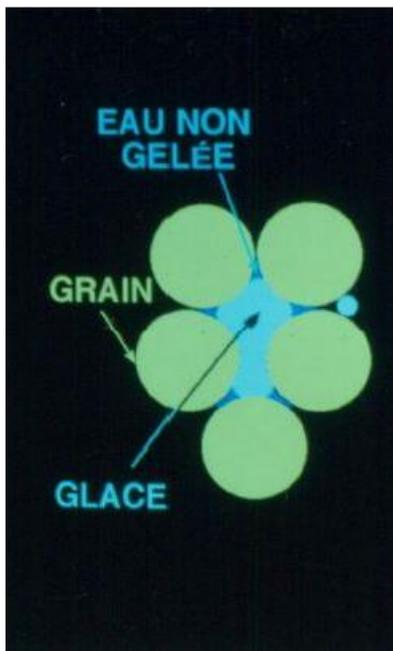


Figure 12 : Schématisation de l'eau non gelée dans le sol gelé (Konrad, 2014)

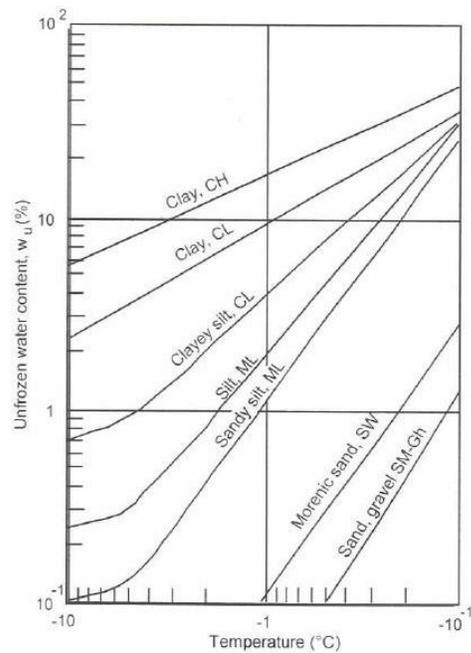


Figure 13 : Variation de la teneur en eau non gelée en fonction de la température et de la classification de sol (Konrad, 2014)

Selon Alfaro *et al.* (2009), la teneur en eau non gelée est un facteur clé lorsqu'il est question du comportement des zones de sol gelé. Ce paramètre joue un rôle très important durant le processus de migration de l'eau dans le sol gelé et quant à l'amélioration du contact thermique entre la matrice de sol et la glace.

1.3.2 Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériel correspond à la quantité d'énergie sous forme de chaleur transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température d'un degré Celsius. La conductivité thermique est la principale propriété thermique qui contrôle les transferts de chaleur par

conduction. La conduction dans un sol correspond à l'écoulement de chaleur par le passage de l'énergie entre les particules de sol en contact les unes avec les autres ou au travers des fluides interstitiels. Comme le montre l'équation 3, le flux de chaleur (Q) transmis par conduction est fonction de la conductivité thermique (k) et du gradient de température (dT/dz).

$$Q = -kA \frac{dT}{dz} \quad (3)$$

En divisant ce flux par l'aire de la surface qu'il traverse (A), le flux unitaire (q) est obtenu (équation 4).

$$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dz} \quad (4)$$

Dans l'équation précédente, le signe négatif indique que le flux de chaleur se propage de la plus chaude température vers la plus froide (Andersland et Ladanyi, 2004). La conductivité thermique d'un sol dépend de la conductivité thermique de chacune de ses composantes. Ainsi, la conductivité thermique du sol varie proportionnellement à la densité du sol sec et à la teneur en eau. Elle varie aussi selon l'origine et la minéralogie des particules solides. La proportion volumique de quartz affecte grandement la conductivité thermique effective puisque sa conductivité thermique est particulièrement élevée (8,4 W/m·°C). De même, la glace étant un meilleur conducteur thermique que l'eau, le sol présente généralement une plus grande conductivité thermique à l'état gelé qu'à l'état non gelé. Conséquemment, la présence d'eau non gelée sous 0 °C influence aussi la conductivité thermique du sol gelé.

Puisque la composition des sols naturels peut varier grandement sur une distance relativement faible, il est approprié d'utiliser une conductivité thermique moyenne. Grossièrement, les sols peuvent être classés comme étant pulvérulents (sables et graviers), à grains fins (silts et argiles) ou d'origine organique (tourbe). En se basant sur cette différenciation, Kersten (1949) propose des équations empiriques afin de déterminer la conductivité thermique des sols gelés (k_f) et non gelés (k_u) en fonction de la masse volumique du sol sec (ρ_d) et de la teneur en eau (w). Ces relations sont basées sur des essais menés sur des échantillons de sols naturels et de pierres concassées. Dans les cas des sols grossiers (contenant moins de 20 % de silt ou d'argile), les conductivités thermiques des sols gelés (-4 °C) et non gelés (4 °C) sont respectivement exprimées par les équations 5 et 6.

$$k_f = 0,01096 \times 10^{0,8115\rho_d} + 0,00461w \times 10^{0,9115\rho_d} \quad (5)$$

$$k_u = 0,1442[0,7 \log w + 0,4] \times 10^{0,6243\rho_d} \quad (6)$$

Dans les équations précédentes, la masse volumique du sol sec (ρ_d) et la teneur en eau massique (w) sont respectivement exprimées en kg/m^3 et en pourcentage. Pour les sols fins (50 % ou plus de silt et argile), les conductivités thermiques des sols gelés et non gelés sont respectivement données par les équations 7 et 8.

$$k_f = 0,001442 \times 10^{1,373\rho_d} + 0,01226w \times 10^{0,4994\rho_d} \quad (7)$$

$$k_u = 0,1442[0,9 \log w - 0,2] \times 10^{0,6243\rho_d} \quad (8)$$

Les équations de Kerstern ne tiennent toutefois pas compte de la variation du contenu en quartz influençant directement la conductivité thermique des particules solides. Pour les sols ayant une composition entre le sable et les sols fins, soit contenant entre 20 et 50 % de silt et d'argile, une interpolation de la conductivité thermique basée sur le contenu en quartz est recommandée (Andersland et Ladanyi, 2004). De plus, la teneur en eau non gelée n'est pas considérée. Néanmoins, le modèle empirique de Kersten diffère des valeurs mesurées de moins de 25 %. Ainsi, il est adéquat pour la plupart des applications pratiques étant donné qu'il est commun d'observer sur le terrain une telle variabilité des propriétés du sol naturel d'un point de mesure à l'autre.

En 1975, Johanssen développe un modèle permettant de tenir compte de la teneur en eau non gelé, de la composition des particules solide. L'équation principale du modèle de Johanssen établit que la conductivité thermique d'un sol (k) est fonction de la conductivité thermique saturée (k_{sat}), de la conductivité thermique sèche (k_{sec}) ainsi que du nombre de Kersten (K_e).

$$k = (k_{sat} - k_{sec})K_e + k_{sec} \quad (9)$$

Dans le cas des sols grossiers non gelés dont le degré de saturation (S_r) est inférieur à 5 %, le nombre de Kersten s'obtient par l'équation ci-dessous.

$$K_e = 0,7 \log(S_r) + 1,0 \quad (10)$$

Alors que dans le cas des sols fin non gelés dont le degré de saturation est supérieur à 10 %, le même paramètre est plutôt obtenu par l'expression suivante.

$$K_e = \log(S_r) + 1,0 \quad (11)$$

Finalement, lorsque le sol est gelé, le nombre de Kerstern est égale au degré de saturation, et ce, dans un intervalle de $\pm 0,1$.

Quant à la conductivité thermique saturée, Johansen (1977) propose l'utilisation d'une moyenne géométrique basée sur la conductivité thermique des constituants (k_s , k_w et k_i) et leur fraction volumétrique. Ainsi, les équations 12 et 13 représentent respectivement les conductivités thermiques à saturation d'un sol non gelé ($k_{sat(u)}$) et gelé ($k_{sat(f)}$).

$$k_{sat(u)} = k_s^{1-n} \cdot k_w^n \quad (12)$$

$$k_{sat(f)} = k_s^{1-n} \cdot k_i^{n-\theta_u} \cdot k_w^{\theta_u} \quad (13)$$

Johansen a développé une équation semi-empirique afin d'estimer la conductivité thermique d'un sol naturel sec en fonction de la masse volumique du sol sec (ρ_d) et de la masse volumique des grains solides égale à 2,700 kg/m³ (équation 14).

$$k_{sec} = \frac{0,137\rho_d + 64,7}{2,700 - 0,947\rho_d} \pm 20\% \quad (14)$$

La roche concassée ayant une conductivité thermique plus élevée, c'est plutôt l'équation semi-empirique suivante qui détermine la valeur de la conductivité thermique du matériel sec.

$$k_{sec} = 0,039n^{-2,2} \pm 25\% \quad (15)$$

En 2005, Côté et Konrad propose un modèle de conductivité thermique généralisée. Pour ce faire, ils reprennent le concept de conductivité thermique normalisée par rapport aux états secs et saturés du sol proposé par Johansen en 1975. Ce modèle présente l'avantage d'intégrer adéquatement l'effet de la porosité, du degré de saturation, de la composition minéralogique, de la distribution granulométrique et de la forme des particules sur la conductivité thermique des sols gelés et non gelés. Ainsi, contrairement au modèle proposé par Kersten (1949), le modèle de Côté et Konrad (2005) est valide pour une large gamme de type de sols qu'il s'agisse de sol naturel ou de matériaux de construction. L'équation exprimant la conductivité thermique normalisée (k) est réécrite comme suit.

$$k = (k_{sat} - k_{sec})k_r + k_{sec} \quad (16)$$

Comme le montre l'équation 16, la conductivité thermique normalisée du sol (k_r) remplace le nombre de Kerstern présent dans l'équation 9. Ce nouveau paramètre est fonction du degré de saturation et d'un facteur associé au type de sol, κ (équation 17).

$$k_r = \frac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1)S_r} \quad (17)$$

Cette relation permet de représenter adéquatement l'effet de toute la gamme des degrés de saturation possibles ce qui n'était pas le cas des modèles précédemment discutés. Le tableau 1 présente les diverses valeurs que peut prendre κ suivant l'état ainsi que le type de sol.

Tableau 1 : Facteur κ en fonction du type de sol et de l'état du sol (Côté et Konrad, 2005)

Types de sols	Facteur de type de sol (κ)	
	Gelé	Non gelé
Graviers et sables grossiers	4,60	1,70
Sables moyens et fins	3,55	0,95
Sols silteux et argileux	1,90	0,85
Tourbes	0,60	0,30

Le second paramètre qui diffère du modèle de Johansen (1977), est la conductivité thermique du sol sec qui est exprimée par rapport à la porosité (n) et à la forme des particules par Côté et Konrad (2005) (18).

$$k_{sec} = \chi \cdot 10^{-\eta n} \quad (18)$$

Les paramètres χ et η ont été déterminés empiriquement en fonction du type de sol (tableau 2).

Tableau 2 : Paramètres pour déterminer k_{sec} en fonction du type de particules comprises dans le sol (Côté et Konrad, 2005)

Types de particules	χ (W/m°C)	η
Graviers et roches concassées	1,70	1,80
Sols naturels	0,75	1,20
Tourbes	0,30	0,87

1.3.3 Capacité thermique et chaleur latente

La capacité thermique (ou capacité calorifique) correspond à la quantité de chaleur requise pour élever d'un degré Celsius une unité de masse (capacité calorifique massique) ou une unité de volume (capacité calorifique volumique) (Farouki, 1985). En considérant que les fractions volumiques du sol, de l'eau, de la glace et de l'air sont respectivement θ_s , θ_w , θ_i et θ_a , la capacité calorifique volumique d'un sol gelé ou non gelé (C) peut s'exprimer selon l'équation générale suivante.

$$C = \theta_s C_s + \theta_w C_w + \theta_i C_i + \theta_a C_a \quad (19)$$

Où C_s , C_w , C_i et C_a correspondent respectivement aux capacités calorifiques volumiques des grains solides, de l'eau, de la glace et de l'air. Cette dernière étant inférieure aux autres capacités calorifiques de trois ordres de grandeur, elle est généralement omise. De plus, considérant que la porosité (n) correspond au volume des vides sur le volume total, elle est égale à la somme des fractions volumiques de l'eau, de la glace et de l'air.

$$n = \theta_w + \theta_i + \theta_a \quad (20)$$

Ainsi, la capacité calorifique volumique d'un sol gelé (C_u) peut être obtenue suivant l'équation suivante.

$$C_u = (1 - n)C_s + S_r n \times C_w \quad (21)$$

Où S_r est le degré de saturation et la capacité calorifique volumique de l'eau (C_w) est égale à 4,18 MJ/m³°C. Dans le cas d'un sol gelé, la capacité thermique volumique (C_f) peut être exprimée par l'équation 22.

$$C_f = (1 - n)C_s + (S_r n - \theta_u)C_i + \theta_u C_w \quad (22)$$

Où C_s est fonction de la nature des particules, $C_i = 1,93$ MJ/m³°C et θ_u correspond à la teneur en eau non gelée volumique (Andersland et Anderson, 1978).

Lorsqu'un changement de phase se produit dans un sol, une augmentation apparente et importante de la capacité calorifique en résulte. Ce phénomène est en fait associé à la chaleur latente de l'eau. Dans un sol, la chaleur latente volumique de fusion est la quantité de chaleur nécessaire pour faire fondre de la glace ou congeler l'eau dans un volume unitaire de sol (Comité Associé de Recherches Géotechniques, 1988). Ainsi, la chaleur latente volumique d'un sol (L_s) s'exprime suivant l'équation 23, où la chaleur latente de fusion de l'eau (L_w) est égale à 334 MJ/m³.

$$L_s = (\theta - \theta_u)L_w = (S_r n - \theta_u)L_w \quad (23)$$

1.4 Propriétés thermiques de la neige

1.4.1 Principes physiques

Pour comprendre l'influence du manteau neigeux sur le flux d'énergie à la surface du sol, il est d'abord nécessaire de s'attarder aux divers principes physiques impliqués. En effet, en s'intéressant à l'implication individuelle de chacun de ces facteurs, il est possible d'en déterminer l'impact global et d'expliquer les variations temporelles de transfert de chaleur.

1.4.1.1 *Albédo élevé en surface*

L'albédo d'une surface correspond au rapport entre la radiation solaire de toutes longueurs d'onde qu'elle réfléchit et la radiation incidente. L'albédo de la neige est influencé par l'angle zénithal solaire (figure 14) et les conditions d'enneigement, par l'albédo de la couche directement sous-jacente ainsi que par les caractéristiques du couvert neigeux, soient la taille et la forme des grains, la rugosité, le teneur en eau liquide, la présence d'impuretés. Grossièrement, l'albédo de la neige est plutôt élevé bien qu'il varie grandement dans le temps. À l'automne et au début de l'hiver, la neige fraîche peut avoir un albédo de 0,85 qui peut atteindre plus de 0,90 dans des conditions nuageuses. Au printemps, la neige mouillée et fondante a un albédo plus faible d'environ 0,60 (Zhang, 2005). De façon générale, la présence d'un couvert neigeux engendre une baisse de la température à sa surface en conséquence d'une réduction de la chaleur solaire absorbée. Puisque les radiations solaires incidentes varient spatialement et temporellement, l'importance de ce facteur varie aussi dans le temps et l'espace. C'est principalement l'élévation solaire contrôlant l'angle d'incidence qui est responsable de ces variations. Effectivement, plus l'élévation solaire est grande et plus le rayonnement incident est important, plus l'albédo élevé de la neige engendrera une différence significative entre la température de l'air et celle à la surface de la neige. À l'automne, lors de l'établissement du couvert neigeux, l'élévation solaire est beaucoup plus faible qu'au printemps durant la période de fonte (figure 15). Ainsi, la radiation globale atteignant la surface de la neige est plus grande au printemps qu'à l'automne. L'effet net de l'albédo sur le bilan énergétique à la surface est donc plus grand au printemps qu'à l'automne, et ce, bien que l'albédo soit plus élevé à l'automne qu'au printemps. Ce phénomène est d'autant plus prononcé à de hautes latitudes où la neige fond en moins de deux semaines (Zhang, 2005). Néanmoins, l'élévation solaire étant plus grande à de basses et moyennes latitudes, l'albédo élevé de la neige influence moins le flux en surface à de hautes latitudes.

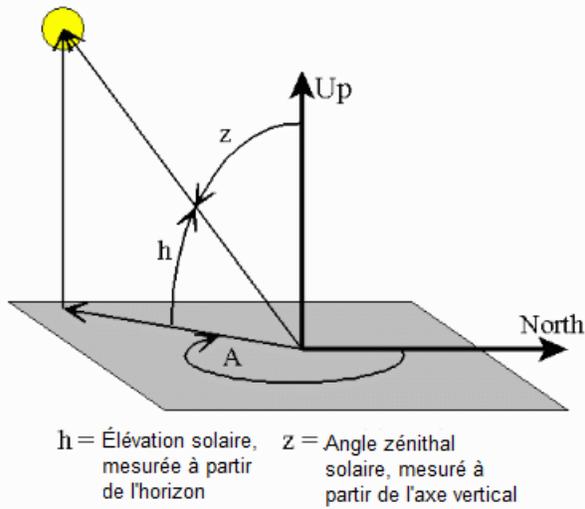


Figure 14 : Schématisation de l'angle zénithal solaire (z) et de l'élévation solaire (h) (modifiée de Boudhar, 2009)

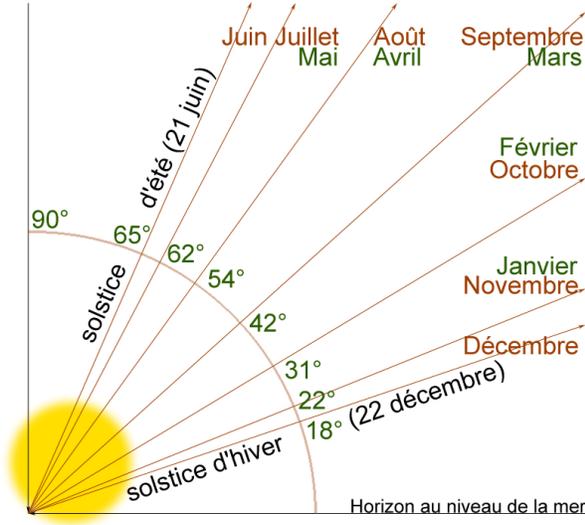


Figure 15 : Schématisation de l'évolution de l'élévation solaire à une latitude de 50° N (Boudhar, 2009)

1.4.1.2 Émissivité et absorptivité

L'émissivité est une propriété associée à la radiation dont la valeur varie de 0 et 1. Elle fournit une mesure de la capacité relative d'une surface à émettre de la chaleur par rayonnement par rapport à un radiateur idéal, soit un corps noir. L'émissivité de la neige est très élevée puisqu'elle varie de 0,96 à 0,99 et présente une valeur moyenne de 0,98 (Zhang, 2005). Ainsi, selon la loi de Stefan-Boltzmann, la chaleur émise par une surface est proportionnelle à son émissivité. Il y a donc un refroidissement important à la surface de la neige dû à l'augmentation du rayonnement par rapport à un sol dénudé dont l'émissivité est plutôt de 0,92. La différence associée peut atteindre près de 1°C à la surface. Toutefois, selon la loi de Kirchhoff, si l'émissivité d'une surface est élevée, son absorptivité, soit le taux auquel l'énergie radiée est absorbée par unité de temps, est elle-aussi élevée. L'absorption d'énergie à la surface de la neige se rapprochant de celle d'un corps noir, le réchauffement de la surface en est favorisé (Zhang, 2005). Il semble donc que l'émissivité et l'absorptivité de la neige induisent des vecteurs contraires de flux d'énergie à l'interface air-neige. Néanmoins, par conditions froides et sèches alors que le ciel est dégagé, l'émissivité est responsable du refroidissement de la surface de la neige. À l'inverse, par conditions humides et nuageuses, les radiations de grande longueur d'onde atteignent la surface de la neige qui absorbe plus d'énergie et se réchauffe. Ainsi, les conditions climatiques décideront du bilan global (Zhang, 2005).

1.4.1.3 *Faible conductivité thermique effective*

Contrairement aux principes physiques évoqués précédemment qui régissent le bilan de flux thermiques à l'interface air-neige, la conductivité thermique effective de la neige gouverne le transport de chaleur à l'intérieur du manteau neigeux. Ce paramètre thermique inclut trois processus de transfert de chaleur distinct, soit la conduction à travers la matrice de glace, la conduction à travers les pores remplis d'air, ainsi que les échanges de chaleur latente dus au cycle de sublimation-condensation (Dominé *et al.*, 2011). Selon le même auteur, la conduction à travers les grains de glace interconnectés correspond au processus dominant. Une neige sèche est composée de cristaux de glace et d'air dont les conductivités thermiques environnent respectivement $2,24 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ et $0,025 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$. Cette dernière valeur est très faible. Ainsi, la neige, contenant une importante fraction d'air, présente une conductivité thermique effective très faible variant avec la densité. Pour une neige fraîche, la conductivité thermique est d'environ $0,10 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$. Elle peut atteindre $0,50 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ pour une neige dense plus vieille. Puisque ces valeurs sont cinq à dix fois inférieures à la conductivité thermique du sol, la neige agit comme une couche isolante entre l'air et la surface du sol (Zhang, 2005). Ainsi, la température du sol sous la neige peut être plus froide ou plus chaude que celle de l'air selon l'occurrence temporelle, la durée et l'épaisseur du manteau neigeux saisonnier ainsi que l'historique de la température de l'air. Néanmoins, généralement, l'effet isolant de la neige empêche le refroidissement du sol. Son effet sur le régime thermique du sol est notable. Il faut aussi souligner que la conductivité thermique est une propriété anisotrope dont les valeurs diffèrent pour un flux horizontal et un flux vertical (Oldroyd *et al.*, 2012). Dans le cas présent, c'est ce dernier qui représente un intérêt.

1.4.1.4 *Chaleur latente de fusion*

La capacité calorifique d'un sol minéral ou organique est minime par rapport à la quantité de chaleur latente de fusion. En effet, $4,18 \text{ J/g}$ sont requis pour réchauffer l'eau de 1 °C , alors que 334 J/g sont nécessaire pour faire fondre les cristaux de glace. Ainsi, la fonte de la neige au printemps joue le rôle de dissipateur thermique (Zhang, 2005). Néanmoins, puisque la fonte de la neige ne dure que d'une à deux semaines à de hautes latitudes, la chaleur latente n'affecte la température du sol que pour une période de temps limitée.

1.4.1.5 *Conclusion partielle*

En résumé, l'albédo et l'émissivité élevés de la neige tendent à diminuer la température à la surface de la neige, à l'intérieur du banc de neige et, ultimement, à diminuer la température à la surface du sol. Ces propriétés de la neige favorisent donc l'existence du pergélisol. De même, la chaleur latente liée à la fonte de la neige retarde le réchauffement de la surface du sol au printemps. À l'inverse, le regel de l'eau dégelée à l'intérieur du banc de neige libère la chaleur latente augmentant conséquemment la

température de la neige et celle à la surface du sol. Finalement, l'effet d'isolation, dû à la faible conductivité thermique de la neige, cause le réchauffement de la température à la surface du sol. Par conditions nuageuses, l'absorptivité élevée de l'eau a le même effet favorisant l'absence de pergélisol ou, encore, sa dégradation. Le tableau 3 associe les propriétés thermiques évoquées en fonction de leur effet sur la température du pergélisol.

Tableau 3: Résumé des facteurs favorisant le refroidissement et le réchauffement à la surface du sol

REFROIDISSEMENT	RÉCHAUFFEMENT
Diminution des radiations solaire absorbées (albédo élevée en surface)	Regel de l'eau dans le banc de neige (chaleur latente)
Émissivité élevée	Effet d'isolant dû à la faible conductivité thermique de l'air contenu dans la neige
Fonte de la neige agissant comme dissipateur thermique (chaleur latente)	Absorptivité élevée par conditions nuageuses

1.4.2 Influence des paramètres

Après avoir établie les propriétés thermiques d'importance, il importe d'établir le facteur dominant, globalement ainsi qu'aux différents stades de l'évolution de la neige, afin de mieux comprendre l'effet net du couvert neigeux saisonnier sur le régime thermique du sol. La section qui suit s'intéresse à l'impact de ces principaux facteurs sur les processus de transfert de chaleur énoncés précédemment.

1.4.2.1 Évolution d'un couvert de neige dans le temps

Pour comprendre pleinement l'effet de l'évolution du couvert neigeux dans le temps, deux paramètres doivent être considérés, soit l'occurrence et la durée. L'occurrence fait référence à la date à laquelle le couvert neigeux s'établit à la fin de l'automne ou au début de l'hiver et à la date à laquelle il disparaît. Quant à elle, la durée fait, bien sûr, référence à la période de temps pendant laquelle la neige recouvre le sol. Les variations temporelles et spatiales de ces paramètres induisent une variation de la magnitude et de la direction du flux thermique. Zhang (2005) suggère qu'à l'automne, au début de son accumulation, le couvert de neige est relativement mince et la température fluctue autour de 0°C. Bien que l'élévation solaire soit encore relativement grande à cette période de l'année, il existe un effet de refroidissement grâce à l'albédo élevé de la neige fraîche. Cette baisse de température ne se produit que sur une courte période de temps et son impact sur la température moyenne annuelle à la surface du sol (TMAS) est plutôt faible. Avec la baisse de la température de l'air et l'épaississement du manteau neigeux, l'effet isolant discuté précédemment devient le facteur dominant et empêche le sol de refroidir. À de hautes latitudes où le couvert neigeux perdure plusieurs mois, l'effet isolant de la neige est notable.

Lors de la fonte printanière, la température à la surface du sol est inférieure à celle de l'air de quelques degrés, principalement grâce à la fraction importante de la radiation solaire qui est réfléchi et consommée par la fonte de la neige. Néanmoins, dans les régions arctiques et subarctiques où se trouve le pergélisol, la fonte est très rapide et le réchauffement de la surface n'est retardé que de quelques jours à un maximum d'environ deux semaines. L'effet de refroidissement peut être significatif à court terme, mais son impact est moindre sur la TMS.

De plus, Zhang (2005) propose que l'effet du manteau neigeux sur le régime thermique varie selon l'échelle de temps considérée. Quotidiennement, il peut en découler un réchauffement ou un refroidissement selon la température de l'air et l'historique de la température du sol. La figure 16 montre bien cet impact. Dans le cas d'un sol naturel végétalisé, l'été y est notable par une faible différence de température entre la surface du sol et l'air ($-1\text{ °C} < \Delta T < 5\text{ °C}$), alors que pendant la saison froide la différence de température varie entre -10 °C et 20 °C . Bien que la température à la surface du sol soit généralement supérieure à celle de l'air, l'inverse est occasionnellement vrai. Les pics négatifs de décembre à mars sont produits par l'advection régionale d'une masse d'air chaud (Zhang, 2005). De fin avril à début mai, l'impact de la fonte de la neige maintient constamment la température à la surface du sol sous la température de l'air, et ce, de plusieurs degrés. De même, la figure 17B illustre que la température du sol peut être inférieure à celle de l'air en démontrant une grande variation de la température du sol pour une même température à la surface. Par exemple, pour une température de l'air de -15 °C , la température à la surface du sol varie de -25 à 0 °C . Ainsi, à une échelle quotidienne, l'influence de la présence du manteau neigeux peut autant induire un refroidissement qu'un réchauffement. De plus, le manque de corrélation entre les températures de l'air et du sol est notable pendant la période de neige (figure 17).

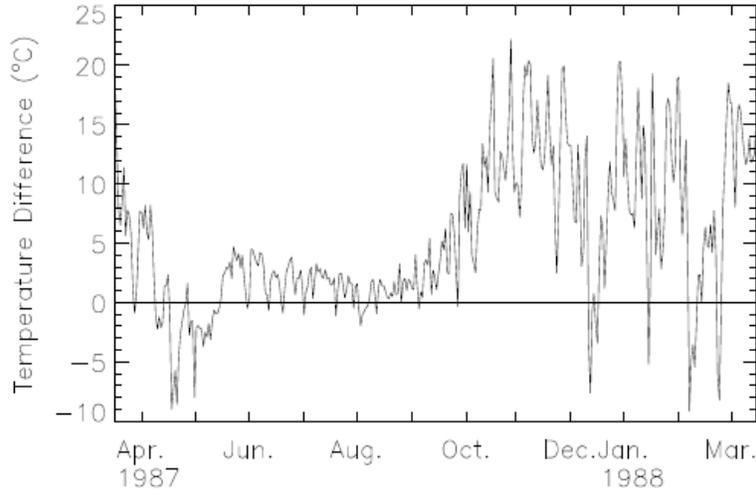


Figure 16: Différence de température entre la température moyenne quotidienne à la surface du sol et la température moyenne quotidienne de l'air ($\Delta T = T_s - T_a$) de mi-mars 1997 à mi-mars 1998 à Franklin Bluffs, au nord de l'Alaska (Zhang, 2005)

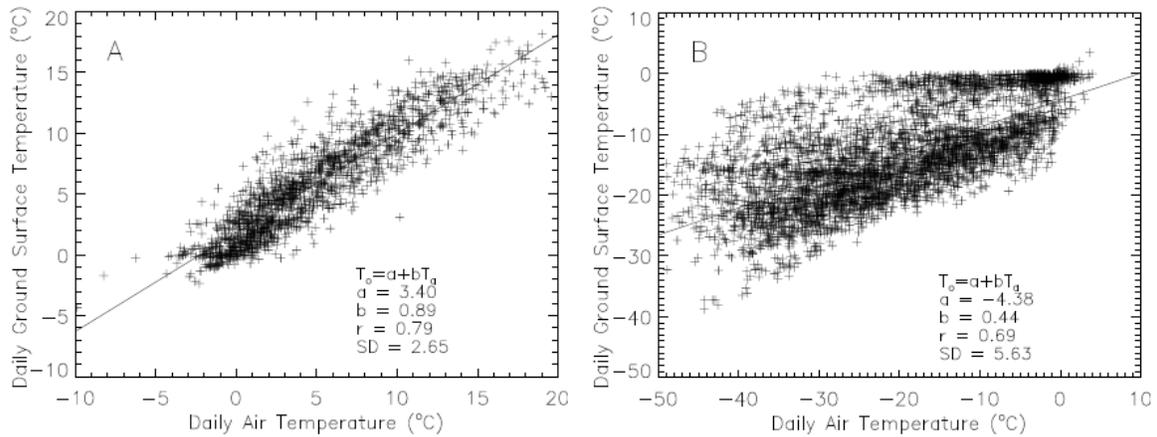


Figure 17 : Relation entre la température moyenne quotidienne à la surface du sol et la température moyenne quotidienne de l'air durant la période sans neige (A) et la période avec neige (B), de 1992 à 1997, à divers sites en Alaska (Zhang, 2005)

Finalement, la figure 18 permet d'apprécier la capacité isolante du couvert neigeux qui amortie grandement l'effet des variations de température de l'air sur la température du sol. Effectivement, alors que pour un sol dénudé, des variations journalières de 4 à 8 °C sont observées autant dans l'air qu'à la surface du sol, le sol recouvert de neige ne présente que des variations de température inférieures à 2 °C. Par conséquent, l'amplitude de la température quotidienne à la surface du sol permet d'identifier le premier et le dernier jour de neige au sol qui est marqué par un changement soudain. Les observations sur le terrain corroborent cette hypothèse (Zhang, 2005).

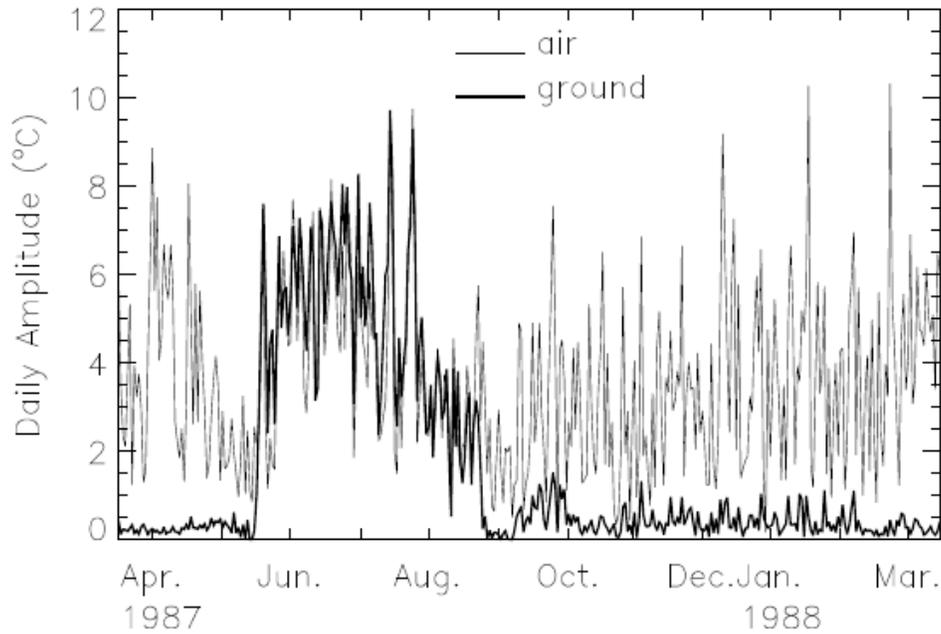


Figure 18 : Amplitude journalière de la température de l'air (ligne pâle) et de la température à la surface du sol (ligne foncé) à Franklin Bluffs, au nord de l'Alaska pour la période de mi-mars 1997 à mi-mars 1998 (Zhang, 2005)

Sur une base mensuelle, l'impact du couvert neigeux sur le régime thermique du sol peut aussi induire un réchauffement ou un refroidissement suivant l'évolution du couvert neigeux tel que discuté précédemment. Effectivement, l'effet d'isolant est plus important au début de l'hiver et un réchauffement de la surface du sol y est associé. La différence maximale entre les températures de l'air et du sol semble atteinte au mois de novembre (figure 19). La neige étant encore fraîche, elle est de faible densité et présente donc une conductivité thermique très faible. La chaleur latente libérée par le regel de la couche active contribue aussi à empêcher le sol de refroidir. À l'inverse, l'effet de la fonte au mois de mai induit un refroidissement à la surface du sol par rapport à la température de l'air comme discuté précédemment.

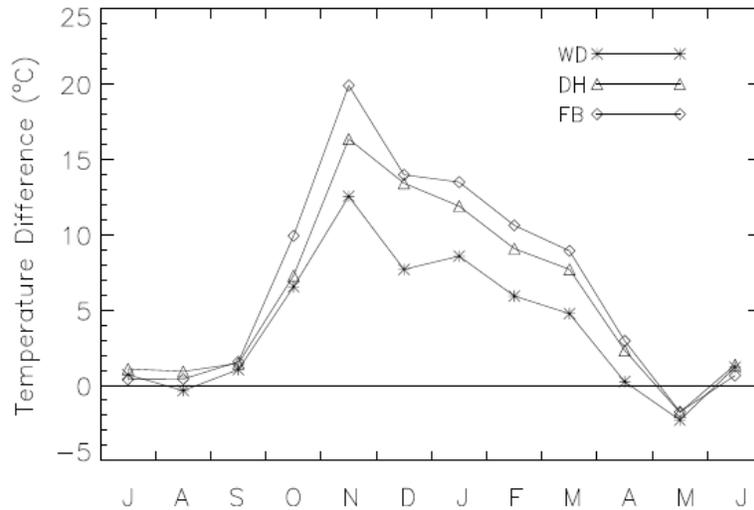


Figure 19 : Différence entre les températures moyennes mensuelles du sol et les températures moyennes mensuelles de l'air à West Dock (WD), Deadhorse (DH) et Franklin Bluffs (FB), soit trois sites en Alaska, pour la période de 1987 à 1992 (Zhang, 2005)

Sur une base annuelle, le couvert neigeux induit un réchauffement à la surface du sol par rapport à la température de l'air soulignant l'importance de l'isolation du manteau neigeux dans les régions arctiques et subarctiques. En effet, pour toutes températures moyennes annuelles de l'air (TMAA), les températures moyennes annuelles à la surface du sol sont supérieures. Par exemple, pour une température de l'air de $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, la température du sol varie de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figure 20).

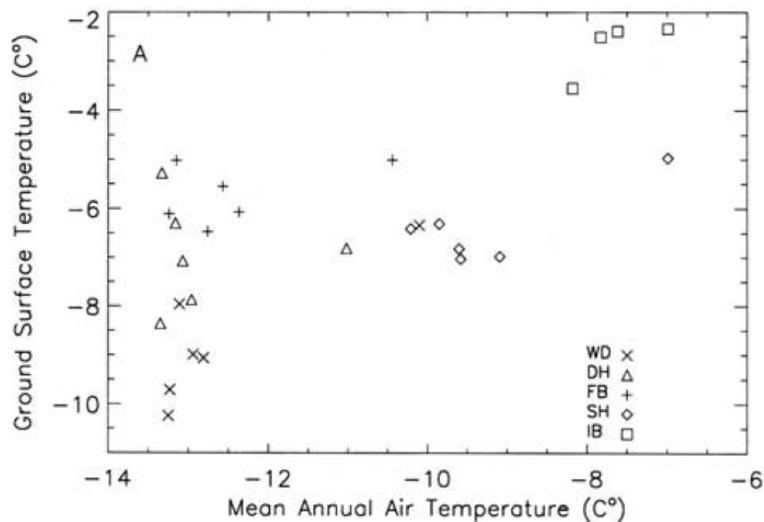


Figure 20 : Relation entre la température moyenne annuelle à la surface du sol et la température moyenne annuelle de l'air à West Dock (WD), Deadhorse (DH), Franklin Bluffs (FB), Sagwon (SH) et Toolik Lake (IB), soit cinq sites au nord de l'Alaska, pour la période de 1987 à 1992 (Zhang, 2005)

En conclusion, la température moyenne annuelle à la surface du sol associée à la profondeur du front de dégel est grandement affectée par l'accumulation de neige à l'automne ou au début de l'hiver tel que suggéré par Goodrich (1982) (figure 21). Ainsi, une rapide accumulation de neige à l'automne et une fonte précoce au printemps correspond au scénario favorisant le plus le réchauffement à la surface du sol (jusqu'à 6 °C de différence). À l'inverse, une accumulation tardive et une fonte tardive vont favoriser le refroidissement qui sera cependant moindre (jusqu'à -3 °C) (Ling et Zhang, 2003).

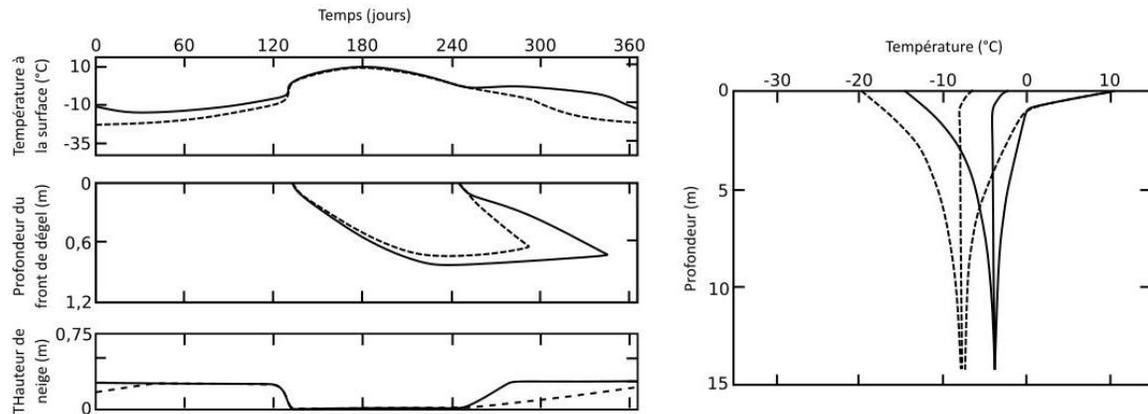


Figure 21 : Comparaison entre l'effet d'une mise en place rapide de la neige au printemps (trait plein) et une mise en place progressive (trait pointillé) pour une même hauteur de neige maximale et le même sol (modifiée de Goodrich, 1982)

1.4.2.2 Hauteur du couvert neigeux

Vu l'importance du rôle isolant de la neige, l'épaisseur du manteau neigeux est un facteur majeur contrôlant la magnitude de l'impact sur la température à l'interface neige-sol (Zhang, 2005). Comme abordé précédemment, lorsque le couvert de neige est mince, ce sont les propriétés thermiques de surface qui dominent les échanges de chaleur. Avec l'augmentation de l'épaisseur de neige, la conductivité thermique effective devient le facteur d'importance. Plus la couche de neige est épaisse, plus l'effet d'isolation est marqué et plus la température à l'interface neige-sol augmente (figure 22). Toutefois, au-delà de 40 cm d'épaisseur, Sturm et Holmgren (2001) suggèrent que l'amplitude de l'impact diminue. Effectivement, la figure 22 démontre qu'au-delà d'une couche d'environ 40 cm, l'augmentation de l'épaisseur du manteau influence peu la température du sol. Ainsi, le gradient de température en régime transitoire est plus important dans les 40 premiers centimètres de la couche de neige et diminue par la suite de façon inversement proportionnel à la conductivité thermique (figure 23). Selon Nicholson et Granberg (1973), la température est quasi uniforme au-delà de 50 à 60 cm de profondeur dans la couche de neige.

