

Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires du MTMDET au Nunavik dans le contexte des changements climatiques

CC02.1

Rapport final

Michel Allard, Valérie Mathon-Dufour, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Sarah Aubé-Michaud Centre d'études nordiques, Université Laval

Rapport produit pour le compte du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec, Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec



Mars 2017



AVANT-PROPOS

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec (MTMDET) pour la confiance et le financement accordés en vue de la réalisation de ce projet de recherche. Nous soulignons également la collaboration de l'Administration Régionale Kativik et tout particulièrement le support logistique de Monsieur Serge Payer tout au long des travaux de terrain afin de faciliter l'accès aux installations aéroportuaires. Finalement, on ne peut passer sous silence l'accueil amical que notre équipe a reçu de la part des employés de Kativik Transport lors des visites aux aéroports.

Auteurs :

- Michel Allard, professeur-chercheur, Département de géographie, Université Laval
- Valérie Mathon-Dufour, professionnelle de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Denis Sarrazin, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Jonathan Roger, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Sarah Aubé-Michaud, professionnelle de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval

Citation recommandée :

Michel Allard, Valérie Mathon-Dufour, Denis Sarrazin, Jonathan Roger et Sarah Aubé-Michaud (2017) Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires du MTMDET au Nunavik dans le contexte de CC. Rapport final au Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 169 p.

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

- Anick Guimond, coordonnatrice du projet de recherche, BCNQ, MTMDET
- Emmanuel L'Hérault, professionnel de recherche, Centre d'études nordiques, Université Laval

TABLE DES MATIÈRES

				_
Av Ta Lis 1 2 3	vant-pr ible des ste des iste des INTI OBJ MÉT 3.1	opos s mat figur table RODU ECTIF FHOD Récc	ières es Paux ICTION S OLOGIE cupération des données : Calendrier des visites sur le terrain	2 6 .12 .14 .17 .18 18
	3.2	Suiv	i climatique	18
	3.2.	1	Acquisition des données : température de l'air	18
	3.2.	2	Traitement des données : Températures de l'air	19
	3.3	Suiv	i thermique du pergélisol	20
	3.3.	1	Acquisition des données : température du pergélisol	20
	3.3.	2	Traitement des données : température du pergélisol	21
4	RÉS 4.1	ULAT: INUI	S KJUAK	.22 22
	4.1.	1	Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation	22
	4.1.	2	Suivi de la température de l'air	23
	4.1.	3	Évolution du régime thermique du pergélisol	26
	4.1. per	4 géliso	Faits saillants relatifs aux températures de l'air et au régime thermique là l'aéroport d'Inukjuak	du 33
	4.2	PUV	IRNITUQ	35
	4.2.	1	Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation	35
	4.2.	2	Suivi de la température de l'air	37
	4.2.	3	Évolution du régime thermique du pergélisol	40
	4.2.	4	Faits saillants relatifs au pergélisol à l'aéroport de Puvirnituq	51
	4.3	AKU		52
	4.3.	1	Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation	52
	4.3.	2	Suivi de la température de l'air	53
	4.3.	3	Évolution du régime thermique du pergélisol	56
	4.3.	4	Faits saillants relatifs au pergélisol à l'aéroport d'Akulivik	74
	4.4	SALL	.UIT	76
	4.4.	1	Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation	76

4.4	4.2	Suivi de la température de l'air	. 78
4.4	4.3	Évolution du régime thermique du pergélisol	. 82
4.4	4.4	Faits saillants relatifs au pergélisol à l'aéroport de Salluit	. 93
4.5	QU/	AQTAQ	. 95
4.	5.1	Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation	. 95
4.	5.2	Suivi de la température de l'air	. 97
4.	5.3	Évolution du régime thermique du pergélisol	101
4.	5.4	Faits saillants relatifs au pergélisol à l'aéroport de Quaqtaq	112
4.6	KAN	IGIRSUK	114
4.	6.1	Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation	114
4.	6.2	Suivi de la température de l'air	116
4.	6.3	Évolution du régime thermique du pergélisol	119
4.	6.4	Faits saillants relatifs au pergélisol à l'aéroport de Kangirsuk	123
4.7	AUP	ALUK	124
4.	7.1	Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation	124
4.	7.2	Suivi de la température de l'air	126
4.	7.3	Évolution du régime thermique du pergélisol	129
4.	7.4	Faits saillants relatifs au pergélisol à l'aéroport de Aupaluk	137
4.8	TAS	IUJAQ	139
4.3	8.1	Caractéristiques des dépôts de surfaces et détail de l'instrumentation	139
4.3	8.2	Suivi de la température de l'air	141
4.3	8.3	Évolution du régime thermique du pergélisol	145
4.3	8.4	Faits saillants relatifs au pergélisol à l'aéroport de Tasiujaq	158
5 DI	SCUSSI	ON	160
5.1 aéro	Régi ports d	ime thermique du pergélisol : sous les pistes d'atterrissage et en périphérie lu MTMDET au Nunavik	des 161
5.2 Nun:	Régi avik	ime thermique du pergélisol : en terrain naturel aux aéroports du MTMDE	⊺au 163
5 3	Corr	nnaraison du régime thermique : en milieu naturel, en nérinhérie et sous les ni	stes
d'att	errissa	ge	163
6 CC	ONCLUS	5ION	166
7 BI	BLIOGF	RAPHIE	167
8 Ar	nexes		1/0

8.1	Annexe A: Tableau sommaire des profondeurs de dégel par stations en fonction de leur
localisa	ation sous l'infrastructure

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des infrastructures aéroportuaires du MTMDET au Nunavik qui font l'objet d'un suivi
du régime thermique du pergélisol dans la présente étude (modifié de Allard et Lemay, 2013)
Figure 2 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la
température de l'air l'aéroport d'Inukjuak, Nunavik
Figure 3 : Évolution de la température moyenne journalière de l'air enregistrée à l'aéroport d'Inukjuak pour
la période de 2008 à 2016
Figure 4 : Température moyenne annuelle (en noir) et saisonnière (saison de gel en gris et de dégel en rouge)
de l'air à Inukjuak pour la période de 2008 à 2016
Figure 5 : Emplacement du câble à thermistance INU_F2 au chaînage 4+989 m, du côté Nord-ouest, à une
distance de 1.7 m du pied du remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak
Figure 6 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble INU_F2
installé en pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour la période de A) 2008 à 2015 et B) pour
l'année 2014-2015 28
Figure 7 : Température du sol enregistrée à partir de 6 m de profondeur au câble INU_F2 installé en pied de
remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour la période de 2008 à 2015
Figure 8 : Profondeur maximale du front de dégel au câble INU_F2 installé en pied de remblai à l'aéroport
d'Inukjuak pour la période de 2008 à 2015 29
Figure 9 : Température du sol selon la profondeur (mètres) en fonction du temps au câble INU_F2 installé en
pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour la période de 2008 à 2015
Figure 10 : Emplacement de la station d'enregistrement du câble à thermistances INU_F4 installé en pied de
remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour l'année 2015-2016
Figure 11 Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble INU_F4
installé en pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour l'année 2015-2016
Figure 12 : Température du sol enregistrée à partir de 1 m de profondeur au câble INU_F4 installé en pied
de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour l'année 2015-2016
Figure 13 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la
température de l'air l'aéroport de Puvirnituq, Nunavik
Figure 14 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Puvirnituq pour la
période de 2005 à 2016
Figure 15 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel
en rouge) de l'air à l'aéroport de Puvirnituq pour la période de 2005 à 2016
Figure 16 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble
PUV_FOR1A localisé dans le roc à une dizaine de mètres de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la
période de A) 2005 à 2016 et B) 2015-2016 41
Figure 17 : Emplacement de la station d'enregistrement du câble à thermistances PUV_F2 localisé dans la
berme à convection à l'est de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période de A) 2009 à 2016 et B)
2015-2016
Figure 18 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à
thermistances PUV_F2 localisé dans la berme à convection à l'est de la piste d'atterrissage de Puvirnituq
pour la période de A) 2009 à 2016 et B) 2015-2016 44
Figure 19 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances
PUV_F2 localisé dans la berme à convection à l'est de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période
de 2009 à 2016 45

Figure 20 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances PUV_F2 localisé dans la b	erme
à convection à l'est de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période 2009 à 2015	46
Figure 21 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câ	ble à
thermistances PUV_F5 localisé dans la berme à convection à l'ouest de la piste d'atterrissage de Puvir	nituq
pour la période de A) 2009 à 2016 et B) 2015-2016	48
Figure 22 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermisto	ances
PUV F5 localisé dans la berme à convection à l'ouest de la piste d'atterrissage de Puvirnitua pour la pé	riode
 de 2009 à 2016.	
Figure 23 · Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances PLIV. E5 localisé dans la b	herme
à convection à l'ouest de la niste d'atterrissage de Puvirnitua nour la nériode de 2009 à 2015	50
Eigure 24 : Plan de localisation de l'instrumentation nour le suivi du régime thermique du nergélisal et	50 • de la
température de l'air l'aéronort d'Akulivik. Nungvik	52
Einperdure de l'ain l'actoport à Akanvik, Nandvik.	ur la
rigure 25. Temperature moyenne journaliere de Fair (Tivisa) enregistree à l'aeroport à Akalivik po	
periode de 2004 d'2010.	J4 dágal
rigure 20 . Temperatures moyennes chinatiques (en non) et saisonnieres (saison de ger en gris et de (ueyei rr
en rouge) de l'un d'hieroport d'Akunvik pour la periode de 2003 d'2016	55
Figure 27 : Temperature au soi seion la projondeur (metres) et temperature de Lair (Tair) au ca	Die a
thermistances AKU_F1 localise a 25 m au pied au rembial au cote sua au chainage 6+010 m de la	piste
d'atterrissage d'Akulivik, pour la periode de A) 2008 a 2016 et B) 2015-2016	57
Figure 28 : Température du sol selon la profondeur (mêtre) en fonction du temps au câble AKU_F1 loc	calisé
à 25 m du pied du remblai du côté sud au chaînage 6+010 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, po	our la
période de 2008 à 2016	58
Figure 29 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances AKU_F1 localisé à 25 m du	ı pied
du remblai du côté sud au chaînage 6+010 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour les années 20	008 à
2015	59
Figure 30 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câ	ble à
thermistances HT162 localisé dans le till en terrain naturel du côté sud au chaînage 5+960 m de la	piste
d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de A) 2008 à 2016 et B) 2015-2016	61
Figure 31 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble HT162 lo	calisé
dans le till en terrain naturel du côté sud au chaînage 5+960 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, po	our la
période de 2008 à 2016	62
Figure 32 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT162 localisé dans le t	till en
terrain naturel du côté sud au chaînage 5+960 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour les années	2008
à 2016	63
Figure 33 : Station d'enregistrement du câble à thermistances HT183 sur le remblai de la piste d'Aku	ulivik.
	64
Figure 34 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câ	ble à
thermistances HT183 localisé sur le remblai, du côté sud de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la pé	riode
de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016	65
Fiaure 35 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermisto	ances
HT183 localisé sur le remblai, du côté sud de la piste d'atterrissaae d'Akulivik, pour la nériode de 20	004 à
2016	66
 Fiaure 36 : Profondeur maximale du front de déael au câhle à thermistances HT183 localisé sur le ren	nblai
du côté sud de la niste d'atterrissage d'Akulivik, nour les années 2009 à 2016	67
Figure 37 : Localisation de la station d'enregistrement du câhle automatisé AKLL FA	07 68
ga. e eeeaouton ue la station a en egistiement du cubie automatise / ito_i +i miniminimini	00