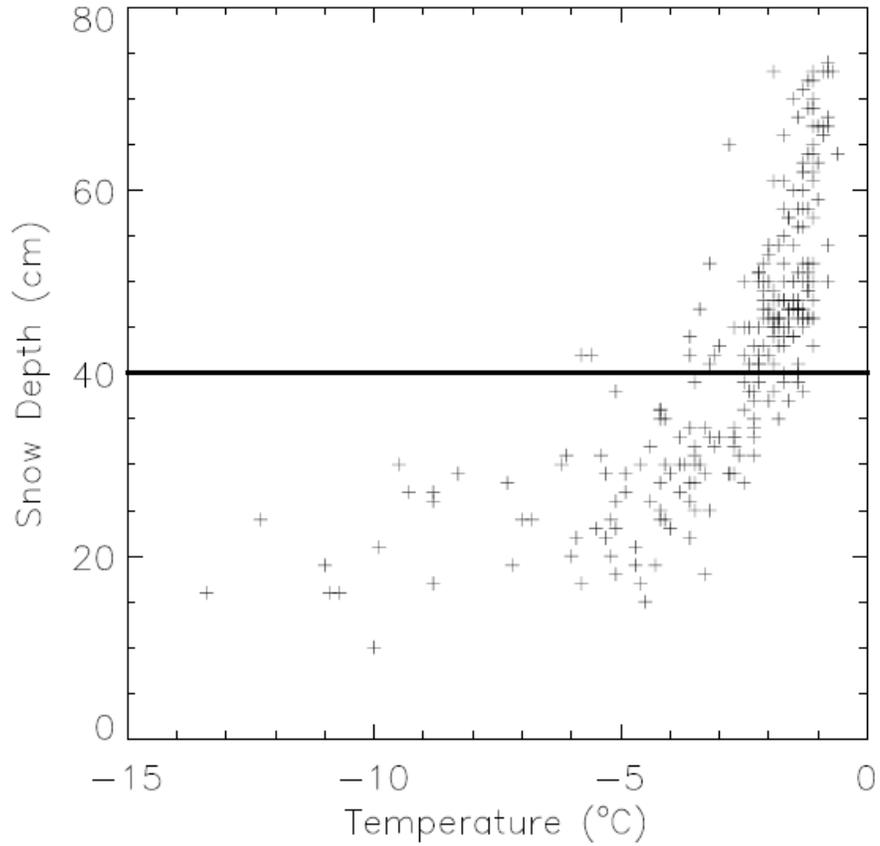


Figure 22 : Relation entre l'épaisseur du manteau neigeux et la température à l'interface neige-sol à Ivotuk en Alaska en novembre 1998. Le trait épais identifie l'épaisseur de neige optimale (modifiée de Zhang, 2005)

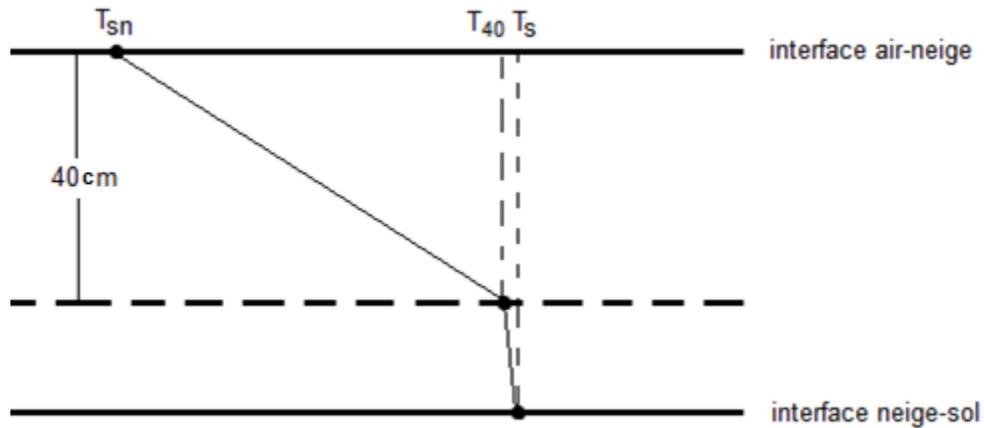


Figure 23 : Schématisation du profil de température dans le manteau de neige en régime permanent

Finalement, si le manteau neigeux est assez épais pour persister jusqu'à la fin du printemps ou, même, jusqu'à l'été, l'effet total de la neige correspond au refroidissement de la température du sol grâce à

l'albédo élevé et la chaleur latente significative. D'un autre côté, la date de regel de la couche active sera aussi décalée avec l'augmentation de l'épaisseur maximale du couvert neigeux qui augmente la profondeur du front de dégel (Ling et Zhang, 2006). Étant donnée la courte période de fonte à de hautes latitudes, ce dernier scénario est plus plausible dans les régions arctiques et subarctiques.

1.4.2.3 Densité, structure et température

Comme il a bien été établi depuis le début de ce mémoire, l'effet isolant de la neige est contrôlé par sa conductivité thermique effective. Étant donné que, dans la plupart des types de neige, la conduction à travers les grains interconnectés correspond au processus de transfert de chaleur dominant, la conductivité thermique effective de la neige est fonction de sa densité et de sa microstructure caractérisant la quantité et la qualité des contacts entre les cristaux de glace. Néanmoins, ces deux propriétés varient considérablement dans le temps et l'espace et, également, à l'intérieur d'un même banc de neige. Par exemple, la densité d'une neige fraîche ou d'un givre de profondeur est de 100 kg/m^3 , alors qu'elle atteint 600 kg/m^3 dans le cas d'une neige fondante ou d'une plaque à vent (Zhang, 2005). Tel que démontré par plusieurs études, la conductivité thermique varie proportionnellement à la densité (figure 24). De plus, Ling et Zhang (2006) ont démontré par modélisation numérique que la densité influence peu les échanges de chaleur latente et le flux de chaleur à l'interface air-neige, mais fortement le flux de chaleur transmis par conduction à l'intérieur de la neige.

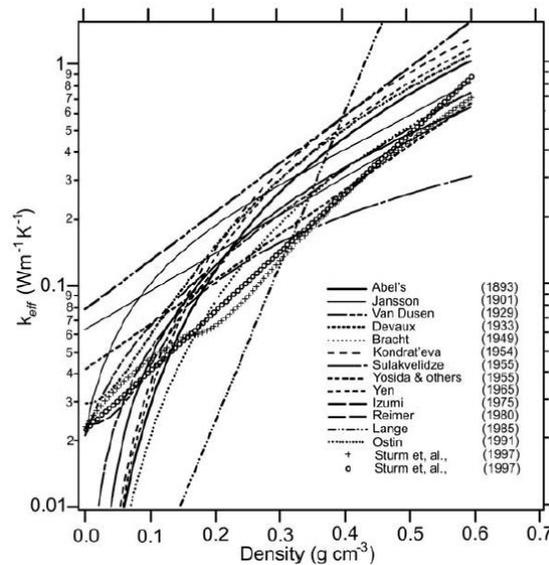


Figure 24 : Équations de régression linéaire du log de la conductivité thermique effective en fonction de la densité de la neige selon différentes publications (Zhang, 2005)

En plus de la densité, la structure de la neige est un facteur important pour déterminer la conductivité thermique effective puisqu'elle caractérise les liens entre les cristaux de glace. De plus, il est important de noter que la neige n'atteint jamais l'équilibre thermique puisqu'elle est continuellement métamorphisée, c'est-à-dire que sa structure et ses propriétés physiques (taille et forme des grains, densité, liens intergranulaires) sont continuellement modifiées. Les transferts de chaleur à l'intérieur du manteau neigeux contribuent à ce métamorphisme modifiant, du coup, la propriété thermique les contrôlant, soit la conductivité thermique (Morin *et al.*, 2010). Il s'agit d'une évolution constante dont il faut être conscient.

1.4.3 Mesures in-situ

À la lumière des informations précédentes, il semble que, sur une base annuelle, le régime thermique du sol dépend principalement des propriétés isolantes du manteau neigeux. En régime permanent, la conductivité thermique effective (k_{eff}) régit le flux de chaleur tel qu'exprimé précédemment par l'équation 2. Cependant, si le régime transitoire est considéré, il est nécessaire de connaître la diffusivité thermique effective (α_{eff}) de la couche de neige pour prédire l'écoulement du flux de chaleur (équation 24). La diffusivité thermique (α) gouverne le taux de diffusion de la chaleur à travers un milieu et est fonction de la conductivité thermique (k), de la masse volumique (ρ) et de la capacité calorifique massique du milieu (c) (équation 25). Comme c'est le flux perpendiculaire aux couches qui présente un intérêt, les valeurs des propriétés thermiques sont dites effectives suivant la composante verticale.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (25)$$

Une meilleure compréhension des processus de transfert de chaleur dans la neige repose sur une meilleure compréhension de l'évolution des propriétés thermo-physiques dans le temps et l'espace. Toutefois, lors de la prise de mesure, le potentiel de résolution temporel et spatial est souvent limité étant donné le caractère laborieux de plusieurs techniques et le fait qu'elles perturbent parfois la structure et altèrent les propriétés mesurées (Oldroyd *et al.*, 2012).

1.4.3.1 Masse volumique

Obtenir une haute résolution temporelle pour la densité représente un vrai défi, car il faut excaver un fossé dans la neige afin de procéder à une analyse gravimétrique pour des échantillons, et ce, à différentes profondeurs (Oldroyd *et al.*, 2012).

L'outil permettant de mesurer la masse volumique sur le terrain est communément appelé échantillonneur de densité (figure 25). Il s'agit simplement d'un contenant (cylindrique ou d'autres formes) de volume (100 ou 500 cm³) et de poids connus qui est inséré minutieusement dans une paroi de neige dégagée afin de combler tout le volume sans perturber la structure de la neige. Le volume choisi varie selon l'épaisseur de la couche et la dureté de la neige. Par exemple, pour une couche épaisse de neige fraîche un volume plus grand sera utilisé, alors que le petit volume sera destiné à une mince couche ventée. L'échantillon est ensuite pesé directement sur le terrain à la suite de son prélèvement.

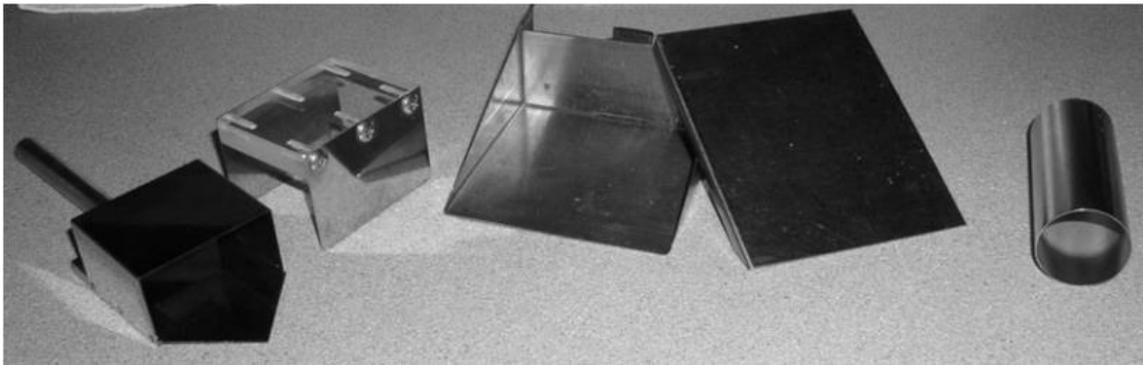


Figure 25 : Divers types de «density cutters». De gauche à droite : boîte (Hydro-Tech 100 cm³), coin (Snow Research Associates 200 cm³) et tube (Wasatch Touring 100 cm³) (Conger et McClung, 2009)

1.4.3.2 Conductivité thermique effective

Pour déterminer la conductivité thermique, autant sur le terrain qu'en laboratoire, plusieurs techniques existent. Elles varient en coût, en facilité d'exécution, en précision et en potentiel de résolution spatiale et temporelle. Les avantages et les désavantages des méthodes les plus communes sont décrites ci-dessous.

Tout d'abord, deux techniques permettent d'étudier l'écoulement thermique en régime permanent. La première implique l'utilisation d'une plaque chauffante induisant un transfert de chaleur au travers d'un bloc de glace extrait et instrumenté afin de déterminer la conductivité thermique effective. Pour que l'écoulement de chaleur ne se produise qu'à travers l'échantillon, il est nécessaire que les côtés soient isolés. De plus, il faut aussi noter que le gradient thermique imposé peut provoquer le métamorphisme

de la neige (Oldroyd *et al.*, 2012). La seconde technique utilise la tomographie de la microstructure. Ainsi, l'image 3D de la microstructure et l'équation de chaleur en régime permanent (équation 2) permettent de déterminer la conductivité thermique effective pour un volume d'échantillon donné en séparant les transferts de chaleur dans la matrice de glace de ceux dans les pores remplis d'air. Néanmoins, en plus d'utiliser un équipement spécialisé, cette méthode est laborieuse car elle implique l'extraction complète d'échantillons de neige et leur stockage. Ainsi, il n'est pas envisageable d'obtenir une bonne résolution spatiale et temporelle à l'aide de cette technique (Oldroyd *et al.*, 2012).

Contrairement aux deux méthodes précédentes, il existe aussi des techniques qui permettent de déterminer la conductivité thermique effective à partir d'un transfert de chaleur transitoire qui présente l'avantage de ne pas nécessiter une source de chaleur constante. L'utilisation d'une aiguille munie de sondes est une méthode très populaire pour mesurer la conductivité d'un matériel (figure 26). Elle consiste à mesurer l'augmentation de température d'un fil de métal chauffant inséré dans le matériel. Cette technique repose donc sur le principe que plus la conductivité thermique est faible, plus l'augmentation de température résultante sera élevée pour un flux de chaleur constant (Morin *et al.*, 2010). Suivant la manipulation des équations de transfert de chaleur en régime transitoire, il a été établi que la différence de température le long de l'aiguille est linéairement reliée au logarithme naturel du temps et que la conductivité thermique est inversement proportionnelle à la pente de cette droite (Oldroyd *et al.*, 2012). L'avantage de cette sonde est qu'elle peut être utilisée en chambre froide, dans la paroi d'une excavation de neige ou, encore, être recouverte naturellement par les précipitations. Cette technique offre donc plus de flexibilité en termes de résolution spatiale et temporelle que les méthodes de transfert de chaleur en régime permanent. Toutefois, la neige est mécaniquement fragile et sa microstructure est extrêmement sensible aux variations de température, et ce, spécialement près du point de fusion (Morin *et al.*, 2010). Ainsi, aussi petite qu'elle soit, l'aiguille altère significativement les propriétés de la neige. Les valeurs mesurées sont systématiques plus faibles que les valeurs réelles (Oldroyd *et al.*, 2012). De plus, par vent fort, le processus d'advection peut aussi fausser les résultats (Morin *et al.*, 2010). En de telles conditions, il peut être nécessaire de réaliser la mesure à l'intérieur d'un tube fermé aux deux extrémités tel que schématisé à la figure 26.

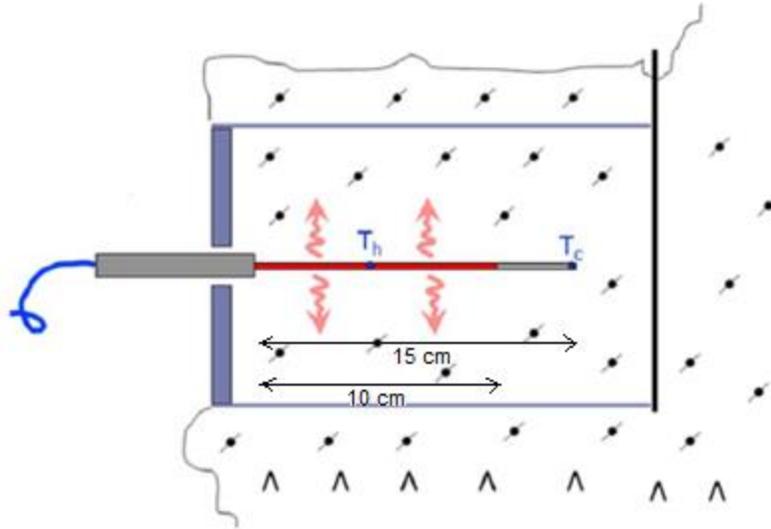


Figure 26 : Schéma d'une aiguille munie de sondes communément utilisées. T_c est la sonde de température de référence et T_h , la sonde au centre de la zone chauffée. Leur différence de température enregistrée permet de déterminer la conductivité thermique (modifiée de Domine et al., 2010)

La conductivité thermique peut aussi être déduite d'autres propriétés du couvert neigeux par paramétrage empirique. Comme mentionné précédemment, plusieurs auteurs ont établi des relations empiriques entre la conductivité thermique et la densité de la neige (Zhang, 2005). Néanmoins, la large dispersion de l'éventail de valeur (figure 24) est attribuée aux différentes microstructures et liaisons intergranulaires existantes pour une même densité. Domine *et al.* (2011) ont tentés de palier à ce problème en établissant une corrélation avec une autre propriété mécanique de la neige, soit sa résistance au cisaillement. Leur étude propose qu'en déterminant la conductivité thermique en fonction de deux paramètres, la valeur déterminée sera plus près de la réalité. Ils suggèrent toutefois que de meilleures courbes de régression pourraient être obtenues en ne considérant qu'un seul type de manteau neigeux (tundra, taïga, alpin ou maritime) ou, même, un seul type de neige (particules de précipitations, grains arrondis, givre de profondeur, etc.). De plus, bien que la méthode ne requière pas la mesure de la conductivité thermique, il faut tout de même connaître la densité du couvert neigeux qui est, elle-même, une propriété dynamique difficile à mesurer avec une haute résolution temporelle.

La dernière approche présente plusieurs avantages en comparaison aux précédentes. En effet, elle est peu dispendieuse et offre une grande flexibilité en termes de résolution, principalement temporelle, mais aussi spatiale. Cette approche permet de déterminer la diffusivité thermique effective à haute résolution temporelle par l'inversion numérique de l'équation de chaleur. La conductivité thermique est calculée à partir d'un profil de température. Ce dernier indique aussi la hauteur du manteau neigeux marquée par une nette inflexion du gradient de température (figure 27). La précision de ce paramètre

varie selon l'espacement entre les appareils de mesure (thermocouples ou thermistances). De plus, un profil de densité est établi par extrapolation linéaire entre deux points de mesure dans le temps (figure 28). Pour déterminer la conductivité thermique, il ne manque donc que la capacité calorifique massique de la glace qui est connue ($2,09 \text{ J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$). L'équation de transfert de chaleur en régime transitoire est résolue numériquement en temps et en espace pour une valeur initiale et des conditions limites données pour une gamme de diffusivités thermiques. Par itération, l'écart entre ces valeurs est ensuite minimisé jusqu'à ce que l'erreur de la racine carrée de la moyenne des carrés entre les températures prédites et mesurées soit minimale.

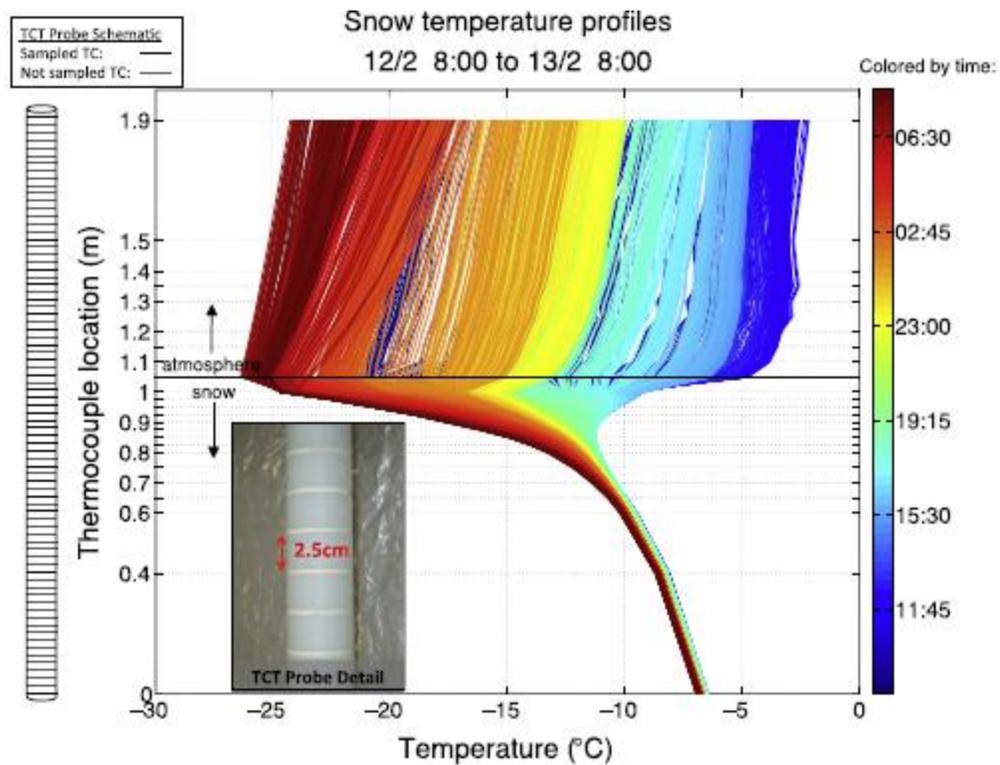


Figure 27 : Exemple de profil de température enregistrée sur une période de 24h, du 12 au 13 février 2008. La «TCT Probe» correspond à la sonde munie de thermocouples espacés de 2,5 à 40 cm les uns des autres. Les traits pointillés indiquent leur position relative (Oldroyd et al., 2012)

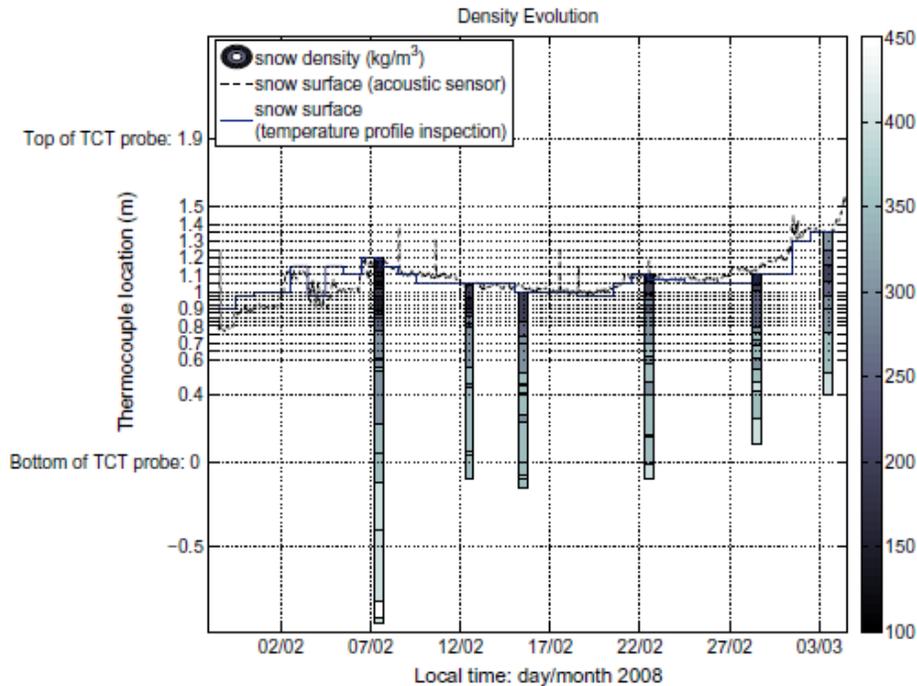


Figure 28 : Évolution de la densité et de la hauteur de la neige au cours de l'expérimentation. La densité est mesurée à chaque 5 cm de profondeur (Oldroyd et al., 2012)

En résumé de la présente section, afin de comprendre les échanges de chaleur dans le couvert neigeux, deux paramètres d'importance méritent d'être mesurés sur le terrain, soit la densité et la conductivité thermique effective. À cette fin, l'utilisation de profils de température semble la méthode la plus avantageuse.

1.5 Modélisation du couvert neigeux

1.5.1 Modèles existants

Par le passé, les transferts de chaleur dans le manteau neigeux ont principalement été étudiés dans le but d'investiguer les phénomènes des avalanches ou d'estimer le volume d'eau équivalent à la suite de la fonte. Par exemple, le modèle SNOWPACK est utilisé quotidiennement par les techniciens en avalanche afin de prédire le tassement du manteau neigeux, la superposition des couches, les échanges d'énergie à la surface ainsi que le bilan de masse (Bartelt et Lehning, 2002). Il s'agit d'un modèle très détaillé impliquant plusieurs processus physiques complexes (figure 29) et où les couches de neige ne sont pas seulement définies en termes de hauteur et de densité, mais aussi par la microstructure ainsi que le métamorphisme de la neige causé par les transferts de masse et de chaleur (Rahimi, 2016).

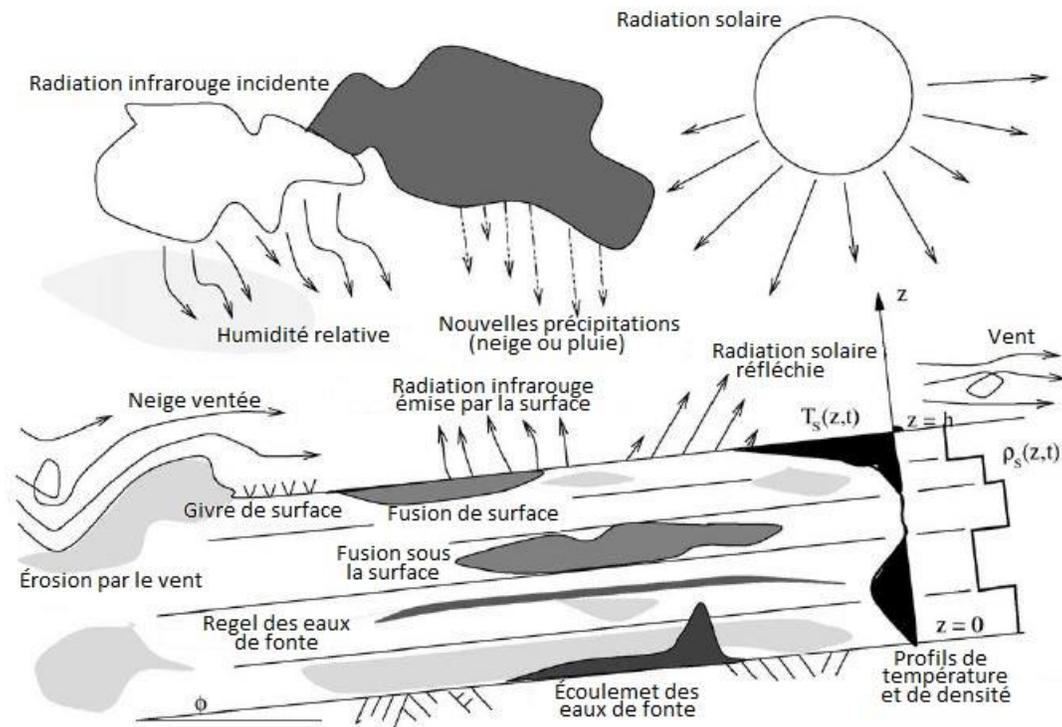


Figure 29 : Processus physiques considérés lors de la modélisation du couvert neigeux par le modèle SNOWPACK (Bartelt et Lehning, 2002).

SNTHERM est aussi un modèle complet basé sur les transferts de chaleur et de masse. Son but premier est toutefois de prédire les profils de température à l'intérieur des strates de neige afin d'estimer la température à la surface du sol gelé (Jordan, 1991). Pour se faire, ce modèle unidimensionnel se base sur la théorie du mélange combinant quatre constituants (glace, eau, vapeur d'eau et air) et représente le couvert de neige en plusieurs couches avec des propriétés thermiques variées qui sont soumises à une pression de surcharge causée par leur propre poids (Rahimi, 2016). Ainsi, l'accumulation, l'ablation, la densification et le métamorphisme de la neige sont traités dans le modèle, de même que leurs impacts sur les propriétés physiques et thermiques du couvert neigeux (Jordan, 1991).

En ingénierie, lors de simulations numériques de régimes thermiques dans le sol, la présence de neige est souvent négligée. Une approche impliquant un minimum de paramètres et d'équations différentielles partielles est généralement favorisée pour modéliser la neige saisonnière. En 1978, Andersland et Anderson propose une méthode simple à utiliser, mais dont l'usage est limité, particulièrement lorsque la convection d'air dans le sol n'est pas négligeable. Cette approche néglige aussi le changement de phase dans la neige et l'effet du climat sur la température à la surface de la neige.

Cette approche élimine le couvert neigeux et estime le flux de chaleur à la surface du sol (Q) suivant l'équation 26.

$$Q = h_n(T_a - T_s) \quad (26)$$

Le coefficient de transfert thermique de la neige (h_n) est fonction de la conductivité thermique de la neige (k_n) et de l'épaisseur moyenne du couvert neigeux (H_n).

$$h_n = \frac{k_n}{H_n} \quad (27)$$

1.5.2 Température à la surface du sol

Étant donnée qu'elle représente la condition limite à la surface de la chaussée et du remblai, la température à la surface du sol est la donnée thermique la plus importante à considérer lors de la conception d'une infrastructure de transport (Doré et Zubeck, 2009). Selon l'application, les deux approches habituellement priorisées sont présentées dans la section qui suit.

1.5.2.1 Bilan d'énergie de surface

Le bilan d'énergie à la surface se calcule selon la loi de conservation de l'énergie et présente l'avantage de s'appliquer à tous les types de surface. L'équation 28 exprime le bilan d'échange d'énergie annuel à la surface du sol.

$$R + LE + P + B = 0 \quad (28)$$

Où R correspond au bilan annuel des radiations incidentes et émises qui inclut les radiations solaires et à ondes longues. LE , P et B correspondent respectivement au flux de chaleur latente associée à l'évaporation, au bilan de chaleur échangée par convection et conduction ainsi qu'au flux de chaleur thermique à la surface du sol (Andersland et Anderson, 1978). La contribution de ces flux de chaleur est inégale. Une analyse de sensibilité permet d'établir l'importance des flux de chaleur dans un environnement donné afin de négliger ceux qui ont une faible influence sur le bilan d'énergie. Il s'agit d'une approche ayant une vaste application, mais qui requiert une grande variété de données météorologiques.

1.5.2.2 Facteur n

Le facteur n représente une façon simple d'estimer indirectement la fonction de la température à la surface du sol. Tel que présenté par les équations 29 et 30, les facteurs n pour le gel (n_f) et le dégel (n_t) sont définis comme le ratio de l'indice de gel ou de dégel du sol sur l'indice de gel ou de dégel de l'air.

$$n_f = \frac{IG_s}{IG_a} \quad (29)$$

$$n_t = \frac{ID_s}{ID_a} \quad (30)$$

La magnitude du facteur n dépend autant des conditions climatiques que du type de surface. Cette méthode empirique est généralement établie pour une surface horizontale ou à des endroits spécifiques. L'applicabilité de cette approche en est donc limitée (Rahimi, 2016).

1.6 Pertinence du projet de recherche

Tel que discuté dans le présent chapitre, en vue de prédire l'impact d'une infrastructure construite sur le pergélisol, il est nécessaire d'estimer la température à la surface du sol. Selon les conditions météorologiques locales et régionales ainsi que l'orientation de l'infrastructure de transport linéaire, l'accumulation préférentielle de neige peut être une conséquence directe de sa construction et contribuer significativement à l'augmentation de la température du sol d'infrastructure. Ainsi, l'effet de la répartition du couvert neigeux en bordure des routes et des pistes d'atterrissage requiert une considération particulière. Dans cet ordre d'idées, quelques modèles ont été développés afin de simuler adéquatement la présence du couvert neigeux. À proximité d'une infrastructure de transport, L'Hérault *et al.* (2012) ont tenté de modéliser le régime thermique dans le sol d'infrastructure de la piste d'atterrissage de Tasiujaq. L'absence de câble à thermistances à proximité a toutefois empêché la validation du modèle. Au même site, une section d'essai où le remblai présente une pente adoucie a été réalisée. Toutefois, il n'existe actuellement aucune étude qui quantifie l'impact de l'angle de la géométrie du remblai sur la répartition du couvert neigeux et donc sur la température à la surface. Le présent projet de recherche a pour objectif de combler cette lacune en proposant une approche de conception visant la stabilisation thermique des ouvrages construits sur le pergélisol en optimisant la géométrie du remblai de façon à prendre en compte l'accumulation de neige préférentielle.

2 Description du site expérimental et instrumentation

Établi en 1971, le village de Tasiujaq est une communauté inuite située sur la côte de la baie d'Ungava. Plus précisément, il se trouve à 110 km au nord-est de Kuujuaq sur les rives de la baie aux Feuilles. La rivière Bérard délimite le sud du village. Sa population s'élève à 248 habitants (Makivik Corporation, 2019). Le village se trouve à quelques kilomètres au nord de la limite des arbres où la toundra arbustive cède définitivement sa place à la toundra arctique. Ainsi, il s'agit approximativement de l'emplacement du contact établi par Ressources naturelles Canada en 1995 entre les zones de pergélisol continu et discontinu.

La construction de l'aéroport de Tasiujaq a été achevée en 1990. Il se situe sur la rive nord-ouest de la rivière Bérard à près de 3 km en amont du village (figure 30). La piste d'atterrissage, s'étendant des chaînages 4+940 m à 6+130 m, atteint une longueur totale de 1 190 m et une largeur de 44 m (Ficheur, 2011). Au nord-est de la piste, l'altitude par rapport au niveau de la mer est de 32 m et augmente jusqu'à 37 m au sud-ouest. Parmi les infrastructures aéroportuaires du Nunavik, la piste d'atterrissage de Tasiujaq a été évaluée comme l'une des plus critiques quant au dégel du pergélisol (Doré et Beaulac, 2007). Selon les mêmes auteurs, cette dégradation est en grande partie due à l'accumulation de neige sur les talus du remblai. Or, c'est pourquoi ce site a été choisi pour étudier plus en profondeur l'effet du couvert neigeux sur la dégradation du pergélisol sous les épaulements et en pied de remblai.



Figure 30 : Image satellite de la piste d'atterrissage de Tasiujaq (modifiée de Google Earth, 2013)

Dans cette section, seront décrits les caractéristiques du site d'essai de Tasiujaq connues grâce aux travaux effectués par le Centre d'études nordiques (CEN) ainsi que l'instrumentation mise en place dans le cadre du présent projet.

2.1 Travaux passés et résultats

2.1.1 Synthèses des travaux et détériorations observées

La dégradation du pergélisol à la piste d'atterrissage de Tasiujaq a été jugée critique en raison du taux d'évolution des tassements très élevé de 20 à 70 mm/an. De plus, de nombreuses accumulations d'eau en pied de remblai ont été observées. Le type de détérioration suggère que le problème de l'accumulation de neige est responsable de la dégradation du pergélisol. Par exemple, peu de tassements sont notés au centre de la piste, alors que les épaulements sont plus touchés par les processus de dégradation, essentiellement l'accotement est. En effet, de ce côté de la piste, maintes dépressions accompagnées de fissures de tension ont été recensées lors de relevés effectués par le personnel du Ministère des Transports du Québec. Plus particulièrement, en 2004, entre les chaînages 5+100 m et 5+140 m, des fissures de plusieurs mètres de long ainsi qu'une dépression de 35 m de large et de 50 cm de profondeur étaient observables (L'Hérault *et al.*, 2012). Il s'agit d'ailleurs de l'emplacement des planches d'essais qui ont été mises en place par le groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval (GRINCH) à l'été 2007. Composé de quatre sections distinctes, le site d'essai inclus, du sud-ouest au nord-est, une section témoin, une section à pente adoucie, une section à remblai à convection d'air et une section à drain thermique (Ficheur, 2011). La section d'essai où la pente est adoucie consiste en un remblai ayant une pente de 8H : 1V, soit 13% (figure 31). Ces sections mesurent chacune 50 m de long et ont été équipées de thermistances à la fin de l'été 2009. Des trous de forage, au milieu de la pente, au centre de chaque section, accueillent deux chapelets en quinconce pour un total de 16 thermistances chacune espacées de 30 cm. La précision des capteurs de température était de $\pm 0,1$ °C.



Figure 31 : Adoucissement de la pente à la section d'essai de Tasiujaq, été 2007 (Jørgensen et Doré, 2009)

Lors des travaux en 2007, la piste a été rechargée et nivelée. Ainsi, les dépressions mentionnées précédemment ont été comblées. Depuis, quelques signes de dégradation sont réapparus. Ces derniers sont toutefois d'une ampleur moindre que ceux recensés au début de la dernière décennie (L'Hérault *et al.*, 2012). Un rechargement partiel de la piste en granulat avait aussi été effectuée en juillet 2004 (Allard *et al.*, 2007). Conséquemment au dégagement de la neige par la souffleuse durant l'hiver, des grandes quantités de MG-20b recouvrent les talus de la piste du côté sud-est et des cailloux se retrouvent dans le terrain naturel avoisinant (Beaulac, 2006).

Entre les chaînage 5+820 m et 5+865 m, se trouve un lac peu profond. Il s'agit des vestiges d'un ancien méandre abandonné (figure 32a et b). Le drainage naturel de ce lac s'effectue principalement le long d'un ruisseau du côté nord-ouest de la piste.

2.1.2 Géomorphologie et caractéristiques de la piste

En 2007, dans le secteur de l'aéroport de Tasiujaq, une carte détaillée des dépôts de surface (figure 32b) a été établie par le CEN (Centre d'études nordiques) en se basant sur une dizaine de coupes stratigraphiques excavées à la pelle dans la couche active, ainsi que sur plusieurs dizaines de trous creusés à l'aide d'une tarière.

De plus, une coupe stratigraphique de 11 m de haut a été exposée à l'aide d'une pompe à eau le long de la rivière Bérard, à 150 m au sud-est de la piste. La figure 33 représente les unités observées. En 2009, quatre forages profonds ont été réalisés en pied de remblai, totalisant 79,5 m de forages pour lesquels 83 échantillons gelés ont été récupérés (L'Hérault *et al.*, 2012). Couplées avec des levés géophysiques, les informations recueillies ont permis de réaliser une coupe géologique longitudinale

sous le remblai (figure 32c). Les échantillons gelés ont été soumis à des essais de consolidation au dégel ainsi qu'à des analyses granulométriques, de teneur en eau et de salinité. La présente section synthétise donc les diverses observations et résultats afin de résumer la répartition spatiale, les épaisseurs et les propriétés des unités géologiques de surface telles que la granulométrie et la teneur en eau. Ces données seront grandement utiles autant lors des travaux de terrains que lors de la validation du modèle numérique.

Dans l'ensemble, la région de Tasiujaq se caractérise par une série de terrasses marines et fluviales dans des dépôts datant de l'Holocène d'origine glaciaire, marine, fluvio-glaciaire, littorale, estuarienne et fluviale (Allard *et al.*, 2007). L'aéroport a été construit sur une terrasse fluviale qui se trouve à environ 30 m au-dessus du niveau de la mer actuel. La terrasse est donc recouverte d'un placage de dépôts fluviaux anciens (Ax) ou d'alluvions actuels (Ap) tel que représenté à la figure 32b. Lors des forages, le roc n'a pas été atteint, ce qui permet d'affirmer que les dépôts meubles s'étendent sur plus de 25 m de profondeur. Selon L'Hérault *et al.* (2012), les unités géologiques de surface peuvent être séparées en cinq couches stratigraphiques distinctes décrites ci-dessous.