Figure 38 : Température du sol selon la profondeur en fonction du temps au câble à thermistances HT183 localisé sur le versant externe d'un fossé à l'intersection entre la voie d'accès et de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de A) 2009 à 2015 et B) entre 4 et 9.5 m de profondeur pour la période de 2009 à 2015.
Figure 39 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances AKU_F4 localisé sur le versant externe d'un fossé à l'intersection entre la voie d'accès et de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de 2009 à 2015
Figure 40 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances AKU_F4 localisé sur le versant externe d'un fossé à l'intersection entre la voie d'accès et de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour les années 2008 à 2015
Figure 41 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) temps au câble à thermistances AKU_F2 localisé au chaînage 5+825 m à 1.8 m du pied du remblai du côté nord de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de 2015 à 2016
Figure 42 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances AKU_F2 localisé au chaînage 5+825 m à 1.8 m du pied du remblai du côté nord de la piste d'atterrissage d'Akulivik pour les années 2015 et 2016
Figure 43 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport de Salluit, Nunavik
Figure 44 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Salluit pour la période de 2002 à 2016
Figure 45 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport de Salluit pour la période de 2005 à 2016
Figure 46 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT154 localisé dans le roc à l'ouest de la piste d'atterrissage de Salluit pour la période de A) 2008 à 2016 et B) 2015-2016
Figure 47 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT154 localisé dans le roc à l'ouest de la piste d'atterrissage de Salluit pour la période de 2006 à 2016 84 Figure 48 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT154 localisé dans le roc à l'ouest de la piste d'atterrissage de Salluit pour les années 2002 à 2016
Figure 50 : Station d'enregistrement du câble à thermistances automatisé SAL_F3 localisé au chaînage 2+030 m du côté est de la piste d'atterrissage de Salluit
Figure 52 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances SAL_F3 localisé au chaînage 2+030 m du côté est de la piste d'atterrissage de Salluit pour la période de 2012 à 2016
Figure 54 : Température selon la profondeur au câble à thermistances A) HT155 localisé dans l'extension de 2010 du tablier (selon des lectures ponctuelles effectuées entre le 10 et le 20 octobre de chaque année; le

gris représente le remblai ajouté au-dessus du câble lors des travaux d'extension de 2010), ainsi qu'aux
câbles à thermistances à lecture manuelle B) HT160 et C) HT179
Figure 55 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la
température de l'air l'aéroport de Quaqtaq, Nunavik
Figure 56 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Quaqtaq pour la
période de 2004 à 2016
Figure 57 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport de Quaqtaq pour la période de 2005 à 2016
Figure 58 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à
thermistances HT156 localisé en terrain meuble à l'est de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016
Figure 59 · Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances
HT156 localisé en terrain meuble à l'est de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période de 2007 à
2016
Figure 60 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT156 localisé en terrain
meuble à l'est de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour les années 2004 à 2016
Figure 61 : Station d'enregistrement du câble HT178 105
Figure 62 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à
thermistances HT178 localisé au chaînage 1+290 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Quaqtaq
pour la période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016 106
Figure 63 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances
HT178 localisé au chaînage 1+290 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période
de 2007 à 2016
Figure 64 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT178 localisé au chaînage
1+290 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour les années 2004 à 2016 108
Figure 65 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à
thermistances QUA2015_F1 localisé du côté nord-est à 7 m du bord de la piste d'atterrissage de Quaqtaq
pour la période d'octobre 2015 à octobre 2016 109
Figure 66 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances
QUA2015_F1 localisé du côté nord-est à 7 m du bord de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période
d'octobre 2015 à octobre 2016 110
Figure 67 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances QUA2015_F1 localisé du côté
nord-est à 7 m du bord de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période d'octobre 2015 à octobre 2016.
Figure 68 : Plan de localisation de l'Instrumentation pour le suivi du regime thermique du pergelisoi et de la
temperature de l'air l'aeroport de Kangirsuk, Nunavik
Figure 69 : Temperature moyenne journaliere de l'air (TMJA) enregistree à l'déroport de Kangirsuk pour la
periode de 2005 a 2016
Figure 70 : Temperatures moyennes climatiques (en noir) et saisonnieres (saison de gel en gris et de degel
en rougej ae l'air a l'aeroport ae Kangirsuk pour la periode de 2005 à 2016
Figure 71 : Station a enregistrement commune aux cables H11 et Kangir_F2
Figure 72 : l'empérature du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à
thermistances H11 localise en marge du remblai au chaïnage 0+850 m du côté est de la piste d'atterrissage
de Kangırsuk pour la période de A) 2008 à 2016 et B) 2015-2016

Figure 73 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistance	es
HT1 localisé en marge du remblai au chaînage 0+850 m du côté est de la piste d'atterrissage de Kangirsu	ık
pour la période de) 2007 à 2016	21
Figure 74 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT1 localisé en marge c	łu
remblai au chaînage 0+850 m du côté est de la piste d'atterrissage de Kangirsuk pour les années 2005	à
2015	22
Figure 75 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de	la
température de l'air l'aéroport d'Aupaluk, Nunavik12	25
Figure 76 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport d'Aupaluk pour	la
période de 2004 à 2016	26
Figure 77 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dég	el
en rouge) de l'air à l'aéroport d'Aupaluk pour la période de 2005 à 2016	27
Figure 78 : Station d'enregistrement du câble automatisé HT294	29
Figure 79 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble	à
thermistances HT294 localisé au chaînage 5+386 m dans le remblai de la niste d'atterrissage d'Aunaluk no	ur.
In période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016 1^2	30
Figure 80 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistance	ρς
HT294 localisé au chaînage 5+386 m dans le remblai de la niste d'atterrissage d'Aunaluk nour la nériode d	-Jo Ho
2006 à 2016	21
Eigure 81 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT294 localisé au chaînar	עי סר
Fugure 81. Projonaeur maximale da joint de deger da cable à thermistances m294 localise da chamag	יר בי
5+566 m duns le remoind de la piste à diternissage à Aupulak pour les années de 2004 à 2010)2)2
Figure 82 : Station à enregistrement du cable datomatise H1299.	در د
rigure 83 : Temperature au soi seion la projonaeur (metres) et temperature de l'air (Tair) au cable	u
thermistances H 1299 localise au chainage 5+384 m aans le milieu naturel a une quarantaine de metres (ie c
l'accotement ouest de la piste à atterrissage à Aupaluk pour la periode de AJ 2008 à 2016 et BJ 2015-201	<i>b</i> .
Is a finite set of the	34
Figure 84 : Temperature du sol selon la profondeur (metre) en fonction du temps du cable à thermistance	2S
H1299 localise au chainage 5+384 m dans le milieu naturel a une quarantaine de metres de l'accoteme	nt
ouest de la piste d'atterrissage d'Aupaluk pour la periode de 2007 a 2016	35
Figure 85 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT299 localisé au chaînag	је
5+384 m dans le milieu naturel à une quarantaine de mètres de l'accotement ouest de la piste d'atterrissag	je
d'Aupaluk pour les années 2004 à 201613	36
Figure 86 : Problèmes de A) et B) « frost-jacking » et C) de plans d'eau sporadiques observés à Aupaluk. 13	37
Figure 87 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de	la
température de l'air l'aéroport de Tasiujaq, Nunavik14	10
Figure 88 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Tasiujaq pour	la
période de 2004 à 2016	11
Figure 89 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dég	el
en rouge) de l'air à l'aéroport de Tasiujaq pour la période de 2005 à 2016	12
Figure 90 : Station d'enregistrement recueillant les lectures des câbles automatisés HT181 et TAS_F2 14	15
Figure 91 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble	à
thermistances HT180 localisé au chaînage 5+090 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujo	ŋ
pour la période de A) 2007 à 2016 et B) 2015-201614	16

Figure 92 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances
H 180 localise au chainage 5+090 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la periode
de 2008 à 2016
Figure 93 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT180 localisé au chaînage
5+090 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour les années 2008 à 2016 148
Figure 94 : Emplacement de la station d'enregistrement du câble à thermistance HT181 localisé au chaînage 5+300 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq149
Figure 95 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à
thermistances HT181 localisé au chaînage 5+300 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq
pour la période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016 150
Figure 96 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances
HT181 localisé au chaînage 5+300 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période
de 2007 à 2016
Figure 97 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT181 localisé au chaînage
5+300 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour les années 2004 à 2016
Figure 98 : Station d'enregistrement du câble automatisé HT304 avec son capteur de température de l'air.
Figure 99 : Température du sol selon la profondeur en fonction du temps au câble à thermistances HT304
localisé en terrain naturel à une quarantaine de mètres de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période
de 2004 à 2016. L'encadré noir correspond à la période où le câble a remonté et où les profondeurs seraient
à vérifier
Figure 100 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à
thermistances TAS_F2 localisé au chaînage 5+310 m à 10 m du pied du remblai du côté ouest de la piste
d'atterrissage de Tasiujaq pour la période de A) 2010 à 2016 et B) 2015-2016
Figure 101 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances
TAS_F2 localisé au chaînage 5+310 m à 10 m du pied du remblai du côté ouest de la piste d'atterrissage de
Tasiujaq pour la période de 2010 à 2016 156
Figure 102 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances TAS_F2 localisé au chaînage
5+310 m à 10 m du pied du remblai du côté ouest de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour les années
2010 à 2016
Figure 103 : Enveloppe des températures maximums, minimums et moyennes selon la profondeur pour le
site HT180 localisé sous de l'isolant dans la piste et le site HT181 localisé dans la piste d'atterrissage de
Tasiujaq
Figure 104 : Localisation des différentes zones où est localisé l'instrumentation en fonction de leur
positionnement par rapport à l'infrastructure
Figure 105 : Température moyenne annuelle du sol selon la profondeur aux câbles à thermistances installés
à l'aéroport d'Akulivik, de Quaqtaq et de Tasiujaq pour l'année 2014-2015 (et 2015-2016 pour les câbles
AKU_F2 et QUA2015_F1). En gris, les câbles localisés sous la piste, en brun et orangé, les câbles localisés en
talus de remblai ou en périphérie de l'infrastructure et en vert, les câbles localisés en terrain naturel 164
Figure 106 : Température moyenne annuelle du sol selon la profondeur aux câbles à thermistances installés
aux aéroports du MTMDET pour l'année 2014-2015. En gris, les câbles localisés sous la piste, en brun et
orangé, les câbles localisés en talus de remblai ou en périphérie de l'infrastructure et en vert, les câbles
localisés en terrain naturel

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Calendrier des visites des aéroports du MTMDET au Nunavik en 2016	18
Tableau 2 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport d'Inukjuak	23
Tableau 3 : Sommaire des températures moyennes annuelle et saisonnière de l'air, durée de saison	de gel
et de dégel et indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à Inukjuak pour la période de 2008 à 2016	25
Tableau 4 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) (°C) enregistrées à l'aéroport d'Int	ukjuak
pour la période de 2008 à 2016	26
	33
Tableau 6 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de	dégel
maximum aux différents sites d'Inukjuak pour les années 2004 à 2016.	34
Tableau 7 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Puvirnitug	36
Tableau 8 : Sommaire des movennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel air	nsi que
des indices de ael (Fi) et déael (Ti) à l'aéroport de Puvirnitua pour la période de 2005 à 2016. * En de	, ate du
13 octobre 2016	39
	irnitua
nour la nériode de 2005 à 2016	39
Tableau 10 : Synthèse de l'état du pergélisol aux câbles à thermistances de l'géroport de Puvirnitug	55 51
Tableau 11 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en nourcentage) des profondeurs de	dénel
maximum aux différents sites de l'aéronort de Puvirnitua nour les années 2004 à 2016	51
Tableau 12 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéronort d'Akulivik	51
Tableau 12 : Tableau sommaire de Emistramentation à l'actoport à Akanvik	55 nci nup
des indices de gel (Ei) et dégel (Ti) à l'aéroport d'Akulivik pour la période de 2005 à 2016	55 S
Tableau 14 : Températures movennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport d'Akuliui	k nour
la nériode de 2005 à 2016	56 x
Tableau 15 : Sunthèse de l'état du nergélisal aux câbles à thermistances de l'aéronart d'Akulivik *C	50 âhle à
lectures manuelle et nonctuelle	7/
Tableau 16 : Tableau sunthèse de la variation (en mètre et en noursentage) des profondeurs de	74 dágal
maximum aux différents sites d'Akulivik nour les années 2004 à 2016	75
Tableau 17 : Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Salluit	75 70
Tableau 19 Commaire des moyennes annuelle et caisennière, débuts, fins et durée de caisen de gel air	
rableau 18 Sommane des moyennes annuene et saisonnere, debuts, juis et auree de saison de ger an	ISI YUE
aes maites de ger (FI) et deger (TI) a l'déroport de Sanait pour la periode de 2005 à 2016	81 it nour
Tubledu 19 : Temperatures moyennes mensuelles de Fuir (TMMA) enregistrees à l'déroport de Salidi	t pour
la periode de 2005 a 2016.	81
Tableau 20 : Synthese de l'état du pergelisol dux cables à thermistances de l'aeroport de Salluit.*C.	able a
lectures manuelle et ponctuelle	93
Tableau 21 : Tableau synthèse de la variation (en mêtre et en pourcentage) des profondeurs de	dégel
maximum aux différents sites de l'aéroport de Salluit pour les années 2004 à 2016	94
Tableau 22 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Quaqtaq	97
Tableau 23 : Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de ge	el ainsi
que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport de Quaqtaq pour la période de 2005 à 2016	100
Tableau 24 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport de Quaqta	q pour
la période de 2005 à 2016	101
Tableau 25 : Synthèse de l'état du pergélisol aux câbles à thermistances de l'aéroport de Quaqtaq	112

Tableau 26 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel
maximum aux différents sites de l'aéroport de Quaqtaq pour les années 2004 à 2016
Tableau 27 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Kangirsuk
Tableau 28 : Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi
que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport de Kangirsuk pour la période de 2005 à 2016 117
Tableau 29 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport de Kangirsuk
pour la période de 2005 à 2016 118
Tableau 30 : Synthèse de l'état du pergélisol aux câbles à thermistances de l'aéroport de Kangirsuk 123
Tableau 31 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel
maximum au câble HT1 installé à l'aéroport de Tasiujaq pour les années 2004 à 2016 123
Tableau 32 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport d'Aupaluk
Tableau 33 Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi que
des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport d'Aupaluk pour la période de 2005 à 2016 128
Tableau 34 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport d'Aupaluk pour
la période de 2005 à 2016
Tableau 35 : Synthèse de l'état du pergélisol aux câbles à thermistances de l'aéroport de Aupaluk 137
Tableau 36 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel
maximum aux différents sites d'Aupaluk de Tasiujaq pour les années 2004 à 2016
Tableau 37 Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Tasiujaq
Tableau 38 : Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi
que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport de Tasiujaq pour la période de 2005 à 2016 142
Tableau 39 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport de Tasiujaq pour
la période de 2005 à 2016
Tableau 40 : Synthèse de l'état du pergélisol au câbles à thermistance de l'aéroport de Tasiujaq 158
Tableau 41 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel
maximum aux différents sites de l'aéroport de Tasiujaq pour les années 2004 à 2016 158
Tableau 42 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel
maximum moyennes en fonction de leur positionnement par rapport à l'infrastructure pour les années 2004
à 2016

1 INTRODUCTION

Le Nunavik, avec une superficie d'environ 515 000 km², constitue le tiers nord de la province de Québec (figure 1). Les quelque 12 090 personnes qui y habitent (Duhaime et al., 2015) sont réparties à l'intérieur de 14 villages nordiques isolés et l'intercommunication entre eux ainsi qu'avec le reste du Canada repose exclusivement sur les voies maritimes et aériennes. La desserte maritime est généralement assurée à 2 ou 3 reprises en été par des navires venant du Sud et qui acheminent les matériaux, les produits non périssables, les équipements industriels, les marchandises lourdes, les véhicules ainsi que les produits pétroliers. Pour quiconque voyage dans la région, il devient vite évident que le transport aérien joue un rôle crucial et stratégique (Allard et al., 2007). Dans ce contexte, les aéroports du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) ainsi que leurs routes d'accès constituent des infrastructures déterminantes qui assurent la desserte des communautés. Or, depuis le début des années 2000, le réchauffement climatique se fait déjà fortement sentir au Nunavik. De plus, les projections climatiques suggèrent une hausse de l'ordre de 3 °C des températures moyennes annuelles de l'air pour la période 2050 (Allard et Lemay, 2013). Ce réchauffement du climat constitue un des facteurs à prendre en compte prioritairement pour l'entretien ainsi que les projets de réhabilitation et de développement pour soutenir l'adaptation aux changements climatiques (CC)des infrastructures aéroportuaires (pistes et routes) du MTMDET construites sur pergélisol au Nunavik.

Les simulations numériques du climat et du régime thermique du pergélisol, réalisés dans les projets de recherche précédents, sous les infrastructures aident à planifier les adaptations au changement climatique. Ces simulations sont essentielles pour soutenir la gestion de risque liées aux CC, mais elles demeurent une source de données approximatives.

Afin d'anticiper et d'estimer les risques à court et long termes du comportement des sols sousjacent aux infrastructures, le suivi du régime thermique du pergélisol est essentiel. Les données de suivi des températures du sol et de l'air compilées depuis maintenant 10 ans (voire 24 ans dans quelques cas), jumelées à celles liées aux conditions de sol (la granulométrie et contenu en eau/glace) sur les sites d'infrastructures aéroportuaires du MTMDET au Nunavik, contribuent à analyser le comportement des ouvrages dans le contexte des variations/changements climatiques. Ces données permettent également de soutenir l'analyse du niveau de risque futur associé aux diverses projections climatiques et de concevoir les mesures d'adaptation à mettre en œuvre le cas échéant.

Afin de maintenir les infrastructures de transport du MTMDET au Nunavik sécuritaires et pérennes dans un contexte de changements climatiques, d'optimiser la planification des interventions en adaptation et de pouvoir intervenir de manière proactive si un réchauffement important du pergélisol était observé sous les ouvrages, le MTMDET a mandaté le Centre d'études nordiques (CEN) de l'Université Laval pour réaliser le présent projet de recherche intitulé « *Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires du MTMDET au Nunavik dans le contexte des changements climatiques* ». Le projet consiste à

effectuer le suivi du régime thermique du pergélisol et des températures de l'air sur une durée de trois années, soit entre 2014 et 2016, sur huit sites d'infrastructures aéroportuaires du MTMDET au Nunavik jugés sensibles. Ce suivi est réalisé à l'aide de thermistances installées sous et en bordure des infrastructures les plus à risque de dégradation.



Figure 1 : Localisation des infrastructures aéroportuaires du MTMDET au Nunavik qui font l'objet d'un suivi du régime thermique du pergélisol dans la présente étude (modifié de Allard et Lemay, 2013).

Les objectifs du suivi thermique et climatique à long terme des infrastructures aéroportuaires du MEMDET au Nunavik sont d'une part d'acquérir le maximum de connaissances sur le pergélisol en vue de fournir l'information nécessaire à la construction et à l'entretien à venir des pistes d'atterrissage et de leurs routes d'accès, et d'autre part, de réaliser une évaluation détaillée sur la façon dont les processus liés aux variations du régime thermique du pergélisol affecteront l'intégrité de ces infrastructures. Plusieurs des puits de forage réalisés dans le cadre de ces études géotechniques ont été instrumentés initialement à l'aide de sondes à température et automatisés à l'aide de système d'acquisition de données. Une campagne de mise à niveau de l'instrumentation en 2003-2004 et des ajouts ont ensuite été effectués au fil des travaux de rénovation et de l'instauration de concepts d'adaptation en ingénierie. Cette instrumentation permet maintenant non seulement de monitorer le régime thermique des infrastructures et du

pergélisol, mais aussi elle fournit les données pour évaluer la performance des mesures d'adaptation. À ce jour, huit sites aéroportuaires sont concernés : Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq. Notons aussi que les données de suivi thermique obtenues aux sites aéroportuaires du MTMDET sont pertinentes et utiles pour l'aménagement des villages nordiques et constituent une base d'information de première main pour tout projet de développement infrastructurel dans le nord du Québec.

2 OBJECTIFS

Plus spécifiquement, dans le cadre du projet de recherche actuel, les objectifs sont les suivants :

- Effectuer le suivi climatique et géothermique du pergélisol aux aéroports de Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk, Quaqtaq, Akulivik, Salluit, Puvirnituq et Inukjuak au Nunavik.
- Veiller à l'entretien et au remplacement des composantes d'équipement du réseau de suivi lorsqu'il est nécessaire afin d'assurer son bon fonctionnement.
- Interpréter les données climatiques et géothermiques recueillies aux sites aéroportuaires.
- Faire des liens pertinents avec les caractéristiques climatiques des années antérieures afin d'évaluer leur impact sur les conditions du pergélisol et la stabilité des infrastructures de transport à l'étude.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 RÉCCUPÉRATION DES DONNÉES : CALENDRIER DES VISITES SUR LE TERRAIN

La dernière tournée de collecte des données et d'entretien de l'instrumentation aux huit aéroports ciblés du Nunavik s'est déroulée du 24 septembre au 25 octobre 2016 (tableau 1). Les 8 aéroports ont alors été visités par Denis Sarrazin, professionnel de recherche au Centre d'études nordigues. Lors de ces visites, une procédure standard a été suivie laguelle consiste à réaliser une maintenance de base effectuée dès l'arrivée à l'aéroport afin de détecter le plus tôt possible tous bris ou mauvais fonctionnement. Cette étape permet d'optimiser le temps de réaction face aux problèmes potentiels et a aussi pour but de retirer les sachets de dessiccant (absorbeur d'humidité) des boîtiers afin de les réactiver dès l'arrivée à l'hôtel. En fonction de l'heure d'arrivée, le téléchargement d'une durée moyenne de 1 heure par câble à thermistances peut débuter à la suite de cette maintenance préliminaire ou peut être reporté au lendemain. Une fois les travaux de maintenance et les téléchargements habituels effectués, une première analyse sommaire des données est réalisée afin de vérifier leur continuité et leur apparente validité. Cette vérification permet aussi de détecter d'éventuels problèmes tels que des données inexactes ou un voltage de batterie insuffisant. Une fois cette analyse préliminaire effectuée, l'intégralité des données est sauvegardée sur l'ordinateur et sur une clef USB afin de minimiser le risque de perte de données.

2016	Septembre								Octobre																							
2010	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Akulivik																																
Salluit																																
Quaqtaq																																
Inukjuak																																
Puvirnituq																																
Tasiujaq																																
Aupaluk																																
Kangirsuk																																

Tableau 1 : Calendrier des visites des aéroports du MTMDET au Nunavik en 2016.

3.2 SUIVI CLIMATIQUE

3.2.1 ACQUISITION DES DONNÉES : TEMPÉRATURE DE L'AIR

À chaque site aéroportuaire, l'acquisition de températures de l'air est effectuée à l'aide d'une thermistance sous abri radiatif et branché à un système d'acquisition de données (CR 1000 et CR10X de Campbell Scientific inc.). La programmation des systèmes d'acquisition fait en sorte qu'une lecture est faite toutes les minutes. La précision des thermistances YSI 44033 est de ± 0.1 °C entre –80 °C et +75 °C.

Les données de températures de l'air actuelles et passées proviennent ainsi principalement de nos instruments en place. Aux sites où Environnement Canada (Inukjuak et Salluit) publie des données climatiques, nos lectures sont comparées et complétées en cas de manque avec celles de cet organisme public.

Il est à noter que certaines séries de données peuvent présenter des hiatus soit en raison d'un arrêt de l'acquisition de données dû à un bris ou une panne d'alimentation électrique. De plus, certains câbles à thermistances à lectures manuelles ont par la suite été automatisés au fil des améliorations, ce qui rend la capacité d'analyse un peu inégale sur le long terme dans quelques cas.

La température atmosphérique est un paramètre est très important à mesurer, car il permet de mesurer l'atténuation des variations de températures de surface dans les remblais et le pergélisol en fonction de l'épaisseur des matériaux de remblais et des propriétés thermiques des matériaux.

3.2.2 TRAITEMENT DES DONNÉES : TEMPÉRATURES DE L'AIR

3.2.2.1 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'AIR

Toutes les séries de données ont été préalablement analysées et nettoyées des valeurs aberrantes. Pour le calcul des moyennes quotidiennes, un manque de plus de 5 heures dans une journée menait à l'exclusion de la donnée. Cette procédure a été appliquée pour les fins statistiques.

3.2.2.2 DÉTERMINATION DES ANNÉES CALENDAIRES ET CLIMATIQUES

Dans le but d'observer les tendances saisonnières et annuelles, les moyennes et les indices ont été calculés sur l'année climatique plutôt que sur l'année calendaire. L'utilisation de l'année calendaire, débutant le premier janvier et se terminant le 31 décembre, coupe la saison de gel en deux. L'année climatique, quant à elle, prend en compte le doublet formé par la saison de gel et de dégel. L'avantage de cette méthode est de pouvoir établir directement la correspondance entre les cycles de température dans le sol, les cycles de gel et de dégel de la couche active et les températures atmosphériques.

La saison de dégel débute lorsque les températures moyennes journalières se situent au-dessus de 0 °C et se termine lorsque ces dernières se situent en dessous de 0 °C. Or, cette limite varie de quelques jours d'une année à l'autre et lors de la transition elle-même. En effet, il est possible que la température oscille autour de 0 °C pour une période allant jusqu'à plusieurs semaines rendant difficile la délimitation de la saison climatique. Afin de déterminer une date précise pour le début et la fin de l'année climatique, les données journalières ont été lissées à l'aide d'une moyenne mobile centrée d'ordre 9. De cette façon, les fluctuations moins significatives lors de la période de transition sont atténuées, tout en prenant compte du poids relatif de ces dernières, nécessaires au calcul des indices de gel et de dégel.

3.2.2.3 CALCUL DES DEGRÉS-JOURS DE GEL ET DÉGEL

Les indices de gel (*Fi*) et de dégel (*Ti*) correspondent au nombre cumulatif des degrés-jours pour une année par rapport à une température de référence (0 °C) (Harris et *al.,* 1988). L'indice de gel a été calculé en faisant la somme des degrés-jour négatifs d'une saison de gel à l'intérieur d'une année climatique. De même, l'indice de dégel a été obtenu en faisant la somme des degrés-jours positifs d'une saison de dégel à l'intérieur d'une année climatique. Le ratio entre les indices de gel et de dégel (*Fi/Ti*) permet de déterminer l'importance du nombre de degrés-jours de gel par rapport au nombre de degrés-jours de dégel. Cet indice constitue un indice du bilan thermique des températures de l'air pour ainsi évaluer l'apport calorifique emmagasiné par le sol durant une année climatique. Plus ce rapport est élevé, plus les températures annuelles seront basses (moins le sol aura emmagasiné de chaleur) et, à l'inverse, plus ce rapport est faible, moins les températures sont basses (plus le sol aura emmagasiné de chaleur) et, a l'inverse, plus ce rapport est faible, moins les températures sont basses (plus le sol aura emmagasiné de chaleur) durant cette année climatique.