Comme indiqué précédemment, les dépôts entre 1 et 2 m de profondeur correspondent à des sédiments fluviaux (A) (figure 32c). Selon la microtopographie, il peut exister un horizon organique de 5 à 30 cm d'épaisseur en surface. Cet horizon est généralement absent sous l'ensemble du remblai. Des buttes basses et plates correspondent à des barres alluviales composées de sable et de gravier (Axb) (figure 32b), bien drainées, et donc pauvres en glace (L'Hérault *et al.*, 2012).

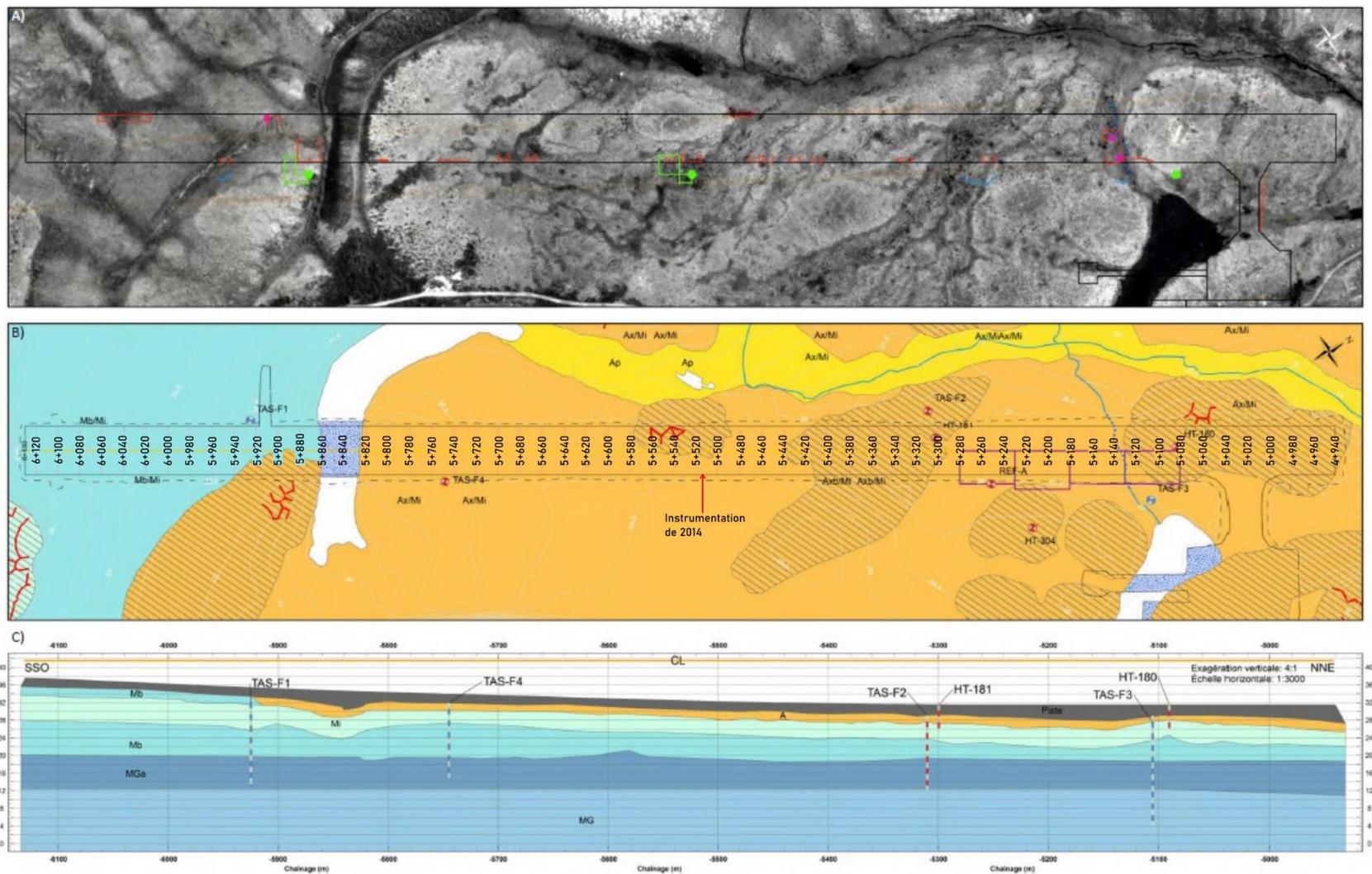


Figure 32 : A) Photographie aérienne avant la construction. B) Unités géologiques de surface et emplacement de la piste, des forages et des sections d'essais. C) Coupe sous le remblai. A sédiments alluviaux, Mb sédiments marins littoraux et pré-littoraux, Mi sédiments intertidaux et MG glaciomarins (L'Hérault et al., 2012)

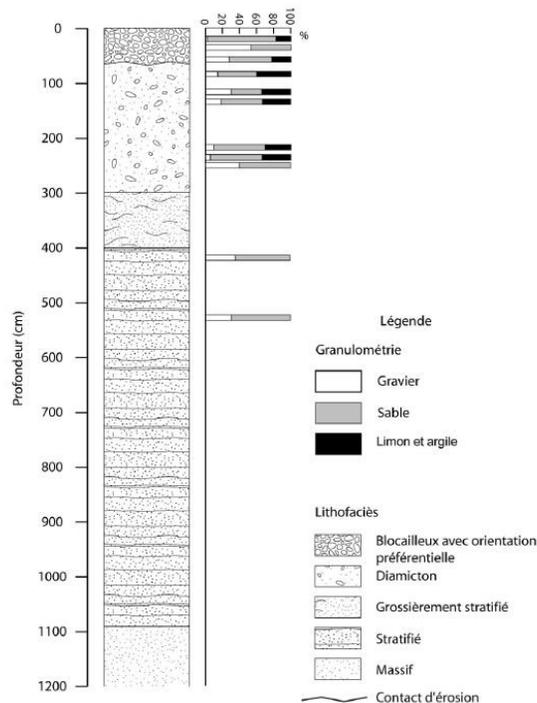


Figure 33 : Coupe stratigraphique de la terrasse de l'aéroport de Tasiujaq incluant les granulométries (Allard *et al.*, 2007)

Comme le montre la coupe stratigraphique de la figure 32c, sous la couche de sédiments fluviatiles (A), des sédiments intertidaux (Mi) se retrouvent à moins de 2 m sous l'ensemble de l'infrastructure. L'épaisseur de cette unité varie entre 1,6 et 6 m. Ces sédiments se présentent sous la forme d'un diamicton, soit de dépôts composés d'éléments détritiques de toutes grosseurs. Du point de vue de la granulométrie, l'unité de diamicton se compose, en pourcentages variables, de gravier, de sable ainsi que de particules fines correspondant à du silt et de l'argile non plastique (figure 33). En moyenne, les proportions de gravier, sable et silt sont respectivement 9, 56 et 35 %. La proportion de silt et d'argile peut toutefois atteindre jusqu'à 50 %. Il est possible de retrouver des poches de matières organiques enfouies, ou encore des fragments de coquillages. Dans la portion de diamicton gelé en permanence, des lentilles millimétriques, plus au moins rapprochées, sont observables. La teneur moyenne en eau totale est de 20 %. Cependant, entre 2 et 4 m de profondeur la densification des lentilles de glace augmente la teneur en eau à près de 27%. À la base de l'unité, le gravier et le sable prédominent (figure 33). Il s'agit d'une transition graduelle avec l'unité sous-jacente (L'Hérault *et al.*, 2012).

Plus en profondeur, le sable silteux intertidal (Mi) est graduellement remplacé par des sédiments pré littoraux (Mb) plus grossiers qui se composent essentiellement de sable grossier et de gravier (figure 32b). Cette couche, de 3 à 7 m d'épaisseur, peut aussi contenir des coquillages, des traces de silt ainsi que

quelques cailloux décimétriques. Les proportions moyennes de gravier, de sable et de particules fines sont respectivement 57, 41 et 2 %. Contrairement à l'unité sus-jacent, la teneur en eau totale est faible et la glace est principalement interstitielle. En effet, la teneur en eau moyenne est de 9 % et n'atteint jamais plus de 16 % (L'Hérault *et al.*, 2012).

Sous cette dernière couche de sable et gravier (Mb), des sédiments fins d'eau profonde (MGc) se retrouvent entre 7 et 13 m de profondeur (figure 32c). Ce dépôt massif d'origine glacio-marine atteint une épaisseur de plus de 7 m. En moyenne, cette unité contient 34 % de sable, 65 % de particules fines et moins d'un pourcent de gravier. Localement, la proportion de particules fines atteint près de 98 %. Alors, le comportement du sol se rapproche de celui d'une argile inorganique plastique. Conséquemment, un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées à pluricentimétriques bien développées sont observables. La teneur en eau totale moyenne de ce dépôt est de 33 % et atteint localement près de 50 % (L'Hérault *et al.*, 2012).

Au-delà de 17 m de profondeur, se trouve un sable silteux d'origine glacio-marine (MG) (figure 32c). Granulométriquement, il se compose de 73 % de sable et de 27 % de silt. La glace y est principalement interstitielle. Toutefois, des lentilles de glace centimétriques subhorizontales ont été observées dans les couches plus silteuses. La teneur en eau moyenne est de 27 % (L'Hérault *et al.*, 2012).

En ce qui a trait aux matériaux de remblai, tel que recommandé, des matériaux granulaires de classe B provenant des déblais ou d'emprunt extérieur ont été utilisés sous la ligne d'infrastructure de la chaussée. Le diamètre nominal des plus grosses particules de pierre concassée était initialement supérieur au 2/3 de l'épaisseur de chaque couche apposée. Cela avait pour effet de favoriser la convection dans le remblai (Beaulac, 2006). Toutefois, en raison des travaux de remblaye qui ont été effectués en 2004 et 2007, la majorité des vides de l'enrochement ont été comblés par le MG-20b utilisé pour recharger les nombreuses dépressions (Beaulac, 2006). Ainsi, le phénomène de convection est pratiquement nul dans le remblai.

2.1.3 Capteurs de température

Depuis la construction de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, un suivi thermique a été effectué à l'aide de trois câbles à thermistance se trouvant à l'intérieur de la zone clôturée de l'aéroport (HT304, HT180 et HT181). En 2007, un quatrième câble a été ajouté (REF-A). Les emplacements exacts de ces câbles ont été illustrés par L'Hérault *et al.* (2012) à la figure 32b.

La station HT304 (figure 34) est considérée comme une station de référence puisqu'elle se trouve dans un dépôt similaire au sol d'infrastructure, et ce, dans le terrain naturel non affecté par la présence du remblai (Allard *et al.*, 2013). Initialement installé en août 1993, ce câble à thermistances de 11 m de

profondeur se trouve à une quarantaine de mètres au sud-est de la piste d'atterrissage (L'Hérault *et al.*, 2012). Les coordonnées géographiques précises sont 58,669843°N en latitude et 69,951915°O en longitude. Par rapport à la piste, le forage se situe à la hauteur du chaînage 5+210 m. Depuis le 12 juin 2004, la température du sol est enregistrée à 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 700, 900 et 1 100 cm de profondeur à toutes les six heures (6h-12h-18h-24h). Cette station est aussi dotée d'un capteur mesurant la température de l'air qui est enregistrée suivant une périodicité horaire (Allard *et al.*, 2013). En date du 24 octobre 2008, trois thermocouples ont été ajoutés au même site à 5, 10 et 20 cm de profondeur.



Figure 34 : Station de référence HT304 dans le milieu naturel, Tasiujaq (Allard *et al.*, 2013)

Les câbles à thermistances HT180 et HT181 comprennent tous deux 11 thermistances réparties sur 5 m le long de forages verticaux dans le remblai et le sol sous-jacent. Plus précisément, le câble HT180 se trouve à 3 m à l'ouest du centre de la piste au chaînage 5+090 m (figure 32b). En surface, les températures sont mesurées à des profondeurs de 60, 80 et 135 cm. Après quoi, les thermistances sont espacées de 50 cm, et ce, jusqu'à 5,35 m de profondeur. Les quatre thermistances superficielles se trouvent dans le remblai. La plus profonde d'entre elles est à 1,85 m de profondeur et est positionnée près de l'interface entre le remblai, l'isolant et le sol d'infrastructure (Centre d'études nordiques, 2011). En effet, à cet emplacement, lors de la mise en place du remblai, une butte de sable et gravier alluviale (Ax à la figure 32b) a été excavée et la base du remblai a été isolée (L'Hérault *et al.*, 2012). La distribution des thermistances le long du câble HT181 est similaire. En effet, les capteurs superficiels se trouvent à 65 et 90 cm, puis, les thermistance suivantes se retrouvent à chaque 50 cm jusqu'à une profondeur de 5,40 m (Centre d'études nordiques, 2011). Ce forage instrumenté se situe au chaînage 5+300 m, à 10,6 m à l'ouest du centre de la piste (figure 32b). À cet emplacement, l'épaisseur du remblai est de 1,75 m. Ainsi, trois thermistances sont dans le remblai et huit dans le sol d'infrastructure sous-jacent. Depuis juin 2014, les

températures dans le remblai et dans le sol d'infrastructure sont enregistrées et cumulées à chaque six heures (Centre d'études nordiques, 2011).

2.1.4 Enneigement

Tel qu'évoqué précédemment, l'une des principales causes de dégradation du pergélisol sous la piste d'atterrissage de Tasiujaq est l'importante accumulation de neige le long du remblai, et ce, particulièrement au sud-est de la piste. La figure 35a montre, qu'à la fin de l'été, la hauteur du banc de neige peut même dépasser la hauteur du remblai au sud-est de la piste. Ce phénomène s'explique par la direction du vent en hiver par rapport à l'orientation de la piste qui suit un axe nord-est. Comme le montre la figure 36, l'orientation du vent à l'aéroport de Tasiujaq diffère selon les saisons. Bien que l'été, le vent est majoritairement parallèle à la piste d'atterrissage, il peut être presque perpendiculaire à cette dernière au cours de l'hiver, et ce, plusieurs jours par année. En effet, en hiver de forts vents suivent souvent une orientation de 290° , croisant alors la piste avec un angle de 80° puisqu'elle-même suit un axe de 30° par rapport au nord (Ficheur, 2011). Ainsi, en hiver, la piste constitue un parfait obstacle au vent, ce qui favorise grandement la déposition de la neige au sud-est du remblai. Du côté nord-ouest, qui est plutôt au vent en hiver, la neige peut être balayée et de moins grandes accumulations de neige ont été observées (figure 35b). De plus, pour des raisons pragmatiques la neige s'accumulant sur la piste est soufflée dans le sens du vent, donc du côté sud-est.

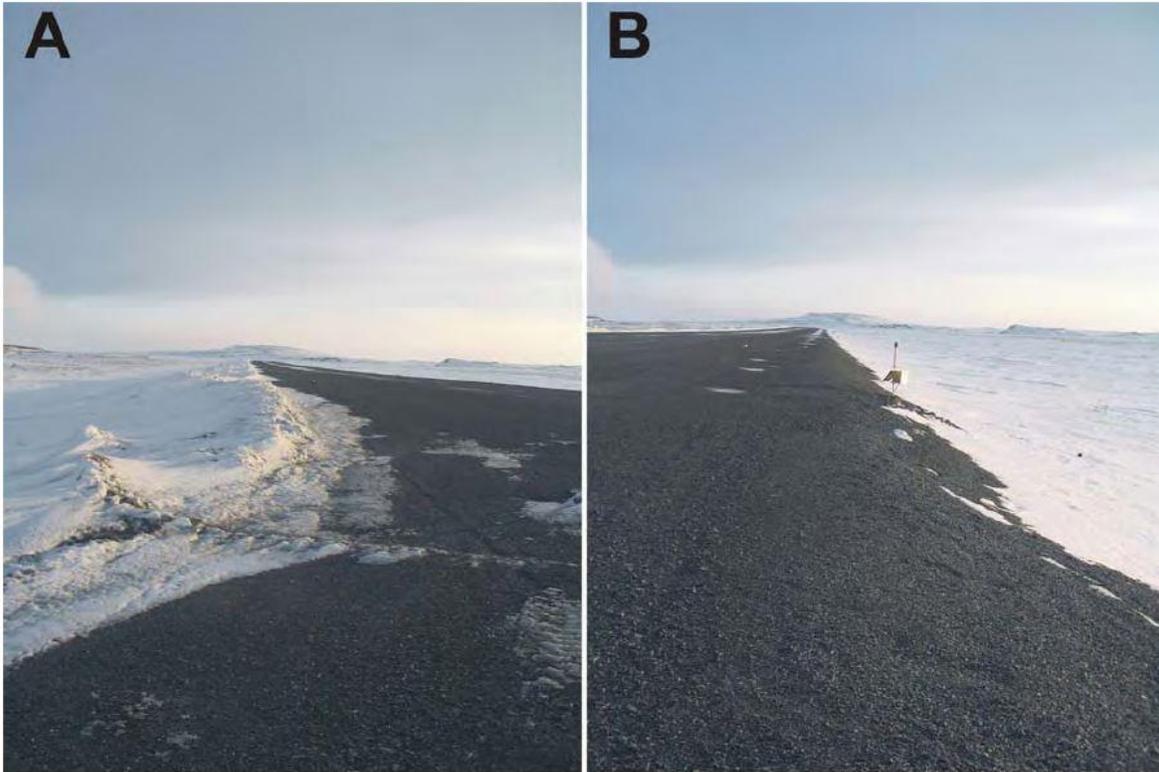


Figure 35 : Accumulation de neige en bordure de la piste d'atterrissage a) du côté nord-est et b) du côté sud-ouest, Tasiujaq, avril 2005 (Allard et al., 2007)

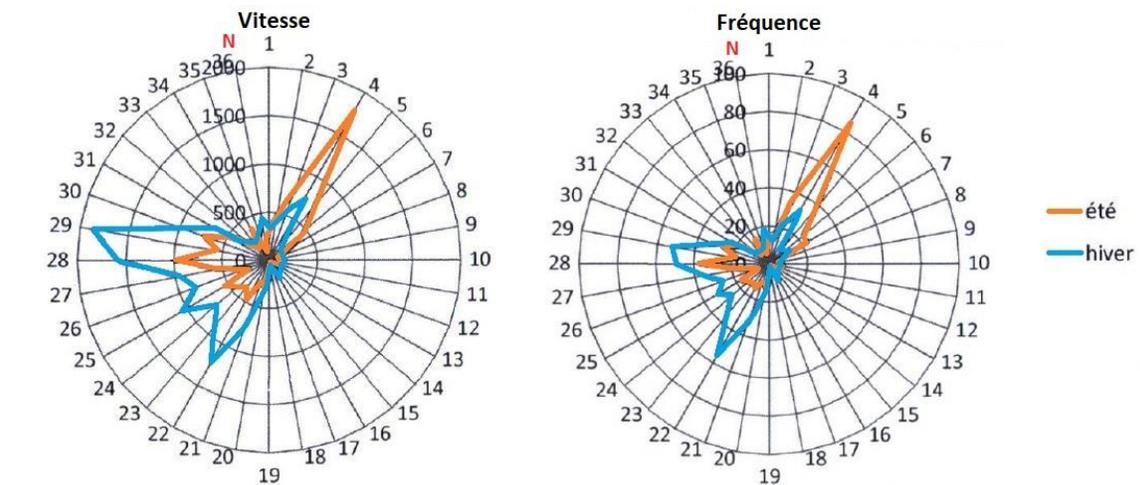


Figure 36 : Vitesse cumulée (en km/h) et fréquence cumulée (en jours) du vent en fonction de la direction de provenance, aéroport de Tasiujaq, 2006 à 2009 (modifiée de Ficheur, 2011)

Les diagrammes de la figure 37 ont été réalisés à l'aide des données archivées par Environnement Canada en 2015. En concordance avec les données enregistrées entre 2006 et 2009, il est possible de noter l'importance des vents provenant de l'ouest au cours de l'hiver 2014-2015 (figure 37b). La majorité du temps, ces vents atteignent plus de 30 km/h. Bien qu'ils donnent une bonne idée de l'orientation et de la vitesse moyenne du vent, ces graphiques omettent toutefois les données nocturnes (entre 17h et 6h). Évidemment, celles-ci ont aussi une influence sur la répartition du couvert neigeux.

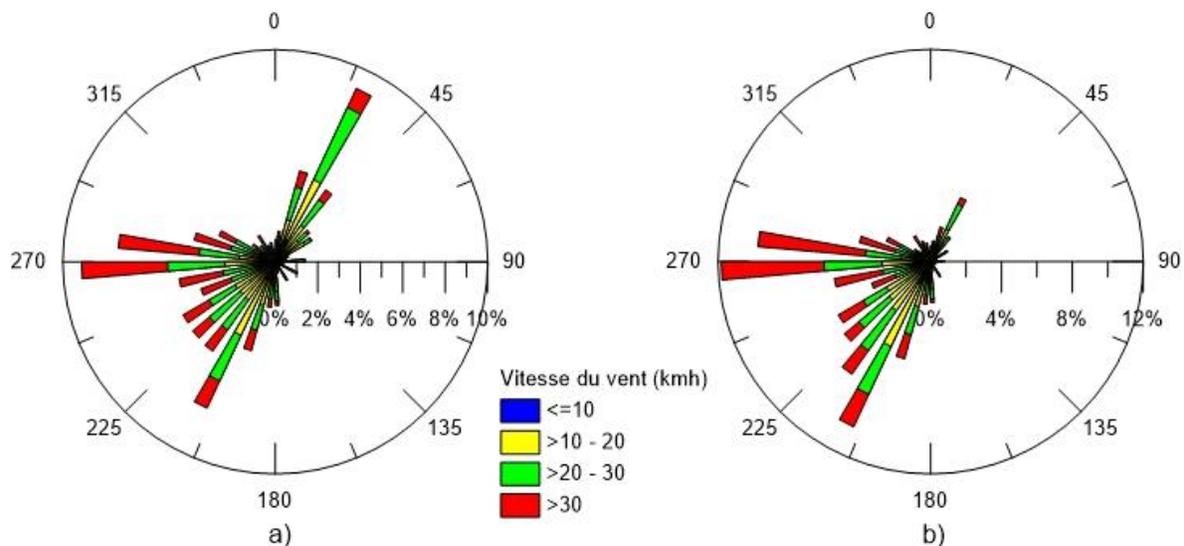


Figure 37 : Direction et vitesse du vent a) de mai 2015 à septembre 2015 ainsi que b) d'octobre 2014 à avril 2015 à Tasiujaq

Afin d'étudier plus en profondeur l'effet du couvert neigeux sur le régime thermique du pergélisol, le personnel du CEN a mesuré l'épaisseur du couvert neigeux au pourtour de la piste de Tasiujaq en avril 2015. Ainsi, des profils d'épaisseur de neige le long de dix transects de 15 à 25 m à la base du remblai ont pu être tracés. De plus, quatre de ces transects étaient équipés d'enregistreurs de température autonomes répartis du pied du remblai jusqu'à 20 m dans le terrain naturel, et ce, sous la surface de la couche organique (Allard *et al.*, 2007). Comme le montre les profils de neige à la figure 38 (a et b), les accumulations nivales sont bien plus importantes au sud-est de la piste. De ce côté, l'épaisseur de neige en pied de remblai avait atteint 175 cm, alors qu'elle ne dépassait jamais 105 cm du côté nord-ouest. Comme attendu, les capteurs de température enregistrent des températures plus élevées sous un couvert neigeux plus épais. Conséquemment, de janvier à avril 2005, au pied du remblai du côté nord-est (sous le vent), les températures sont supérieures de 6 °C à celles mesurées au pied des pentes au vent (figure 38c et d). L'impact thermique de l'enneigement différentiel est donc majeur. Il a d'ailleurs été conclu par Allard *et al.* (2007) qu'au-delà d'une hauteur de neige critique de l'ordre de 77 cm, le bilan thermique

annuel à la surface du sol est positif. Fait est de constater, qu'en pied du remblai, tout le côté sud-est est recouvert par une couche de neige supérieure à cette épaisseur.

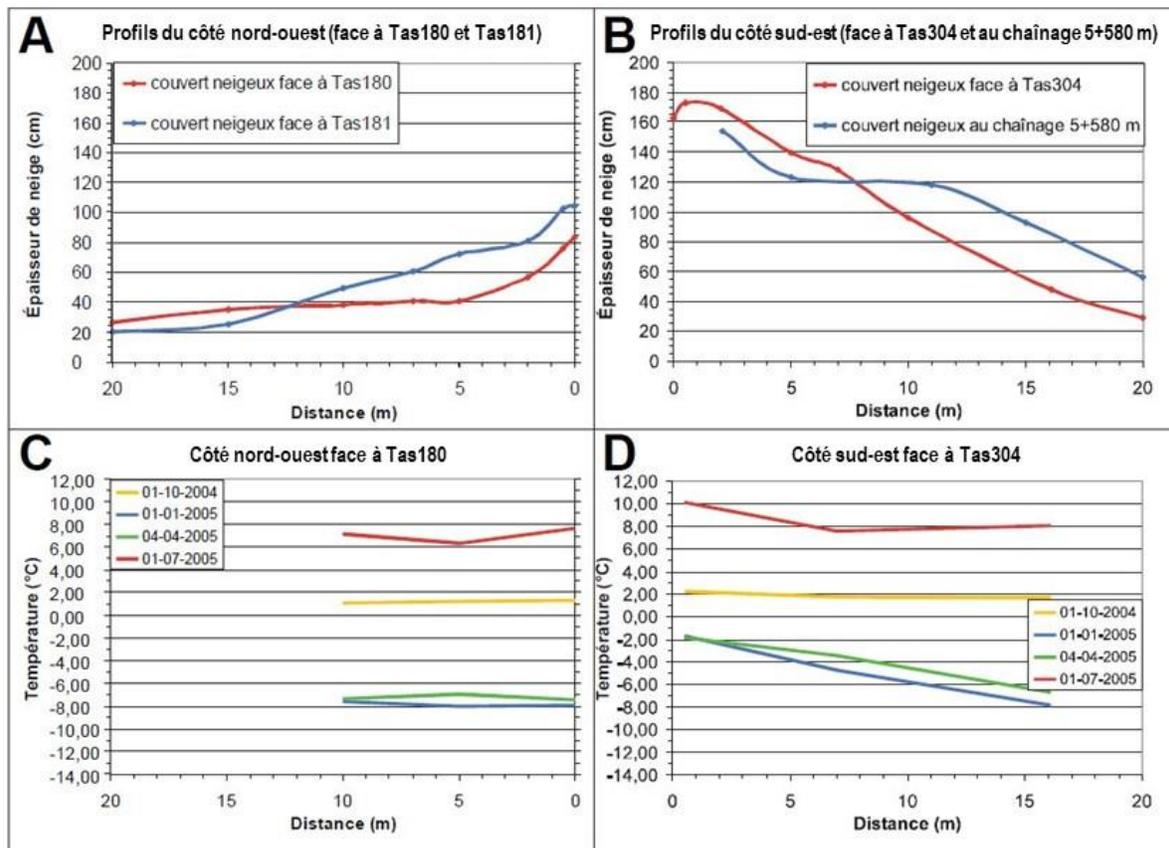


Figure 38 : Profils de l'épaisseur de neige en avril a) du côté nord-ouest, b) du côté sud-est ainsi que les températures à la surface, Tasiujaq, 2005 (Allard et al., 2007). Les emplacements des câbles à thermistances 180, 181 et 304, ainsi que le chaînage 5+580 m sont indiqués à la figure 32b

Finalement, Allard *et al.* (2007) ont noté une expansion et une densification de la végétation arbustive le long de la piste. Cette croissance est due à la protection offerte aux branches et aux bourgeons par le manteau neigeux durant l'hiver ainsi qu'au réchauffement général de la température de l'air depuis 2002. Rétroactivement, cette végétation favorise le piégeage de la neige transportée.

2.2 Instrumentations au chaînage 5+515 m

Dans le cadre du présent projet de recherche, un transect de la piste d'atterrissage a été instrumenté en septembre 2014. À ce moment de l'année, la couche active avait approximativement atteint son épaisseur maximale, facilitant ainsi la mise en place de l'équipement.

2.2.1 Localisation du transect

L'instrumentation se trouve à la hauteur du chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage (figure 32b). Cet emplacement a été consciencieusement choisi afin d'éliminer au maximum l'influence des facteurs contribuant à la dégradation du pergélisol autres que celui de l'accumulation de la neige. Tout d'abord, il était indispensable que le transect expérimental se trouve à une distance adéquate de la section de référence instrumentée en 2007 puisque le régime thermique du sol y est grandement affecté par une importante accumulation d'eau en pied de remblai. Toujours dans le but de minimiser l'impact de l'écoulement de l'eau, il était primordial que les capteurs de température se trouvent à l'écart des réseaux de drainage notables, tel qu'observé au chaînage 5+515 m (figure 32a et b). Plus précisément, le transect instrumenté se situe aux coordonnées géographiques 58,667806 °N en latitude et 69,955194 °O en longitude.

Selon la coupe de la piste d'atterrissage réalisée par le CEN (L'Hérault *et al.*, 2012), au chaînage 5+515 m, le remblai d'une moyenne de 2,5 m de haut repose sur trois unités distinctes (figure 32b et c). Une synthèse de la stratigraphie est présentée au tableau 4.

Tableau 4 : Stratigraphie des unités géologiques au chaînage 5+515 m

Unités	Sous-unités	Épaisseur (m)	Élévation* (m)	
			Sommet	Base
Remblai	Matériaux de remblai	2,5	2,5	0,0
Sédiments alluviaux	Alluvions (A)	1,8	0,0	-1,8
Sédiments marins	Sédiments intertidaux (Mi)	3,5	-1,8	-5,3
	Sédiments littoraux et pré-littoraux (Mb)	5,7	-5,3	-11,0
Sédiments glaciomarins	Sédiments marins d'eau profonde (MGa)	7,0	-11,0	-18,0
	Sédiments glaciomarins non différenciés (MG)	> 14	-18,0	n.d.

*par rapport à la surface du sol d'infrastructure

2.2.2 Instrumentation

Tel qu'illustré à la figure 39, l'instrumentation mise en place à l'automne 2014 se compose essentiellement de trois câbles d'acquisition de température individuels, identifiés par leur numéro de série précédé de l'acronyme TAC pour « temperature acquisition cable » (TAC2597, TAC2598 et TAC2599).

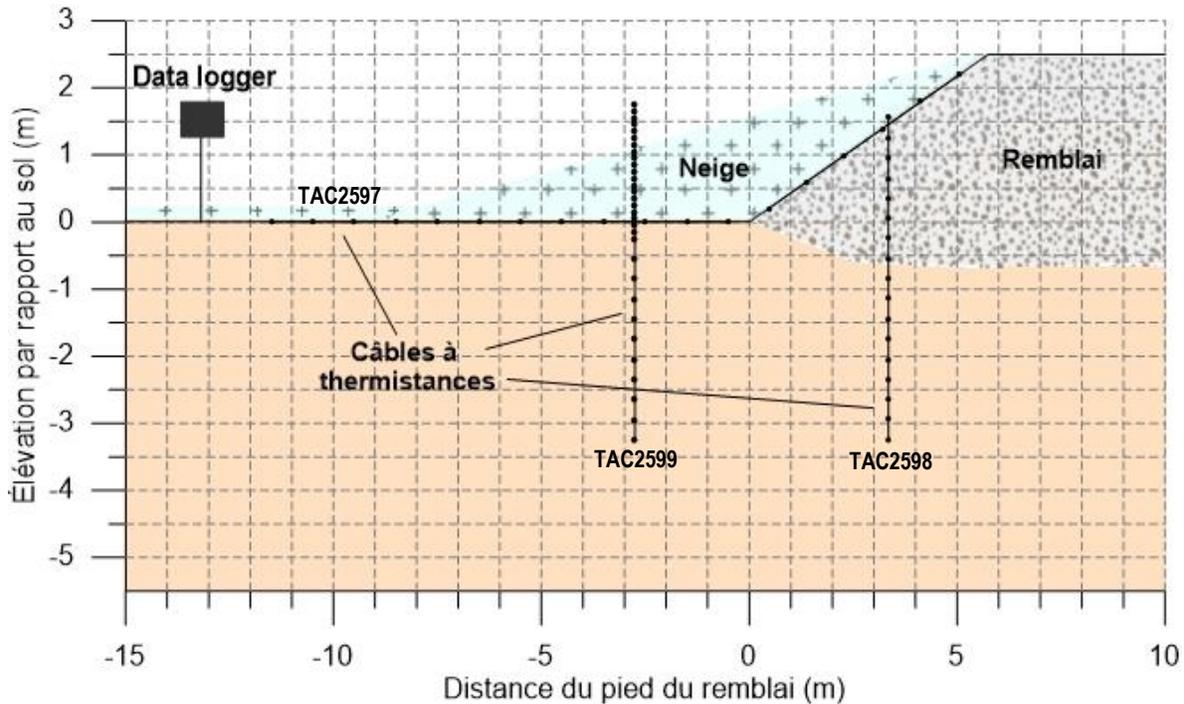


Figure 39 : Coupe transversale de la piste de Tasiujaq montrant l'instrumentation au chaînage 5+515 m

Dans le but de simplifier la présentation des résultats, le point à l'origine se trouve au pied du remblai (figure 39). Ainsi, les valeurs négatives le long de l'axe horizontal sont attribuées à des capteurs se trouvant dans le terrain naturel, alors que les valeurs positives font référence aux capteurs dans la pente du remblai. De même, le long de l'axe vertical, les valeurs négatives et positives correspondent respectivement à des capteurs se trouvant dans le sol naturel et au-dessus de celui-ci, que ce soit dans le remblai (TAC2598) ou au-dessus du sol naturel (TAC2599). Cette approche sera utilisée tout au long du présent document afin de désigner les diverses thermistances.

Les câbles utilisés sont de modèle S724EX et fabriqués par la compagnie alaskienne BeadedStream. Les divers capteurs mesurent la température de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Afin d'enregistrer la température à la surface du sol, le câble TAC2597 a été posé à la surface du sol parallèlement au transect à partir de l'épaule jusqu'à 11,5 m dans le terrain naturel. Ce câble comprend 18 thermistances espacées d'un mètre les unes des autres. Comme schématisé sur la figure 39, ces capteurs mesurent la température directement sous le couvert nival lorsque celui-ci est en place. À la mi-pente, le câble TAC2598 mesure la température dans 1,45 m de remblai et dans 3,25 m de sol naturel, pour une profondeur totale de 4,7 m. Ce câble est muni de 17 thermistances positionnées à chaque 30 cm. Toutefois, la thermistance la plus en surface, n'a pas pu être introduite dans le remblai et se trouve à 10 cm au-dessus de la surface (figure 39). Ainsi, la première thermistance considérée pour le TAC2598

se trouve à 20 cm de profondeur. Finalement, le câble TAC2599 permet de documenter le régime thermique dans le sol naturel à 2,75 m de la base du remblai (figure 39). Il se compose de 31 thermistances dont 13 se retrouvent sous la surface du sol et sont espacées de 30 cm. Parmi celles-ci, la thermistance la plus superficielle et celle la plus profonde se trouvent respectivement à 0,05 m et 3,25 m de profondeur. Les 18 autres capteurs de température ont été fixés à l'aide d'attaches à tête d'équerre le long d'un poteau de fibre de verre peu conducteur recouvert de ruban adhésif blanc minimisant l'impact des radiations solaires. Ces thermistances permettront de suivre l'évolution du couvert neigeux en continu au fur et à mesure que la neige s'accumule en pied de remblai (consulter section 3.4). Le plus haut capteur se trouve à 1,75 m au-dessus de la surface. Afin de maximiser la résolution des données collectées, seulement 10 cm séparent chacun des capteurs, soit l'espacement minimal recommandé par le fabricant.

Entre les capteurs, les trois câbles sont blancs afin de réduire l'effet thermique de la radiation solaire. Pour la même raison, les capteurs de température exposés aux radiations solaires ont aussi été recouvert d'une gaine blanche (TAC2597 et TAC2599). Dans le cas des TAC2598 et TAC2599, les sections des câbles sans thermistances se trouvant à l'extérieur du sol sont recouvertes d'une gaine renforcée grise afin d'ajouter une protection contre la faune et de diminuer le risque d'écrasement par des véhicules motorisés par exemple. Le diamètre approximatif des câbles est de 7 mm et atteint 11 mm de à la hauteur des thermistances. Ainsi, des tubes de polychlorure de vinyle (PVC) de $\frac{3}{4}$ de pouce de diamètre contiennent les sections des TAC2598 et TAC2599 se trouvant dans le sol. Ce format de tubage a permis d'insérer facilement le câble en minimisant la convection d'air. Les tuyaux mesurent chacun 10 pieds de long et ont été mis bout à bout à l'aide de raccords et de colle à PVC afin d'assurer l'étanchéité du tubage. Dans la même optique, un coude de PVC a été utilisé à la surface du TAC2598 et du ruban adhésif toilé blanc a permis de sceller les embouts à la sortie des deux câbles souterrains.

Quant à l'enregistrement des données, c'est le système d'acquisition et de transmission programmable D405 de BeadedStream qui a été utilisé pour remplir cette fonction. Cet appareil est conçu pour être déployé dans des régions éloignées sous des conditions extrêmes. Ainsi, le système est opérationnel de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sa capacité de stockage de quatre mégabits est bien suffisante pour emmagasiner sur plus d'un an les températures mesurées par les 66 thermistances à chaque deux heures. Le GPS intégré permet de géolocaliser l'installation et fournit une horloge en temps réel automatiquement synchronisée qui est précise à ± 5 minutes sur un an. Le système a aussi été choisi pour sa faible demande énergétique. En effet, la batterie rechargeable possède une autonomie typique de 3 mois sans panneau solaire. Munie d'un panneau solaire de seulement un watt de puissance nominale, la durée de vie de la batterie est prolongée au travers de multiples saisons. Le panneau a été soigneusement orienté vers le sud afin de maximiser la recharge de la batterie durant les courtes périodes d'ensoleillement hivernales. Au bout de chacun des câbles d'acquisition de température, des connecteurs XLR sont branchés au système

d'acquisition D405. Afin d'assurer un bon contact et de prévenir la corrosion, une pâte conductrice a été utilisée lors du couplage. Le boîtier a été fixé à 1,5 m de hauteur le long d'un tuyau d'aluminium enfoncé de plus d'un demi-mètre à l'aide de supports en fibre de verre avec des encoches en V et des serres en aluminium (figure 40).



Figure 40 : Montage du système d'acquisition et de transition D405 de BeadedStream au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, septembre 2014

En plus d'emmagasiner les données, le système D405 utilisé permet aussi la transmission des données en temps réel via une connexion satellite Iridium. L'ensemble des données transmises peuvent donc être téléchargé sur n'importe quelle connexion internet. Étant un système télémétrique bidirectionnel, il est aussi possible de modifier les configurations quant à la fréquence de prise de mesure, de l'enregistrement et de la transmission des données. De septembre 2014 à septembre 2015, les données stockées étaient transmises à toutes les six heures.

Sur le terrain, l'application pour appareil mobile *Auroralink* élaborée par BeadedStream a été utilisée afin de configurer le système d'acquisition et de transmission. Cette application a aussi permis de vérifier que l'enregistrement des données s'effectuait correctement lors de l'installation du système de collecte des données thermiques.

Les figure 41 et figure 42 montre le résultat final de l'instrumentation vu à partir du terrain naturel vers la piste d'atterrissage.