3.3 SUIVI THERMIQUE DU PERGÉLISOL

3.3.1 ACQUISITION DES DONNÉES : TEMPÉRATURE DU PERGÉLISOL

Les systèmes de mesure de la température du sol consistent en câbles électriques sur lesquels sont branchés des capteurs appelés thermistances. Ces capteurs sont en fait des résistances électriques très sensibles dont la valeur varie selon la température ambiante. Les thermistances (modèle YSI 44033) sont disposées suivant des espacements prédéterminés le long des câbles installés verticalement dans des trous forés dans le sol et à travers les remblais des infrastructures. Le câble à thermistances est inséré à l'intérieur d'un tubage de PVC placé dans le puits de forage et rempli d'huile de silicone assurant ainsi le contact thermique entre les thermistances, le tuyau et le sol adjacent. Lorsque les câbles à thermistances sont installés sous une piste d'atterrissage ou une route, une extension du fil se prolonge jusque sur le bas-côté ou l'accotement où un système d'acquisition de données est installé. Le système consiste en un « datalogger » (CR10X ou CR 1000 de Campbell Scientific inc.) programmé pour effectuer les lectures des thermistances à intervalles prédéterminés et d'un multiplexeur (AM 16/32) ou d'un module de mémoire selon le nombre de thermistances installées. L'alimentation électrique du système est fournie par une batterie 12 V, elle-même maintenue chargée grâce à un panneau solaire. Le système d'acquisition de données, le module de mémoire, la batterie et le modulateur du panneau solaire sont protégés dans une boîte-abri en aluminium. Sur les accotements des pistes, les systèmes d'acquisition sont fixés à un mat vertical solidement implanté dans le sol. À plusieurs sites aéroportuaires, un câble à thermistances témoin est aussi installé dans le sol naturel et/ou le roc à une certaine distance de la piste afin de pouvoir mesurer l'impact du climat sur le pergélisol du terrain naturel et fournir une référence pour mieux interpréter le comportement thermique de l'ouvrage de génie. Dans de tels cas, le boîtier du système d'acquisition est fixé à une structure « mécano » montée sur des tiges angulaires d'acier ou sur un tuyau d'acier galvanisé installé à la verticale dans le sol.

La mise en marche du système d'acquisition de données et le téléchargement des données lors des visites sont réalisés à l'aide d'un ordinateur portable muni du logiciel Logger Net de la compagnie Campbell Scientific inc.

Tous les câbles à thermistances qui font l'objet d'un suivi dans le présent rapport sont localisé sur un plan dans les sections propres à chaque aéroport (figures 2, 13, 24, 43, 55, 68, 75 et 87)

3.3.2 TRAITEMENT DES DONNÉES : TEMPÉRATURE DU PERGÉLISOL

3.3.2.1 PRÉTRAITEMENT DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DU PERGÉLISOL

Toutes les données ont été préalablement analysées et nettoyées des valeurs aberrantes. Pour le calcul des moyennes quotidiennes, un manque de plus de 5 heures dans une journée menait à l'exclusion de la donnée. Cette procédure a été appliquée pour les fins statistiques.

3.3.2.2 TRAITEMENT, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES

Les données de température du sol obtenues à l'aide des câbles à thermistances ont été analysées et ont servi à déterminer avec précision le régime thermique du pergélisol. Elles ont été utilisées afin d'établir l'amorce du dégel, la durée et le regel de la couche active, la profondeur maximale de dégel saisonnier, les températures moyennes en fonction de la profondeur ainsi que l'existence des anomalies dans le régime thermique du pergélisol, telles que la présence d'un écoulement d'eau ou de l'effet isolant de l'accumulation de neige. Les données de températures du sol ont été représentées notamment à l'aide de diagrammes et de graphique mettant en relation la température selon le temps, la profondeur et l'emplacement par rapport à l'infrastructure. Elles ont été compilées et représentées graphiquement à l'aide du tableur *Microsoft Excel*.

4 RÉSULATS

4.1 INUKJUAK

4.1.1 CARACTÉRISTIQUES DES DÉPÔTS DE SURFACES ET DÉTAIL DE L'INSTRUMENTATION

4.1.1.1 SYNTHÈSE DE LA RÉPARTITION SPATIALE, DE L'ÉPAISSEUR ET DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUE DES DÉPÔTS SUPERFICIELS

Les sols rencontrés à Inukjuak sont généralement sableux, avec des proportions variables de silt et de gravier (L'Hérault et *al.*, 2012; Verreault, 2015). Les dépôts sableux se présentent souvent sous la forme de replats ou de terrasses. Il s'agit d'anciennes plages marines laissées suite au relèvement isostatique. À proximité de la piste, plusieurs zones de dépôts sableux mal drainés ont été observées en surface. Les analyses granulométriques pratiquées sur des échantillons de sol ont révélé une quantité significative de silt et d'argile suggérant un sol plutôt sensible au gel (Allard et *al.*, 2007; L'Hérault et *al.*, 2012). D'après les forages géotechniques réalisés en 2008 à l'aéroport, le socle rocheux se trouve entre 4.64 et 10.91 m de profondeur à proximité de la piste (L'Hérault et *al.*, 2012).

4.1.1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Inukjuak comprend trois câbles à thermistances automatisés (figure 2 et tableau 2) :

- INU_F2 : Le câble INU_F2, installé en 2008, comporte 15 thermistances entre 0.05 et 12 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1.5 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. Il est localisé du côté nord-ouest de la piste, au chaînage 5+210 m, à 2 m du pied de remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **INU_F3** : Le câble INU_F3, installé en 2015, comporte 14 thermistances entre 0.05 et 8 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté nord-ouest de la piste, au chaînage 5+704 m, à 4 m du pied de remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- INU_F4 : Le câble INU_F4, installé en 2015, comporte 14 thermistances entre 0.05 et 8 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté sud-est de la piste, au chaînage 6+006 m, à 1 m du pied de remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.



Figure 2 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport d'Inukjuak, Nunavik.

Tablaau 2	· Tablaau	commaira	do l'i	instrumentation	à	l'aáran	ort d	Inuk	inak
Tableau Z	: Tableau	sommaire	aeri	nstrumentation	a	i aerop	ort a	inukj	иак.

INUKJUAK							
Câbles à thermistances	Mise en service	Système d'acquisition	Répartition des thermistances (cm)	Câbles à lectures manuelles			
INU_F2	08-10-2008	CR1000	5-10-20-50-100-200-300-400-500-600-700-800-900-1000-1200				
INU_F3	21-10-2015	CR1000	5-25-50-75-100-150-200-250-300-400-500-600-700-800				
INU_F4	22-10-2015	CR1000	5-25-50-75-100-150-200-250-300-400-500-600-700-800				

4.1.2 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Dans le secteur de INU_F2, l'accumulation de neige en pied du remblai est telle qu'elle recouvre le capteur de températures de l'air, ce qui altère la validité des données mesurées en hiver. Les données ne recommencent à fluctuer qu'au printemps selon la température de l'air, une fois que la fonte de la couverture nivale réexpose le capteur aux variations thermiques atmosphériques. Pour cette raison, les statistiques sont construites à partir des enregistrements de la station météorologique locale d'Environnement Canada, lesquelles ont été complétées par nos données (figure 3).



Figure 3 : Évolution de la température moyenne journalière de l'air enregistrée à l'aéroport d'Inukjuak pour la période de 2008 à 2016.

4.1.2.1 ÉVOLUTION DES INDICES CLIMATIQUES : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES, MENSUELLES ET SAISONNIÈRES DE L'AIR, DÉBUT, FIN, DURÉE ET MOYENNE DES SAISON DE GEL ET DE DÉGEL ET DEGRÉSJOURS DE GEL ET DE DÉGEL

L'année climatique 2015-2016 est marquée par des températures moyennes annuelles de l'air (TMMA) légèrement supérieures à la moyenne pour la période de 2008 à 2016. En effet, la TMAA mesurée de -3.30 °C, ce qui est légèrement plus chaud que la moyenne de -3.39 °C pour cette période de référence. Durant cette période, l'année climatique 2009-2010 a été la plus chaude, avec une moyenne de -2.26 °C et l'année 2013-2014 a été la plus froide avec une moyenne de -5.07 °C (figure 4). Les températures froides enregistrées à Inukjuak depuis 2013 ont inversé la tendance des dernières années qui était au réchauffement (Roger et *al.*, 2016). Cette dernière indique maintenant une baisse de la température moyenne annuelle de l'air de -0.21 °C par an (tendance de -0.05 °C par an pour la saison de dégel et de -0.38 °C par an pour la saison de gel).

Le début et la fin de la saison de gel fluctuent beaucoup d'une année à l'autre. Pour la période de référence de 2008 à 2016, la saison de gel s'amorce en moyenne le 21 octobre, mais peut varier de plus de 33 jours d'une année à l'autre, et est d'une durée d'en moyenne 213 jours. De même, la saison de dégel débute en général autour du 25 mai avec une variation interannuelle de 21 jours, et dure en moyenne 148 jours. Pour l'année 2015-2016, la saison de gel a débuté le 10 octobre et a duré 227 jours alors que la saison de dégel a débuté le 27 mai, et a duré 137 jours. La température moyenne enregistrée durant la saison de gel 2015-2016 est de –14.40 °C et de 7.61 °C durant la saison de dégel 2016. Ces valeurs se situent sensiblement près de la moyenne pour la période d'enregistrement (tableau 3).

L'année 2016 a été marquée par des températures moyennes mensuelles de l'air hivernales légèrement plus basses et des températures moyennes mensuelles de l'air estivales légèrement plus hautes que la moyenne pour la période de 2008 à 2016, en particulier le mois d'avril, dont la moyenne mensuelle est 4.34 °C sous la moyenne (tableau 4).

La tendance au refroidissement de la température de l'air observée dans les moyennes annuelles, saisonnières et mensuelles est aussi présente dans le cumul des degrés-jours de gel et de dégel, représentés par les indices de gel (Fi) et de dégel (Ti), ainsi que dans le ratio entre ces deux indices. Pour la période de 2008 à 2016, la tendance de Fi est à l'augmentation alors que celle de Ti est à la baisse, indiquant que le sol a emmagasiné moins de chaleur. Les ratios Fi/Ti des années 2014-2015 et de 2015-2016 sont d'ailleurs les deux plus élevés depuis 2008, avec des valeurs de 3.64 et de 3.08 comparativement à la moyenne de 2.78.



Figure 4 : Température moyenne annuelle (en noir) et saisonnière (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à Inukjuak pour la période de 2008 à 2016.

ΙΝυΚJUΑΚ										
INDICES	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	2016- 2017	Moyenne
Saison de gel										
Début (jj-mmm)	30-oct	16-oct	12-nov	22-oct	11-oct	25-oct	30-oct	10-oct	10-oct	21-oct
Fin (jj-mmm)	01-juin	11-mai	29-mai	27-mai	24-mai	16-mai	30-mai	24-mai	n. d.	24-mai
Durée (jour)	214	207	198	218	225	203	212	227	n. d.	213
Moyenne (°C)	-15.47	-11.35	-13.37	-13.70	-12.70	-17.31	-16.58	-14.74	n. d.	-14.40
Saison de dégel										
Début (jj-mmm)	02-juin	12-mai	30-mai	28-mai	25-mai	17-mai	31-mai	25-mai	n. d.	25-mai
Fin (jj-mmm)	15-oct	11-nov	21-oct	10-oct	24-oct	29-oct	09-oct	09-oct	n. d.	19-oct
Durée (jour)	135	183	144	135	152	165	131	137	n. d.	148
Moyenne (°C)	8.45	6.82	7.88	8.71	6.36	7.16	7.39	8.14	n. d.	7.61
Année climatique										
TMAA (°C)	-3.51	-2.26	-2.75	-2.49	-3.17	-5.07	-4.60	-3.30	n. d.	-3.39
Indice de gel (FI)	3332	2368	2669	3017	2887	3537	3551	3369	n. d.	3091
Indice de dégel (TI)	1152	1276	1145	1188	976	1201	975	1094	n. d.	1126
Ratio (FI/TI)	2.89	1.86	2.33	2.54	2.96	2.94	3.64	3.08	n. d.	2.78

Tableau 3 : Sommaire des températures moyennes annuelle et saisonnière de l'air, durée de saison de gel et de dégel et indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à Inukjuak pour la période de 2008 à 2016.