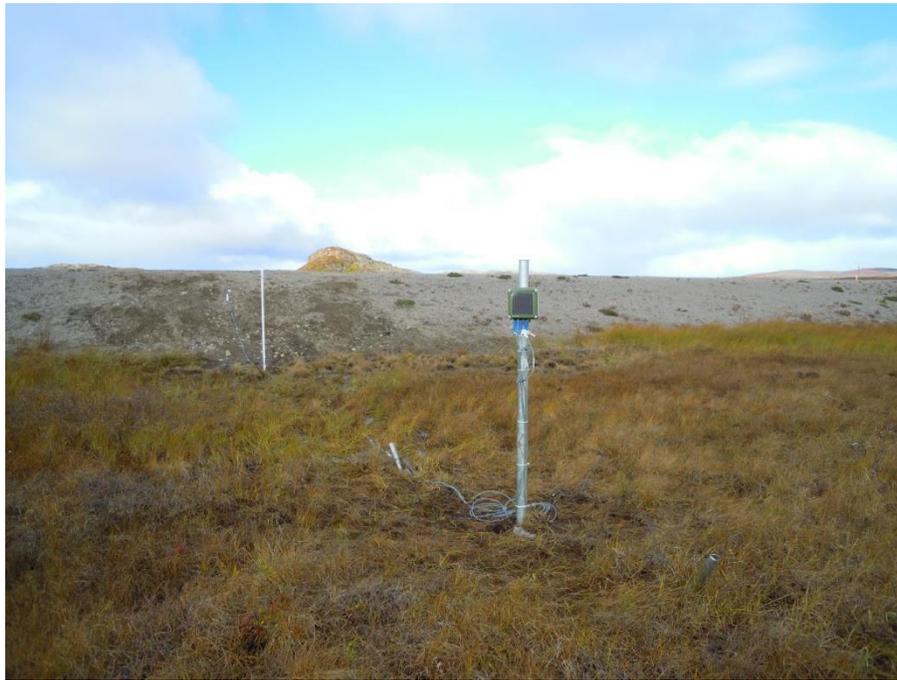


Figure 41 : Instrumentation au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, septembre 2014

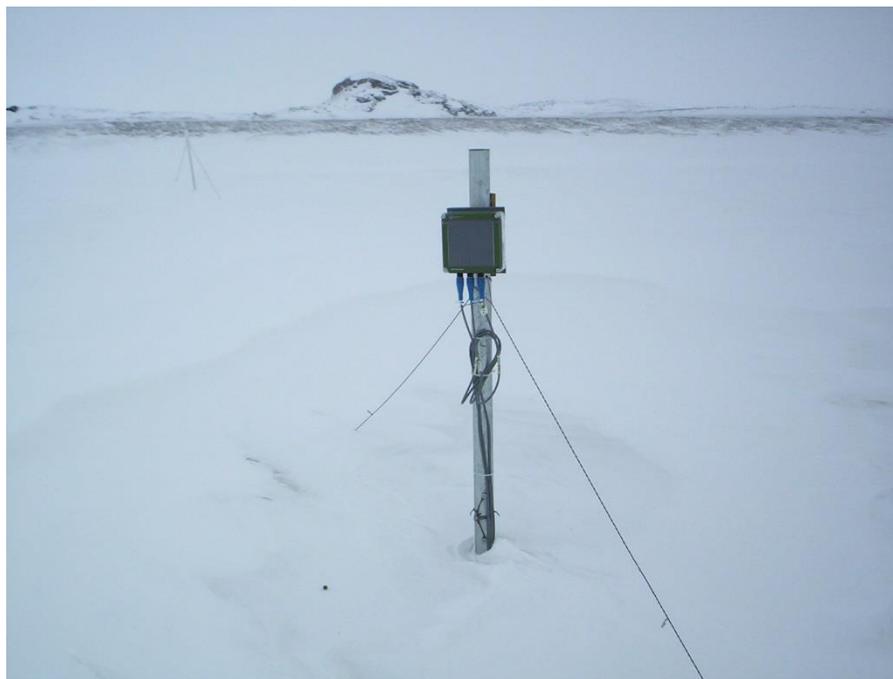


Figure 42 : Instrumentation au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, avril 2015

2.2.3 Mode de mise en place

Comme démontré tout au long du présent chapitre, dans le secteur de l'aéroport de Tasiujaq, la géologie du terrain et les caractéristiques de la piste sont bien connues et documentées. Ainsi, il n'a pas été jugé nécessaire de recueillir des échantillons ni de procéder à la description du sol lors de l'installation de l'instrumentation. À des fins logistiques et par souci d'économie de temps et d'argent, la technique de forage par pointes perdues a donc été priorisée. Cette méthode permet d'enfoncer un tubage jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur à l'aide d'un marteau à percussion. Pour ce faire, une foreuse portable à essence de modèle Pionjar 120, de la marque Atlas Copco, a été utilisée. À la suite de la mise en place du tubage, les tubes de PVC ainsi que le câbles à thermistance sont insérés dans le trou de forage. Le tubage était finalement extrait à l'aide d'une simple mâchoire à bille. Pour le forage à la mi-pente, l'aide d'une pelle mécanique, qui travaillait à la réfection des infrastructures aéroportuaires, a été nécessaire pour retirer l'engrènement plus grossier composant le remblai, avant de procéder au forage dans le terrain naturel sous-jacent (figure 43). Les différentes couches de granulats ont été excavées séparément et remises en place conséquemment. Cette excavation du remblai a permis de confirmer qu'une grande quantité de MG-20b avait rempli les vides interstitiels entre les blocs grossiers.



Figure 43 : Excavation du remblai en vue de la mise en place du TAC2598 au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, septembre 2014

3 Analyse des données thermiques de Tasiujaq

L'instrumentation en place a permis d'enregistrer un cycle climatique complet débutant le 1^{er} octobre 2014 et se terminant le 30 septembre 2015. Contrairement au cycle annuel, cette période de temps permet d'inclure l'hiver entier dans le même cycle climatique. L'instrumentation du site ayant été complétée le 25 septembre 2014, sept jours ont permis à la chaleur induite par la mise en place des instruments de mesure de se dissiper. Selon Darrow (2011), cette période peut varier de 4 à 19 jours.

La section qui suit présente et discute des données collectées, tel la température de l'air, le régime thermique dans le terrain naturel et celui au chaînage 5+515 m. L'évolution du couvert neigeux est aussi discuté ainsi que son impact sur la température à la surface du sol.

3.1 Température de l'air

3.1.1 Cycle climatique 2014-2015

Afin de confirmer la qualité de la température de l'air mesurées à l'aide du TAC2599, les valeurs obtenues ont été comparées avec celles mesurées à la station HT304. La figure 44 montre que la corrélation entre les deux séries de données est très bonne. L'écart observé moyen n'est que de 0,33 °C, soit inférieur à la somme des erreurs absolues associées à chacun des appareils de mesures. En effet, l'erreur totale de $\pm 0,6$ °C est obtenue en additionnant l'erreur absolue de $\pm 0,1$ °C proposée par le fabricant BeadedStream (TAC2599) à celle associée aux thermistances utilisées par le CEN de $\pm 0,5$ °C (HT304). Toutefois, l'écart maximal observé (1,72 °C) dépasse légèrement cette valeur. Néanmoins, considérant que moins d'un cinquième des écarts calculés sont supérieurs à 0,6 °C et que la température de l'air varie sur plus de 55 °C au cours d'une année, les valeurs mesurées au TAC2599 semblent tout à fait réalistes.

De plus, pour les deux sites de mesure, les indices de dégel calculés sont très similaires (tableau 5). Cependant, il semble qu'au TAC2599, l'indice de gel est légèrement sous-estimé par rapport à celui mesuré à la station de référence. Toutefois, la différence observée n'est que de 46 °C·jour, ce qui ne représente que 1,3 % de la moyenne des deux valeurs. Cette différence est donc négligeable. De plus, bien qu'ils soient recouverts d'une gaine blanche, les capteurs du TAC2599 sont moins bien protégés de la radiation solaire que la station de température HT304 du CEN (figure 34). En plus de la précision des appareils de mesure, ce facteur peut aussi expliquer la différence de 0,11 °C entre les températures annuelles moyennes mesurées aux deux stations (tableau 5).

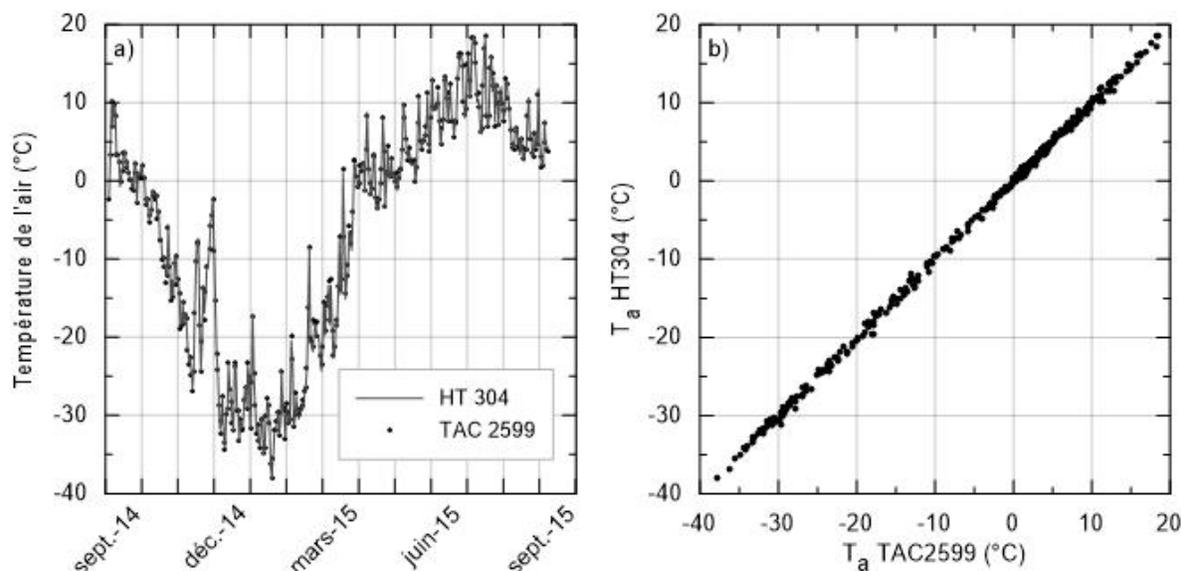


Figure 44 : Comparaison entre les moyennes quotidiennes de la température de l'air enregistrées à la station HT304 et au câble à thermistance TAC2599. a) Température de l'air en fonction du temps. b) Corrélation entre les moyennes quotidiennes aux deux sites.

Tableau 5 : Comparaison des températures de l'air mesurées à la station HT304 et au câble à thermistances TAC2599 de septembre 2014 à août 2015

Sites	Indice de gel (°C·jour)	Indice de dégel (°C·jour)	Température moyenne annuelle (°C)
HT304	-3 534	1 132	-6,51
TAC2599	-3 488	1 140	-6,62
Écart (%)	1,3	0,7	1,7

À la lumière de cette analyse, les températures de l'air enregistrées au pied du remblai (TAC2599) sont jugées adéquates et seront utilisées tout au long de l'analyse des données thermiques pour l'année climatique 2014-2015.

3.1.2 Dix derniers cycles climatiques : 2004 à 2015

La figure 45 expose la tendance qu'a suivi la température de l'air au cours des 11 derniers cycles climatiques (1^{er} octobre 2004 au 30 septembre 2015). La courbe en bleu correspond aux températures moyennes quotidiennes, alors que les points gris montrent les moyennes annuelles. Ces dernières sont présentées en date du 1^{er} octobre de chaque année puisqu'il s'agit du début de chacun des cycles climatiques qui se terminent, conséquemment, le 30 septembre de l'année civile suivante. La température

de l'air semble avoir été généralement stable durant la dernière décennie. Toutefois, la courbe de tendance en gris est légèrement négative (figure 45). Grossièrement, il existe deux périodes de refroidissement, soit de 2005 à 2008 et de 2009 à 2015. Les cycles climatiques le plus chaud et le plus froid sont respectivement 2009-2010 avec une température moyenne annuelle de l'air de $-2,64\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 2014-2015 où la moyenne annuelle s'abaisse à $-6,51\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tableau 5). Puisque la température de l'air à la station HT304 n'a été enregistrée que depuis le 12 juin 2004 et que les données n'étaient donc disponibles que sur une période de onze ans, les indices nominaux de dégel et de gel du site de l'aéroport de Tasiujaq ont été calculés en utilisant seulement les années ayant présenté l'été le plus chaud et l'hiver le plus froid tel que recommandé dans la littérature (United States. Departments of the Army and United States. the Air Force, 1987). Bien que l'année 2009-2010 enregistre la plus haute température moyenne annuelle (figure 45), l'été 2012 est le plus chaud avec un indice de dégel de $1\ 335\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$. En comparaison, l'année au cours de laquelle s'est déroulé le projet de recherche présente un indice de dégel de $1\ 132\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$ (tableau 5). Cette dernière valeur se rapproche beaucoup de la valeur moyenne des indices de dégel ($1\ 211\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$). Inversement, l'indice de gel estimé pour l'hiver 2014-2015 ($-3\ 534\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$) est significativement supérieur à la valeur moyenne de $-2\ 905\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$. Il s'agit d'ailleurs de l'hiver le plus froid des onze dernières années et, donc, de l'indice de dégel nominal.

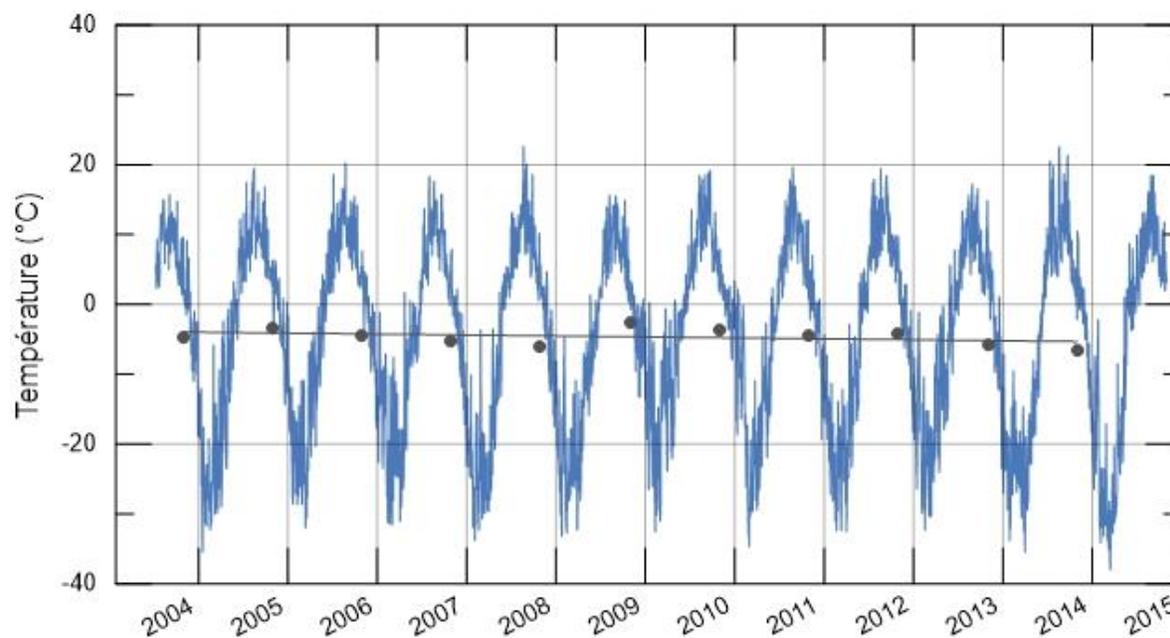


Figure 45 : Évolution de la température de l'air sur les 11 dernières années (station HT304)

3.2 Régime dans le terrain naturel

Tel qu'établi précédemment, la station HT304 installée et exploitée par le Centre d'études nordiques est utilisée comme station de référence. Sa grande profondeur permet d'estimer avec précision la profondeur d'amplitude annuelle nulle ainsi que la température du pergélisol associée. Cette valeur sera capitale afin de déterminer les conditions limites inférieures lors de l'élaboration du modèle. Ainsi, il est d'abord primordial de vérifier la qualité de ces données en établissant le profil vertical et l'évolution de la température en fonction du temps à cette station de mesure.

L'analyse du profil vertical d'octobre 2014 à septembre 2015 montre un fait aberrant (traits pleins de la figure 46). En effet, l'écart entre les températures minimales et maximales mesurées est nettement plus significatif à 50 cm de profondeur que l'écart observé près de la surface du sol, soit entre 5 cm et 20 cm de profondeur.

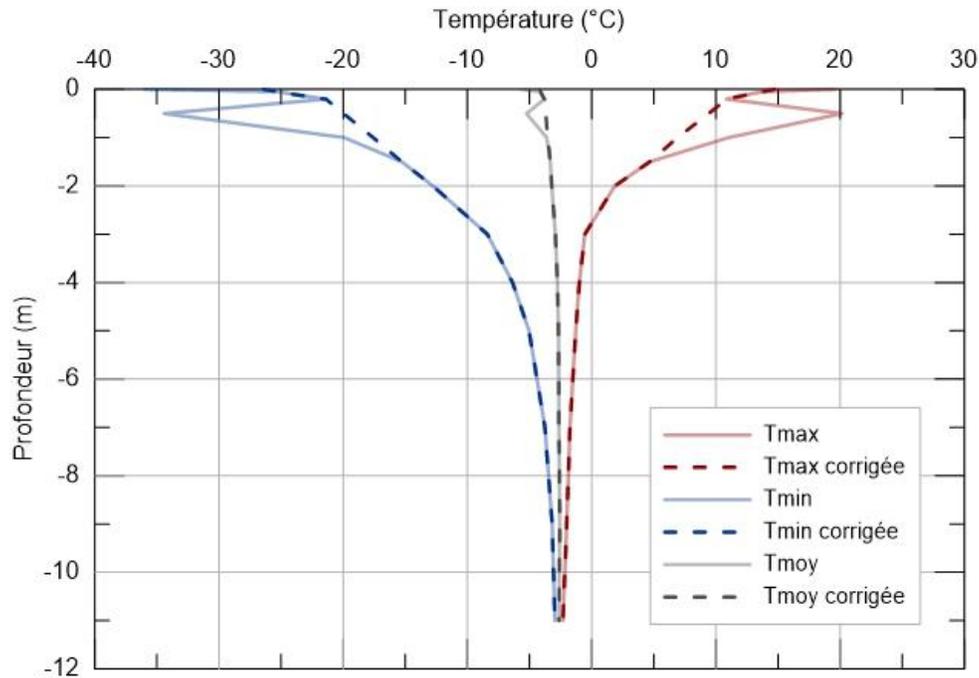


Figure 46 : Profils verticaux des moyennes quotidiennes des températures maximales, minimales et moyennes dans le sol à la station HT304 d'octobre 2014 à septembre 2015, aéroport de Tasiujaq

Cette observation n'est pas causée par un seul enregistrement aberrant, mais s'observe quotidiennement comme le montrent les profils de températures des moyennes quotidiennes pour quatre dates données (figure 47). En effet, les profils des premiers jours de novembre, février et août montre la même incongruité. Toutefois, au-dessus de 50 cm de profondeur, l'augmentation progressive de l'amplitude de la variation de température avec la diminution de la profondeur semble réaliste (figure 46 et figure 47).

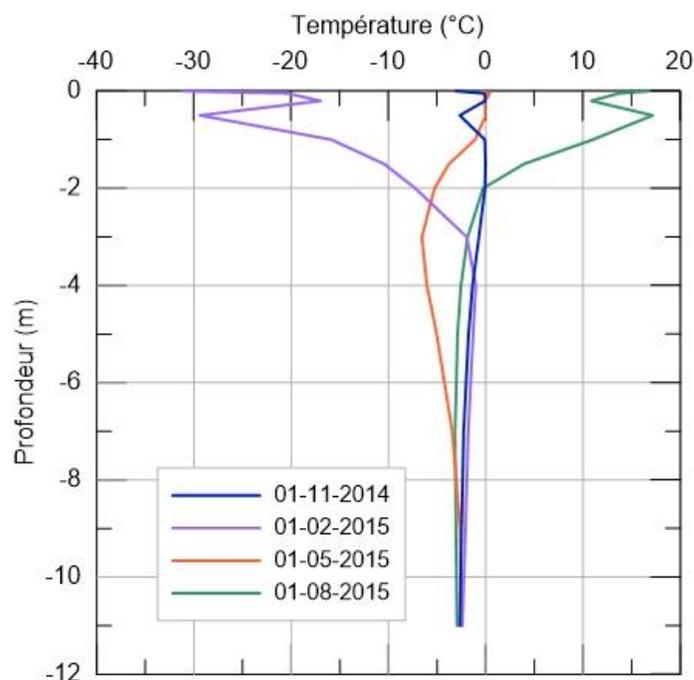


Figure 47 : Profils verticaux des températures du sol montrant les moyennes quotidiennes (station HT304)

De son côté, le graphique de la température en fonction du temps montre que, sur une période d'un an, la température hivernale à 50 cm de profondeur est supérieure à la température de l'air. Néanmoins, la différence observée est surprenamment faible compte tenu de l'effet isolant du couvert neigeux (figure 48). Durant la période de dégel, en revanche, les températures mesurées à la profondeur de 50 cm dépassent la température de l'air. Cette aberration remet aussi en cause la validité des données thermiques mesurées à cette profondeur. À la lumière de ces observations, les mesures enregistrées par les capteurs aux profondeurs de 50 et 100 cm ont été remplacées par des températures corrigées suivant mieux le profil de température standard (traits pointillés de la figure 46).

En se fiant à ces nouvelles courbes, il est possible d'identifier que la couche active a atteint 2,85 m de profondeur au cours de l'été 2015 (figure 46). Cette valeur semble très probable étant donné qu'une épaisseur de 2,51 m a été enregistrée à l'été 2009 et que la couche active tend à s'approfondir en moyenne de 6 cm/an (L'Hérault *et al.*, 2012). Bien que les thermistances en place atteignent 11 m dans le sol, la profondeur d'amplitude annuelle nulle, où la variation de température est inférieure à 0,1 °C, n'est pas représentée sur la figure 46. En effet, à 11 m de profondeur la variation de la température moyenne quotidienne est encore de 0,6 °C. En extrapolant la courbe, il est possible d'estimer qu'à 13,5 m de profondeur la température de 2,7 °C varie de moins de 0,1 °C annuellement.

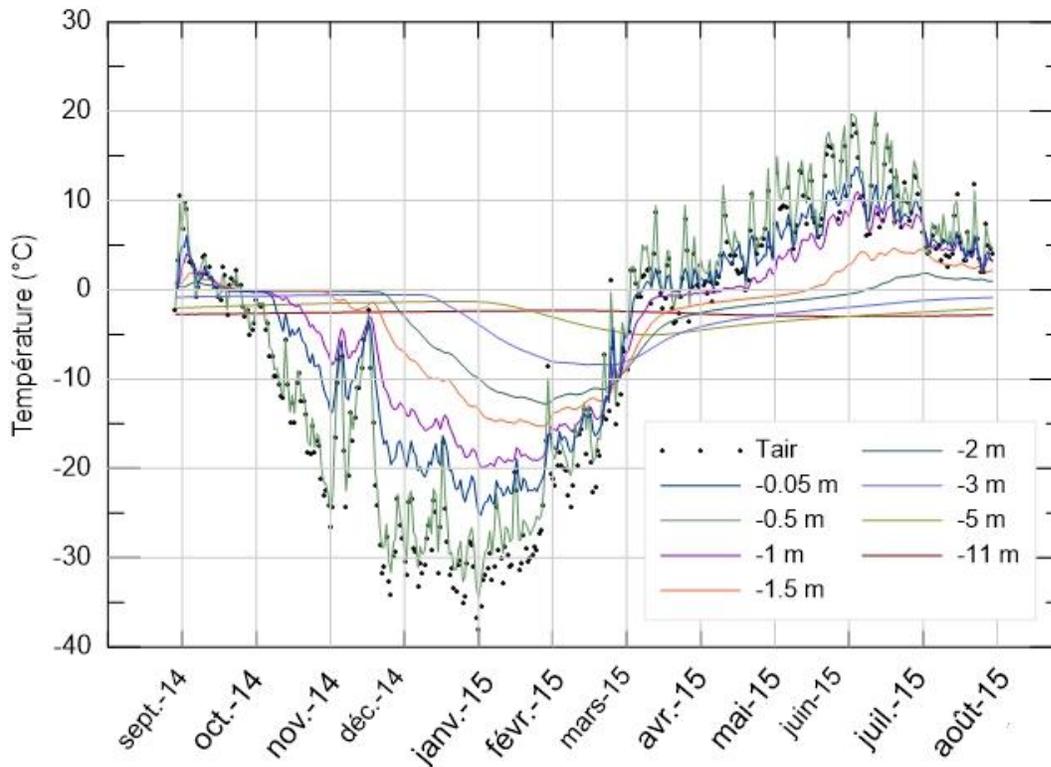


Figure 48 : Moyennes quotidiennes de la température de l'air et du sol en fonction du temps à la station HT304

3.3 Régime thermique au chaînage 5+515 m

Une analyse a été réalisée afin de vérifier la fiabilité des données thermiques collectées au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq. Ainsi, les figure 49 à Figure 55 montrent les courbes trompettes ainsi que les courbes de température en fonction du temps pour les câbles à thermistances TAC2597, TAC2598 et TAC2599.

3.3.1 Température à la surface (TAC2597)

Reporté le long d'un profil horizontal, l'enveloppe des températures minimales montrent bien l'effet du couvert neigeux plus épais au pied du remblai (figure 49). En effet, il est évident que les températures minimales les plus élevées sont observées au pied du remblai dans le terrain naturel (valeurs des abscisses négatives), soit là où le couvert neigeux atteint son épaisseur maximale. Ainsi, à un demi-mètre de la base du remblai (-0,5 m), la moyenne quotidienne de la température mesurée à la surface du terrain naturel atteint près de -3 °C.

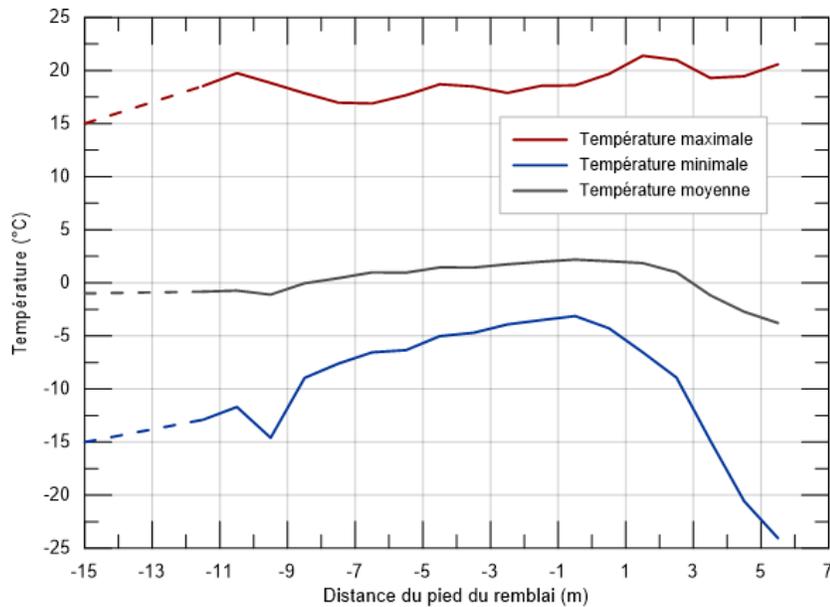


Figure 49 : Maximum, minimum et moyenne des moyennes quotidiennes des températures à la surface du sol en fonction de la position par rapport au pied du remblai (0 m) d'octobre 2014 à août 2015 (TAC2597). Les abscisses négatives et positives représentent respectivement le terrain naturel et le remblai.

La courbe des températures minimales à la figure 49 est généralement continue et confirme donc la qualité des données collectées ainsi que l'influence de l'épaisseur du couvert neigeux sur la température à la surface du sol durant l'hiver. Dans le terrain naturel, la température à la surface du sol augmente lorsque la distance par rapport au pied du remblai diminue. Néanmoins, la thermistance se trouvant à 9,5 m du pied du remblai s'écarte un peu de la tendance générale. Cette observation peut s'expliquer par une variation locale des conditions pouvant être causée par un changement de la quantité d'eau accumulée au sol ou de la végétation affectant très localement la distribution de la neige. Quant à elle, l'enveloppe des températures maximales en fonction de la distance du pied du remblai est relativement constante (figure 49). En effet, la gamme de températures mesurées ne s'étend que sur 4,5 °C, soit entre 21,39 °C et 16,89 °C, selon la position des capteurs. Comparativement, les températures minimales observées varient de -24,02 °C à -3,13 °C, soit plus de 20 °C d'écart. Toutefois, une légère tendance linéaire montre tout de même une augmentation des températures maximales en se rapprochant de l'épaule de la chaussée. Cette tendance est peut-être associée au changement de surface, soit du terrain naturel aux matériaux de remblai. Ultimement, la courbe des températures moyennes à la surface du sol représente la même tendance que l'enveloppe des températures minimales, mais avec une plus faible amplitude. Il est aussi intéressant de remarquer que la température moyenne dépasse 0 °C à partir de 8,5 m du pied du remblai jusqu'à environ la mi-pente du remblai. Cette observation est similaire à celle de Allard *et al.* (2007) qui proposent, cependant, que la température est positive jusqu'à 15 m du pied du remblai. Ce fait souligne, une fois de plus, l'importance de l'épaisseur du couvert neigeux, particulièrement près de la base

du remblai. Les températures les plus froides sont mesurées près de l'épaulement de la piste. Cette observation laisse croire que la neige est ventée à cet emplacement ou encore que l'effet de refroidissement associé au vent joue un rôle important sur le bilan d'énergie à la surface du remblai. Enfin, les observations précédentes soutiennent qu'à la piste d'atterrissage de Tasiujaq, la température à la surface du sol varie beaucoup plus en hiver qu'à l'été en fonction de la position par rapport à la base du remblai. Cela confirme que la répartition spatiale de la température à la surface du sol est principalement contrôlée par un facteur hivernal, soit l'épaisseur du couvert neigeux.

Les courbes de l'évolution de la température en fonction du temps montrent aussi que les températures mesurées à la surface du sol varient spatialement beaucoup plus au cours de l'hiver que durant l'été (figure 50). En effet, de la mi-novembre jusqu'à la mi-avril, la température peut varier de plus de 20 °C selon la distance du pied du remblai. La plus grande différence de température est observée en date du 2 février 2015, alors que la température minimale, mesurée près de l'épaulement (à 5,5 m du pied du remblai), s'abaisse à -24,05 °C et que la température maximale, mesurée dans le terrain naturel à un demi-mètre du pied du remblai (-0,5 m), s'élève à -2,02 °C. À l'inverse, l'été, les différences de températures en fonction de la position des capteurs sont généralement inférieures à 5°C.

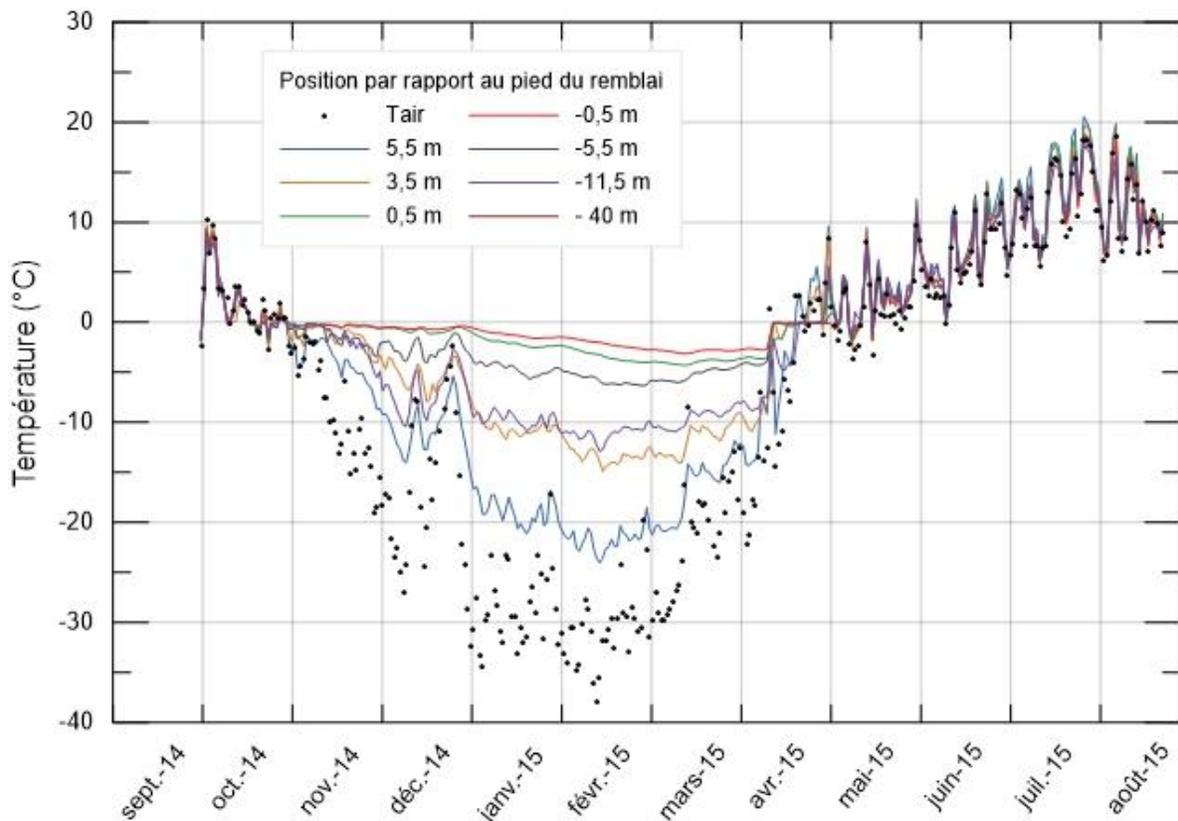


Figure 50 : Moyennes quotidiennes de la température de l'air et à la surface du sol en fonction du temps et de la position par rapport au pied du remblai d'octobre 2014 à septembre 2015 (TAC2597)

De plus, la figure 50 montre deux tendances distinctes. La première touche les données mesurées près du remblai dans le terrain naturel (-11,5 m à -0,5 m). D'autre part, les températures mesurées à la surface de la pente du remblai (0,5 m à 5,5 m) ne suivent pas la même tendance et les courbes associées recourent les courbes des températures mesurées à la surface du terrain naturel. Cette observation porte à croire que des phénomènes différents contrôlent les échanges de chaleur dans le terrain naturel et le long de la pente du remblai. Dans les deux cas, plus les capteurs de température sont éloignés du pied du remblai, où la hauteur de neige est maximale, plus l'amplitude des courbes est importante. Ce phénomène montre, encore une fois, l'effet de la répartition spatiale hétérogène de l'épaisseur du couvert neigeux qui inhibe le contrôle de la température de l'air sur celle du sol.

3.3.2 Température dans la pente du remblai (TAC2598)

Le profil vertical des températures maximales et minimales mesurées sur 4,7 m de profondeur à la mi-pente du remblai permet d'observer les variations de température à diverses profondeurs au cours du cycle climatique 2014-2015 (figure 51). Ainsi, près de la surface, à 1,25 m au-dessus du sol d'infrastructure, la température moyenne quotidienne dans le remblai varie de 32,78 °C, soit près de 23 °C de moins que la température de l'air ($\Delta T_a = 56,53$ °C) qui fluctue entre -38,02 et 18,51 °C au cours d'une même année. Il est aussi intéressant de remarquer qu'en été, la température maximale près de la surface atteint plus de 20 °C et qu'elle ne s'abaisse qu'à -11,82 °C à l'hiver. Ainsi, bien que la conductivité thermique de la couche active soit plus élevée en hiver, l'effet tampon de la neige sur la température de l'air l'emporte puisqu'un maigre 2,45 °C sépare les températures maximales du sol et de l'air, alors que cette même différence atteint 26,2 °C pour les températures minimales. De plus, selon la courbe des températures moyennes, le bilan annuel est positif à 20 cm de profondeur sous la surface du remblai (figure 51).

Les profils thermiques ont été prolongés jusqu'à la surface du remblai (à 1,45 m) en ajoutant les températures mesurées par le capteur à 3,5 m du pied du remblai appartenant au TAC2597 (traits pointillés de la figure 51). Précisément, cette thermistance se trouve à 14 cm de l'emplacement du TAC2598 (figure 39). Ainsi à la figure 51, l'enveloppe des températures minimales obtenue arbore une forme caractéristique d'un profil de température vertical. Il en est autrement pour l'enveloppe des températures maximales. En effet, cette dernière présente une cassure improbable qui ne peut définitivement pas expliquer que la température du remblai sous-jacent soit supérieure à 20 °C. Les mesures enregistrées par les autres capteurs du TAC2597 le long de la pente sont très similaires. L'aberration observée ne peut donc définitivement pas être associée au mal fonctionnement isolé de la thermistance. Une explication plausible serait que, comme les thermistances sont recouvertes d'une gaine blanche possédant un albédo plus élevé que les matériaux de remblai, la fraction de rayonnement incident absorbé est plus faible et, conséquemment, la température des capteurs est plus basse que celle à la surface

de la pente. Les thermistances du TAC2597 auraient idéalement dû être légèrement enfouies afin de pallier ce problème. Cela étant dit, à la surface, ce sont principalement les températures enregistrées lors de la période hivernale, à l'interface sol-neige, qui présentent un intérêt pour cette étude. Il est toutefois important de considérer que la sous-estimation des températures durant la période de dégel de 4 à 5 °C affecte aussi la température moyenne en surface.

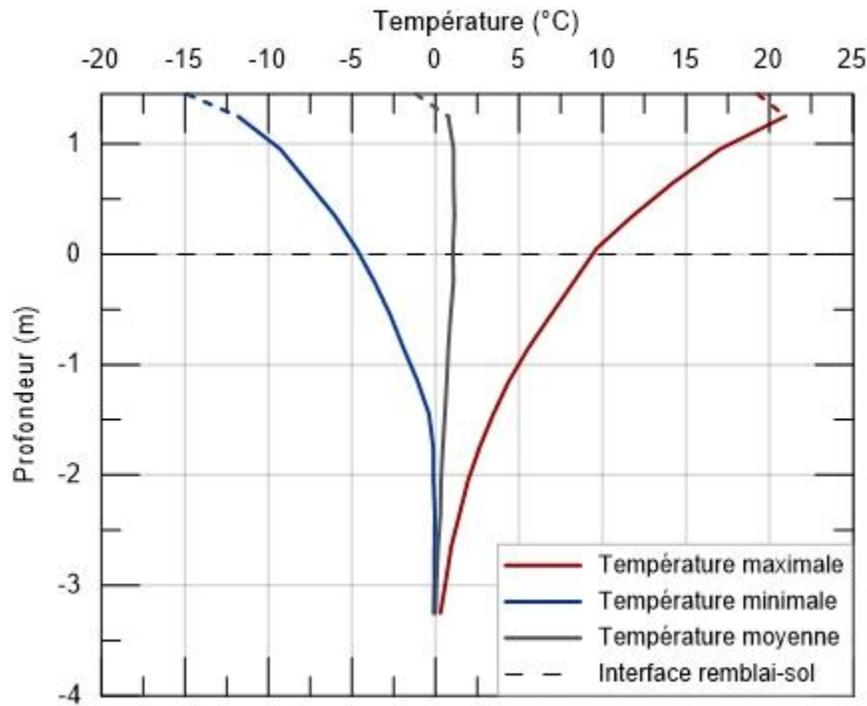


Figure 51 : Profils verticaux des moyennes quotidiennes des températures maximales, minimales et moyennes à la moitié de la pente du remblai d'octobre 2014 à septembre 2015 (TAC2598)

Tel qu'attendu, avec l'augmentation de la profondeur, l'amplitude des variations annuelles de température diminue (figure 51 et figure 52). Bien qu'à 4,7 m de profondeur à partir de la surface du remblai, la différence de température n'est que de 0,42 °C, la profondeur à laquelle la fluctuation de température est minimale ($< 0,1$ °C) ne semble pas tout à fait atteinte par le câble à thermistances en place (figure 51). De même, le plafond du pergélisol ne semble pas être tout à fait atteint puisque la courbe des températures maximales ne croise jamais le seuil de 0 °C (figure 51). Ainsi, il est possible d'affirmer que la couche active descend à plus de 3,25 m dans le sol d'infrastructure et que son épaisseur totale est légèrement supérieure à 4,7 m. Toutefois, son épaisseur exacte reste inconnue. Le profil vertical des températures moyennes quotidiennes reste aussi du côté des températures positives, mais atteint toutefois 0,01 °C à 4,7 m de profondeur. Ce profil représente un régime transitoire affecté par un gradient généralement positif indiquant un réchauffement. Néanmoins, le cycle climatique 2014-2015 ayant connu un hiver particulièrement froid, le haut de la courbe est redirigé vers un bilan annuel négatif (figure 51). Selon la

courbe trompette du TAC2598, le décalage thermique en surface (« thermal offset ») observé à mi remblai semble quasiment nul. Combinée avec la grande profondeur de la couche active (plus de 4,7 m), cette observation pousse à croire que les conductivités thermiques des matériaux gelés et non gelés sont très similaires, et ce, surtout dans le remblai, mais aussi dans la couche superficielle du sol sous-jacent.

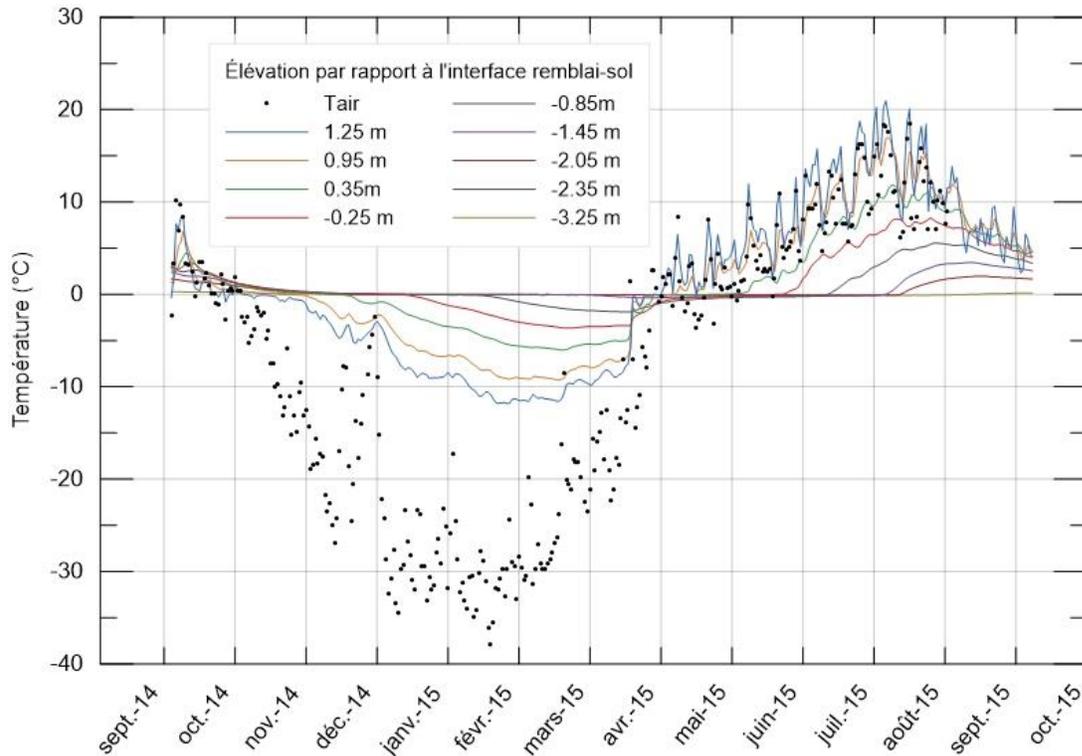


Figure 52 : Moyennes quotidiennes de la température de l'air et du sol à la moitié de la pente du remblai en fonction du temps (TAC2598)

Caractéristique des courbes de température en fonction du temps, la figure 52 montre une atténuation de l'amplitude des variations, de même qu'un déphasage dans le temps, suivant l'augmentation de la profondeur. De plus, lors du gel du sol à l'automne, une période zéro associée à la chaleur latente de l'eau contenue dans le sol est observée à partir de 0,5 m de profondeur dans le remblai (0,95 m). Il en va de même au printemps, alors que toutes les courbes sont affectées par une période zéro allant d'une semaine à plus de 100 jours. Toutefois, le comportement du régime thermique à la mi-avril laisse perplexe. En effet, une hausse aussi soudaine et simultanée des températures que celle observée à la figure 52 n'est pas caractéristique d'un diagramme de température en fonction du temps standard qui montre généralement une remontée progressive et déphasée des températures au printemps selon la profondeur de mesure (figure 5). Cet évènement a été associé à la période de fonte du couvert neigeux. Ainsi, il semble que dès qu'il n'y a plus de neige sur la pente du remblai, la couche active, encore gelée, se réchauffe instantanément

et rapidement jusqu'à plus de deux mètres sous la surface, soit plus d'un mètre dans le sol d'infrastructure. Ce fait souligne l'influence significative du couvert neigeux sur le régime thermique dans le remblai et le sol sous-jacent. L'apport de chaleur associé au drainage de l'eau de fonte est aussi probablement responsable de cette soudaine élévation de la température. De plus, l'influence du couvert neigeux se manifeste clairement alors que l'amplitude de la variation des températures quotidiennes est nettement atténuée en hiver (novembre à avril) comparativement au reste de l'année (mai à octobre) (figure 52). Cette tendance est visible même dans le cas du capteur se trouvant à 4,7 m sous la surface de la pente (-3,25 m). Il est à noter qu'à la figure 52, certaines courbes de moindre importance ont été omises afin d'alléger le graphique.

3.3.3 Température au pied du remblai (TAC2599)

Tout comme dans le cas du TAC2598, la courbe trompette montrant les données du TAC2599 se caractérise par l'atténuation de la variation de température avec l'approfondissement des thermistances (figure 53).

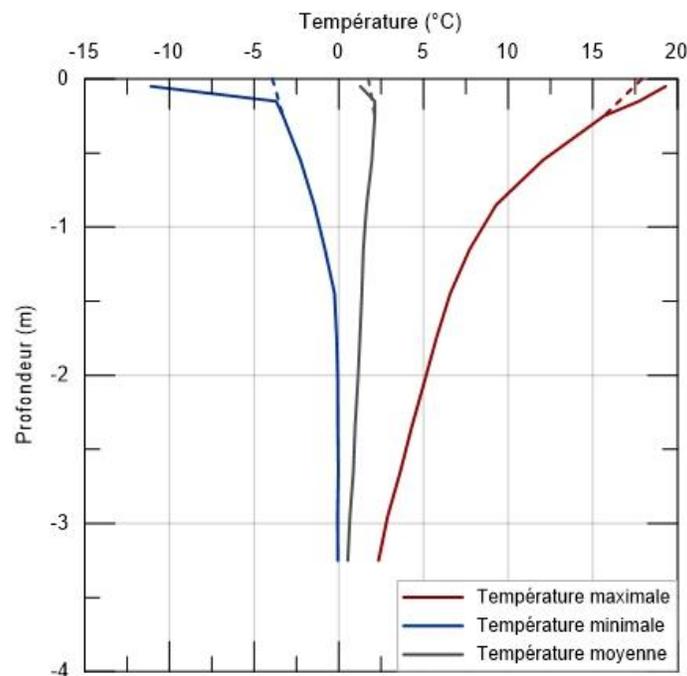


Figure 53 : Profils verticaux des moyennes quotidiennes des températures maximales, minimales et moyennes au pied du remblai d'octobre 2014 à septembre 2015 (TAC2599)

Les profils verticaux sont généralement continus et les températures mesurées sont donc jugées fiables. Néanmoins, une valeur semble aberrante en surface. En effet, à 5 cm de profondeur, la température minimale enregistrée est de -11,09 °C. Cette moyenne quotidienne a été enregistrée en date du 21

novembre 2014, alors que la température de l'air s'est abaissée à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais que la première chute de neige n'a pas encore eu lieu (voir section 3.4). À ce moment, un gradient thermique élevé de $-83\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ entre 5 et 15 cm de profondeur est atteint, sachant que la température moyenne quotidienne à 15 cm de profondeur est de $-2,78\text{ }^{\circ}\text{C}$. De plus, la température moyenne quotidienne à la surface du sol mesurée par le TAC2597 à 25 cm de l'emplacement du TAC2599 est de $-3,60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (traits pointillés de la figure 53). Le capteur de température du TAC2599 semblant bien fonctionné, la principale cause de cette valeur extrême est probablement liée à un phénomène de convection à l'intérieur du tuyau de PVC dans lequel se trouve le câble à thermistances. En effet, malgré le petit diamètre du tuyau ($\frac{3}{4}$ de pouce), la thermistance superficielle se trouvant très près de la surface, un échange de chaleur par convection a pu se produire au-dessus du capteur malgré le ruban adhésif toilé utilisé pour sceller le tubage. La thermistance occupant presque la totalité du diamètre, les capteurs plus bas n'ont pas été affectés par le phénomène de convection. En traçant plutôt le diagramme trompette à l'aide des températures moyennes mensuelles, l'enveloppe des températures minimales est adoucie et l'effet de la convection avant la mise en place du couvert nival est moindre (figure 54).

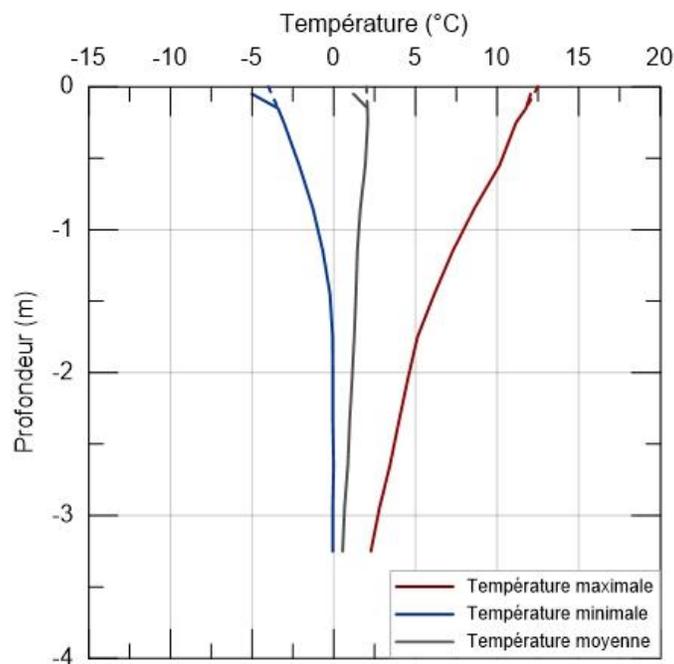


Figure 54 : Profils verticaux des moyennes mensuelles des températures maximales, minimales et moyennes au pied du remblai d'octobre 2014 à septembre 2015 (TAC2599)

Plus en profondeur, la variation annuelle minimale entre les moyennes quotidiennes observée à 3,25 m est de $2,40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figure 53). Le gradient de température observé à cette profondeur étant quasiment vertical, il laisse croire que le sommet du pergélisol est bien plus profond que la dernière thermistance. Ainsi,

l'épaisseur exacte de la couche active ne peut, une fois de plus, pas être établie précisément, mais il est possible d'affirmer qu'elle est significativement supérieure à 3,25 m. Selon la tendance observée, à 2,75 m du pied du remblai, la base de la couche active se trouve à plus de 4 m de profondeur. Contrairement aux observations à la mi-pente, la profondeur d'amplitude annuelle nulle est loin d'être atteinte par le câble à thermistances en pied de remblai.

La figure 55 montre bien l'atténuation de l'amplitude des variations, ainsi que le déphasage dans le temps suivant l'augmentation de la profondeur. Les périodes zéro sont aussi observables au cours du dégel et du gel du sol. Celle associée au dégel du sol est toutefois bien plus notable. En-dessous de 1,45 m, la température ne s'abaisse que timidement en-dessous du point de congélation (-0,13 °C à -0,06 °C) (figure 53 et figure 55). Ainsi, il est difficile de considérer que le pallier de changement de phase a vraiment été franchi. Au printemps, la même hausse soudaine et simultanée des températures qu'au TAC2598 est observée. Cela confirmant le bon fonctionnement des capteurs et l'influence notable de la présence du couvert neigeux, mais aussi probablement le rôle significatif du drainage de l'eau de fonte. À la mi-avril, lorsqu'il ne reste que 10 à 20 cm de neige, cette mince couche tend à refroidir le sol à court terme malgré le rehaussement de la température de l'air. Dès la fonte complète de la neige, la température du sol augmente subitement (figure 55).

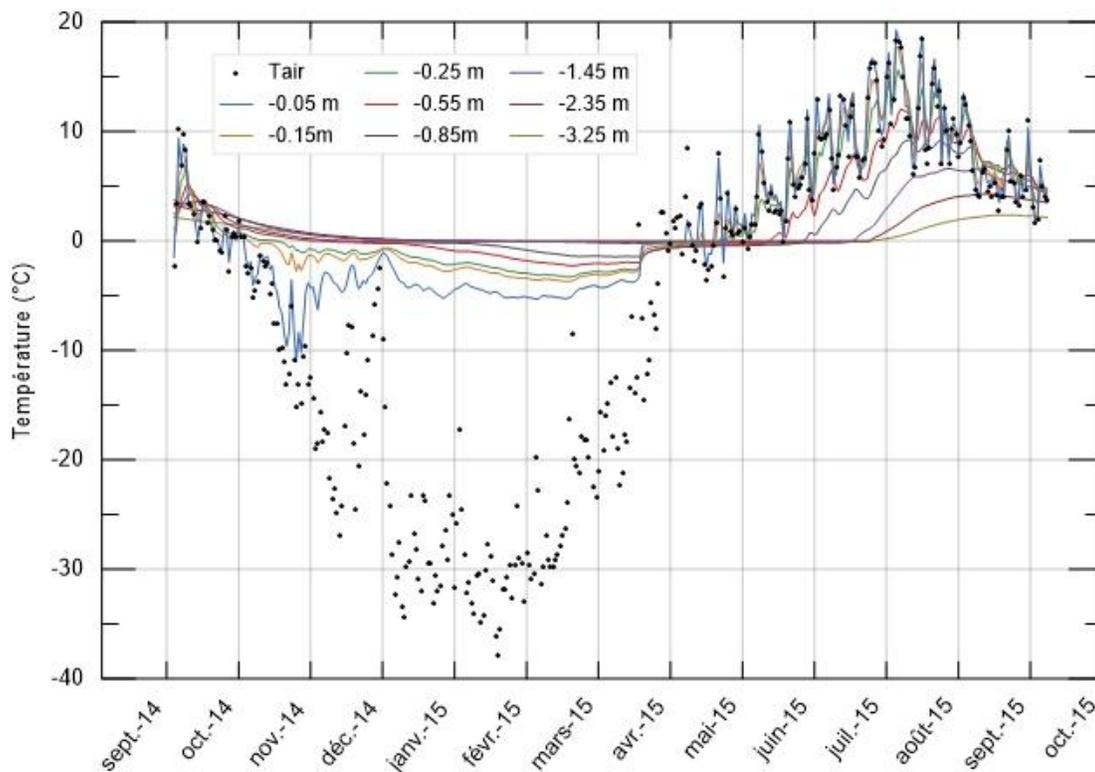


Figure 55 : Moyennes quotidiennes de la température de l'air et du sol au pied du remblai en fonction du temps (TAC2599)

De même, l'influence du couvert neigeux se manifeste clairement alors que l'amplitude de la variation des températures quotidiennes est nettement atténuée en hiver (novembre à avril) comparativement au reste de l'année (mai à octobre) (figure 55). Cette tendance est évidente même pour les thermistances se trouvant à 3,25 m sous la surface du sol naturel. À plus d'un mètre de profondeur, la température ne s'abaisse pas significativement au-dessous de 0 °C en hiver, alors que la température de l'air descend fréquemment au-dessous de -30 °C. Même près de la surface, à -0,15 m de profondeur, la température minimale atteinte est de -3,70°C. Inversement, l'été la température de l'air, qui n'atteint même pas 20 °C, provoque l'élévation de la température du sol jusqu'à 2,34 °C à 3,25 m de profondeur et jusqu'à 17,72 °C à 0,15 m de profondeur. Ainsi, bien que le sol présente une plus grande conductivité thermique lorsque son contenu en eau est gelé, l'influence du couvert neigeux est telle, qu'annuellement, le bilan thermique du sol est positif à la profondeur étudiée. Il est à noter qu'à la figure 55, certaines courbes de moindre importance ont été omises afin d'alléger le graphique.

3.4 Évolution du couvert neigeux

3.4.1 Épaisseur du couvert neigeux (TAC2599)

Comme indiqué précédemment, la portion du TAC2599 se trouvant au-dessus du sol naturel a permis d'estimer en continu l'évolution du couvert neigeux au pied du remblai. Pour chaque capteur, la présence ou l'absence de neige a été déterminée en se basant sur les propriétés isolantes de la neige et la réduction de l'amplitude de la différence de température avec l'air (Reusser et Zehe, 2011; de Pablo et al., 2017; Lewkowicz, 2008; Oldroyd *et al.*, 2012). En effet, lorsqu'elles se trouvent dans le manteau neigeux, les thermistances ne mesurent plus la température de l'air, mais renvoient une valeur plus élevée et présentant de faibles fluctuations. Il est ainsi possible de déterminer qu'un capteur se trouve sous la surface du couvert nival lorsque la température qu'il mesure est significativement différente de celle de l'air, encore enregistrée par les capteurs sus-jacents. L'épaisseur de neige déterminée correspond alors à la hauteur moyenne entre la thermistance nouvellement sous la couverture nivale et celle directement au-dessus. Chacun des capteurs étant séparés par 10 cm, la hauteur du couvert neigeux est estimée avec une résolution de 10 cm et une précision de ± 5 cm.

La figure 56a montre la variation entre la température moyenne quotidienne enregistrée à différentes hauteurs et la température moyenne quotidienne de l'air. Certaines courbes de moindre importance ont été omises afin d'alléger le graphique. Le seuil de variation significative, fixée à 1,5 °C, y est représenté par un trait pointillé. Tout au long de l'hiver, chaque fois qu'une nouvelle courbe franchit ce seuil, la hauteur de neige correspondante est reportée à la figure 56b. Une relation de variation montrant des paliers plus ou moins longs est obtenues.

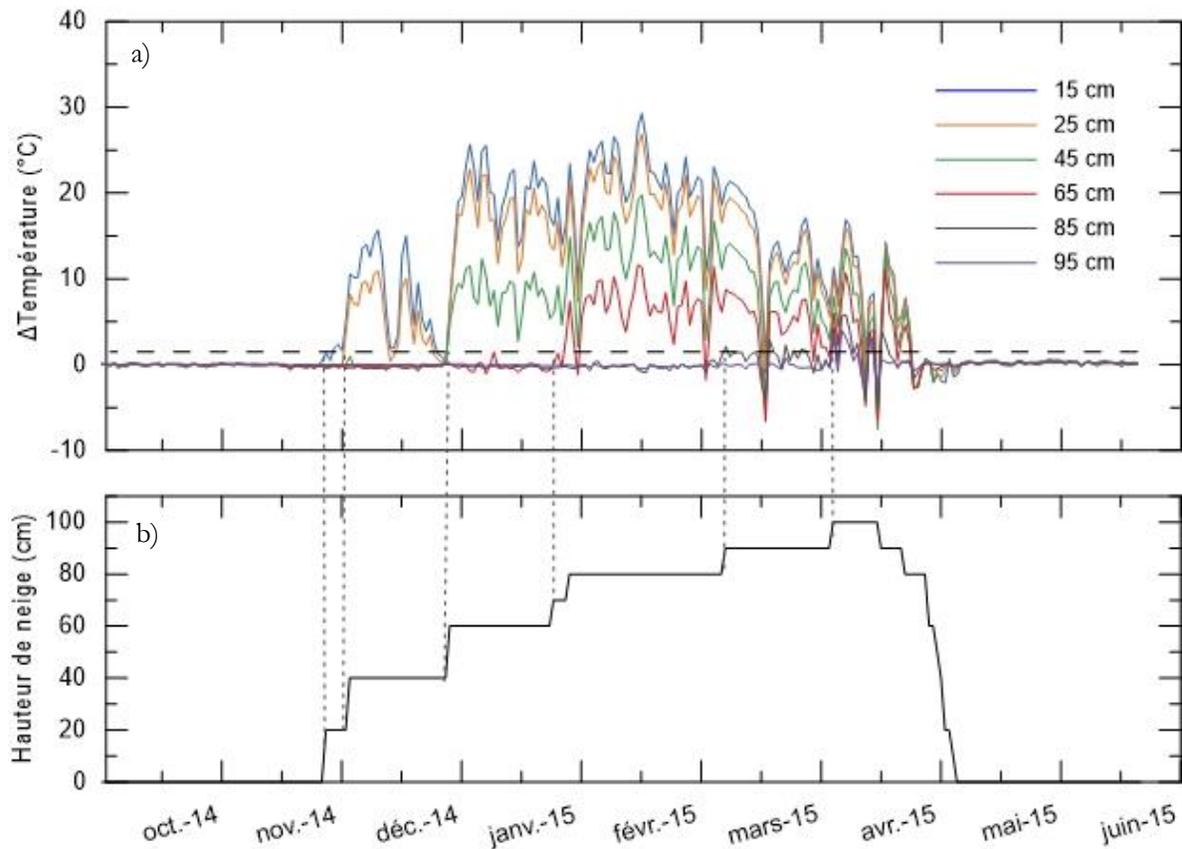


Figure 56 : a) Différence avec la température de l'air le long d'un profil vertical au-dessus du sol; b) Estimation de l'évolution du couvert neigeux au pied du remblai au chaînage 5+515 m de l'aéroport de Tasiujaq

Avant la mise en place du couvert neigeux à la fin du mois de novembre, les températures mesurées le long de l'axe verticale sont les mêmes, soit la température de l'air. À ce moment, si une mince couche de neige existe, elle ne dépasse pas 5 cm d'épaisseur. En date du 26 novembre, le manteau neigeux a atteint successivement les thermistances à 5 et 15 cm au-dessus de la surface du sol. Puisque la thermistance suivante, à 25 cm, enregistrait toujours la température de l'air, l'épaisseur du couvert neigeux a été estimée à 20 cm. Le 1^{er} décembre, un second épisode de précipitations a recouvert tour à tour les capteurs à 25 et 35 cm de la surface du sol. La nouvelle hauteur de neige estimée était alors de 40 cm. Le 27 décembre, cette valeur atteint 60 cm. Puis, 10 cm de neige sont ajoutés successivement les 23 et 29 janvier, ainsi que les 3 et 31 mars. À cette date, la hauteur maximale de neige de 100 cm est atteinte. Cette épaisseur est maintenue jusqu'à ce que la fonte de la neige commence aux environs du 15 avril. En 2005, le rapport du Centre d'études nordiques décrit que la fonte commence plutôt au début du mois de mai (Allard *et al.*, 2007). Toutefois, tout comme à l'hiver 2004-2005 (Allard *et al.*, 2007), la durée de la fonte au printemps 2015 est d'approximativement 15 jours, soit du 15 avril au 2 mai.

Comme attendu, la majorité de l'hiver, les températures moyennes quotidiennes mesurées dans le manteau neigeux sont plus élevées que celle de l'air. Ainsi, la vaste majorité des variations de température observées à la figure 56a sont positives. Toutefois, quelques valeurs négatives indiquent l'occurrence de redoux au cours de l'hiver. Ceux-ci n'ont toutefois pas semblé affecter l'évolution du manteau neigeux, à l'exception du redoux à la mi-avril associé au début de la fonte.

3.4.2 Répartition du couvert neigeux (TAC2597)

Le câble à thermistances TAC2597 apporte une information complémentaire quant à la répartition spatiale du couvert nival le long du transect étudié. La présence ou l'absence de neige à la surface a pu être déterminée pour chaque thermistance en se basant sur le critère que la variation journalière de la température à la surface est inférieure à 1 °C, et ce, pour trois jours consécutifs (de Pablo et al., 2017). Ainsi, la figure 57 présente les journées répondant à ce critère à l'aide d'un point noir. Il s'agit donc de l'occurrence du couvert neigeux en fonction de la position par rapport au pied du remblai.

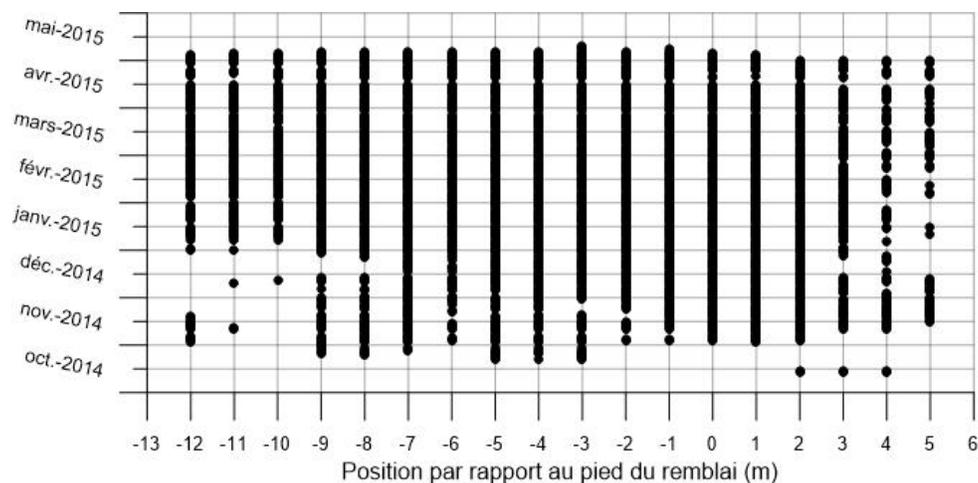


Figure 57 : Occurrence du couvert neigeux au sud-est de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, au chaînage 5+515 m

Dans la partie supérieure de la pente du remblai, de la neige se serait déposée momentanément dès la mi-octobre, avant de se mettre définitivement en place au cours des deux premières semaines du mois de novembre (figure 57). La présence de neige y est toutefois discontinue tout au long de l'hiver, particulièrement en se rapprochant de l'épaule de la piste. Une photo prise au mois d'avril 2015 semble confirmer cette observation (figure 42). Au-bas de la pente du remblai, la présence du manteau neigeux est plutôt persistante à partir du 31 octobre 2014. Il en va généralement de même jusqu'à 7 m dans le terrain naturel. Au-delà de quoi, l'existence du manteau neigeux n'est que sporadique jusqu'au mois de janvier, et ce, principalement au-delà de 10 m dans le terrain naturel (figure 57). Cette observation souligne l'influence du remblai sur la répartition du couvert nival. Dans le terrain naturel, certains capteurs

enregistrent de faibles variations journalières peu après la mi-octobre. Par exemple, à 3 m de la base du remblai dans le terrain naturel, soit à proximité du TAC2599, les températures en surface mesurées par la thermistance du TAC2597 suggèrent que le couvert neigeux y est existant dès le 19 octobre 2014. Il en va de même pour les capteurs à 4 et 5 m de la base du remblai (figure 57). La présence du manteau neigeux est néanmoins discontinue jusqu'au 26 novembre 2014, après quoi sa mise en place semble définitive tel que démontré par les données collectées au TAC2599. Les capteurs avoisinants montrent la même tendance, mais près d'une semaine plus tôt. Cela laisse croire que la présence du poteau de fibre de verre influence très localement la distribution de la neige en retardant légèrement son accumulation à proximité. Cela étant dit, les faibles variations journalières de la température enregistrée avant le 26 novembre, qui sont ici associée à la présence de neige, pourrait aussi être causée par la présence d'eau recouvrant ces thermistances, particulièrement lors du gel de celle-ci.

Contrairement à sa mise en place, la disparition du couvert neigeux à la fin de l'hiver 2014-2015 se produit presque simultanément peu importe l'emplacement le long du transect (figure 57). En effet, à l'intérieure d'une période de dix jours, soit du 26 avril au 5 mai, plus aucun capteur ne semble être couvert de neige. Le dernier capteur enregistrant une variation de température journalière inférieure à 1 °C est celui se trouvant à proximité du poteau vertical à 3 m du pied du remblai dans le terrain naturel. Considérant que l'installation peut avoir retardé la fonte définitive de la neige à cet emplacement, la dernière présence de neige estimée se trouverait à 1 m du remblai dans le terrain naturel en date du 2 mai, réduisant, ainsi, la durée de la période de fonte à une seule semaine. De plus, cette date concorde avec la disparition du manteau neigeux estimée au TAC2599.

3.4.3 Validation

Dans le but de valider les estimations et hypothèses quant à l'évolution du manteau neigeux au chaînage 5+515 m, les résultats obtenus aux TAC2597 et TAC2599 ont été comparés avec les observations météorologiques archivées (figure 58). Ces dernières sont présentées de manière plus exhaustive au tableau 10 en annexe. Comme le démontre la figure 58, les épisodes d'augmentation de l'épaisseur de neige au TAC2599 concordent tous avec des chutes de neiges observées par Environnement Canada à la station d'observation météorologique de Tasiujaq.

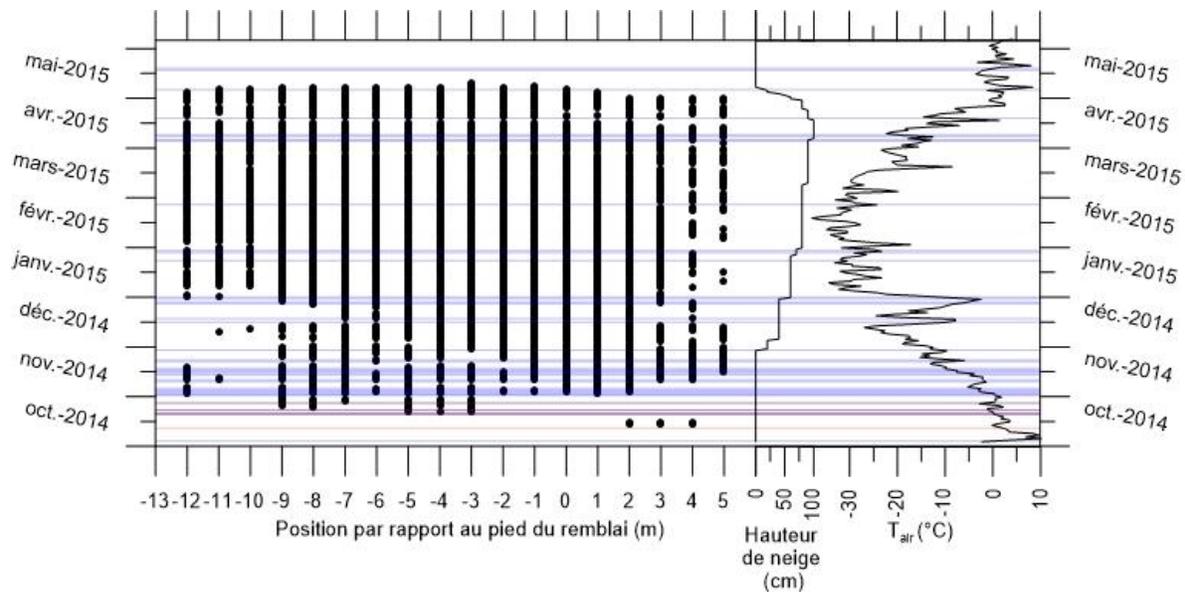


Figure 58 : Comparaison entre les estimations de l'évolution du manteau neigeux et l'occurrence d'épisodes de précipitations archivés par Environnement Canada. Les lignes bleues et rouges correspondent respectivement à des événements de neige et de pluie.

Tels que reportés à la figure 58, des précipitations ont toutefois été archivées entre les divers paliers représentés à la figure 56b. Puisque la résolution de la mesure est contrôlée par l'espacement de 10 cm entre les thermistances le long de l'axe vertical, il n'est pas surprenant que des chutes de neiges aient été observées entre les diverses accumulations de neige estimées à l'aide du TAC2599. Compte tenu de cette limitation, il semble que l'estimation de l'épaisseur de la couche de neige est généralement précise, et ce, de la fin du mois de novembre 2014 à la mi-avril 2015. Néanmoins, avant le 26 novembre 2014, aucune thermistance du TAC2599 n'a enregistré une différence de température significative avec l'air, alors que plusieurs épisodes de neige ont été enregistrés par Environnement Canada durant les mois d'octobre et de novembre lorsque la température de l'air était supérieure à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figure 58). Jusqu'au 24 octobre, les chutes de neiges étaient généralement de moindre importance (moins de deux heures) et entrecoupées par des précipitations sous forme de pluie. Il semble donc plausible que moins de 5 cm de neige aient pu s'accumuler en pied de remblai et qu'aucun capteur du câble TAC2599 ne se soit retrouvé sous la surface du couvert nival. Cependant, même à la fin du mois d'octobre, à la suite du premier épisode de neige d'importance non suivi de pluie, la hauteur de neige au sol est toujours inférieure à celle de la première thermistance. Cette absence de neige est plus difficile à expliquer, d'autant plus qu'il est ici question de quinze journées où des épisodes de neige ont été enregistrés (tableau 10 en annexe). Néanmoins, jusqu'à la mi-novembre les températures moyennes quotidiennes sont tout juste sous le point de congélation puisqu'elles oscillent entre $0,7$ et $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ainsi, il n'est pas si surprenant que le couvert neigeux atteigne seulement 5 cm d'épaisseur à la fin du mois de novembre. Cette hypothèse est supportée par les

observations précédentes découlant du TAC2597 où les premières accumulations de neige enregistrées concordent toutes très bien avec des chutes de neige (figure 58). Par exemple, la première accumulation de neige enregistrée le 19 octobre est réaliste compte tenu qu'Environnement Canada a enregistré une série de précipitations de pluie et de neige en alternance du 17 au 20 octobre (tableau 10 en annexe).

Il est aussi pertinent de noter que la majorité des précipitations se concentrent en début d'hiver, alors que la température de l'air est supérieure à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Au cours de l'hiver, l'épaississement du couvert neigeux mesuré au TAC2599 correspond bien aux légères hausses de la température de l'air qui corréllent aussi généralement avec des épisodes de chute de neige enregistrées par Environnement Canada (figure 58).

3.5 Température à la surface du sol

L'évolution du couvert nival au chaînage 5+515 m étant maintenant connue, son impact sur la température à la surface du sol a pu être quantifié. À partir des données collectées, la différence de température entre l'air et la surface du sol ainsi que le facteur n ont été exprimés en fonction de la hauteur du couvert nival.

3.5.1 Différence de température

En premier lieu, la hauteur de neige estimée a été reliée à la différence de température entre la base (T_{surface}) et le sommet du couvert neigeux (T_{air}). La figure 59 montre donc la variation de température entre l'air et le sol exprimée en fonction de la hauteur de neige accumulée. De façon générale, cette relation empirique semble pouvoir être exprimée par une courbe logarithmique, ou encore, asymptotique. Cette tendance montre qu'il existe une hauteur de neige critique à partir de laquelle l'effet de l'épaississement du couvert nival sur la différence de température de part et d'autre (ΔT) diminue significativement. Dans le cas de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, ce seuil critique se situe aux alentours de 40 cm (trait pointillé en rouge à la figure 59). Cette observation est en accord avec la figure 22 ainsi que les conclusions tirées de la littérature citées précédemment (Nicholson et Granberg, 1973; Sturm *et al.*, 2002; Zhang, 2005).

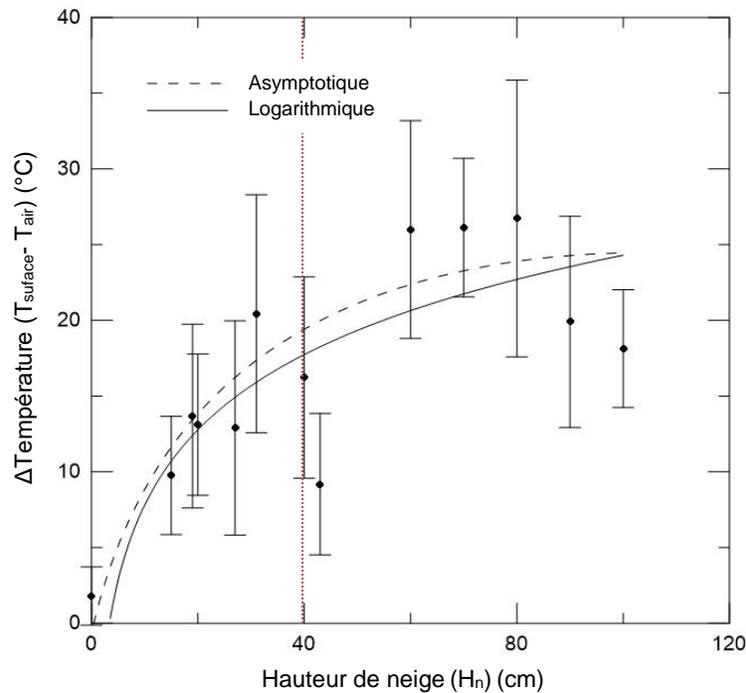


Figure 59 : Différence de température entre l'air et la surface du sol en fonction de la hauteur de neige accumulée au site d'étude de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, hiver 2014-2015

Ainsi, le gradient de température est plus important dans les 40 premiers centimètres de la couche de neige et diminue par la suite de façon inversement proportionnel à la conductivité thermique. En effet, avec le temps et le poids des couches sus-jacentes, les cristaux de glace se métamorphosent et se compactent. Il en résulte la densification du couvert nival qui est associée à l'augmentation de la conductivité thermique à la base du manteau neigeux. La diminution du gradient thermique pour l'ensemble du manteau neigeux est aussi affectée par l'évolution de la température de l'air et du sol au cours de l'hiver. Cela est particulièrement vrai à la fin de l'hiver, lorsque la différence de température diminue, alors que le couvert neigeux atteint son maximum.

3.5.2 Facteur n

À partir des indices de gel et de dégel du sol et de l'air, les facteurs n ont été calculés quotidiennement au cours de l'hiver. Chacun des facteur n de gel quotidien (n_f) a été associé à la hauteur de neige estimée au TAC2599 à pareille date (figure 60). De façon à souligner la tendance générale au long de l'hiver, une moyenne mobile pondérée sur 11 jours a été utilisée afin de supprimer les fluctuations transitoires. Ainsi, autant pour les hauteurs de neige que pour le facteur n de gel, les valeurs quotidiennes pour 5 jours de part et d'autre d'une date donnée ont servi au calcul de la moyenne mobile pondérée pour cette journée. De façon à accorder un poids représentatif à chacune des valeurs utilisées dans le calcul, un coefficient

maximal de six a été appliqué à la journée calculée. En s'éloignant de la date visée, le poids de chaque terme décroisse linéairement d'une unité jusqu'à atteindre un coefficient de 1.

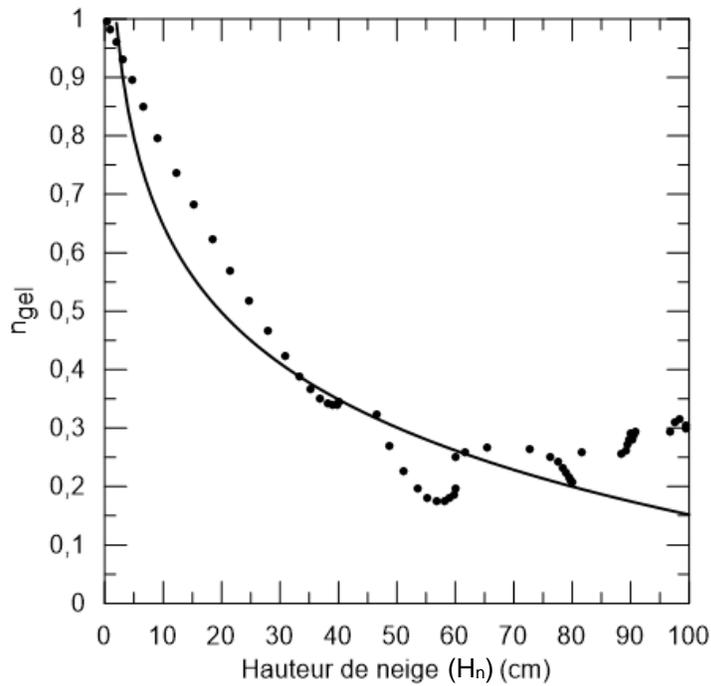


Figure 60 : Valeur de facteur n en fonction de la hauteur de neige accumulée au site d'étude de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, hiver 2014-2015

À partir du graphique présenté à la figure 60, une courbe de tendance a été appliquée. Tel qu'observé à la figure 59 et tel que soutenu par la littérature, la relation entre le facteur n de gel et l'épaisseur de neige peut s'exprimer par une équation logarithmique (équation 31).

$$n_f = -0,215 \times \ln(H_n) + 1,142 \quad (31)$$

Ainsi, l'équation établie à partir du traitement des données thermiques collectées au site d'essai de Tasiujaq servira à établir les conditions limites en surface du modèle géothermique présenté à la prochaine section.

4 Simulations numériques

Tel qu'indiqué précédemment, le site d'essai de Tasiujaq est très bien documenté. En effet, grâce aux travaux du Centre d'études nordiques, les diverses unités stratigraphiques y sont connues ainsi que leurs propriétés géotechniques et thermiques. De même, les régimes thermiques dans le sol naturel et dans le remblai y sont suivis depuis la construction de la piste. Ces diverses données historiques et les températures enregistrées au cours de l'hiver 2014-2015 ont permis de calibrer un modèle thermique bidimensionnel tenant compte de l'accumulation de neige. Puisque l'épaississement du couvert neigeux y a été identifié comme le principal facteur de dégradation du pergélisol, le modèle permettra de simuler les perturbations thermiques relatives à l'accumulation de neige le long de la piste. Dans ce chapitre, il sera donc question du logiciel utilisé, du développement du modèle, de ses propriétés et caractéristiques ainsi que de sa validation.