	INUKJUAK									
Mois	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	x̄ mensuelles
Janvier	-23.27	-24.46	-19.97	-17.28	-24.48	-23.94	-21.38	-27.43	-20.69	-22.54
Février	-26.37	-24.13	-18.46	-22.56	-24.42	-24.18	-23.33	-31.57	-26.42	-24.61
Mars	-21.42	-20.97	-15.13	-22.04	-18.58	-12.88	-25.50	-24.82	-21.79	-20.35
Avril	-9.22	-9.94	-5.32	-13.68	-10.87	-12.06	-14.85	-9.76	-15.60	-11.26
Mai	0.97	-4.61	-0.66	-3.68	-1.20	-2.33	1.25	-2.26	-1.63	-1.57
Juin	9.90	5.69	5.23	6.42	8.06	5.69	6.75	4.10	6.53	6.49
Juillet	13.84	14.71	12.54	10.67	10.27	8.55	10.93	10.36	11.68	11.51
Août	13.56	10.00	11.59	11.42	11.87	10.38	11.47	10.31	10.45	11.23
Septembre	5.55	5.58	7.50	6.04	7.67	4.49	4.49	5.85	6.82	6.00
Octobre	2.42	0.24	2.71	2.26	-0.45	1.13	2.89	-1.02	-1.33	0.98
Novembre	-7.07	-4.41	-2.00	-4.97	-5.82	-9.15	-8.28	-7.38	-5.79	-6.10
Décembre	-18.72	-12.09	-7.03	-13.70	-12.85	-20.78	-13.23	-15.07	-16.99	-14.50

Tableau 4 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) (°C) enregistrées à l'aéroport d'Inukjuak pour la période de 2008 à 2016.

4.1.3 ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

Le suivi thermique du pergélisol de l'aéroport d'Inukjuak est effectué à l'aide de trois câbles à thermistances installés en périphérie de la piste d'atterrissage. Cependant, seul le câble INU_F4 possède des données pour l'année 2015-2016. Les câbles INU_F2 et INU_F3 ont été endommagés par l'eau et plusieurs composantes devront être remplacées. Les données de l'année 2015-2016 de ces deux câbles n'ont pu être récupérées.

4.1.3.1 CÂBLE AUTOMATISÉ INU_F2 : 2008 À 2015

Le câble INU_F2 est localisé du côté nord-ouest de la piste, au chaînage 5+210 m, à 2 m du pied de remblai de la piste d'atterrissage.il L'épaisseur du couvert nival à cet endroit atteint en moyenne 1.13 m (moyenne de 2008 à 2016 mesurée par le MTMDET au site N1) (Roger *et al.*, 2016). Les données de température du sol du câble à thermistances INU_F2 (figure 5) présentées à la figure 6 A et B s'échelonnent du début de l'automatisation de la station en 2008 jusqu'au téléchargement le plus récent en octobre 2015. Les données de l'année 2015-2016 ne sont pas disponibles dû à un bris d'équipement.

En période hivernale, les fluctuations des températures de l'air affectent très peu les températures enregistrées dans le sol en raison d'un épais couvert de neige le long du remblai qui isole le sol en hiver. Depuis 2008, les thermistances installées en dessous de 7 m enregistrent un réchauffement de la température du sol à l'exception de celles situées à 6 (-0.15 °C) et 8 m (-0.13 °C) de profondeur qui enregistrent une baisse de la température. La profondeur maximum de dégel atteinte au câble INU_F2 varie relativement peu, soit entre 5.60 (en 2015) et 5.76 m (en 2012) pour la période d'enregistrement (figure 8).

En raison de l'épaisseur de neige qui limite l'extraction de chaleur accumulée dans le sol en été, le regel de la couche active est retardé jusqu'à tard dans l'hiver et les températures du sol y sont relativement chaudes. En effet, le regel complet de la couche active s'effectue autour du 30 avril en moyenne, alors que les températures de l'air sont sous le point de congélation depuis le 21 octobre en moyenne. Le dégel printanier s'effectue un peu plus d'un mois plus tard (37 jours plus tard en moyenne) (figure 9). En hiver, les premiers mètres à la surface du sol n'enregistrent qu'une très faible diminution de température et restent non gelés sur une période d'en moyenne 332 jours avant de finalement passer sous 0 °C. Cette signature thermique spécifique indique que le régime thermique du pergélisol n'est plus influencé par les températures de l'air hivernales en raison d'une importante accumulation de neige en pied de remblai à cet endroit qui est de l'ordre de 1.15 à 2.20 m d'épaisseur (Roger et al., 2016) et, aussi, en raison de la chaleur latente contenue dans la couche dégelée (L'Hérault et al., 2012). Les données du capteur pour les températures de l'air mesurées sous la neige à la station INU_F2 viennent appuyer cette affirmation en présentant des valeurs beaucoup plus chaudes en hiver que celles enregistrées par Environnement Canada quantifiant ainsi l'effet isolant du couvert neigeux (Allard et al., 2013). Les forages INU_F3 et INU_F4 réalisés à l'automne 2008 n'avaient d'ailleurs pas permis d'atteindre les fronts de dégel suggérant que la couche dégelée dépasse les 6 mètres (Verreault, 2015).



Figure 5 : Emplacement du câble à thermistance INU_F2 au chaînage 4+989 m, du côté Nord-ouest, à une distance de 1.7 m du pied du remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak.



Figure 6 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble INU_F2 installé en pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour la période de A) 2008 à 2015 et B) pour l'année 2014-2015.



Figure 7 : Température du sol enregistrée à partir de 6 m de profondeur au câble INU_F2 installé en pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour la période de 2008 à 2015.



Figure 8 : Profondeur maximale du front de dégel au câble INU_F2 installé en pied de remblai à l'aéroport d'Inukjuak pour la période de 2008 à 2015.



Figure 9 : Température du sol selon la profondeur (mètres) en fonction du temps au câble INU_F2 installé en pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour la période de 2008 à 2015.

4.1.3.2 CÂBLE AUTOMATISÉ INU_F3 : 2014-2015

Le câble INU_F3 est localisé du côté nord-ouest de la piste, au chaînage 5+704 m, à 4 m du pied de remblai de la piste d'atterrissage. L'instrumentation de la station d'enregistrement du câble INU_F3, installé à l'été 2015, a été endommagée par l'eau durant l'année 2015-2016. Il n'y a donc pas de données disponibles pour la période.

4.1.3.3 CÂBLE AUTOMATISÉ INU_F4 : 2014 À 2016

Le câble à thermistances INU_F4 (figure 10), localisé du côté sud-est de la piste au chaînage 6+006 m à 1 m du pied de remblai de la piste d'atterrissage, a été installé à la fin d'octobre 2015. Les valeurs enregistrées durant l'année 2015-2016 sont représentées à la figure 11. À l'instar du câble INU_F2, le câble INU_F4 présente très peu de fluctuation dans les températures du sol durant la saison de gel en raison du couvert nival abondant qui isole et limite l'extraction de chaleur durant l'hiver. Ainsi, le profil thermique révèle que le sol ne regèle pas complètement (talik) (entre 1 et 7 m) durant la saison de gel (figure 12). Seule la thermistance installée à 8 m de profondeur indique des températures négatives près du point de fusion, variant de -0.07 à -0.05 °C. Étant donné que l'enregistrement des températures au câble INU_F4 débute et se termine lors de la transition entre la saison de dégel et de gel, à la mi-octobre, il se peut que le maximum de dégel de 2015 et 2016 soit légèrement plus profond. Cependant, pour la période couverte, le maximum de dégel enregistré à cet endroit est de -7.55 m de profondeur en 2015 et de -7.64 m en date du 11 octobre 2016.



Figure 10 : Emplacement de la station d'enregistrement du câble à thermistances INU_F4 installé en pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour l'année 2015-2016.



Figure 11 Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble INU_F4 installé en pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour l'année 2015-2016.



Figure 12 : Température du sol enregistrée à partir de 1 m de profondeur au câble INU_F4 installé en pied de remblai de la piste d'atterrissage d'Inukjuak pour l'année 2015-2016.

4.1.4 FAITS SAILLANTS RELATIFS AUX TEMPÉRATURES DE L'AIR ET AU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL À L'AÉROPORT D'INUKJUAK

Les conditions de pergélisol enregistrées en pied de remblai à l'extrémité sud-ouest et nord-est de la piste d'atterrissage aux câbles INU_F2 et INU_F4 présentent une couche active très épaisse dont le maximum enregistré est de 7.64 m en 2016 au câble INU_F4 (tableau 5 et tableau 6).

D'ailleurs, les températures en profondeur au câble INU_F2 indiquent que malgré les températures de l'air plus froides des dernières années, le sol en profondeur continue à se réchauffer. Cette perturbation du régime thermique du pergélisol en périphérie de la piste est essentiellement due à la modification de facteurs environnementaux, la présence de neige en hiver et d'eau stagnante en été. En effet, l'accumulation importante de neige en hiver (causes naturelle et anthropique) mesurée par l'équipe technique du MTQ (Roger et al., 2016) et observée par le CEN lors des visites sur le terrain a pour effet d'isoler le sol en hiver limitant ainsi la pénétration du gel. L'important couvert nival combiné aux mauvaises conditions de drainage observées en pied de remblai contribue au réchauffement du régime thermique du pergélisol à cet endroit, qui est déjà près du point de fusion à plus de 8 m de profondeur. Avec une augmentation des températures projetées de 3.17 °C, il est indéniable que le front de dégel gagnera progressivement en profondeur. Comme la profondeur au roc est de 11 m, il reste encore 3 mètres de pergélisol qui devrait lentement dégeler dans le futur. L'épaississement progressif du dégel, augmentant l'épaisseur de ce sol non gelé et gorgé en eau (0.22 m³/m³), sous le niveau actuel de la couche active actuelle diminuera la capacité portante en pied de remblai et augmentera les risques d'affaissements (L'Hérault et al., 2012). Ces affaissements pourraient éventuellement engendrer de nouvelles fissures de tension en bordure du remblai telles que celles antérieurement observées par Allard et al. (2007). De plus, les conditions plus chaudes en périphérie de l'infrastructure vont, par transfert latéral de la chaleur, se propager vers le centrepiste et ultimement en affecter la stabilité (L'Hérault et al., 2012).

Câble	Influence du couvert nival	Localisation	Profondeur moyenne du dégel (m)	Tendance front de dégel
INU_F2	Forte	Épaulement	-5.70	Remontée récente
INU_F4	Forte	Épaulement	-7.60	-

Tableau 5 : Synthèse de l	l'état du peraélisol aux	x câbles à thermistances	de l'aéroport d'Inukiuak.
rabicaa b . by nenese ac i	ciul uu pergensor uu	cables a thermistances	ac i aci oport a margaan

Tableau 6 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum aux différents sites d'Inukjuak pour les années 2004 à 2016.

	Épa	uleme	nt/	Épa	Épaulement/				
	Pé	ériphér	ie	Périphérie					
	INUK	JUAK IN	U_F2	INUK	INUKJUAK INU_F4				
	z (m) Δ (m) Δ (%)			z (m)	∆ (m)	Δ (%)			
2004									
2005									
2006									
2007									
2008	5.68								
2009	5.65	-0.03	-0.4						
2010	5.74	0.09	1.5						
2011	5.75	0.01	0.1						
2012	5.76	0.01	0.1						
2013	5.68	-0.08	-1.4						
2014	5.71	0.03	0.5						
2015	5.60	-0.11	-2	7.55					
2016				7.64	0.09	1.2			

: Augmentation de la couche active : Diminution de la couche active

4.2 PUVIRNITUQ

4.2.1 CARACTÉRISTIQUES DES DÉPÔTS DE SURFACES ET DÉTAIL DE L'INSTRUMENTATION

4.2.1.1 SYNTHÈSE DE LA RÉPARTITION SPATIALE, DE L'ÉPAISSEUR ET DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUE DES DÉPÔTS SUPERFICIELS

La piste repose sur trois unités géologiques de surface différentes soit des affleurements rocheux, des dépôts d'origine marine et du till remanié lors du retrait de la mer de Tyrrell, donc plutôt sableux et pauvre en particules fines. La répartition spatiale de ces trois unités géologiques de surface suit un patron bien spécifique qui est intimement lié à la topographie régionale caractérisée par un relief ondulé où alternent sommets et dépressions de faible amplitude (dénivellation inférieure à 30 m). Les parties surélevées correspondent essentiellement à des affleurements rocheux dont la surface lisse est marquée par des polis glaciaires, tandis que les dépressions sont, quant à elles, comblées de dépôts meubles d'origine marine et/ou glaciaire. Le roc qui délimite ces dépressions peut plonger abruptement ce qui forme des cuvettes profondes à l'intérieur desquelles l'épaisseur des dépôts peut atteindre plus de 16 m. La piste est en grande partie construite sur des affleurements rocheux. Toutefois, elle traverse une vallée remplie de dépôts meubles entre les chaînages 6+125 et 6+390 m. C'est dans cette section de la piste traversée par la vallée qu'ont été observées la majorité des dégradations (L'Hérault et *al.*, 2012).