4.1 Logiciel utilisé

La modélisation a été effectuée à l'aide du volet TEMP/W de la suite GeoStudio (version 2012). Il s'agit d'un logiciel par éléments finis servant à modéliser les transferts de chaleur et les changements de phase dans un milieu poreux. Dans le cas de la plupart des applications en ingénierie impliquant le gel et dégel du sol, le principal mécanisme de transfert de chaleur à considérer est la conduction (Andersland et Anderson, 1978). Tel que discuté à la section 2.3.2, la conduction dans un sol correspond à l'écoulement de chaleur par le passage de l'énergie entre les particules de sol en contact les unes avec les autres ou au travers des fluides interstitiels. À cette fin, le logiciel TEMP/W utilise l'équation différentielle gouvernant les transferts de chaleur par conduction en deux dimensions où Q est un flux thermique appliqué (GEO-SLOPE International Ltd, 2013) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = \left(c + L\theta \frac{\partial \theta_u}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (32)$$

Les termes à droite de l'équation 32 expriment la capacité d'un sol à emmagasiner la chaleur en fonction de sa capacité calorifique volumique gelée ou non gelée (c) ainsi que de la quantité de chaleur qui est absorbée ou libérée lors du gel ou du dégel, soit la chaleur latente. Cette quantité de chaleur dépend de la chaleur latente de l'eau (L), de la teneur en eau volumique (θ) et de la teneur en eau non gelée (θ_u) qui est fonction de la température. À gauche de l'équation, les conductivités thermiques suivant l'axe horizontal et l'axe vertical sont exprimées respectivement par k_x et k_y . L'équation 32 indique que la différence entre le flux de chaleur entrant et sortant d'un volume élémentaire de sol en un point à un

temps donné est égale à la variation de la quantité de chaleur emmagasinée. En régime permanent, le flux entrant et sortant d'un volume élémentaire de sol est le même en tout temps. Ainsi, l'expression précédente est réduite à l'équation 33 (GEO-SLOPE International Ltd, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (33)$$

4.1.1 Modèle thermique complet

Le logiciel TEMP/W offre la possibilité d'utiliser divers types de modèle, considérant différemment les propriétés thermiques du sol et posant différentes hypothèses. Dans le cas de la présente étude, le modèle thermique dit complet a été utilisé. Ce dernier prend en compte que le changement de phase se produit sur une gamme plus ou moins large de températures. De même, le modèle thermique complet considère la conductivité thermique ainsi que la teneur en eau non gelée comme des fonctions dépendantes de la température. Néanmoins, le modèle pose l'hypothèse que les capacités calorifiques volumiques du matériel gelé et non gelé ainsi que la teneur en eau volumique du sol demeurent constantes. Il est aussi important de noter que le modèle thermique développé s'intéresse seulement au régime thermique du sol et ne tient pas compte de la formation de lentilles de glace et des tassements dus au dégel.

4.2 Modèle

4.2.1 Paramètres du modèle

Lors des itérations, la convergence est atteinte alors que des solutions successives sont égales à l'intérieur d'un seuil de tolérance spécifié ou lorsque le nombre maximal d'itérations est atteint. GeoStudio détermine la tolérance en se basant sur deux paramètres, soit le nombre de chiffres significatifs et la différence minimum (GEO-SLOPE International Ltd, 2013). Dans le cas de TEMP/W ces critères de convergence s'appliquent bien sûr à la température qui est la variable primaire. Deux chiffres significatifs sont considérés dans le modèle et la différence tolérée de température est établie à 0,10 °C. Ainsi, la convergence est établie lorsque deux itérations successives donnent une température ayant un écart inférieur à 0,10 °C à deux chiffres significatifs près. Cette telle tolérance est considérée comme suffisante afin de filtrer le bruit numérique inhérent au calcul d'information en éliminant les différences n'ayant pas de signification physique dans le contexte de la présente analyse. En ce qui a trait au nombre maximal d'itérations, ce dernier a été fixé à 50. Selon la figure 61, cette limite est adéquate, puisqu'entre deux et seize itérations suffisent pour que la convergence soit atteinte. Plus précisément, près de 80 % des

solutions ont été obtenues après seulement deux itérations et la quasi-totalité d'entre elles ont nécessité moins de huit itérations.

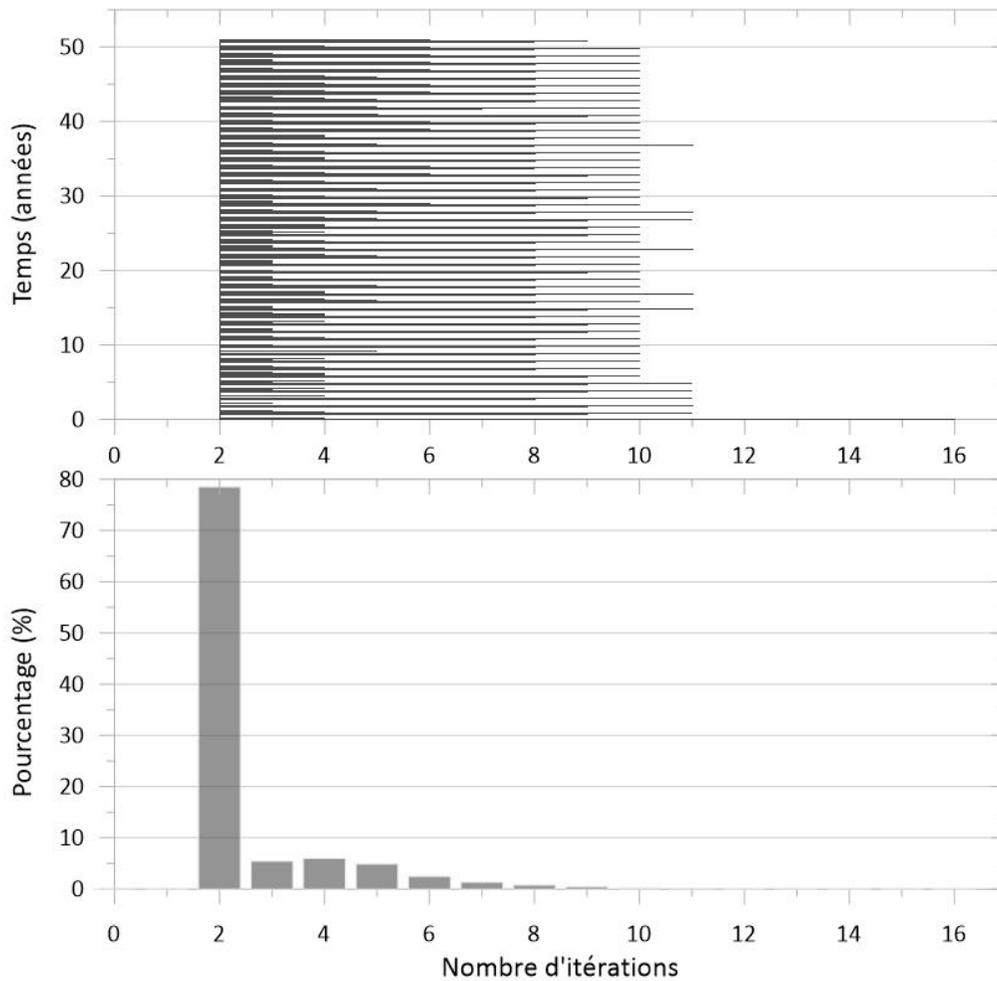


Figure 61 : Pourcentage du nombre d'itérations nécessaires pour que la convergence de chacune des 74 460 solutions soit atteinte au cours des 50 de simulation

La convergence du modèle est aussi assurée par l'utilisation d'un paramètre de relaxation inférieur à 1, soit de 0,1. Ce taux de sous-relaxation thermique permet d'accommoder la divergence ou l'oscillation de solutions successives causée par des propriétés des matériaux non-linéaire. L'effet de la chaleur latente est un bon exemple d'extrême non-linéarité de la matière. Ainsi, en impliquant le changement de phase de l'eau dans l'analyse de transfert d'énergie, un taux de sous-relaxation thermique compris entre 0 et 1 doit être appliqué (GEO-SLOPE International Ltd, 2013).

Finalement, sous l'onglet convergence, TEMP/W propose deux types de solveur d'équation distincts, soient direct ou itératif (GEO-SLOPE International Ltd, 2013). Tel que recommandé pour les modèles

de grandes dimensions, l'option itérative, appelée solveur d'équation direct parallèle a été employée afin de minimiser le temps d'analyse nécessaire.

En ce qui a trait au pas de temps, son augmentation choisie est linéaire, car il est possible de considérer le taux de variation de la température comme étant relativement constant du début à la fin de la simulation. Toutefois, si une simulation était réalisée pour représenter l'évolution du régime thermique du sol à partir du moment où le remblai est construit, une augmentation exponentielle du pas de temps serait probablement plus adéquate. Le pas de temps est établi à chaque six heures, soit quatre fois par jour et 1 460 fois par an. Le modèle a été exécuté sur 51 ans afin d'assurer sa stabilité thermique tel qu'expliqué à la section 4.2.6.4, pour un total de 74 460 pas de temps.

4.2.2 Géométrie du modèle

La géométrie du modèle est présentée à la figure 62. Il est possible d'y observer une vue en coupe de la chaussée à partir de son centre ($x = 20$ m) jusqu'à 40 m dans le terrain naturel ($x = -40$ m). Les câbles à thermistances qui seront utilisés lors de la calibration du modèle à la section 4.3 y sont aussi visibles. Les divers matériaux ayant des propriétés géotechniques et thermiques variées sont représentés par trois couleurs distinctes. Le remblai est en jaune et le sol d'infrastructure est en orange ou en bleu en fonction de la lithologie. Les propriétés de ces couches sont définies à la section 4.2.4.

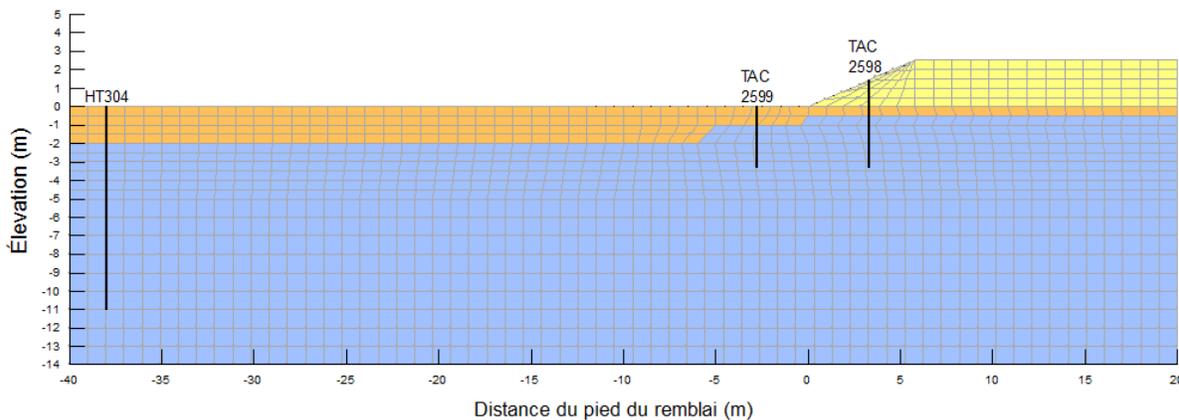


Figure 62 : Géométrie du modèle réalisé sur TEMP/W

Le modèle, qui est asymétrique, s'étend donc sur 60 m de largeur et sur 14 à 16,5 m de hauteur. Cette étendue horizontale permet d'inclure le TAC304 dans le terrain naturel, mais aussi, d'éliminer les effets de bords à proximité de la zone d'étude, soit sous la pente du remblai et à son pied. En effet, selon Matine et coll. (2011), le flux et la température obtenus par l'homogénéisation constituent une approximation satisfaisante dans les régions suffisamment éloignées de la frontière. De plus, l'étendue verticale du

modèle permet d'atteindre la profondeur de l'amplitude annuelle nulle dans le pergélisol, fixée à 13,5 m, ainsi que d'éliminer les interférences entre les conditions limites supérieure et inférieure qui seront décrites à la section 4.2.6.

4.2.3 Maillage du modèle

L'analyse par éléments finis se base sur la subdivision d'un continuum en morceaux de petites tailles. L'analyse décrit les actions de chacun des fragments individuels et les reconnecte pour représenter le comportement du continuum comme un tout. Le processus de subdivision en morceaux, correspondant chacun à un élément fini, s'appelle la discrétisation ou le maillage (GEO-SLOPE International Ltd, 2013).

Étant donné que les gradients de température près de la surface sont généralement plus importants en direction perpendiculaire à celle-ci, il est préférable d'utiliser des éléments quadrilatères. En effet, la présence d'éléments triangulaires cause des fluctuations excessives du résultat suivant leur orientation. De plus, en découpant le modèle en quadrilatères, le nombre d'éléments et, conséquemment, le temps de simulation sont minimisés (GEO-SLOPE International Ltd, 2013). Pour toutes ces raisons, le modèle mis au point utilise un maillage rectangulaire de quadrilatères. Ce maillage structuré, constitué de 1259 éléments, est bien visible à la figure 62. La densité des éléments finis est plus importante près de la surface afin d'obtenir une meilleure résolution de la couche active et d'accommoder numériquement les variations rapides et drastiques des conditions limites à la surface (Darrow, 2011; GEO-SLOPE International Ltd, 2013). Ainsi, jusqu'à 5 m de profondeur, les quadrilatères ont une hauteur de 0,5 m et une largeur de 1 m, alors qu'il s'agit plutôt de carré de 1 m d'arrêtes entre 5 et 14 m de profondeur (figure 62). Jumelée à la discrétisation temporelle discutée précédemment (section 4.2.1), la discrétisation spatiale choisie est suffisamment fine pour obtenir une solution acceptable au cours des analyse de transfert de chaleur en régime transitoire.

4.2.4 Propriétés des matériaux

Comme présenté à la figure 62, le modèle a été divisé en trois régions auxquelles des propriétés géotechniques et thermiques ont été attribuées. Plus précisément, cinq paramètres d'entrées doivent être saisis dans le modèle thermique complet de TEMP/W pour chacune des régions. Il s'agit des conductivités thermiques et des capacités thermiques du matériel gelé et non gelé ainsi que de la teneur en eau volumique. Tout comme la géométrie des régions, ces valeurs ont été établies en se basant sur les études géotechniques réalisées au site de Tasiujaq dont les résultats sont présentés à la section 2.1.2. À la suite d'une analyse de sensibilité, les cinq couches stratigraphiques composant le sol d'infrastructure à la figure 32c ont été réduites à seulement deux unités, soit une couche de sable et gravier et une de sable moyen silteux.

En fonction de la granulométrie du remblai et des couches de sol d'infrastructure, des masses volumiques du sol sec et des particules solides ont été tirées de la littérature (Holtz et Kovacks, 1991; Côté et Konrad, 2005; Darrow, 2011; L'Hérault *et al.*, 2012) . Les valeurs utilisées sont présentées au tableau 6.

Tableau 6 : Propriétés géotechniques attribuées à chacun des matériaux du modèle

Matériaux	Masse volumique du sol sec	Masse volumique des particules solides	Teneur en eau massique
	ρ_d (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	w (%)
Remblai	2 255	2 750	1,5
Sable et gravier	1 810	2 650	5,0
Sable moyen silteux	1 700	2 700	10,0

Associées à la teneur en eau, ces valeurs ont permis de calculer les propriétés thermiques selon les divers modèles existants (section 1.3). Ultimement, ces paramètres ont été raffinés par le biais d'une analyse régressive en comparant les données de températures du sol modélisées à celles mesurées par les câbles à thermistances TAC2598, TAC2599 et HT304 (section 4.3).

4.2.4.1 Teneur en eau non gelée

Tel que souligné précédemment, TEMP/W utilise la teneur en eau volumique (θ) plutôt que la teneur en eau gravimétrique typiquement employée en géotechnique. En utilisant la porosité du sol (n) ainsi que les masses volumiques du sol sec (ρ_d) et des particules solides (ρ_s), la conversion peut s'effectuer selon les relations suivantes.

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (34)$$

$$\theta = \frac{wG_s(1 - n)}{100} \quad (35)$$

À l'équation 35, G_s est la densité des grains solides, soit le ratio entre la masse volumique des particules solides (ρ_s) et celle de l'eau (ρ_w).

Ainsi, à partir des valeurs présentées au tableau 6, la teneur en eau volumique normalisée des matériaux de remblai a été fixée à 0,03. Cette valeur est la même que celle utilisée par L'Hérault *et al.* (2012) lors de simulations numériques visant à prédire l'approfondissement du front de dégel sous la piste d'atterrissage de Tasiujaq. Les teneurs en eau volumique des couches de sable et gravier et de sable moyen silteux sont respectivement 0,09 et 0,17.

En ce qui a trait à la teneur en eau non gelée volumique, TEMP/W permet d'exprimer ce paramètre en fonction de la température. Dans le cas de la présente étude, les relations proposées par le logiciel pour différents types de sol ont été utilisées. La figure 63 montre les courbes associées à ces fonctions pour un gravier, un sable et un silt sableux. Tel que discuté à la section 1.3.1, la teneur en eau non gelée diminue lorsque la température diminue ou que la dimension des particules augmente.

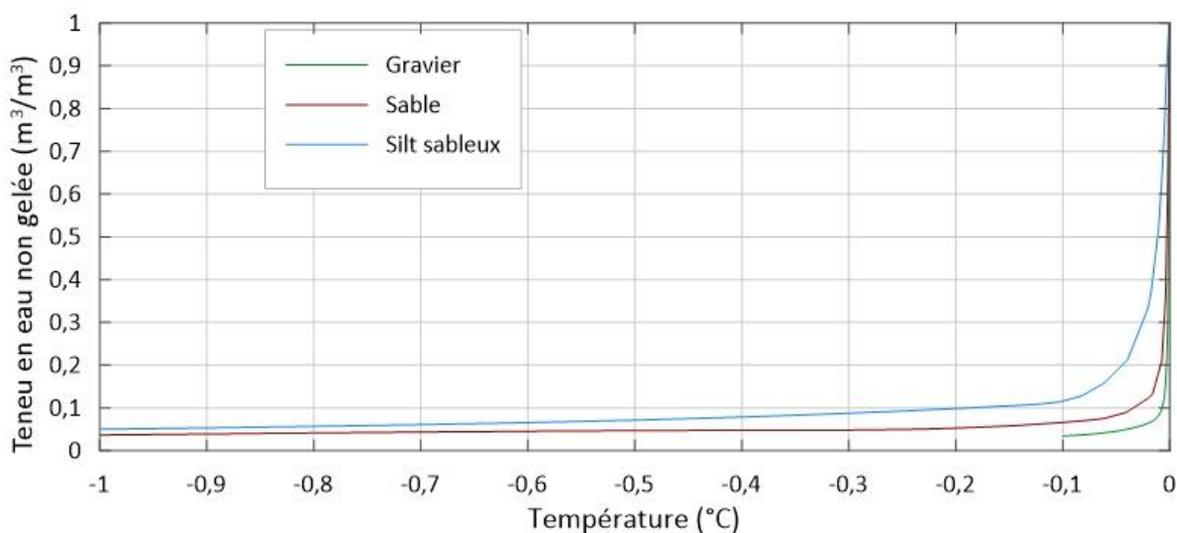


Figure 63 : Fonctions de la teneur en eau non gelée volumique proposée par TEMP/W pour différent type de matériaux granulaires

La courbe associée au gravier a été utilisée pour les matériaux de remblai ainsi que pour la couche de sable et gravier en raison de leur granulométrie grossière et de leur faible teneur en eau. Ainsi, au-dessous de -0,1 °C, la teneur en eau non gelée de ces régions du modèle est considérée comme étant nulle (figure 63). Pour ce qui est de la couche de sable moyen silteux, la fonction représentant la teneur en eau non gelée d'un sable a été préférée à celle du silt sableux. Ce choix influence très peu les résultats du modèle étant donné la teneur en eau volumique normalisée de cette couche de seulement 0,17. En effet, l'utilisation d'une fonction de la teneur en eau non gelée variant avec la température spécifique au site a le plus grand effet en présence de sol possédant une grande teneur en eau non gelée comme dans le cas des argiles. Même dans ces circonstances, l'impact sur les résultats du modèle reste léger (Darrow, 2011).

4.2.4.2 Conductivité thermique

Deux des modèles présentés à la section 1.3.2 ont été utilisés pour calculer les conductivités thermiques des trois matériaux gelés et non gelés. Pour la couche inférieure du modèle, composée de sable moyen silteux, le modèle de Kersten pour des sols grossiers a été employé. Ainsi, à partir des équations (5 et (6 ainsi que des paramètres du tableau 6, les conductivités thermiques du sol gelé et non gelé sont respectivement de 1,9 et de 1,8 W/m°C. Dans le cas de matériaux plus grossiers, composant le remblai et la couche supérieure du sol naturel, le modèle de Côté et Konrad reflète mieux la réalité (Côté et Konrad, 2005). Ainsi à l'aide des équations (12 à (17 et des valeurs de κ suggérées (tableau 1), la conductivité thermique du remblai a été établie à 1,6 W/m°C pour le matériel gelé et 1,9 W/m°C pour le matériel non gelés. Le fait que la conductivité thermique du remblai non gelé soit plus élevée que celle du remblai gelé est probablement associée à sa faible teneur en eau. Théoriquement, ce résultat est difficile à expliquer. Néanmoins, plusieurs autres études analysant les transferts de chaleur sous une infrastructure routière via des logiciels d'analyse numérique par éléments finis considèrent qu'un remblai avec une faible teneur en eau présente une conductivité thermique plus faible lorsqu'il est gelé (Darrow, 2011; L'Hérault *et al.*, 2012; Richard, 2018). Dans le cas du sable graveleux, le modèle de Côté et Konrad (2005) donne une conductivité thermique du sol non gelé de 1,6 W/m°C. Étant donnée la faible teneur en eau de cette couche (tableau 6), la conductivité thermique du sol gelée a été estimée à 1,7 W/m°C, donc, légèrement supérieure à celle de la couche non gelée. Dans TEMP/W, les conductivités thermiques ont été saisies en kJ/jm°C. Les valeurs converties sont présentées dans le tableau résumant les paramètres d'entrés appliqués (tableau 7).

Comme mentionné précédemment, la relation entre la conductivité thermique et la température est exprimée par une fonction proposée par le logiciel TEMP\W. L'algorithme génère une courbe basée sur le type de matériaux dont les valeurs extrêmes correspondent aux conductivités thermiques gelé et non gelé entrées. Les diagrammes associés à la teneur en eau non gelées du gravier composant le remblai et la couche de sable graveleux présentent des valeurs entre des températures de 0 et -0,1 °C (figure 64). Ainsi, au-dessous de -0,1 °C, la conductivité thermique du matériel gelée est atteinte et appliquée aux régions en question.

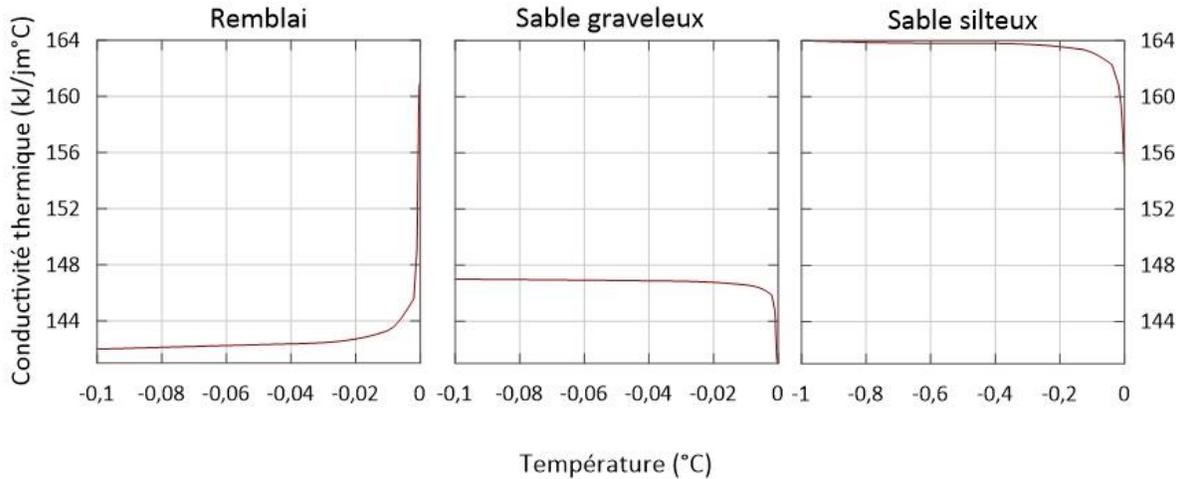


Figure 64 : Relations de la conductivité thermique en fonction de la température utilisées pour les matériaux du modèle

Quant à elle, la conductivité thermique du sable moyen silteux varie jusqu'à $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en suivant la courbe caractéristique d'un sable générée par TEMP/W (figure 64). À des températures inférieures, la conductivité thermique du sol est constante.

4.2.4.3 Capacité thermique volumique

Comme discuté précédemment, le modèle complet intégré dans le logiciel TEMP/W pose l'hypothèse que les capacités thermiques du matériel gelé et non gelé demeurent constantes. Ces paramètres ont été déterminées à l'aide du modèle présenté à la section 1.3.3. En ce qui a trait aux matériaux non gelés, l'équation (21) a permis de calculer que le remblai, le sable graveleux et le sable moyen silteux ont respectivement une capacité thermique de 1,62, 1,61 et 1,66 $\text{MJ}/\text{m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Compte tenu que la capacité thermique de la glace correspond à la moitié de celle de l'eau, sous $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ces paramètres ont alors été estimés pour les sols gelés à 1,56, 1,42 et 1,58 $\text{MJ}/\text{m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$ à l'aide de l'équation (22). Dans les deux cas, les capacités thermiques des composantes solides d'origine minérale se trouvent entre 1,95 et 2,20 $\text{MJ}/\text{m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.2.4.4 Paramètres des régions du modèle

En terminant, le tableau ci-dessous résume les paramètres établis pour chacune des régions composant le modèle.

Tableau 7 : Propriétés des matériaux utilisées lors de la modélisation au site de Tasiujaq

Matériaux	Conductivité thermique (kJ/jm°C)		Capacité calorifique volumique (kJ/m ³ °C)		Teneur en eau volumique (m ³ /m ³)
	Gelé	Non gelé	Gelé	Non gelé	
Remblai	146	161	1 556	1 623	0,03
Sable grossier gravier	147	141	1 416	1 609	0,09
Sable moyen silteux	164	155	1 579	1 664	0,17

Bien que ces paramètres aient été méticuleusement estimés et réfléchis, il semble que modifier les propriétés thermiques des matériaux a un impact mineur sur les résultats finaux du modèle comparativement aux conditions limites de surface (Darrow, 2011). Celles-ci sont détaillées à la section 4.2.6.

4.2.5 Conditions initiales

Il existe deux options afin de spécifier les conditions initiales à l'aide de TEMP/W. La méthode standard est d'appliquer manuellement une température initiale à chacun des nœuds individuellement. L'option plus avancée est d'utiliser le résultat d'un modèle en régime permanent comme condition de température initiale pour l'analyse en régime transitoire. Cette dernière approche a été privilégiée. L'analyse en régime permanent réalisée vise à reproduire grossièrement un régime thermique permanent selon les conditions enregistrées au début du mois d'octobre 2014. En date du 1^{er} octobre, la température moyenne de l'air est de 2,83 °C et le plafond de pergélisol est estimé à 2 m de profondeur (figure 65). En l'absence de neige, la température de l'air a été appliquée comme condition limite en surface. À la profondeur d'amplitude annuelle nulle, estimée précédemment à 13,5 m, la température est de -2,70 °C. Cette valeur correspond donc à la température du pergélisol qui a été appliquée comme limite inférieure du modèle lors de l'analyse en régime permanent.

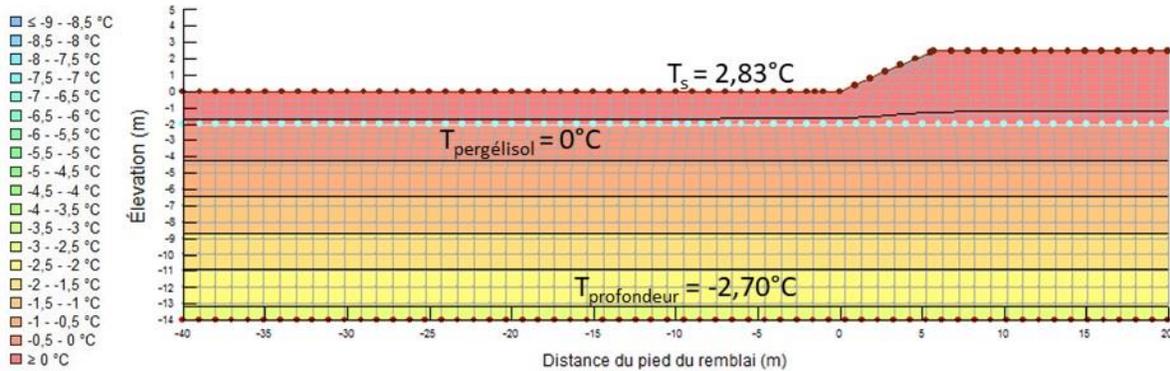


Figure 65 : Résultats de l'analyse en régime permanent montrant les conditions limites initiales appliquées

4.2.6 Conditions limites

Les conditions aux limites supérieure et inférieure du modèle sont expliquées au cours de cette section. Tout d'abord, les conditions aux limites latérales du modèle sont discutées.

4.2.6.1 Conditions limites latérales

Aux deux frontières latérales du modèle, les conditions limites verticales correspondent à un flux nul. Dans le terrain naturel, il est assumé que cette hypothèse représente des conditions non perturbées qui n'influenceront pas significativement le modèle dans la région d'intérêt, soit l'épaulement et le pied du remblai. En ce qui a trait à la frontière du modèle se trouvant au centre du remblai, un flux nul peut généralement s'appliquer grâce à la symétrie de l'infrastructure forçant le bilan d'énergie à être nul le long de cette ligne (Alfaro *et al.*, 2009). Toutefois, dans le cas présent, comme l'épaisseur du couvert neigeux varie selon l'orientation de la pente du remblai, le modèle n'est pas tout-à-fait symétrique. En effet, Allard *et al.* (2007) ont mesuré que la température à la surface du sol au pied du remblai du côté nord-ouest est inférieure de 6 °C à la température de côté sud-est qui est représenté par le modèle. Ainsi, un flux négatif pourrait être appliqué comme condition limite verticale, du moins pour la hauteur du remblai. Cependant, il a été jugé que le rôle de ce flux de chaleur est négligeable par rapport aux conditions limites en surface. Conséquemment, l'hypothèse de symétrie du modèle a été retenue, tout comme L'Hérault *et al.* (2012) qui ont analysé l'approfondissement de front de dégel sous la piste d'atterrissage de Tasiujaq, aussi à l'aide du logiciel TEMP/W.

4.2.6.2 Conditions limites en surface

Comme mentionné à plusieurs reprises au cours de cette section, le paramètre d'entrée du modèle le plus critique est la condition limite de surface (Darrow, 2011). Plus précisément, la condition limite supérieure correspond à la température à la surface du sol. Comme discuté à la section 1.5.2, la température à la

surface peut être déterminée en suivant une approche analytique, se basant sur l'équation du bilan d'énergie à la surface du sol (équation 28). Pour y parvenir, une grande quantité de données climatiques doivent être connues et saisies dans le modèle. La température à la surface du sol peut aussi être estimée empiriquement en utilisant la température de l'air corrigée par un facteur n. Cette dernière approche a finalement été retenue étant donné la complexité associée au calcul du bilan d'énergie en présence d'un manteau neigeux tel qu'illustré par les modèles existants à la section 1.5.1.

Le cycle climatique annuel du modèle se base sur les température moyennes mensuelles d'octobre 2014 à septembre 2015 (figure 66).

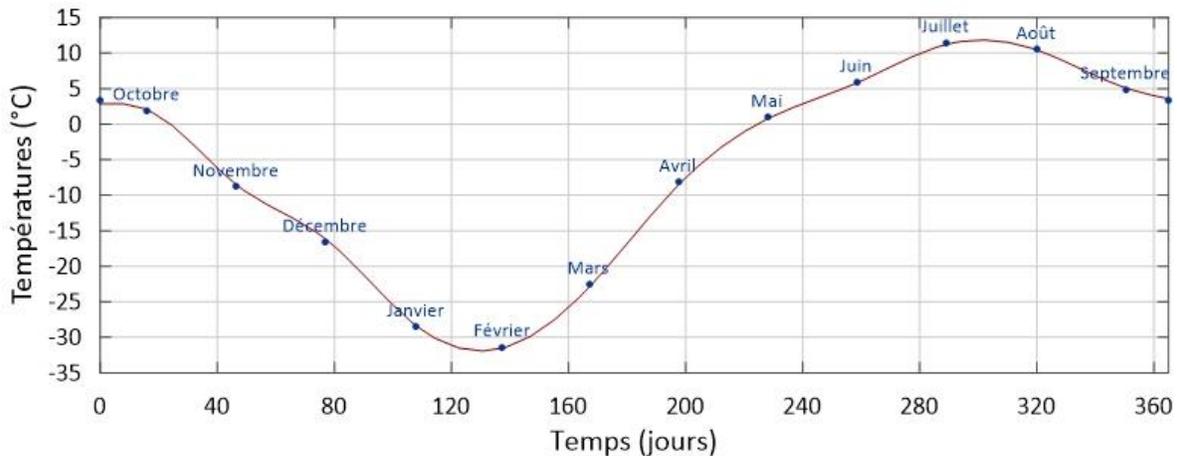


Figure 66 : Cycle climatique annuel du modèle (ligne rouge) basée sur les moyennes mensuelles d'octobre 2014 à septembre 2015 (points bleus)

Durant la période de gel, les facteurs de correction pour les surfaces couvertes de neige, soit le terrain naturel et la pente du remblai, sont établis à l'aide de l'équation 31. Dans cette expression, H_n représente la hauteur de neige maximale accumulée en centimètres pour une section d'un mètre de largeur parallèlement à la coupe du modèle (équation 36).

$$n_f = -0,215 \times \ln(H_{n_{max}}) + 1,142 \quad (36)$$

Ainsi, les conditions limites de surface sont différentes pour chaque mètre du modèle à partir du sommet de l'épaulement du remblai jusqu'à 25 m dans le terrain naturel. Ces conditions limites variées sont représentées par une gamme de couleurs à la figure 67. À plus de 25 m du pied du remblai, l'hypothèse est posée que la répartition de la neige n'est plus affectée par la présence de la piste d'atterrissage. L'épaisseur du couvert neigeux y est alors estimée à 8 cm correspondant à un facteur n de gel de 0,70 selon l'équation 36.

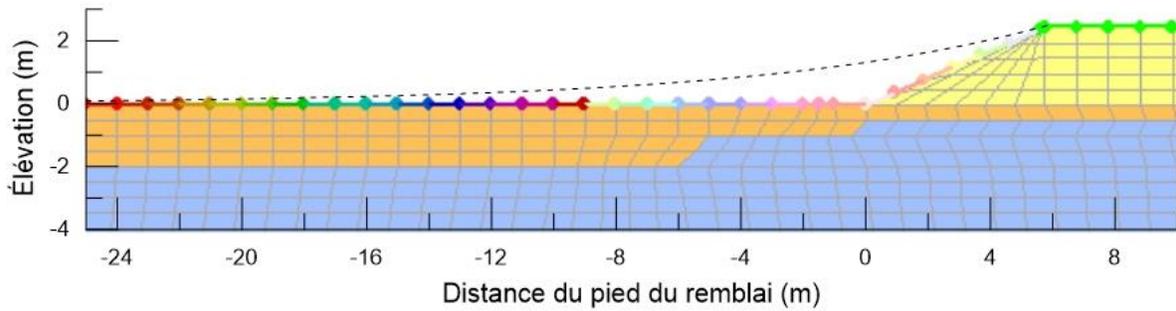


Figure 67 : Schématisation des conditions limites appliquées à la surface du modèle

Le modèle de Tabler (1994), détaillé à la section 1.2.2, a été utilisé afin de déterminer la capacité maximale de rétention de la neige selon la géométrie du remblai. Ce modèle semble toutefois surestimer la hauteur de neige mesurée à 2,75 m du pied du remblai, soit au TAC2599. La courbe obtenue a donc été adaptée afin de respecter les informations collectées sur le terrain. La surface de neige obtenue est illustrée par le trait pointillé à la figure 67. La hauteur de neige maximale pour chacune des sections correspond à la distance entre la ligne pointillée et la surface du modèle au centre de la zone d'un mètre. Bien évidemment, cette valeur est fonction de la géométrie du remblai tel qu'expliqué à la section 4.4.1. Le facteur n de gel équivalent est appliquée instantanément dès que la température de l'air est inférieure à 0°C .

Les facteurs n de dégel pour l'ensemble du modèle et le facteur n de gel pour la chaussée sont basées sur les gammes de valeurs proposées par la littérature (O.B. Andersland et Ladanyi, 2004; Doré et Zubeck, 2009). Ces valeurs ont bien sûr été ajustées en fonction des conditions observées sur le terrain et sont présentées au tableau 8.

Tableau 8 : Facteurs de gel et de dégel des surfaces n'étant pas affectées par la présence de neige

Surfaces	Facteur n de gel (n_f)	Facteur n de dégel (n_t)
Chaussée en gravier	1,00	1,10
Pente du remblai en gravier	--	1,40
Terrain naturel au pied du remblai	--	1,15
Terrain naturel	--	0,90

Selon les photos du site d'instrumentation en hiver, ainsi que les photos prise par Allard et coll. (2007), la neige ne semble pas s'accumuler sur la chaussée au site de Tasiujaq. Ainsi, un facteur n de 1,00 est utilisé pour la surface de roulement et respecte la plage de valeurs suggérées en pratique pour une chaussée de gravier par Doré et Zubeck (2009). Durant la période de dégel, les facteurs n appliqués aux matériaux

de remblai sont compris entre 1,1 et 2,0, soit les valeurs limites recommandées pour le facteur n de dégel à la surface du gravier. Un facteur n de seulement 1,10 a été attribué à la chaussée, qui est grandement affectée par le vent, afin de simuler la perte de chaleur par convection. À l'inverse, la pente du remblai étudiée, d'aspect sud-est, est moins exposée au vent et d'avantage soumise aux radiations solaires incidentes. Un facteur n de 1,40 a donc été choisi pour représenter ces conditions. Dans le terrain naturel, un facteur n de 1,15 est appliqué à la température de l'air durant la période de dégel pour les cinq premiers mètres au pied du remblai. La surface de ce secteur s'apparente à un sol minéral en raison de la construction du remblai. Ainsi, l'utilisation d'un facteur n de dégel légèrement inférieur à celui recommandé par Andersland et Ladanyi (2004) pour un sol minéral ($n_t = 1,22$) semble raisonnable. Plus loin dans le terrain naturel, un facteur de correction inférieur à 1,0 a été appliqué pour simuler l'effet de la végétation sur la température à la surface du sol.

À lumière des explications précédentes, la figure 68 montre quelques exemples du cycle climatique annuel de l'air corrigé par les facteurs n de gel et de dégel, et ce, pour divers emplacements à la surface du modèle. Pour trois des quatre courbes illustrées, les températures moyennes mensuelles mesurées par le câble à thermistances TAC2597 y sont symbolisées par des points. Pour la période de gel, les conditions limites de surface appliquées au terrain naturel, soient les courbes verte et bleue, corréleront bien avec les températures mesurées. Il semble donc que la répartition du couvert neigeux associée à la relation empirique entre le facteur n de gel et la hauteur de neige simule bien l'effet du couvert neigeux sur la température de l'air. Néanmoins, le facteur n appliqué à la partie supérieure de la pente du remblai (courbe orange à la figure 68) semble sous-estimer la température à la surface comparativement aux données mesurées. Diverses raisons peuvent expliquer cette observation. Entre autres, l'épaisseur de neige accumulée peut être surestimée. La photo de l'instrumentation à la figure 42 (section 2.2.2) confirme que cela est potentiellement le cas puisqu'une quantité de neige négligeable semble recouvrir la portion supérieure de la pente du remblai. Cependant, la photo tirée de Allard (2016) présentée à la figure 10b montre nettement la présence de neige jusqu'à l'épaulement du remblai. Cette photo montre aussi que le manteau neigeux est potentiellement plus dense au sommet du remblai, ce qui permettrait à la chaleur d'être plus facilement extraite en hiver que ne le prévoit les conditions de surfaces appliquées dans le modèle. Il est aussi important de souligner que la relation empirique pour déterminer le facteur n a été développée au pied du remblai, soit dans le terrain naturel. Dans tous les cas, l'utilisation d'un facteur n de dégel surévaluant légèrement la température à la surface de la pente du remblai permet de contrer cette lacune du modèle sur l'ensemble du cycle climatique. Ce fait est démontré via la calibration du modèle à la section 4.3.