4.2.1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Puvirnituq comprend six câbles à thermistances automatisés (dont seulement trois sont fonctionnels) et un câble à thermistances à lectures manuelles (figure 13 et tableau 7) :

- **PUV_F2**: Le câble PUV_F2, instrumenté en 2008 et automatisé en 2009, comporte 15 thermistances entre la surface et 15 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans une berme du côté est de la piste, au chaînage 6+197 m, à moins d'un mètre de l'ancien pied de remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **PUV_F5**: Le câble PUV_F5, instrumenté en 2008 et automatisé en 2009, comporte 12 thermistances entre la surface et 6.5 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans une berme du côté ouest de la piste, au chaînage 6+315 m, à moins d'un mètre l'emplacement de l'ancien pied de remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- PUV_FOR1a : Le câble PUV_FOR1a, installé en 2005, comporte 11 thermistances entre 0.05 et 3.75 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1.5 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. Il est localisé à environ 122 m du côté est de la piste et à environ 50 m de la route d'accès, en terrain naturel (milieu argileux). L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- HT177, HT296 et HT297 : Les câbles HT177, HT296 et HT297 ont été installés en 1991 lors de la construction de la piste et automatisés en 2005. Le système d'acquisition, commun aux

trois câbles, a cessé de fonctionné depuis 2010. Les trois câbles installés dans le remblai de la piste forment un transect du centre vers le bord, au chaînage 6+170 m approximativement.

HT303 : Le câble HT303 a été installé en 1991 et comporte 11 thermistances entre 1 et 20 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé à environ 100 m du côté est de la piste et à environ 3 m à l'ouest de la route d'accès, en terrain naturel (dans le roc). Comme le câble n'est pas équipé d'un système d'acquisition, la lecture des températures se fait à intervalle ponctuel et irrégulier.



Figure 13 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport de Puvirnituq, Nunavik.

PUVIRNITUQ							
Câbles à thermistances	Mise en service	Système d'acquisition	Répartition des thermistances (cm)	Câbles à lectures manuelles			
PUV_F2	15-09-2009	CR1000	0-20-50-100-200-300-400-500-600-700-800-1000-1200-1400-1500	HT303			
PUV_F5	25-09-2009	CR1000	0-50-100-150-200-250-300-350-400-500-600-650				
PUV_FOR1a	27-06-2005	CR10X	5-25-50-75-100-150-200-250-300-350-375				
HT177	26-06-2005	CR10X	110-410-710-800-910-1580-1780-1880-1980-2180-2380-2580				
HT296	26-06-2005	CR10X	325-350-400-450-500-550-600-650-700-750-800				
HT297	26-06-2005	CR10X	525-550-600-650-700-750-800-850-900-950-1000				

Tableau 7 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Puvirnituq.
4.2.2 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

La température de l'air est mesurée à partir d'un capteur situé à 1.5 m du sol sur la station PUV_FORA. Les données couvrent la période de 2005 à 2016. Ainsi, la température moyenne journalière présentée à la figure 14, illustre que, depuis le début de l'enregistrement jusqu'en 2012, la tendance était au réchauffement et que depuis 2013, cette dernière s'est inversée.



Figure 14 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Puvirnituq pour la période de 2005 à 2016.

4.2.2.1 ÉVOLUTION DES INDICES CLIMATIQUES : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES, MENSUELLES ET SAISONNIÈRES DE L'AIR, DÉBUT, FIN, DURÉE ET MOYENNE DES SAISON DE GEL ET DE DÉGEL ET DEGRÉSJOURS DE GEL ET DE DÉGEL

L'année climatique 2015-2016 est marquée par des températures de l'air légèrement supérieures à la moyenne pour la période de 2005 à 2016. En effet, la TMAA mesurée de -3.55 °C est légèrement plus chaude que la moyenne de -3.92 °C pour la période de référence. Durant cette période, l'année 2009-2010 a été la plus chaude, avec une moyenne de -2.20 °C et l'année 2013-2014 a été la plus froide avec une moyenne de -5.36 °C (figure 15 et tableau 8).

Pour la période de 2005 à 2016, la saison de gel s'amorce en moyenne le 20 octobre, mais peut varier de plus de 28 jours d'une année à l'autre, et est d'une durée d'en moyenne 216 jours. De même, la saison de dégel débute en général autour du 25 mai avec une variation interannuelle de 28 jours, et dure en moyenne 148 jours. Pour l'année 2015-2016, la saison de gel a débuté le 10 octobre et a duré 216 jours alors que la saison de dégel a débuté le 1^{er} juin. Comme les données ont été téléchargées durant la période de transition entre les saisons, la fin de la saison de dégel n'a pu être déterminée. La température moyenne enregistrée durant la saison de gel 2015-2016 est de –15.47 °C et de 8.38 °C durant la saison de dégel se situe près de la moyenne de la période de référence. Cependant, la saison de dégel a été la seconde plus chaude enregistrée depuis le début de la période de référence (après celle de 2011-2012 de 9.01 °C). Comme mentionné précédemment, les températures froides enregistrées à Puvirnituq depuis l'année 2012-2013 ont inversé la tendance des dernières années qui était au réchauffement (Roger et *al.*, 2016). Cette

dernière indique maintenant une baisse de la température moyenne annuelle de –0.03 °C par an. Or, cette baisse s'effectue principalement lors de la période hivernale (tendance de –0.12 °C par an), car la tendance de la moyenne saisonnière estivale est toujours à la hausse (0.06 °C par an).

Ces tendances dans les températures moyennes sont aussi présentes dans le cumul des degrésjours de gel et de dégel, représentés par les indices de gel (Fi) et de dégel (Ti), ainsi que dans le ratio entre ces deux indices. Pour la période de 2005 à 2016, la tendance de Fi est à l'augmentation alors que celle de Ti est à la baisse. Pour l'année 2015-2016, l'indice de gel de 3646 et de dégel de 1139 sont tous deux au-dessus de la moyenne enregistrée pour la période de 2005 à 2016 ce qui suggère un hiver plus froid et un été plus chaud. Le ratio Fi/Ti obtenu de 3.2 est supérieur à la moyenne de 2.78 ce qui indique que, malgré un été chaud, le sol a emmagasiné moins de chaleur.



Figure 15 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport de Puvirnituq pour la période de 2005 à 2016.

De manière plus détaillée (tableau 9), l'année 2016, comparativement à 2015, présente des valeurs plus près des moyennes mensuelles. Ainsi, les températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) hivernales sont légèrement plus basses et estivales légèrement plus hautes que la moyenne pour la période de 2005 à 2016, en particulier les mois de mars et d'avril, dont la moyenne mensuelle est respectivement de 2.17 et 4.34 °C sous la moyenne.

PUVIRNITUQ												
Indices	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	Moyenne
Saison de gel												
Début (jj-mmm)	30-oct	25-oct	19-oct	28-oct	15-oct	04-nov	22-oct	07-oct	24-oct	15-oct	10-oct	20-oct
Fin (jj-mmm)	13-mai	02-juin	05-mai	01-juin	22-mai	30-mai	27-mai	25-mai	18-mai	30-mai	31-mai	24-mai
Durée (jour)	195	220	199	216	219	207	218	230	206	227	234	216
Moyenne (°C)	-14.50	-14.31	-18.28	-16.57	-11.94	-13.70	-15.06	-14.05	-18.11	-16.89	-15.47	-15.35
Saison de dégel												
Début (jj-mmm)	14-mai	03-juin	06-mai	02-juin	23-mai	31-mai	28-mai	26-mai	19-mai	31-mai	01-juin	25-mai
Fin (jj-mmm)	24-oct	18-oct	27-oct	14-oct	03-nov	21-oct	06-oct	23-oct	14-oct	09-oct	n.d.	19-oct
Durée (jour)	163	137	174	134	164	143	131	150	148	131	n.d.	148
Moyenne (°C)	6.73	6.77	7.80	8.22	7.53	7.33	9.01	6.15	7.40	7.27	8.38*	7.51
					Année	climatiqu	e					
TMAA (°C)	-3.88	-3.77	-5.24	-4.18	-2.20	-3.18	-3.02	-3.95	-5.36	-4.81	-3.55*	-3.92
Indice de gel (FI)	2846	3162	3660	3598	2638	2856	3312	3250	3751	3872	3646	3091
Indice de dégel (TI)	1111	940	1381	1115	1246	1062	1193	932	1109	960	1139*	1126
Ratio (FI/TI)	2.56	3.36	2.65	3.23	2.12	2.69	2.78	3.49	3.38	4.04	3.2*	2.78

Tableau 8 : Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport de Puvirnituq pour la période de 2005 à 2016. * En date du 13 octobre 2016.

Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) (°C) enregistrées à l'aéroport de Puvirnituq pour la période de 2005 à 2016.

PUVIRNITUQ													
Mois	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	$ar{x}$ mensuelles
Janvier	n.d.	-24.56	-23.55	-26.74	-25.30	-21.99	-18.03	-26.76	-25.43	-22.13	-30.01	-22.36	-24.26
Février	n.d.	-24.28	-23.24	-28.05	-24.89	-19.06	-24.67	-24.84	-25.56	-24.68	-33.99	-27.44	-25.52
Mars	n.d.	-13.81	-22.81	-22.34	-22.10	-16.75	-23.06	-20.72	-17.10	-26.24	-25.83	-23.47	-21.30
Avril	n.d.	-6.18	-11.10	-10.02	-10.66	-6.18	-14.03	-11.87	-12.04	-15.01	-10.38	-15.48	-11.18
Mai	n.d.	0.29	-4.76	1.60	-5.35	-1.36	-4.41	-1.01	-3.35	0.68	-2.15	-1.81	-1.97
Juin	n.d.	5.61	4.37	9.65	4.84	5.26	5.85	8.30	4.78	6.26	3.75	5.83	5.86
Juillet	9.45	11.18	10.08	14.27	14.85	12.75	10.50	11.28	8.73	11.26	10.72	12.32	11.45
Août	9.65	10.91	10.99	12.79	10.71	12.64	11.26	11.99	10.41	11.55	10.54	12.00	11.29
Septembre	6.49	5.58	4.39	4.66	5.10	7.42	5.57	6.86	3.93	3.57	5.21	6.50	5.44
Octobre	2.45	1.27	-0.21	1.08	-1.76	1.96	0.42	-1.81	0.50	0.95	-1.69	0.84	0.33
Novembre	-6.62	-5.69	-10.67	-8.57	-6.57	-2.54	-6.54	-7.45	-10.80	-10.11	-8.82	n.d.	-7.67
Décembre	-18.19	-13.20	-21.68	-21.76	-12.49	-7.95	-15.94	-14.39	-22.47	-15.31	-17.77	n.d.	-16.47

4.2.3 ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

4.2.3.1 CÂBLE AUTOMATISÉ PUV_FOR1A: 2005 À 2016

Les données thermiques du câble de référence (PUV_FOR1A), jusqu'à une profondeur de 3.75 m, s'échelonnent de juin 2005 jusqu'à octobre 2016. Depuis son installation, le tube dans lequel est installé le câble est remonté de plus de 1.5 m. Les températures selon la profondeur sont présentées à la figure 16 A et B, mais la profondeur réelle des thermistances est inconnue. Le câble devra être réajusté, ou du moins il faut maintenant remesurer la profondeur exacte des thermistances, pour poursuivre l'analyse thermique à cet endroit.



Figure 16 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble PUV_FOR1A localisé dans le roc à une dizaine de mètres de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période de A) 2005 à 2016 et B) 2015-2016.

4.2.3.2 CÂBLE AUTOMATISÉ PUV_F2 : 2009 À 2016

Les données thermiques du câble PUV_F2, sous la berme du côté est (figure 17), s'échelonnent depuis l'installation de la berme en septembre 2009 jusqu'en septembre 2016 (figure 18 A et B et figure 19). Le régime thermique enregistré au câble PUV_F2 répond aux températures de l'air entre les profondeurs de 0 et 1 m alors qu'à partir de 2 m le profil indique très peu de variations. Ainsi, depuis l'installation du câble, la température moyenne selon la profondeur indique que le profil thermique s'est refroidi dans les 5 premiers mètres, alors qu'en profondeur, il s'est réchauffé. Il est aussi à noter qu'une période zéro (stabilisation au point de congélation) qui survenait durant plusieurs mois en période de regel à 3 m de profondeur depuis 2012 semble s'être estompée en 2015 avec le refroidissement du profil (figure 19). Ce phénomène suggère que l'eau du sol dans la couche profondément dégelée en 2010 est en train de regeler de façon permanente; un tel regel, s'il se poursuit, augmentera la conductivité thermique du sol et possiblement accélérera la reprise et le refroidissement du pergélisol dans les prochaines années. Il est prévisible que le réchauffement en profondeur, initié sous une congère avant l'installation de la berme, sera stoppé et inversé d'ici quelques années si la tendance aux hivers froids se maintient; à suivre.

La profondeur maximale du front de dégel au câble PUV_F2 poursuit la tendance observée depuis le début de l'enregistrement. Depuis 2009, la profondeur maximum a diminué de -1.13 m passant de -4.28 m en 2009 à -3.16 m en 2015 (figure *20*). Rappelons qu'en 2008, une lecture manuelle du câble nouvellement installé avait mis en évidence que la profondeur de dégel atteignait 5.75 m à cet endroit, en pied de remblai, après plusieurs années de réchauffement sous une épaisse congère qui se formait le long du remblai (L'Hérault et *al.*, 2012). Les données de suivi jusqu'en 2016 montrent donc que le pergélisol est en train de se reformer sous la berme à convection construite pour remédier à cette situation. Bien que le système à convection de la berme ait certainement aidé, il est aussi évident que le refroidissement du climat de 2010 à 2016 et particulièrement les hivers froids de 2014 à 2016 ont favorisé la récupération du pergélisol. Le rôle respectif de l'un et l'autre facteur reste encore à mieux déterminer.



Figure 17 : Emplacement de la station d'enregistrement du câble à thermistances PUV_F2 localisé dans la berme à convection à l'est de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période de A) 2009 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 18 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances PUV_F2 localisé dans la berme à convection à l'est de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période de A) 2009 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 19 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances PUV_F2 localisé dans la berme à convection à l'est de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période de 2009 à 2016.



Figure 20 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances PUV_F2 localisé dans la berme à convection à l'est de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période 2009 à 2015.

4.2.3.3 CÂBLE AUTOMATISÉ PUV_F5 : 2009 À 2016

Le câble PUV_F5, localisé dans la berme du côté est de la partie centrale de la piste, présente des données de température à la baisse (figure 21 - A et B) sur l'ensemble des profondeurs sondées pour la période d'enregistrement. Cette baisse est plus importante en surface, où elle atteint près de 1.9 °C et diminue graduellement avec la profondeur où on enregistre une diminution de 0.1 °C pour cette même période. On observe simultanément une très lente remontée du plafond du pergélisol qui a augmenté de près d'un mètre durant la période de 2010 à 2015 (figure 22 et figure 23). Toutefois, une couche à forte teneur en eau vers 3.5 m de profondeur empêche le regel complet de la couche active retardant par le fait même l'extraction de chaleur. Il est à souhaiter que le refroidissement se poursuivre pour la regeler définitivement et créer des conditions thermiques davantage favorables au pergélisol.



Figure 21 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances PUV_F5 localisé dans la berme à convection à l'ouest de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période de A) 2009 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 22 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances PUV_F5 localisé dans la berme à convection à l'ouest de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période de 2009 à 2016.



Figure 23 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances PUV_F5 localisé dans la berme à convection à l'ouest de la piste d'atterrissage de Puvirnituq pour la période de 2009 à 2015.

4.2.4 FAITS SAILLANTS RELATIFS AU PERGÉLISOL À L'AÉROPORT DE PUVIRNITUQ

Les températures du sol des sites PUV_F2 et PUV_F5 indiquent qu'une remontée graduelle du front de dégel a été enregistrée. Les données de la température du sol recueillies aux câbles PUV_F2 et PUV_F5 lors la mise en place du remblai et de la berme à convection permettent de constater une remontée significative du front de dégel, soit 2.59 m (45 %), pour la station PUV_F2 et de 1.23 m (18 %) pour la station F5 d'après les estimations du front de dégel de 5.75 et de 6.75 m respectivement selon L'Hérault et *al.* (2012). Ce réajustement provoqué du front de dégel est certainement dû à un réajustement du régime thermique du pergélisol à la suite de la mise en place des bermes et remblais à convection d'air. Cependant, il n'en demeure pas moins que les quelques années relativement froides de 2010 à 2015 ont contribué au refroidissement sous les bermes comme le montrent en particulier les figure 21 et figure 23 où on voit clairement que l'onde de froid hivernal s'est fait sentir jusqu'à un mètre de profondeur en 2014 et 2016. Le rôle positif de la berme a été rehaussé récemment par des conditions climatiques plus favorables au pergélisol.

Câble	Influence du couvert nival	Localisation	Profondeur moyenne du dégel (m)	Tendance front de dégel
PUV_FOR1A	Faible	Terrain naturel	-1.78	Approfondissement constant
PUV_F2	Forte	Épaulement	-3.63	Remontée + stabilisation
PUV_F5	Forte	Épaulement	-6.16	Remontée récente

Tableau 10 : Synthèse a	e l'état du pergéliso	l aux câbles à thermistance	s de l'aéroport de Pi	uvirnituq
-------------------------	-----------------------	-----------------------------	-----------------------	-----------

Tableau 11 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum aux différents sites de l'aéroport de Puvirnituq pour les années 2004 à 2016.

	Épa	auleme	nt/	Épa	auleme	nt/				
	P	ériphéri	ie	Р	ériphéri	ie	Terrain naturel			
	PUVIR	NITUQ PU	JV_F2	PUVIR	NITUQ PI	JV_F5	PUVIRNITUQ PUV_FOR1A			
	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	
2004										
2005							1.01			
2006							1.22	0.21	20.7	
2007							1.21	-0.01	-0.8	
2008							1.38	0.17	14	
2009	4.28			6.5			1.44	0.16	4.3	
2010	3.76	-0.52	-12.1	6.5	0	0	1.73	0.29	20.1	
2011	3.68	-0.08	-2.1	6.5	0	0	1.88	0.15	8.6	
2012	3.82	0.14	3.8	6.25	-0.25	-3.8	2.07	0.19	10.1	
2013	3.42	-0.4	-10.5	6.03	-0.22	-3.5	2.12	0.05	2.4	
2014	3.31	-0.11	-3.2	5.85	-0.18	-3	2.26	0.14	6.6	
2015	3.16	-0.15	-4.5	5.52	-0.33	-5.6	2.36	0.1	4.4	
2016							2.70	0.34	16.9	

: Augmentation de la couche active

: Diminution de la couche active

4.3 AKULIVIK

4.3.1 CARACTÉRISTIQUES DES DÉPÔTS DE SURFACES ET DÉTAIL DE L'INSTRUMENTATION

4.3.1.1 Synthèse de la répartition spatiale, de l'épaisseur et des propriétés géotechnique des dépôts superficiels

La piste d'atterrissage de l'aéroport d'Akulivik traverse deux unités géologiques. La partie sudouest de la piste repose sur une plaine de sable marin riche en coquillages et sillonnée par des fentes de gel tandis que le nord-est de la piste repose principalement sur une butte de till recouverte par endroit d'une mince couche de sable marin ponctuée d'ostioles à bourrelets siltograveleux (Allard et *al.*, 1993). Les principaux signes de dégradation recensés par le MTMDET sont des dépressions dans la section sur till et quelques petites mares thermokarstiques en pied de remblai (L'Hérault et *al.*, 2012).

4.3.1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Akulivik comprend cinq câbles à thermistances automatisés répartis dans le terrain naturel à proximité de la piste, les accotements et dans le remblai de l'infrastructure et un câble à thermistances à lectures manuelles (figure 24 et tableau 12) :

- AKU_F1 : Le câble AKU_F1, instrumenté en 2008 comporte 12 thermistances entre 0.5 et 9.50 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté sud de la piste au chaînage 6+010 m à 25 m du pied du remblai vers le sud-est. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- AKU_F2 : Le câble AKU_F2, instrumenté en 2015, comporte 14 thermistances entre 0.05 et 15 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté nord de la piste chaînage 5+825 m à 1.8 m du pied du remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- AKU_F4 : Le câble AKU_F4, instrumenté en 2008, comporte 12 thermistances entre 0.50 et 9.50 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté nord de la piste au chaînage 5+825 m à 10 m du pied du remblai de la voie d'accès vers l'est-nord-est. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- HT162 : Le câble HT162, installé en 2004, comporte 11 thermistances entre 0.25 et 5 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1.5 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. Il est localisé du côté sud de la piste au chaînage 5+960 m à 25 m du pied du remblai vers le sud-est. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- HT183 : Le câble HT183, installé en 2004, comporte 11 thermistances entre 0.65 et 5.40 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans le remblai de la piste au chaînage 5+960 m. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **HT232**: Le câble HT232, installé en 1990, comporte 10 thermistances entre la surface et 17.5 m dans le sol afin d'assurer le suivi thermique. Il est situé du côté nord de la piste, au

chaînage 5+492 m, à environ 43 m de la piste dans les sédiments marins sableux. Comme le câble n'est pas équipé d'un système d'acquisition, la lecture des températures se fait à intervalle ponctuel et irrégulier.



Figure 24 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport d'Akulivik, Nunavik.

AKULIVIK										
Câbles à thermistances	Mise en service	Système d'acquisition	Répartition des thermistances (cm)	Câbles à lectures manuelles						
AKU_F1	12-10-2008	CR10X	50-75-100-200-300-400-500-600-700-800-900-950	HT232						
AKU_F2	17-10-2015	CR1000	5-25-50-75-100-150-200-250-300-400-500-600-700-800							
AKU_F4	11-10-2008	CR1000	50-75-100-200-300-400-500-600-700-800-900-950							
HT162	23-06-2004	CR10X	25-50-100-150-200-250-300-350-400-450-500							
HT183	23-06-2004	CR10X	65-90-140-190-240-290-340-390-440-490-540							

Tableau 12 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport d'Akulivik.

4.3.2 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

La station de référence HT162 est dotée d'un capteur pour enregistrer la température de l'air fixé à 1.5 m de hauteur et les données recueillies couvrent la période de 2004 à 2016. Comme les données ont été téléchargées à la fin du mois de septembre 2016, l'année climatique n'est pas complète. Cependant, les données obtenues jusqu'à cette date indiquent que la tendance est au refroidissement de la température de l'air pour la période couverte (figure 25).



Figure 25 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport d'Akulivik pour la période de 2004 à 2016.

4.3.2.1 ÉVOLUTION DES INDICES CLIMATIQUES : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES, MENSUELLES ET SAISONNIÈRES DE L'AIR, DÉBUT, FIN, DURÉE ET MOYENNE DES SAISON DE GEL ET DE DÉGEL ET DEGRÉSJOURS DE GEL ET DE DÉGEL

Depuis le début de la période de couverture des données de 2004 à 2016, l'année 2009-2010 a été la plus chaude, avec une moyenne de -2.29 °C et l'année 2013-2014 a été la plus froide avec une moyenne de -5.50 °C (figure 26 et tableau 13). L'année climatique 2015-2016 n'est pas complète, mais les données obtenues jusqu'à cette date indiquent que la saison de gel, avec une moyenne de la température de -15.11 °C, a été légèrement plus froide que la moyenne pour la période d'enregistrement qui est de -14.61 °C.

Les trois dernières années climatiques enregistrées à Akulivik ont été particulièrement froides et ont permis d'inverser la tendance de la température de l'air qui indique maintenant une légère baisse de près de 0.1 C/an. Cette diminution de la température s'effectue surtout lors de la période hivernale (-0.15 °C par an). La tendance dans les températures estivales, quoi qu'aussi en déclin, indique une diminution moins importante avec une tendance de -0.01 °C/an.

Pour la période de 2005 à 2016, la saison de gel s'amorce en moyenne le 21 octobre, mais peut varier de plus de 30 jours d'une année à l'autre. La durée moyenne de la saison de gel est de 217 jours. De même, la saison de dégel débute en général autour du 25 mai avec une variation interannuelle de 28 jours, et dure en moyenne 146 jours. Pour l'année 2015-2016, la saison de gel a débuté le 9 octobre et a duré 217 jours alors que la saison de dégel a débuté le 2 juin. Comme les données ont été téléchargées durant la période de dégel, la fin ainsi que la durée de la saison n'ont pu être déterminées.

Le cumul des degrés-jours de gel et de dégel, représentés par les indices de gel (Fi) et de dégel (Ti), ainsi que dans le ratio entre ces deux indices indique que, pour la période de 2005 à 2016, la

tendance de Fi est à l'augmentation (72 degrés-jours/an) alors que celle de Ti est à la baisse (19 degrés-jours/an). Pour l'année 2015-2016, l'indice de gel de 3587 degrés-jours indique un hiver plus froid que la moyenne observée (3188 degrés-jours).



Figure 26 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport d'Akulivik pour la période de 2005 à 2016.

ΑΚυμινικ												
Indices	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	Moyenne
Saison de gel												
Début (jj-mmm)	29-oct	25-oct	18-oct	28-oct	15-oct	06-nov	22-oct	07-oct	24-oct	14-oct	09-oct	21-oct
Fin (jj-mmm)	14-mai	03-juin	06-mai	01-juin	22-mai	01-juin	29-mai	27-mai	19-mai	02-juin	01-juin	24-mai
Durée (jour)	197	221	201	216	219	207	220	232	207	231	236	217
Moyenne (°C)	-13.52	-13.57	-17.19	-15.65	-11.33	-13.42	-14.31	-13.38	-17.17	-16.11	-15.11	-14.61
Saison de dégel												
Début (jj-mmm)	15-mai	04-juin	07-mai	02-juin	23-mai	02-juin	30-mai	28-mai	20-mai	03-juin	02-juin	25-mai
Fin (jj-mmm)	24-oct	17-oct	27-oct	14-oct	05-nov	21-oct	06-oct	23-oct	13-oct	08-oct	n.d.	19-oct
Durée (jour)	162	135	173	134	166	141	129	148	146	127	n.d.	146
Moyenne (°C)	5.84	5.83	6.65	7.72	6.75	6.25	7.87	4.93	6.17	6.29	n.d.	6.43
					Année	climatiqu	e					
TMAA (°C)	-3.84	-3.87	-5.27	-3.97	-2.29	-3.58	-3.22	-4.23	-5.50	-4.91	n.d.	-4.07
Indice de gel (FI)	2683	3013	3476	3399	2495	2798	3171	3120	3572	3754	3587	3188
Indice de dégel (TI)	961	801	1170	1051	1134	893	1024	741	915	806	n.d.	950
Ratio (FI/TI)	2.79	3.76	2.97	3.23	2.20	3.13	3.10	4.21	3.90	4.66	n.d.	3.40

Tableau 13 Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport d'Akulivik pour la période de 2005 à 2016.