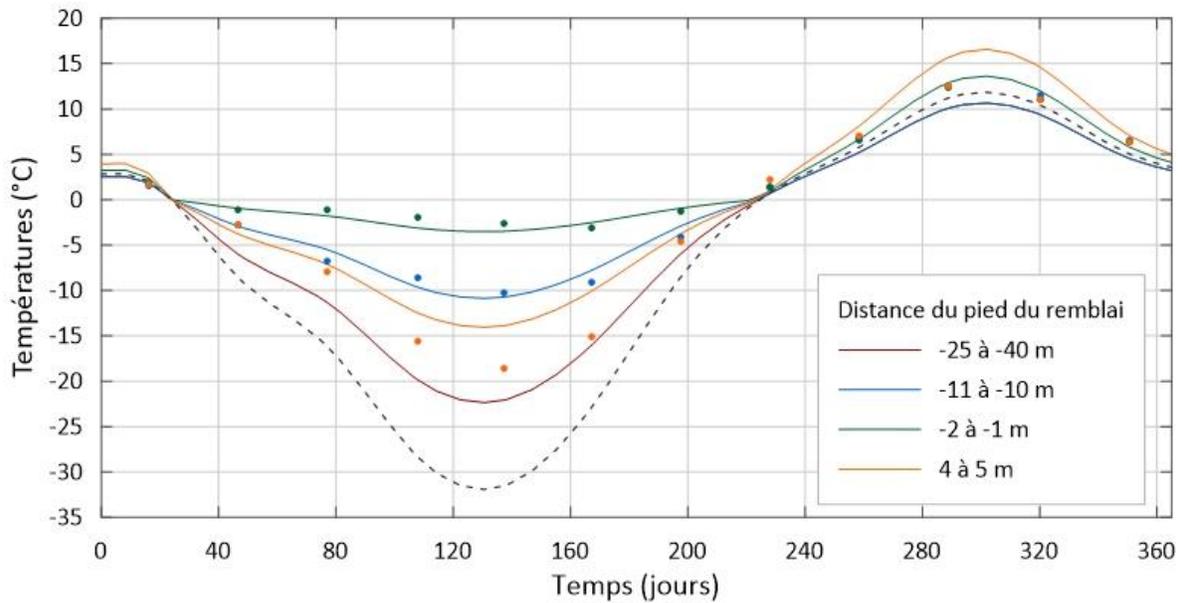


Figure 68 : Exemples de cycles climatiques annuel de l'air (trait pointillé) corrigé par un facteur n appliqués comme condition limite dans la pente du remblai (4 à 5 m), au pied du remblai (-2 à -1 m), dans le terrain naturel affecté par le remblai (-11 à -10 m) et dans le terrain naturel (-25 à -40 m).

4.2.6.3 Condition limite à la base du modèle

À la base du modèle, la condition limite peut être appliquée de deux façons, soit en fixant une température constante ou en appliquant des éléments infinis sous la forme d'un flux de chaleur nul ou géothermique. La première raccourci le temps de modélisation, alors que la seconde représente une condition limite inférieure plus réaliste lorsqu'il est question de représenter l'évolution du régime thermique dans le sol à très long terme (Alfaro *et al.*, 2009). Dans le cas présent, une température constante a été appliquée au modèle puisque la méthode de stabilisation thermique employée vise à conserver la température annuelle nulle. Cette approche est détaillée à la section 5.1. De plus, une analyse de sensibilité a permis d'établir que la frontière inférieure du modèle est assez éloignée de la surface pour que la température d'intérêt à l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure ne soit pas affectée par la condition limite appliquée. Subséquemment, la température du pergélisol à la profondeur d'amplitude annuelle nulle (-2,7 °C) a été fixée à la base du modèle, et ce, comme lors de l'analyse en régime permanent ayant permis d'établir les conditions initiales (section 4.2.5).

4.2.6.4 Stabilisation du modèle

Lors des simulations numériques, une première analyse en régime transitoire est exécutée sur 50 ans. Les résultats sont alors enregistrés à la fin de chaque cycle climatique. Cette analyse permet de vérifier que l'ensemble des solutions du modèle se stabilisent dans le temps considérant les paramètres d'entrées et les conditions limites discutés précédemment. La figure 69 montre bien que les températures enregistrées à

l'interface entre le remblai et le sol sous la pente du remblai se stabilise au bout d'environ 11 ans. En effet, entre 4 000 et 18 250 jours, la solution obtenue varie de moins de 0,05 °C d'une année à l'autre. En profondeur, la même tendance est observée. La variation de température est toutefois encore plus minime étant donné que la condition limite à la base du modèle est une température constante.

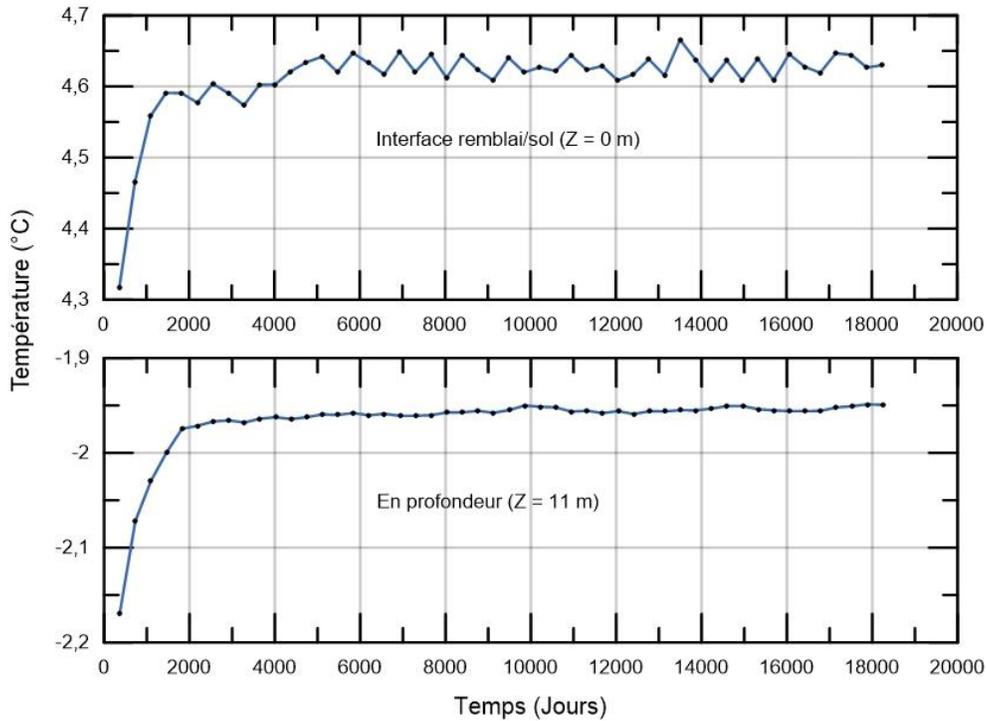


Figure 69 : Temps nécessaires pour la stabilisation des conditions limites du modèle

Le modèle étant considéré stabilisé, une deuxième analyse en régime transitoire est réalisée afin d'enregistrer quotidiennement les solutions obtenues, ce qui correspond à chaque quatre pas de temps.

4.3 Calibration du modèle

Les paramètres, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites du modèle présentés précédemment ont été calibrés en se fiant aux données thermiques enregistrées au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage de Tasiujaq. En plus du câble à thermistance en surface (TAC2597), utilisé pour valider les conditions limites à la section 4.2.6.2, trois forages instrumentés ont été utilisés pour ajuster le modèle en fonction des observations. D'abord, les enveloppes minimale, moyenne et maximale des températures moyennes mensuelles modélisées à 38 m dans le terrain naturel ont été ajustées en fonction des températures moyennes mensuelles mesurées à la station HT304 (figure 70). La comparaison des deux profils de température a permis de calibrer les conditions limites à la surface et les propriétés du sol

pour un terrain non affecté par la présence de l'infrastructure de transport. La figure 70 illustre bien que le modèle a été convenablement calibré dans le terrain naturel. En effet, bien que le modèle surestime de 38 cm l'épaisseur de la couche active, la courbe des températures annuelles moyennes corrèle très bien avec les valeurs mesurées.

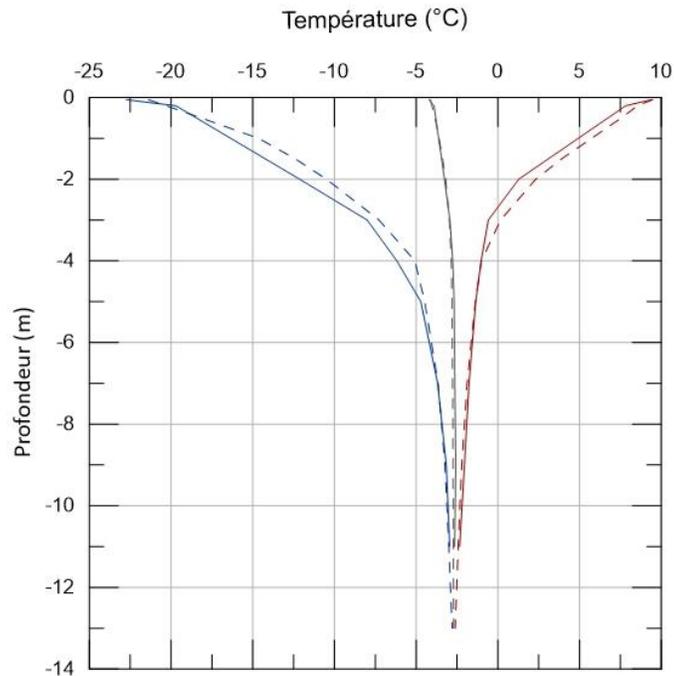


Figure 70 : Comparaison du profil thermique modélisé (traits pointillés) avec le profil thermique mesuré (traits pleins) par le câble à thermistances HT304 dans le terrain naturel

Les propriétés du sol d'infrastructure étant bien ajustées, les conditions limites à la surface du terrain naturel affecté par le remblai ont été vérifiées et calibrées à l'aide des données collectées au pied du remblai par le câble à thermistances TAC2599 (figure 71a). Puis, en comparant les profils thermiques modélisés et mesurés à mi-pente du remblai, les propriétés des matériaux du remblai et les conditions limites le long de la pente ont été calibrées (figure 71b).

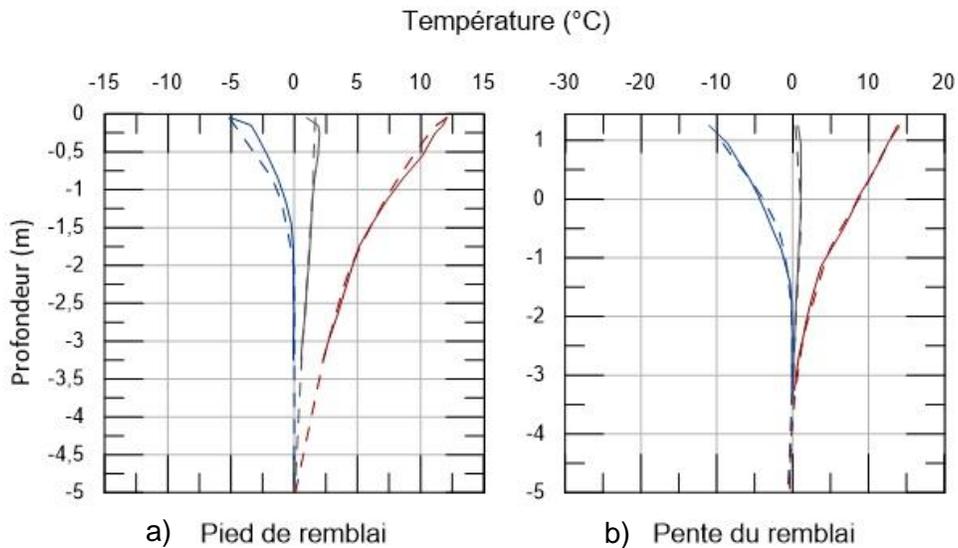


Figure 71 : Comparaison des profils thermiques modélisés (traits pointillés) avec les profils thermiques mesurés (traits pleins) en pied de remblai (TAC2599) et dans la pente du remblai (TAC2598)

Autant au pied du remblai que sous sa pente, les courbes trompettes de la figure 71, réalisées à partir des moyennes mensuelles des températures minimales, maximales et moyennes, montrent que les conditions limites en surface durant la période de gel sont adéquates (traits en bleu). De même, le modèle simule très bien la température maximale annuelle (traits en rouge) et, donc, l'épaisseur de la couche active par extrapolation des données mesurées. Cette information est un paramètre clé lors de la conception d'un remblai d'une infrastructure de transport linéaire (Darrow, 2011). Finalement, les courbes modélisées et mesurées des températures moyennes annuelles (traits gris) montrent aussi que le modèle est bien calibré et représente adéquatement le régime thermique dans le secteur d'intérêt de l'étude. Il est d'autant plus important que la température moyenne annuelle modélisée à l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure soit réaliste étant donné que le gradient thermique entre ce point et la profondeur d'amplitude annuelle nulle est au cœur de l'approche de stabilisation thermique présentée à la section 5.1.

4.4 Impact de la géométrie du remblai

Dans le but d'en évaluer l'impact sur le régime thermique, la géométrie du remblai a été modifiée en diminuant l'angle de la pente du remblai dans le modèle. Conséquemment, la hauteur de neige en est affectée et les conditions limites supérieures doivent être modifiées.

4.4.1 Modification des conditions limites en surface

En appliquant le modèle de Tabler (1994) corrigé, dont il a été question à la section 4.2.6.2, la hauteur de neige calculée n'est pas affectée par le changement d'angle de la pente. Ainsi, la même surface de neige

que pour la géométrie originale du modèle, illustrée par la courbe en pointillée de la figure 67, a été conservée. Une schématisation des conditions limites supérieures pour le modèle ayant une pente adoucie de 6H : 1V est présentée comme exemple à la figure 72.

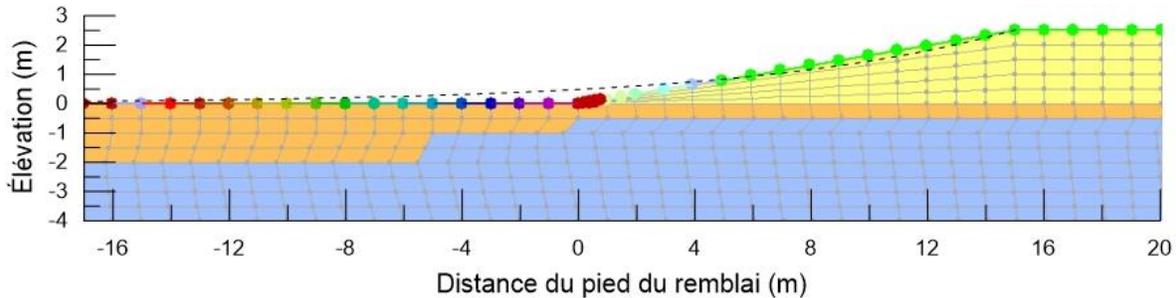


Figure 72 : Schématisation des conditions limites appliquées à la surface du modèle ayant une pente adoucie de 6H : 1V

Cet exemple montre que, dans le cas d'une pente douce de 6H : 1V (17%), il n'y a pas de neige qui s'accumule sur les premiers dix mètres de la portion supérieure de la pente du remblai. Le même facteur n de gel que pour la chaussée y est alors appliqué et l'équation 36 n'est utilisée que pour les cinq derniers mètres de la pente. Vers la frontière sud-est du modèle de la figure 72, la topographie du remblai a un impact sur la répartition de la neige jusqu'à 16 m dans le terrain naturel. Au-delà de ce nœud, le facteur n de gel est constant. Comparativement, l'angle de pente initial du remblai (environ 2H : 1V) avait un impact sur l'épaisseur du couvert neigeux jusqu'à 25 m dans le terrain naturel (figure 67). La même logique est employée pour les géométries intermédiaires.

4.4.2 Validation du modèle

Le modèle étant calibré selon la géométrie du remblai au chaînage 5+515 m de la piste d'atterrissage, où l'angle de la pente originale est légèrement inférieur à 2H : 1V, il est primordial de valider la fiabilité des paramètres du modèle, particulièrement les conditions limites supérieures. Dans le but de vérifier que la répartition du couvert neigeux ainsi que la relation empirique déterminant les facteurs n de gel s'appliquent à une pente adoucie, une simulation a été réalisée pour un remblai ayant une pente de 8H : 1V (13%). Les profils de température minimale, moyenne et maximale obtenus ont été comparés aux données thermiques collectées au milieu de la section d'essai de la pente adoucie (figure 73). Tel que mentionné à la section 2.1.1, les températures sont enregistrées au chaînage 5+205 m, sous la mi-pente du remblai à pente douce, depuis l'instrumentation de la planche d'essais à la fin de l'été 2009 (Ficheur, 2011). L'analyse en régime transitoire a duré 4 ans. Il s'agit du nombre d'années écoulées entre l'adoucisement de la pente et la fin du cycle climatique 2012-2013 dont la température de l'air a été modifiée par le facteur n pour obtenir les conditions limites de surface.

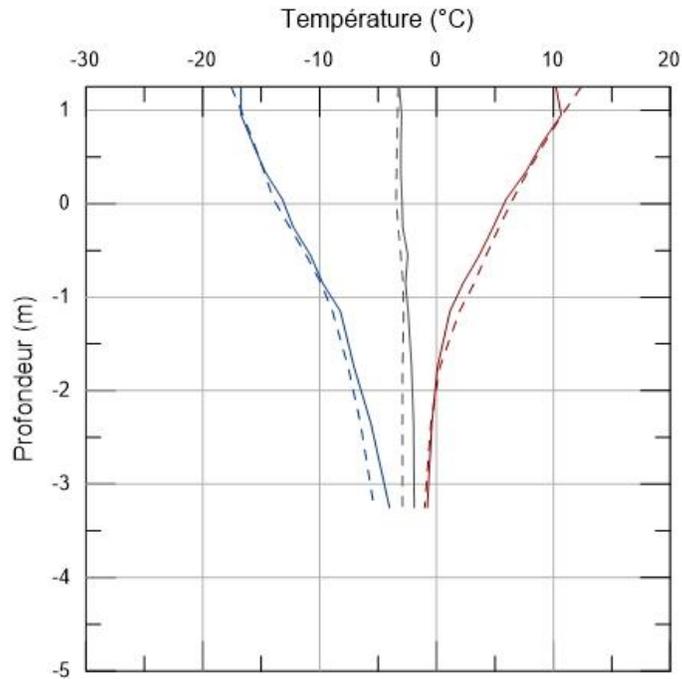


Figure 73 : Comparaison entre les moyennes mensuelles des températures minimales, maximales et moyennes des valeurs simulées et des données collectées à la mi-pente de la section de la pente adoucie d'octobre 2012 à septembre 2013, aéroport de Tasiujaq

Comme le démontre la figure 73, les moyennes mensuelles des températures enregistrées près de la surface correspondent assez bien aux valeurs modélisées. Plus particulièrement, la bonne corrélation entre les températures minimales de surface mesurées et modélisées permet de valider les hypothèses émises quant à la répartition du couvert neigeux et le facteur n associé. De même, les températures obtenues à l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure ainsi que l'épaisseur de la couche active correspondent bien à la réalité. Ainsi, cette simulation reflète que le modèle et ses conditions limites supérieures représentent adéquatement l'effet du couvert neigeux au cours de la période hivernale, et ce, indépendamment de la température de l'air et de l'angle de la pente du remblai. Toutefois, il est important de considérer qu'il s'agit du même site d'essai et de la même hauteur de remblai.

5 Approche de stabilisation thermique

À partir du modèle numérique bidimensionnel calibré et validé, décrit à la section 4, des analyses de transfert de chaleur par éléments finis sont exécutées pour des géométries variées. Plus précisément, l'angle de la pente et la hauteur du remblai sont modifiés d'une simulation à l'autre. La température annuelle moyenne sous la pente à l'interface entre le remblai et le sol naturel est le principal résultat utilisé. Au cours de la présente section, l'approche de stabilisation thermique employée est expliquée. Les résultats des simulations sont ensuite présentés. Pour terminer, un outil de conception, découlant de la relation entre la géométrie du remblai et le gradient thermique dans le sol d'infrastructure, est proposé.

5.1 Correction de la température à l'interface

L'approche de stabilisation thermique proposée est inspirée des travaux de Richard (2018) ainsi que de ceux de Doré et Kong (2019). Celle-ci repose sur l'évaluation du gradient de température entre la profondeur de variation de l'amplitude annuelle nulle et l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure. Dans le premier cas, il s'agit de la température du pergélisol considérée constante. Annuellement, un gradient de température positif peut indiquer que le régime thermique est en transition et que le sol sous le remblai sera porté à se réchauffer dans le futur, menant à la dégradation du pergélisol. Inversement, un gradient de température nul prévient l'induction d'un flux de chaleur positif et signifie généralement que le régime thermique du sol est stable et que le pergélisol sera conservé. L'approche vise donc à déterminer le décalage thermique requis (ΔT_{requis}) pour que le gradient de température dans le sol naturel sous l'infrastructure soit nul. Cette valeur correspond à la différence entre la température à l'interface et celle du pergélisol (équation 37).

$$\Delta T_{requis} = T_{interface} - T_{pergélisol} \quad (37)$$

La température à l'interface entre le remblai et le sol ($T_{interface}$) est obtenue via les analyses numériques de transfert de chaleur. La température utilisée correspond à la moyenne annuelle en degrés Celsius. Quant à la température du pergélisol ($T_{pergélisol}$), Richard (2018) définit ce paramètre comme la température la plus froide enregistrée sous la couche active qui pourrait donc être mesurée au plafond du pergélisol. Toutefois, dans le cadre des présents travaux, $T_{pergélisol}$ correspond plutôt à la température enregistrée ou extrapolée à la profondeur de l'amplitude annuelle nulle, et ce, aussi en degrés Celsius.

Dans leur article, Doré et Kong (2019) introduisent le concept d'une marge de sécurité (MS) afin de tenir compte des changements climatiques pour la durée de vie utile de l'infrastructure. Comme le montre la figure 74, la marge de sécurité à appliquer est proportionnelle à l'augmentation de la température moyenne

annuelle de l'air (TMAA). Cette figure montre aussi que plus le remblai est haut, plus l'impact de l'augmentation de la TMAA sur la température du sol est inhibé.

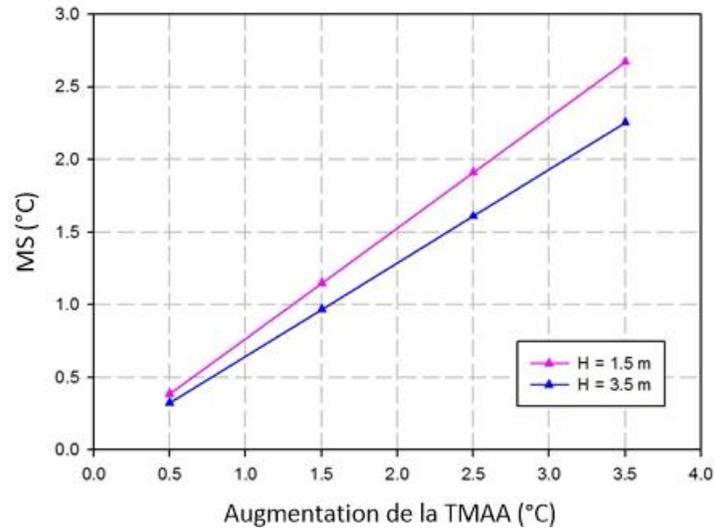


Figure 74 : Marge de sécurité nécessaire en fonction de l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air (TMAA) et de la hauteur du remblai (modifiée de Doré et Kong (2019))

En additionnant la valeur de la marge de sécurité en degrés Celsius au décalage thermique requis, la correction de la température à l'interface nécessaire à la préservation du pergélisol (*CTI*) est obtenue (équation 38).

$$CTI = \Delta T_{requis} + MS \quad (38)$$

Les études mentionnées précédemment utilisent le gradient thermique sous le centre de l'infrastructure ou à mi-pente du talus. Lorsqu'il est question d'accumulation de neige, la problématique est asymétrique et le point névralgique quant à la dégradation du pergélisol se trouve au pied et sous la pente du remblai. Ainsi, la figure 75 résume l'approche de stabilisation thermique sous la forme d'un schéma montrant la pente du remblai où la neige s'accumule préférentiellement.

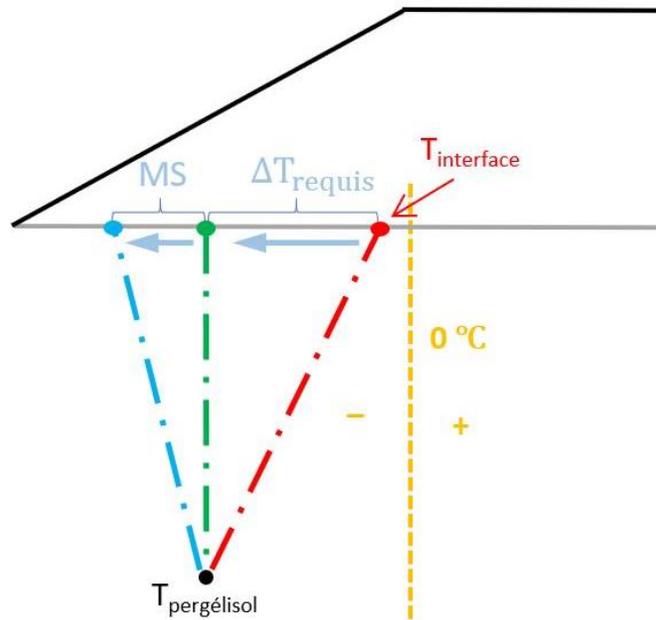


Figure 75 : Schématisation de l'approche de stabilisation employée (modifiée de Doré et Kong, 2019)

En rouge, la température à l'interface est inférieure à 0 °C, mais le gradient de température dans le sol naturel est positif. Le régime thermique dans le sol d'infrastructure est alors considéré instable et l'intégrité du remblai est menacée. En décalant, la température à l'interface d'une valeur de ΔT_{requis} , le gradient de température devient nul et le régime thermique, illustré par le trait vert, tend à se stabiliser. Pour que cet équilibre thermique perdure pendant toute la durée de vie de l'infrastructure, la température moyenne annuelle à l'interface est encore décalée selon la marge de sécurité dictée par les prédictions de modèles climatiques. Le régime thermique qui en résulte est schématisé en bleu à la figure 75. Le gradient de température associé est maintenant négatif et contribue à maintenir ou même, à court terme, à diminuer la température du pergélisol.

5.2 Résultats des simulations

Conséquemment aux variations de la géométrie du modèle, les conditions limites à la surface sont modifiées conformément à la procédure décrite à la section 4.4.1. Ainsi, des simulations ont été réalisées pour une gamme d'angle de pentes adoucies, variant de la pente originale d'environ 2H : 1V à une pente douce de 7H : 1V. Des exemples de résultats de cette analyse sont présentés aux figures suivantes.

La figure 76 montre les résultats de l'analyse en régime transitoire pour la géométrie originale du remblai en date du 15 mai. En raison du déphasage de la température du sol par rapport à celle de l'air, un

maximum de chaleur est extrait du sol d'infrastructure à ce moment du cycle climatique. Bien que la couche active soit alors gelée jusqu'à la surface, un bulbe de chaleur persiste sous la pente et au pied du remblai. Ainsi, une portion du sol naturel reste dégelée toute l'année selon le modèle. Cette observation est confirmée par les températures mesurées au site d'essai par les deux câbles à thermistances dont la position est illustrée par des traits noirs à la figure 76.

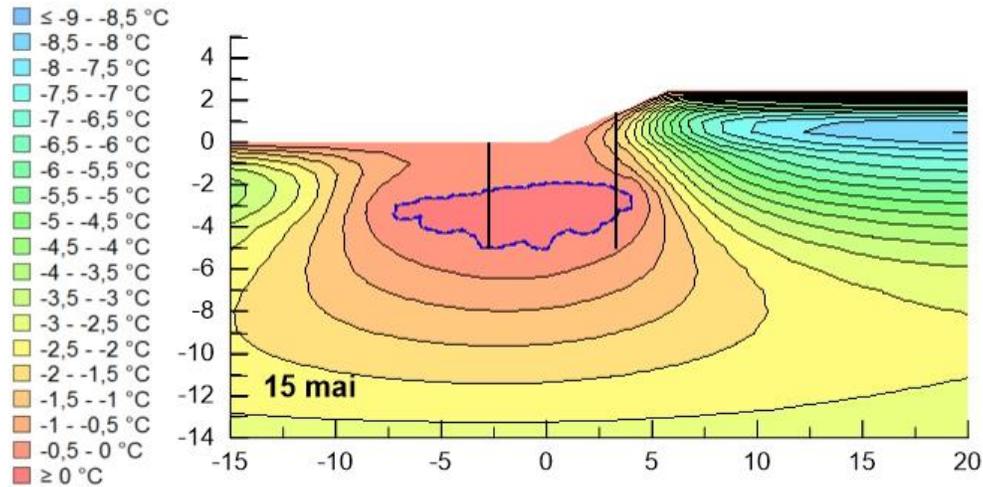


Figure 76 : Résultat du modèle en date du 15 mai pour la géométrie originale du remblai (environ 11H : 5V)

Selon le modèle mis au point, une pente adoucie de 6H : 1V (17%) est nécessaire pour éliminer le bulbe de chaleur observé à la mi-mai. Les résultats de cette simulation sont présentés à la figure 77 qui montre que l'entièreté du sol et du remblai sont gelés jusqu'à la surface à pareille date.

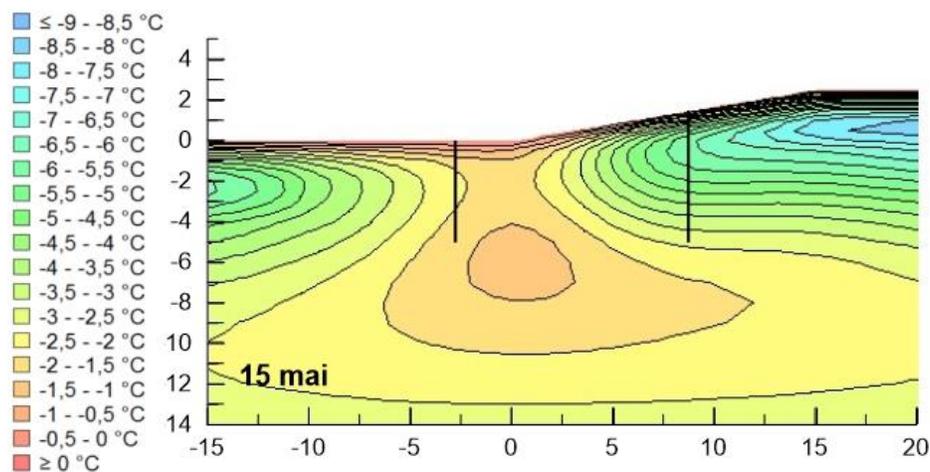


Figure 77 : Résultat du modèle en date du 15 mai pour la géométrie d'une pente adoucie de 6H : 1V

La figure 78 montrent les profils des températures mensuelles moyennes (gris), minimales (bleu) et maximales (rouge) des deux simulations décrites ci-haut. Les traits pleins et pointillés illustrent respectivement les résultats pour la pente originale du remblai et pour un remblai ayant une pente adoucie de 6H : 1V. Les deux graphiques montrent bien le décalage des profils thermiques vers des températures plus basses associé à l'adoucisement de la pente. Le rehaussement de la couche active au pied du remblai est frappant et représente probablement la disparition du bulbe de sol non gelé (figure 78a).

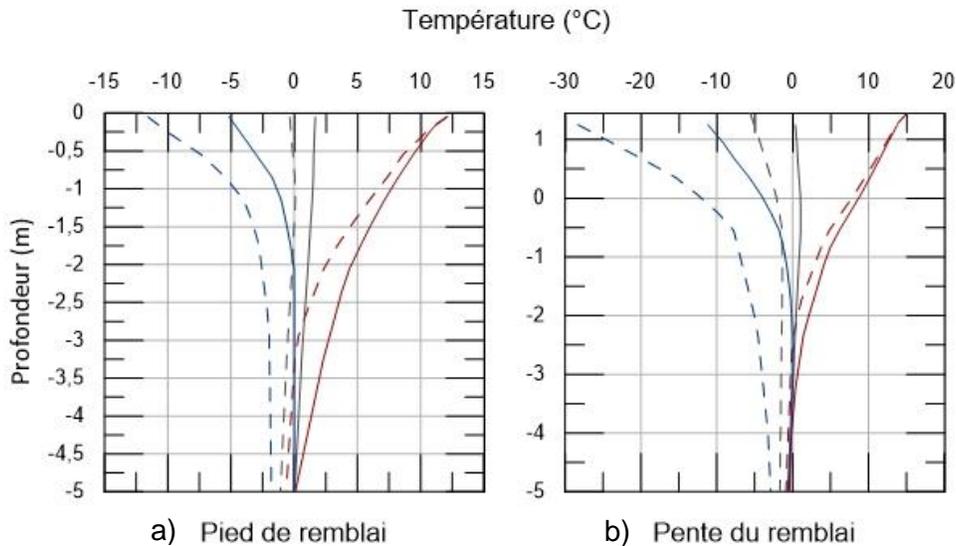


Figure 78 : Décalage des enveloppes de températures de la pente originale de 11H : 5V (traits pleins) à celles d'un remblai ayant une pente de 6H : 1V (traits pointillés)

Le profil thermique de la figure 78b se situe au centre de la pente du remblai, soit le point d'intérêt de l'approche de stabilisation décrite à la section précédente. Sans surprise, les profils de températures moyennes ne sont pas rectilignes tel que schématisé à la figure 75. Considérant que la température du pergélisol à la base du modèle est de $-2,7\text{ °C}$ et que la température annuelle moyenne à l'interface est de $1,38\text{ °C}$, le gradient de température pour la géométrie originale du remblai est positif. Tel qu'obtenu à l'exemple de calcul ci-dessous, ce dernier est de $0,30\text{ °C/m}$.

$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_{interface} - T_{pergélisol}}{z_{interface} - z_{pergélisol}} = \frac{1,38\text{ °C} - (-2,7\text{ °C})}{0 - (-13,5\text{ m})} = 0,30\text{ °C/m} \quad (39)$$

Dans le cas d'une pente adoucie de 6H : 1V, la température annuelle moyenne à l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure obtenue par analyse numérique est de $-2,14\text{ °C}$. En appliquant l'équation 39, le gradient de température calculé est de $0,04\text{ °C/m}$. Ainsi, bien que le bulbe de sol non gelé ne soit plus existant (figure 77), le gradient de température est encore légèrement positif et, à long terme, la

préservation du pergélisol ne peut être assurée. Toutefois, à court et moyen terme, le sol en surface tend à se refroidir tel que le montre le rehaussement de la couche active d'environ 1,5 m (figure 78b).

5.3 Outil de conception

Les analyses numériques réalisées ont permis de quantifier l'effet d'une pente adoucie sur le régime thermique du sol d'infrastructure. Afin de rendre accessibles ces résultats, le présent document propose un outil de conception se basant sur l'approche de correction de la température à l'interface discutée à la section 5.1. Ainsi, tel qu'évoqué précédemment, la variable déterminante tirée des simulations numériques est la température moyenne annuelle obtenue à l'interface entre le remblai et le sol, et ce, au centre de la pente du remblai. À partir de ces valeurs et de la température du pergélisol, le décalage thermique dans le sol naturel requis a été calculé. Ce paramètre est exprimé en fonction de la pente du remblai à la figure 79.

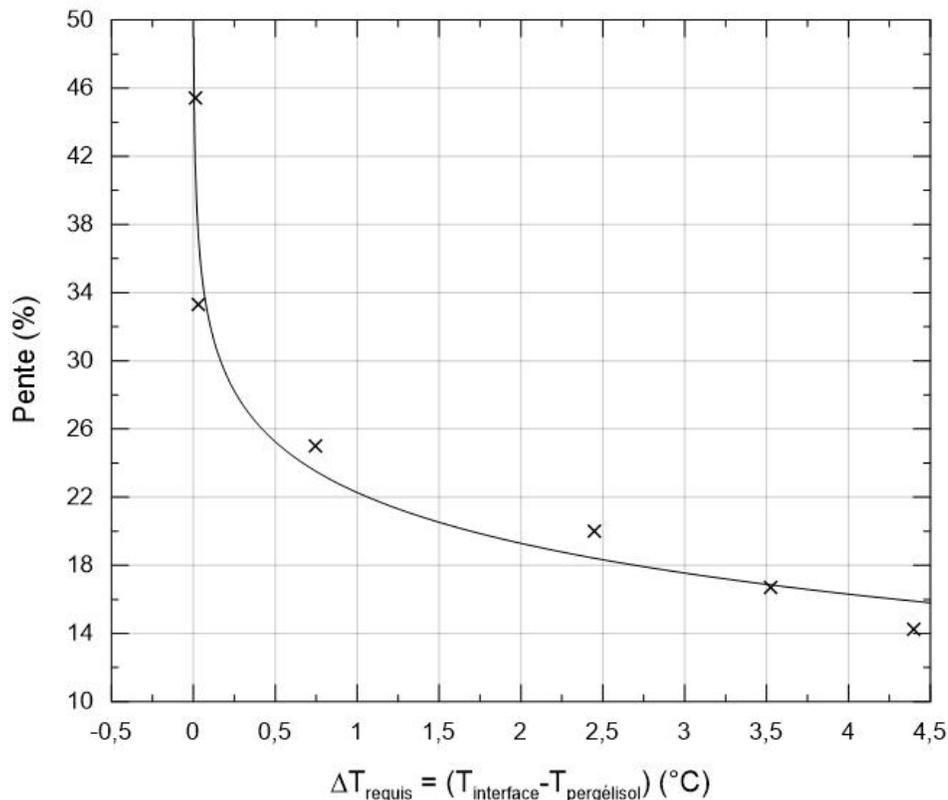


Figure 79 : Pente du remblai permettant d'atteindre le décalage thermique dans le sol naturel requis (ΔT_{requis})

À la figure 79, chacune des données représente un décalage thermique associé à une pente variant de 11H : 5V (45%) à 7H : 1V (14%). La pente du remblai est exprimée en pourcentage suivant le ratio entre

la hauteur du remblai ($H_{remblai}$) et sa largeur ($l_{remblai}$) (équation 40). Ainsi, un remblai de 6H : 1V correspond à une pente de 17 %.

$$pente = 100 \times \frac{H_{remblai}}{l_{remblai}} \quad (40)$$

La courbe à la figure 79 représente une fonction logarithmique qui permet d'extrapoler la relation entre les résultats ponctuels découlant des simulations. Cette régression prédit assez bien les résultats des simulations puisque le coefficient de détermination est de 0,94 et l'erreur type de la pente est de 3,03. Cette dernière est jugée acceptable considérant l'ordre de grandeur de la pente en pourcentage. L'équation associée à cette fonction est présentée ci-dessous.

$$pente (\%) = -4,32 \ln(\Delta T_{requis}) + 22,27 \quad (41)$$

À l'équation 41, la pente est obtenue en pourcentage et le décalage de température requis (ΔT_{requis}) est en degrés Celsius. L'application d'une fonction logarithmique montre bien que plus l'angle du talus est faible, plus l'impact d'une pente adoucie sur la température à l'interface est important. En effet, au-delà d'une pente de 25 % (4H : 1V), le décalage thermique obtenu est minime. Toutefois, pour des pentes plus faibles que 25 %, le décalage thermique est notable. L'abaque de conception proposé par Doré et Kong (2019) qui établit une relation entre la pente et la correction de la température à l'interface associée au centre de la pente du remblai est similaire. La figure 80 montre la similitude entre les résultats de Doré et Kong (2019) et de la courbe logarithmique présentée à l'équation 41. Il est évident que la tendance générale des deux courbes est très similaire. En effet, pour une correction de la température à l'interface (CTI) de 0,11 °C ou plus, la différence entre les pentes du remblai varie de moins de 5 % d'une étude à l'autre, jusqu'à être quasiment identique pour une CTI de 4,5 °C.

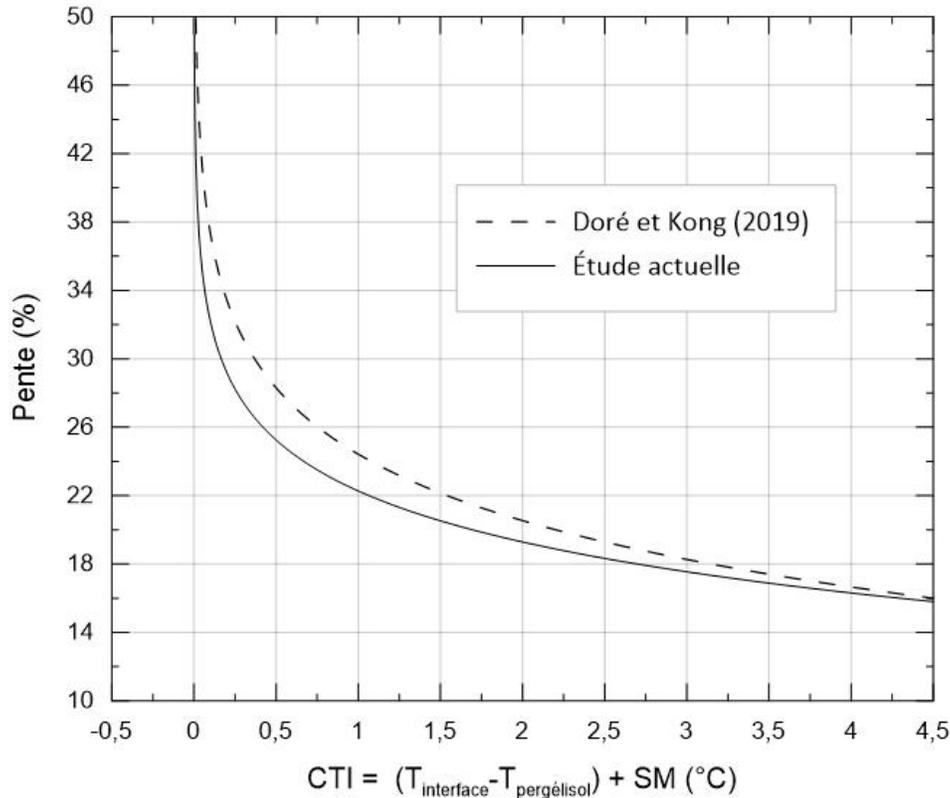


Figure 80 : Comparaison avec l'abaque de conception proposé par Doré et Kong (2019)

5.3.1 Application du modèle

En se basant sur l'approche de correction de la température à l'interface, le ΔT_{requis} à la piste d'atterrissage de Tasiujaq est de $4,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ (équation 42).

$$\Delta T_{requis} = T_{interface} - T_{pergélisol} = 1,38\text{ }^{\circ}\text{C} - (-2,70\text{ }^{\circ}\text{C}) = 4,08\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (42)$$

En se reportant à la figure 79, pour que le gradient de température soit nul, une pente de 6H : 1V n'est pas tout à fait suffisante tel que discuté à la section 5.2. En posant $4,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ comme valeur de décalage thermique requis dans l'équation 41, une pente de 16,2 % est obtenue (équation 43).

$$pente\ (\%) = -4,32 \ln(4,08\text{ }^{\circ}\text{C}) + 22,27 = 16,2\ \% \quad (43)$$

Cette valeur est légèrement inférieure à une pente de 6H : 1V, et ce, sans considérer l'ajout d'une marge de sécurité. En effet, en supposant, par exemple, une marge de sécurité de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la CTI atteint $6,08\text{ }^{\circ}\text{C}$. soit environ une pente de 7H : 1V (14%).

5.3.2 Effet de la hauteur du remblai

Tel qu'indiqué précédemment, des analyses numériques ont aussi été réalisées dans le but d'évaluer l'impact de la hauteur du remblai. À cette fin, des simulations considérant des remblais de 1,5 m et de 3,5 m de hauteur ont été effectuées pour la même gamme d'angles de pente que dans le cas de la hauteur originale du remblai de 2,5 m. De ces résultats, des courbes logarithmiques mettant en relation la pente en pourcentage et la correction de la température à l'interface ont aussi été déduites (figure 81). Le tableau 9 présentent des indicateurs statistiques illustrant la capacité des relations logarithmiques à prédire les données modélisées pour chaque hauteur de remblai. Ces statistiques de régression montrent que les résultats pour les simulations où le remblai est de 1,5 et 3,5 m de hauteur sont encore mieux représentés par les courbes de la figure 81 que dans le cas d'un remblai de 2,5 m de hauteur pour lequel la régression était déjà satisfaisante.

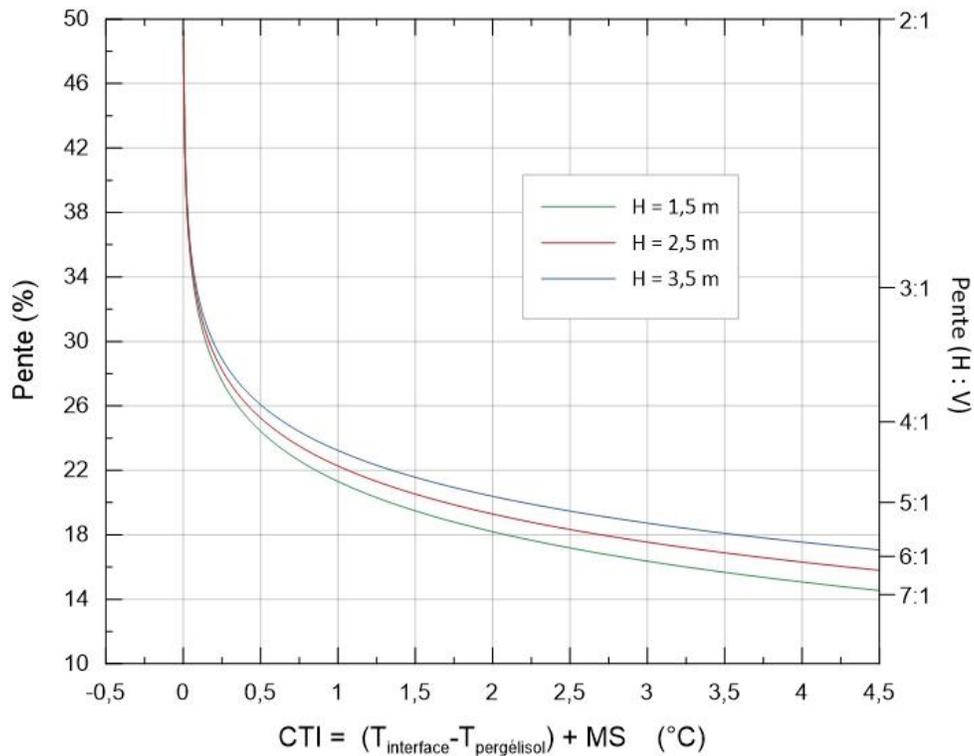


Figure 81 : Abaque de conception en fonction de la hauteur du remblai

Tableau 9 : Statistiques des régressions pour les trois hauteurs de remblai

Hauteur de remblai	1,5 m	2,5 m	3,5 m
Coefficient de détermination	0,96	0,94	0,99
Erreur type	2,58	3,03	0,46

La figure 81 dégage une tendance générale montrant que l'épaississement du remblai augmente l'angle de la pente requis pour obtenir une même correction de la température à l'interface. Cette observation supporte le fait que l'augmentation de la hauteur du remblai assure une remontée de la couche active et donc un refroidissement de la température sous le remblai. Néanmoins, la hauteur du remblai a peu d'effet pour des *CTI* s'approchant de 0 °C. Inversement, plus la correction de la température à l'interface augmente, plus l'effet de la hauteur du remblai est significatif. Par exemple, pour obtenir une *CTI* de 4,5 °C, des pentes de 14,5 % et de 16,7 % sont requises dans les cas respectifs d'un remblai de 1,5 m et de 3,5 m de hauteur. Bien qu'apparaissant plutôt mince, il s'agit de la différence entre une pente de 7H : 1V d'une pente de 6H : 1V.

Des régressions linéaires ont permis d'associer entre eux les paramètres des équations logarithmiques pour les trois hauteurs de remblai. En remplaçant ces deux expressions dans l'équation 41, il est possible de généraliser cette relation en exprimant la pente en fonction de la correction de la température à l'interface et de la hauteur du remblai (équation 44).

$$pente (\%) = (0,2H - 4,8067) \ln(CTI) + 0,96H + 19,87 \quad (44)$$

6 Discussion

6.1 Limitations et recommandations

La construction de remblais à pente douce assure la stabilisation thermique des infrastructures de transport linéaires construites sur le pergélisol. Bien qu'il s'agisse d'une méthode de mitigation plutôt simple ne demandant pas de matériel technique, cette approche présente des limitations au niveau des coûts reliés à la disponibilité et à la mise en place d'importantes quantités de matériel de remblai. L'estimation des coûts associés ne faisait pas l'objet du présent projet de recherche. Dans le futur, il serait pertinent d'évaluer les coûts engendrés par les matériaux de remblai additionnels et de les comparer aux coûts reliés aux travaux de maintenance advenant l'absence de méthode de mitigation.

6.1.1 Instrumentation

Le transect instrumenté à la piste d'atterrissage de Tasiujaq a permis de documenter l'évolution du couvert neigeux en continu durant un hiver complet. La hauteur de neige au pied du remblai a été mesurée à un point fixe à l'aide de thermistances le long d'un axe vertical. Pour chaque senseur, la présence ou l'absence de neige a été déterminée en se basant sur les propriétés isolantes de la neige et la réduction de l'amplitude thermique quotidienne résultante. Cette simple prise de mesure s'est montrée efficace et tout indiquée pour surveiller le développement et le déclin du manteau neigeux à un site éloigné comme la piste d'atterrissage de Tasiujaq. Néanmoins, en rétrospective, il aurait été pertinent de connaître la hauteur de neige pour plusieurs points le long du transect de façon à mieux comprendre la répartition du couvert neigeux le long de la pente du remblai. Dans cet ordre d'idées, l'installation d'un capteur à ultrason aurait permis de mesurer la hauteur de neige pour une zone de détection longue et étroite. Certains appareils disponibles sur le marché offrent une portée jusqu'à 10 m et une résolution de ± 1 cm. Les valeurs obtenues auraient aussi pu confirmer ou infirmer l'évolution du couvert neigeux mesurée par les capteurs de températures le long de l'axe vertical. L'occurrence du manteau neigeux le long du transect a toutefois pu être établie à l'aide du câble à thermistances se trouvant à la surface du sol. À cette fin, il s'agissait d'une instrumentation adéquate. Toutefois dans le but de mesurer la température du sol en surface, les thermistances auraient dues être légèrement enfouies sous la surface. En effet, comme les thermistances sont recouvertes d'une gaine blanche possédant un albédo plus élevé que les matériaux de remblai ou que le sol naturel, la fraction de rayonnement incident absorbé est plus faible et, conséquemment, la température enregistrée est sous-estimée. Cette omission affecte particulièrement les températures mesurées en l'absence de neige.

En ce qui a trait à la mesure du régime thermique dans le sol, il aurait été pertinent que les capteurs de températures atteignent la profondeur de variation d'amplitude annuelle nulle dans le sol naturel et sous le remblai. Cette mesure aurait complexifié la mise en place de l'instrumentation, mais aurait évité d'extrapoler la température du pergélisol utilisée lors de l'approche de la correction de la température à l'interface.

Globalement, l'instrumentation de la piste d'atterrissage de Tasiujaq reposant exclusivement sur des capteurs de température reliés à une seule station d'enregistrement s'est révélée une bonne solution. Les câbles à thermistances et la station d'acquisition des données du fabricant BeadedStream sont adaptés au climat froid et rigoureux des régions nordiques et sauront perdurer à long terme. De plus, le système d'acquisition D405 est muni d'une connexion satellite Iridium qui permet la transmission des données en temps réel. Cette fonction s'est montrée hautement utile dans le cadre de la présente étude, mais aussi pour les hivers subséquents et futurs. En effet, l'instrumentation est toujours en place au site d'essai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq et les données peuvent encore être téléchargées sur n'importe quelle connexion internet. Puisqu'il s'agit d'un système télémétrique bidirectionnel, les fréquences de prise de mesure, de l'enregistrement et de la transmission des données peuvent toutes être adaptées selon le besoin de projets de recherche ultérieurs ou simplement du suivi du site expérimental. Dans le futur, il est d'ailleurs recommandé d'effectuer la prise de données à chaque heure plutôt qu'aux deux heures.

6.1.2 Modèle géothermique

Le modèle géothermique produit dans le cadre de ce mémoire est bidimensionnel. Considérant la continuité linéaire d'une piste d'atterrissage ou d'une route, la représentation d'un transect semble tout indiquée pour illustrer de façon simplifiée la problématique d'accumulation de neige préférentielle le long du remblai. L'hypothèse est donc posée que pour un même côté du remblai, la répartition spatiale du couvert neigeux est la même que celle simulée le long du transect modélisé. De plus, le modèle est asymétrique puisqu'une des limites latérales se trouve au centre du remblai. L'hypothèse d'un flux de chaleur nul a été posée pour cette limite et l'impact du régime thermique de l'autre moitié du remblai a été jugé négligeable. Une étude plus poussée pourrait permettre de mieux comprendre l'interaction à cette limite en modélisant l'entièreté du remblai ou en appliquant un flux de chaleur négatif représentatif.

Comme la majorité des modèles numériques simulant l'effet du couvert neigeux sur le régime thermique d'une infrastructure de transport, la condition limite supérieure du modèle est établie en appliquant un facteur n à la température de l'air. Dans le cas du présent modèle, le facteur n appliqué considère toutefois une variation logarithmique empirique qui est fonction de la hauteur de neige. Néanmoins, la relation utilisée pour déterminer la température à la surface est basée sur les données collectées à un seul site

d'essai, et ce, pour uniquement un hiver. De ce fait, le suivi d'autres sites d'essais présentant une problématique d'accumulation de neige sur une plus longue période de temps, conjointement à une analyse statistique plus développée, permettrait d'évaluer la robustesse du modèle logarithmique. Il en va de même pour le modèle de Tabler (1994) utilisé pour établir la répartition du couvert neigeux. De plus, la condition limite supérieure ne tient pas compte de l'accumulation progressive du couvert neigeux puisque le facteur n découlant de la relation empirique est calculé à partir de la hauteur de neige maximale et est appliquée instantanément dès que la température de l'air est inférieure à 0 °C. Une amélioration à apporter au modèle consisterait à faire varier le facteur n temporellement en plus de spatialement comme c'est déjà le cas.

Quant à la limite inférieure du modèle, elle correspond à la température à la profondeur de variation d'amplitude annuelle nulle sous le remblai. Cette dernière provient toutefois d'une extrapolation et n'a pu être confirmée tel qu'évoqué à la section précédente.

Le modèle géothermique développé repose sur les transferts de chaleur par conduction et néglige les transferts de chaleur dus à la convection. Dans le cas de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, il s'agit d'une hypothèse valable étant donné le remplissage des vides entre les matériaux de remblai par des particules fines. Néanmoins, pour un remblai composé de matériaux grossiers bien triés où un important transfert de chaleur par convection est attendu, le modèle faillirait à simuler l'impact de cet échange de chaleur sur les propriétés du couvert neigeux ainsi que sur le régime thermique dans le remblai. Dans le futur, une analyse de sensibilité visant à quantifier le rôle de la convection sur la température à la surface du remblai et à l'interface avec le sol permettrait de comprendre si le modèle actuel s'applique bien à des situations où de la convection se produit dans le remblai. Cela est particulièrement vrai pour vérifier l'effet de la convection forcée par le vent, et ce, principalement à la surface du remblai. En effet, malgré l'exposition significative au vent de la piste d'atterrissage de Tasiujaq, les transferts de chaleur par convection forcée sont négligés dans le modèle. Leur impact sur la température à la surface est toutefois artificiellement simulé par les facteurs n .

6.1.3 Approche de stabilisation thermique

L'approche de stabilisation thermique proposée repose sur l'utilisation d'une correction de la température à l'interface visant à modifier le gradient thermique dans le sol d'infrastructure. L'outil de conception en découlant fournit des balises quant à l'angle de la pente du remblai assurant la préservation du pergélisol pour une hauteur de remblai donnée. Il s'agit d'une méthode simple permettant de faciliter l'utilisation des résultats de ce projet de recherche dans un contexte d'ingénierie appliquée.

Cette approche néglige toutefois le changement des propriétés du sol d'infrastructure en fonction de la profondeur de la couche active. En effet, le profil des températures moyennes annuelles n'est pas rectiligne et est caractérisé par un « thermal offset » plus ou moins marqué en fonction du ratio entre les conductivités thermiques du sol gelé et non gelé. Lorsque la conductivité thermique du sol non gelé est significativement plus faible que celle du sol gelé, comme dans le cas d'un sol ayant une grande teneur en eau, un important décalage thermique peut contribuer à la dégradation du pergélisol bien que la température à l'interface entre le sol et le remblai soit inférieure à 0 °C. Néanmoins, si la température moyenne annuelle à l'interface est la même que celle du pergélisol, le bilan thermique annuel sera nul même si la température du sol entre l'interface et la profondeur d'amplitude annuelle nulle est plus chaude que celle du pergélisol.

De plus, tel qu'expliqué précédemment, l'approche de stabilisation thermique est basée sur la correction de température à un seul point se trouvant à l'interface entre le remblai et sol d'infrastructure au centre de la pente. Bien que cette approche soit justifiée au centre d'un large remblai où il convient de procéder à une analyse thermique uni-dimensionnelle, elle présente certaine limitation dans le cas d'une problématique asymétrique. En effet, tel qu'illustré par les résultats des simulations, le couvert neigeux accumulé en bordure d'une infrastructure de transport a un effet bi-dimensionnel sur le régime thermique dans le remblai et le sol sous-jacent. Ainsi, il serait intéressant de comparer les résultats de l'étude actuelle à une approche de stabilisation basée sur l'intégration transversale des profils de température sur l'ensemble de la zone d'influence du couvert de neige. Néanmoins, il est important de rappeler que bien que l'approche de stabilisation thermique soit uni-dimensionnelle, la correction à l'interface est obtenue via des analyses numériques bi-dimensionnelles où la condition limite supérieure prend en considération la variation spatiale du couvert neigeux suivant la pente du remblai.

À l'automne 2018, le Ministère des Transports du Québec a complété des travaux de réfection afin d'adoucir les pentes de talus de part et d'autre du remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq. Les talus ont été modifiés de façon à obtenir des pentes de 6H : 1V ou de 7H : 1V. L'instrumentation mise en place dans le cadre du présent projet de recherche a été soigneusement conservée, et même améliorée. En effet, en plus d'enterrer légèrement le câble à thermistances à la surface du sol, des points de mesure de la hauteur de neige ont été ajoutés le long du transect à l'étude et pour d'autres transect autour de la piste d'atterrissage. Les données collectées le long du transect expérimental sont toujours transmises via une connexion satellite. Leur suivi permettra de valider l'approche de stabilisation thermique ainsi que l'outil de conception proposé, et ce, à court et long terme.

6.2 Considérations pour l'application

En considérant les limitations énoncées précédemment, ce projet de recherche présente une méthode valable de stabilisation thermique des infrastructures de transport linéaires lorsque la dégradation du pergélisol est principalement causée par une accumulation de neige préférentielle. Cette approche de conception est applicable essentiellement pour des infrastructures se trouvant dans des régions nordiques où la végétation arctique et la topographie permet le transport de la neige par le vent et où l'orientation des vents dominants par rapport au remblai favorise l'accumulation de neige le long du talus sous le vent.

L'outil de conception a aussi le mérite d'être simple, puisque seulement deux paramètres doivent être connus, soit la température du pergélisol et celle à l'interface entre le remblai et le sol d'infrastructure. Dans le cas d'un remblai déjà existant, il est possible de mesurer ces deux variables à l'aide d'une série de capteurs de température le long d'un axe vertical au centre du talus. En vue de la construction d'une infrastructure de transport, la température du pergélisol peut être mesurée à l'emplacement du futur ouvrage, ou encore déduite d'un site similaire se trouvant à proximité. Toutefois, la présence d'un remblai doit être simulée pour obtenir la température à l'interface. Contrairement aux simulations discutées dans ce mémoire, une augmentation exponentielle du pas de temps devrait être appliquée pour représenter l'évolution du régime thermique du sol à partir du moment où le remblai est construit.

Conclusion

L'objectif général de ce mémoire était de présenter une méthode de conception visant la stabilisation thermique des infrastructures de transport linéaires construites sur le pergélisol en optimisant la géométrie du remblai de façon à prendre en compte l'accumulation de neige préférentielle. À cette fin, la piste d'atterrissage de Tasiujaq, au Nunavik, présentait une bonne étude de cas puisque l'accumulation de neige préférentielle y est reconnue comme étant la principale cause de dégradation du pergélisol.

L'instrumentation du site d'essai de Tasiujaq a fourni des données fiables sur le régime thermique dans le sol le long d'un transect perpendiculaire au remblai au cours d'un cycle climatique complet. L'évolution du couvert neigeux a été mesurée en continu au pied du remblai à l'aide de capteurs de température le long d'un axe vertical. Pour chaque senseur, la présence ou l'absence de neige a été déterminée en se basant sur les propriétés isolantes de la neige et la réduction de l'amplitude thermique quotidienne résultante. Suivant la même logique, des capteurs de température à la surface du sol ont permis de déterminer l'occurrence et la répartition du couvert neigeux le long du talus et dans le terrain naturel.

À partir du traitement des données, une relation empirique entre la hauteur du couvert neigeux et la différence de température entre la surface du sol et l'air a été établie. Cette tendance est exprimée par une fonction logarithmique et montre qu'à partir d'une hauteur de neige critique de 40 cm l'effet de l'épaississement du couvert nival sur la température à la surface du sol diminue significativement. Cette observation vient appuyer les conclusions d'études antérieures. En exprimant plutôt la différence de température par le ratio de l'indice de gel du sol sur l'indice de gel de l'air, l'évolution du facteur n de gel a pu être exprimée en fonction de la hauteur de neige suivant toujours une fonction logarithmique.

Ce modèle empirique a servi de condition limite à la surface du modèle numérique bidimensionnel réalisé via le logiciel d'analyse numérique par éléments finis TEMP/W afin de simuler adéquatement l'effet du couvert neigeux sur le sol sous-jacent, et ce, dans le talus et au pied du remblai. Le modèle a été calibré en comparant le régime thermique modélisé aux données recueillies au site d'essai de Tasiujaq. Dans le but de valider la fiabilité du modèle, une simulation a été complétée pour un remblai ayant une pente de 8H : 1V (12,5 %). En comparant les résultats obtenus aux données thermiques collectées au milieu de la section d'essai de la pente adoucie construite en 2007, il est possible d'en conclure que le modèle et ses conditions limites supérieures représentent adéquatement l'effet du couvert neigeux au cours de la période hivernale, et ce, indépendamment de la température de l'air et de l'angle de la pente du remblai. Toutefois, il est important de considérer qu'il s'agit du même site d'essai et de la même hauteur de remblai.

Des simulations ont été effectuées pour des pentes de talus variant de 11H : 5V à 7H : 1V, soit de 45 % à 14 %. Pour chacune de ces inclinaisons de pente, les simulations ont été réalisées pour trois hauteurs de remblai, soit 1,5, 2,5 et 3,5 m. Dans le cas de la hauteur originale du remblai de 2,5 m, une pente adoucie de 6H : 1V était nécessaire pour, qu'après plusieurs années de simulation, l'entièreté du sol d'infrastructure regèle au cours d'un cycle climatique. De plus, les résultats ont permis de quantifier l'impact de la géométrie du remblai sur le gradient de température dans le sol d'infrastructure. Ce dernier est calculé à partir de la température à l'interface entre le remblai et le sol et celle à la profondeur de variation d'amplitude annuelle nulle, considérée constante. Suivant l'approche de la correction de la température à l'interface, un gradient de température nul ou négatif est visé afin de préserver le pergélisol. Un tel régime thermique est obtenu en corrigeant la température à l'interface. Les analyses numériques ont permis de conclure que l'angle de la pente du talus en pourcentage varie selon une expression logarithmique en fonction du décalage thermique obtenu lors des simulations. Ainsi, plus l'angle du talus est faible, plus l'impact d'une pente adoucie sur la température à l'interface est important. Quant à la hauteur du remblai, son accroissement augmente l'angle de la pente requise pour obtenir une même correction de la température à l'interface. Ultiment, ces conclusions sont quantifiées sous la forme d'un outil de calcul de l'angle de la pente requis pour assurer la stabilité thermique d'un ouvrage en fonction de l'épaisseur du remblai pour des sites où le vent et l'orientation favorise l'accumulation de neige.

Bibliographie

- Alfaro, M. C., Ciro, G. A., Thiessen, K. J. et Ng, T. (2009) Case Study of Degrading Permafrost beneath a Road Embankment. *Journal of Cold Regions Engineering*, vol. 23, n°3, p. 93-111.
- Allard, M. (2016) Notions de base sur le pergélisol et Impacts des perturbations écologique et anthropiques sur le pergélisol. Chapitres 1 et 2 du guide de construction de la société d'Habitation du Québec.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Chaumont, D., Savard, J. P. et Tarussov, A. (2007) L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. Québec.
- Allard, M., Sarrazin, D. et Roger, J. (2013) Monitoring des thermistances - collecte et interprétations des données: aéroports de Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqtac, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq (Vol. 1). Québec.
- Andersland, O. B. et Anderson, D. M. (1978) *Geotechnical Engineering for Cold Regions*. New-York : McGraw-Hill.
- Andersland, O.B. et Ladanyi, B. (2004) *An Introduction to Frozen Ground Engineering*. New York : Chapman and Hall.
- Andersland, Orlando B. et Ladanyi, B. (2004) *Frozen Ground Engineering Second Edition*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons.
- Bartelt, P. et Lehning, M. (2002) A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part I : numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 35, p. 123-145.
- Beaulac, I. (2006) Impacts de la fonte du pergélisol et adaptations des infrastructures de transport routier et aérien au Nunavik. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec.
- Brown, R. J. E. (1970) *Permafrost in Canada: Its Influence on Northern Development*. Toronto : University of Toronto Press.
- Centre d'études nordiques (2011) *Excel instrumentation*.
- Comité Associé de Recherches Géotechniques (1988) *La terminologie du pergélisol et notions connexes*. Ottawa : Conseil national de recherches du Canada.
- Côté, J. et Konrad, J.-M. (2005) A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, n°2, p. 443-458.
- Darrow, M. M. (2011) Thermal modeling of roadway embankments over permafrost. *Cold Regions*

- Science and Technology, vol. 65, n°3, p. 474-487.
- de Pablo, M. A., Ramos, M. et Molina, A. (2017) Snow cover evolution, on 2009-2014, at the Limnopolar Lake CALM-S site on Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica. *Catena*, vol. 149, n°October, p. 538-547.
- Dominé, F., Bock, J., Morin, S. et Giraud, G. (2011) Linking the effective thermal conductivity of snow to its shear strength and density. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 116, n°4, p. 1-10.
- Doré, G. et Beaulac, I. (2007) Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptation. Québec.
- Doré, G. et Burn, C. (2014) Notes du cours Advanced course on permafrost engineering applied to transportation infrastructure. Whitehorse : Yukon College.
- Doré, G. et Kong, X. (2019) Thermal Stabilization of Embankments Built on Thaw Sensitive Permafrost. *Cold Regions Science and Technology* (sous presse).
- Doré, G. et Zubeck, H. K. (2009) *Cold Regions Pavement Engineering*. Reston, Virginia : ASCE Press.
- Dumais, S. (2014) Évaluation des revêtements routiers à albédo élevé en contexte nordique. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec.
- Farouki, O. (1985) Ground Thermal Properties. *Thermal Design Considerations in Frozen Ground Engineering*, p. 186-203. New York : ASCE Press.
- Ficheur, A. (2011) Expérimentations de techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures du Nunavik : aéroport de Tasiujaq. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec.
- Gaumont, F. G. et Doré, G. (2013) Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq - Rapport final. Québec.
- GEO-SLOPE International Ltd (2013) *Thermal Modeling with TEMP/W: An Engineering methodology*. Calgary, Alberta : GEO-SLOPE International Ltd.
- Goodrich, L. E. (1982) The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 19, n°4, p. 421-432.
- Holtz, R. D. et Kovacks, W. D. (1991) *Introduction à la géotechnique*. Montréal : Presses internationales Polytechnique.
- Johansen, O. (1977) *Thermal Conductivity of Soils*. Cold Regions Research and Engineering Lab.

Hanover, NH.

- Jordan, R. (1991) A One-Dimensional Temperature Model for a Snow Cover: Technical Documentation for SNTHERM.89. Cold Regions Research and Engineering Lab. Hanover, NH : 64 p.
- Jorgensen, A. S. et Doré, G. (2009) Experimentation of Several Mitigation Methods in Tasiujaq Airport to Minimize the Effects Caused by the Melting of Permafrost. Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction, p. 171-182.
- Konrad, J.-M. (2014) Propriétés physiques des sols gelés. Cours Géotechnique des régions froides. Québec : Université Laval.
- L'Hérault, E., Allard, M., Barrette, C., Doré, G. et Sarrazin, D. (2012) Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour les aéroports d'Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituk, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk et Tasiujaq, Nunavik. Québec.
- L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A., Doyon-robotaille, J., Lachance, M., Ducharme, M., Larrivée, K. et Grandmont, K. (2013) Production de cartes des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik - Rapport final. Québec.
- Lewkowicz, A. G. (2008) Evaluation of Miniature Temperature-loggers to Monitor Snowpack Evolution at Mountain Permafrost Sites, Northwestern Canada. Permafrost and Periglacial Processes, vol. 19, p. 323-331.
- Ling, F. et Zhang, T. (2006) Sensitivity of ground thermal regime and surface energy fluxes to tundra snow density in northern Alaska. Cold Regions Science and Technology, vol. 44, p. 121-130.
- Mackay, J. R. (1970) Disturbances to the tundra and forest tundra environment of the western Arctic. Canadian Geotechnical Journal, vol. 7, n°4, p. 420-432.
- Makivik Corporation (2019) <http://www.makivik.org/fr/tasiujaq/>.
- Matine, A., Boyard, N., Cartraud, P., Legrain, G. et Jarny, Y. (2011) Homogénéisation et prise en compte des effets de bords : Application à la thermique. Congrès français de Mécanique, p. 1-6. Besançon, France.
- Morin, S., Domine, F., Arnaud, L. et Picard, G. (2010) In-situ monitoring of the time evolution of the effective thermal conductivity of snow. Cold Regions Science and Technology, vol. 64, n°2, p. 73-80.
- Nicholson, F. H. et Granberg, H. B. (1973) Permafrost and Snowcover Relationships near Shefferville.

- Permafrost : North American Contribution to the Second International Conference, p. 151-158. Washington D.C. : Natl. Acad. Press.
- Oldroyd, H. J., Higgins, C. W., Huwald, H., Selker, J. S. et Parlange, M. B. (2012) Thermal diffusivity of seasonal snow determined from temperature profiles. *Advances in Water Resources*, vol. 55, p. 121-130.
- Rahimi, M. (2016) Modélisation de l'effet du couvert de neige sur les transferts thermiques sol-atmosphère. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec.
- Ressources naturelles Canada (1993) Canada-Pergélisol [carte]. L'Atlas national du Canada - 5e édition. Ottawa, Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources.
- Reusser, D. E. et Zehe, E. (2011) Low-cost monitoring of snow height and thermal properties with inexpensive temperature sensors. *Hydrological Processes*, vol. 25, n°12, p. 1841-1852.
- Richard, C. (2018) Stabilisation thermique des infrastructures routières construites sur pergélisol sensible au dégel à l'aide de surface à albédo élevé. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec.
- Robitaille, A. (1996) Guide pratique d'identification des dépôts de surface aux Québec: notions élémentaires de géomorphologie. Québec : Ministère des Ressources naturelles.
- Tabler, R. D. (1994) Design Guidelines for the Control of Blowing and Drifting Snow. Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- United States. Departments of the Army and United States. the Air Force (1987) Arctic and subarctic construction: general provisions. *Arctic and subarctic construction, general provisions*, vol. 88, n°19.
- Zhang, T. (2005) Influence of seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews in Geophysics*, vol. 43, n°4.

Annexe

Le tableau 10 présente les observations météorologiques archivées par Environnement Canada au cours de l'hiver 2014-2015. Il s'agit initialement de données horaires d'où l'observation la plus répétée a été dégagée afin de déterminer les journées où des épisodes de précipitations significatifs ont été enregistrés. Il est à noter que ces observations ont été compilées seulement au cours de la journée, soit entre 7h et 16h.

Tableau 10 : Observations météorologiques quotidiennes archivées du 1^{er} octobre 2014 au 31 mai 2015, à la station de mesure Tasiujaq A (Environnement Canada, 2015)

Date	Temps	Date	Temps	Date	Temps
2014-10-01	Neige	2014-11-02	Neige	2014-12-10	Généralement
2014-10-02	Nuageux	2014-11-03	Généralement	2014-12-11	Généralement dégagé
2014-10-03	Généralement	2014-11-04	Nuageux	2014-12-12	Neige en grains
2014-10-04	Brouillard	2014-11-05	Nuageux	2014-12-13	Généralement
2014-10-05	Généralement	2014-11-06	Neige	2014-12-14	Neige
2014-10-06	Généralement	2014-11-07	Neige	2014-12-15	Généralement dégagé
2014-10-07	Généralement dégagé	2014-11-09	Nuageux	2014-12-16	Généralement dégagé
2014-10-08	Nuageux	2014-11-10	Neige	2014-12-17	Généralement dégagé
2014-10-09	Pluie, Brouillard	2014-11-11	Neige	2014-12-18	Généralement
2014-10-10	Généralement	2014-11-12	Neige	2014-12-19	Généralement dégagé
2014-10-11	Nuageux	2014-11-13	Neige	2014-12-20	Généralement
2014-10-12	Généralement	2014-11-14	Neige	2014-12-21	Nuageux
2014-10-13	Pluie	2014-11-15	Généralement	2014-12-22	Généralement
2014-10-14	Pluie	2014-11-16	Généralement dégagé	2014-12-23	Neige
2014-10-15	Généralement	2014-11-17	Généralement dégagé	2014-12-24	Neige
2014-10-16	Généralement	2014-11-18	Neige	2014-12-26	Neige, Poudrierie
2014-10-17	Neige	2014-11-19	Neige	2014-12-27	Neige
2014-10-18	Neige	2014-11-20	Généralement	2014-12-28	Généralement
2014-10-19	Nuageux	2014-11-21	Généralement dégagé	2014-12-29	Généralement
2014-10-20	Neige	2014-11-24	Généralement	2014-12-30	Généralement
2014-10-21	Généralement	2014-11-25	Neige	2014-12-31	Généralement
2014-10-22	Généralement	2014-11-26	Généralement	2015-01-02	Généralement
2014-10-23	Pluie	2014-11-27	Généralement	2015-01-03	Poudrierie élevée
2014-10-24	Neige	2014-11-28	Nuageux	2015-01-04	Généralement dégagé
2014-10-25	Nuageux	2014-12-01	Généralement	2015-01-05	Généralement
2014-10-26	Nuageux	2014-12-02	Nuageux	2015-01-06	Cristaux de glace
2014-10-27	Généralement	2014-12-03	Généralement	2015-01-07	Cristaux de glace
2014-10-28	Généralement	2014-12-04	Nuageux	2015-01-08	Cristaux de glace
2014-10-29	Neige	2014-12-05	Généralement dégagé	2015-01-09	Généralement
2014-10-30	Neige	2014-12-06	Généralement	2015-01-11	Généralement dégagé
2014-10-31	Neige	2014-12-08	Généralement dégagé	2015-01-13	Généralement
2014-11-01	Neige	2014-12-09	Généralement dégagé	2015-01-14	Généralement dégagé

Date	Temps
2015-01-15	Généralement dégagé
2015-01-16	Nuageux
2015-01-18	Neige
2015-01-19	Généralement dégagé
2015-01-20	Généralement dégagé
2015-01-21	Cristaux de glace
2015-01-22	Nuageux
2015-01-23	Neige
2015-01-24	Neige
2015-01-25	Généralement dégagé
2015-01-26	Généralement dégagé
2015-01-27	Généralement
2015-01-28	Généralement
2015-01-29	Poudrerie élevée
2015-01-30	Généralement dégagé
2015-01-31	Généralement dégagé
2015-02-01	Poudrerie élevée
2015-02-02	Cristaux de glace
2015-02-03	Généralement dégagé
2015-02-04	Généralement
2015-02-05	Généralement
2015-02-06	Cristaux de glace
2015-02-07	Cristaux de glace
2015-02-08	Cristaux de glace
2015-02-09	Nuageux
2015-02-10	Poudrerie élevée
2015-02-11	Généralement
2015-02-12	Généralement dégagé
2015-02-13	Généralement dégagé
2015-02-14	Généralement dégagé
2015-02-15	Poudrerie élevée
2015-02-18	Généralement
2015-02-19	Généralement dégagé
2015-02-20	Généralement
2015-02-21	Neige
2015-02-22	Généralement dégagé
2015-02-23	Généralement
2015-02-24	Généralement dégagé
2015-02-25	Nuageux
2015-02-26	Généralement dégagé
2015-02-27	Généralement dégagé
2015-03-01	Nuageux
2015-03-02	Cristaux de glace
2015-03-03	Dégagé

Date	Temps
2015-03-04	Cristaux de glace
2015-03-05	Cristaux de glace
2015-03-06	Généralement
2015-03-07	Généralement
2015-03-08	Généralement dégagé
2015-03-09	Généralement
2015-03-10	Généralement
2015-03-11	Généralement dégagé
2015-03-12	Cristaux de glace
2015-03-13	Cristaux de glace
2015-03-14	Cristaux de glace
2015-03-15	Généralement
2015-03-16	Généralement
2015-03-17	Généralement
2015-03-18	Généralement dégagé
2015-03-19	Généralement dégagé
2015-03-20	Généralement dégagé
2015-03-21	Poudrerie élevée
2015-03-22	Généralement
2015-03-23	Généralement dégagé
2015-03-24	Poudrerie élevée
2015-03-25	Généralement dégagé
2015-03-26	Généralement dégagé
2015-03-27	Généralement dégagé
2015-03-28	Généralement
2015-03-29	Généralement dégagé
2015-03-30	Généralement
2015-03-31	Neige
2015-04-01	Neige
2015-04-02	Généralement dégagé
2015-04-03	Neige en grains
2015-04-04	Neige, Poudrerie
2015-04-05	Dégagé
2015-04-06	Généralement dégagé
2015-04-07	Cristaux de glace
2015-04-08	Généralement dégagé
2015-04-09	Généralement dégagé
2015-04-10	Nuageux
2015-04-11	Généralement
2015-04-12	Généralement dégagé
2015-04-13	Généralement
2015-04-14	Neige
2015-04-15	Généralement
2015-04-16	Généralement

Date	Temps
2015-04-17	Généralement dégagé
2015-04-18	Généralement
2015-04-19	Généralement
2015-04-21	Nuageux
2015-04-22	Nuageux
2015-04-23	Généralement
2015-04-24	Nuageux
2015-04-25	Nuageux
2015-04-26	Nuageux
2015-04-27	Généralement dégagé
2015-04-28	Généralement
2015-04-29	Généralement
2015-04-30	Pluie
2015-05-01	Neige
2015-05-02	Généralement
2015-05-03	Généralement
2015-05-04	Généralement
2015-05-06	Généralement
2015-05-07	Généralement
2015-05-08	Nuageux
2015-05-09	Brouillard
2015-05-10	Généralement
2015-05-11	Généralement
2015-05-12	Généralement dégagé
2015-05-13	Neige
2015-05-14	Neige
2015-05-15	Généralement
2015-05-16	Généralement dégagé
2015-05-17	Généralement
2015-05-18	Généralement
2015-05-19	Généralement dégagé
2015-05-20	Nuageux
2015-05-21	Nuageux
2015-05-22	Nuageux
2015-05-24	Nuageux
2015-05-25	Nuageux
2015-05-26	Généralement dégagé
2015-05-27	Généralement
2015-05-28	Neige
2015-05-30	Nuageux
2015-05-31	Nuageux