Les températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) détaillées au tableau 14 indiquent qu'elles sont légèrement plus basses durant l'hiver et légèrement plus hautes en été que la moyenne pour la période de 2005 à 2016. Cette différence est plus importante durant les mois de mars et d'avril, dont la moyenne mensuelle est respectivement de 2.67 et 4.45 °C sous la moyenne mensuelle enregistrée depuis 2005.

AKULIVIK													
Mois	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	$ar{x}$ mensuelle
Janvier	-28.26	-22.84	-22.78	-24.73	-23.53	-20.33	-17.31	-25.79	-24.38	-21.53	-28.73	-21.63	-23.49
Février	-25.06	-22.84	-21.06	-26.99	-23.62	-18.90	-24.74	-23.22	-24.77	-23.43	-32.63	-26.34	-24.47
Mars	-17.18	-13.26	-21.85	-21.74	-21.59	-16.53	-22.36	-20.48	-16.57	-24.98	-24.79	-23.04	-20.36
Avril	-7.80	-6.75	-11.30	-10.18	-10.03	-5.51	-14.28	-11.87	-11.49	-14.53	-10.98	-15.28	-10.83
Mai	1.09	-0.44	-4.99	1.31	-5.53	-1.79	-4.74	-1.38	-3.91	-0.01	-2.87	-3.55	-2.23
Juin	4.02	3.86	2.72	7.38	3.73	3.70	4.03	6.11	2.32	4.38	2.56	4.37	4.10
Juillet	7.64	9.51	8.46	11.72	14.57	11.27	8.34	9.86	7.14	9.99	9.53	10.98	9.92
Août	8.59	10.09	10.08	11.26	10.33	11.87	10.53	10.89	9.52	9.52	9.43	11.68	10.31
Septembre	5.56	5.39	3.98	4.54	4.58	7.37	4.80	6.11	2.94	3.20	4.06	6.25	4.90
Octobre	2.24	1.28	-0.26	1.05	-1.30	2.20	0.45	-1.56	0.32	0.43	-1.84	n.d.	0.27
Novembre	-5.69	-5.24	-9.51	-7.62	-6.03	-2.08	-5.24	-6.55	-9.56	-8.99	-8.29	n.d.	-6.80
Décembre	-16.64	-12.07	-20.38	-20.14	-11.34	-7.31	-15.29	-13.75	-21.49	-14.82	-17.88	n.d.	-15.56

Tableau 14 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport d'Akulivik pour la période de 2005 à 2016.

4.3.3 ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

4.3.3.1 CÂBLE AUTOMATISÉ AKU_F1 : 2008 À 2016

Le câble AKU_F1 se situe à 25 m du pied du remblai de la piste d'atterrissage d'Akulivik. Malgré la profondeur de 15 m atteinte lors du forage, seul les premiers 9.5 m ont été instrumentés. Les données recueillies s'échelonnent depuis l'installation du câble en octobre 2008 jusqu'en mai 2016 seulement, à cause d'un bris de matériel. Le portrait général des températures du sol depuis l'installation du câble ainsi que l'année supplémentaire de données sont présentés aux figure 27 A et B et figure 28. Ils permettent de constater qu'un refroidissement est enregistré dans les 5 premiers mètres alors qu'en deçà de cette profondeur, la tendance est encore à l'augmentation de la température du sol (de 0.06 °C/an à 9.5 m).

Depuis 2010, le maximum annuel atteint par la couche active s'est d'abord approfondi pour ensuite remonter lentement les années subséquentes. Depuis 2012, où la profondeur atteinte par la couche active était à son maximum, le front de dégel est passé de -2.48 à 2.23 m (figure 29). La station AKU_F1 a une signature thermique similaire à la station HT162 suggérant des conditions d'enneigement similaires.



Figure 27 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances AKU_F1 localisé à 25 m du pied du remblai du côté sud au chaînage 6+010 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de A) 2008 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 28 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble AKU_F1 localisé à 25 m du pied du remblai du côté sud au chaînage 6+010 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de 2008 à 2016.



Figure 29 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances AKU_F1 localisé à 25 m du pied du remblai du côté sud au chaînage 6+010 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour les années 2008 à 2015.

4.3.3.2 CÂBLE AUTOMATISÉ HT162 : 2008 À 2016

Le câble HT162, utilisé comme référence, se situe dans le till en terrain naturel non loin de la piste d'atterrissage. Le portrait général des températures du sol présenté aux figure 30 A et B et figure 31 permet de constater que tout comme AKU_F1, HT162 enregistre un refroidissement généralisé depuis l'année chaude de 2010. À noter, les profondeurs de 0.05 à 0.25 m ont été retirées en raison d'une incongruité au niveau des profondeurs, causée par le rehaussement du câble à thermistance dû au tassement du sol et au soulèvement gélival du tubage. Le régime thermique en surface est principalement conditionné par les températures de l'air. En effet, l'influence des hivers froids enregistrés en 2013, 2014 et 2015 se répercute profondément dans le sol encore en 2016, où la température moyenne à 5 m de profondeur a atteint sa valeur la plus basse depuis le début de l'enregistrement. Depuis 2010, la température du sol à cette profondeur est passée de -2.09 °C à -3.71 °C. L'année particulièrement chaude de 2010 a eu beaucoup d'impact sur les températures du sol avec une moyenne des températures de surface beaucoup plus chaude en hiver. En effet, l'épaisseur de la couche active a augmenté de 22 % passant de 2.34 m en 2009 à 2.86 m en 2010. Une diminution de l'épaisseur de la couche active a été enregistrée par la suite jusqu'en 2015.

Malgré ces fluctuations importantes, l'épaisseur de la couche active a diminué (figure 32) atteignant 2.47 m de profondeur en 2016 depuis son maximum de 2.86 m en 2010. La progression annuelle du front de dégel vers le haut diffère légèrement de la station voisine AKU_F1 laquelle enregistre une épaisseur de la couche active relativement stable depuis 2013. La corrélation importante entre les températures de l'air et le régime thermique du sol suggère que l'épaisseur restreinte du couvert neigeux, similaire à celui qu'on retrouve au site AKU_F1, n'isole pas complètement le sol en hiver et permet un échange thermique air-sol.



Figure 30 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT162 localisé dans le till en terrain naturel du côté sud au chaînage 5+960 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de A) 2008 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 31 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble HT162 localisé dans le till en terrain naturel du côté sud au chaînage 5+960 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de 2008 à 2016.



Figure 32 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT162 localisé dans le till en terrain naturel du côté sud au chaînage 5+960 m de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour les années 2008 à 2016.

4.3.3.3 CÂBLE AUTOMATISÉ HT183 : 2004 À 2016

Le câble HT183 (figure 33) est installé dans le remblai de la piste jusqu'à 5.4 m de profondeur dans le till sous-jacent. Contrairement aux valeurs enregistrées aux câbles AKU_F1 et HT162 en milieu naturel, celles du câble HT183 ont moins subi les effets des températures chaudes enregistrées en 2010 (figure 34 A et B et figure 35). En effet, de 2009 à 2010, la couche active n'a gagné que 4.5 cm, soit une augmentation de 2 % contrairement à 22 % pour HT162 et 33 % pour AKU_F1. En l'absence d'un couvert neigeux à cause du déneigement de la piste, les températures froides enregistrées à l'hiver 2013, 2014 et 2015 ont favorisé l'extraction de chaleur du sol, diminuant ainsi la température. Ainsi, la température moyenne annuelle du sol à 5.4 m de profondeur a augmenté de près de 1.5 °C, passant de -3.64 °C (2011) à -5.07 °C (2015).

Les années récentes plus froides ont eu pour effet de diminuer l'épaisseur de la couche active de 1.54 m qui s'est approfondie par la suite légèrement en 2016 à 1.77 m (figure 36). Toutefois, avec une épaisseur de remblai estimée à environ 0.75 m dans sa section la plus mince (Allard et *al.*, 2007), le front de dégel se situe toujours dans l'ancienne couche active consolidée et pauvre en glace.



Figure 33 : Station d'enregistrement du câble à thermistances HT183 sur le remblai de la piste d'Akulivik.



Figure 34 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT183 localisé sur le remblai, du côté sud de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 35 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT183 localisé sur le remblai, du côté sud de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de 2004 à 2016.



Figure 36 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT183 localisé sur le remblai, du côté sud de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour les années 2009 à 2016.

4.3.3.4 CÂBLE AUTOMATISÉ AKU_F4 : 2009 À 2015

Le câble AKU_F4 (figure 37) se situe du côté nord de la piste à 10 m du pied de remblai de la voie d'accès. Le forage fait 10.41 m de profondeur dont les premiers 9.5 m sont instrumentés. Les quatre premiers mètres consistent en des sédiments littoraux sous lesquels repose un till remanié. Dû à des problèmes techniques à la station d'enregistrement, les données couvrent jusqu'en octobre 2015 seulement. Le portrait général des températures du sol présenté aux figure 38 A et B et figure 39 permet de constater que tout comme les autres câbles à Akulivik, AKU_F4 a enregistré un refroidissement des températures de surface à l'hiver 2015 ainsi qu'une diminution des températures maximales en été. Par contre, les températures du sol en profondeur continuent de se réchauffer progressivement. Toutefois, ce refroidissement en surface est beaucoup moins marqué que les autres stations. En effet, les températures anormalement froides enregistrées pendant les mois de janvier, février et mars 2015 ne se répercutent que très faiblement sur les profondeurs de surface sans pénétrer en profondeur. Ainsi, la température du sol entre 1 et 6 m de profondeur demeure comprise entre -1 et 0 °C pendant tous les hivers tandis que des températures de -19 °C à 1 m de profondeur ont été enregistrées en milieu naturel le 3 mars 2015 au câble HT162. Ce réchauffement du profil thermique est induit par l'enneigement abondant dans le fossé adjacent à la voie d'accès. Le front de dégel s'approfondit annuellement depuis 2009 (figure 40) tandis qu'il remonte graduellement aux câbles AKU F1 (figure 29), HT162 (figure 32) et HT183 (figure 36) depuis 2010. En six ans, soit de 2009 à 2015, la couche active s'est épaissie de 15 % augmentant de 3.16 m à 3.71 m d'épaisseur dans ce fossé.



Figure 37 : Localisation de la station d'enregistrement du câble automatisé AKU_F4.



Figure 38 : Température du sol selon la profondeur en fonction du temps au câble à thermistances HT183 localisé sur le versant externe d'un fossé à l'intersection entre la voie d'accès et de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de A) 2009 à 2015 et B) entre 4 et 9.5 m de profondeur pour la période de 2009 à 2015.



Figure 39 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances AKU_F4 localisé sur le versant externe d'un fossé à l'intersection entre la voie d'accès et de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de 2009 à 2015.



Figure 40 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances AKU_F4 localisé sur le versant externe d'un fossé à l'intersection entre la voie d'accès et de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour les années 2008 à 2015.

4.3.3.5 CÂBLE AUTOMATISÉ AKU_F2 : 2015-2016

Le câble AKU_F2 est localisé au chaînage 5+825 à 1.8 m du pied du remblai du côté nord de la piste d'atterrissage d'Akulivik. Le câble installé atteint 8 m de profondeur et traverse une unité de sédiments littoraux superficiels et de till remanié en profondeur. Le portrait général des températures du sol présenté à la figure 41 A et B permet de constater que ce dernier est fortement influencé par le couvert nival et montre un profil thermique particulièrement chaud. En effet, la température du sol indique que les variations de température sont très faibles durant la saison de gel et qu'elles sont fortement influencées par celles de l'air durant la saison de dégel. Ainsi, la neige semble isoler le sol pendant la saison de gel, empêchant par le fait même l'extraction de la chaleur accumulée durant la saison de dégel, ce qui à long terme induit un réchauffement du profil thermique. La profondeur de dégel enregistrée en 2015 et 2016 à cet endroit atteint respectivement 6.66 et 6.70 m de profondeur (figure 42).



Figure 41 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) temps au câble à thermistances AKU_F2 localisé au chaînage 5+825 m à 1.8 m du pied du remblai du côté nord de la piste d'atterrissage d'Akulivik, pour la période de 2015 à 2016.


Figure 42 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances AKU_F2 localisé au chaînage 5+825 m à 1.8 m du pied du remblai du côté nord de la piste d'atterrissage d'Akulivik pour les années 2015 et 2016.

4.3.4 FAITS SAILLANTS RELATIFS AU PERGÉLISOL À L'AÉROPORT D'AKULIVIK

Le pergélisol présent en pied de remblai et dans les fossés du côté nord de la piste est fortement dégradé comme en témoignent les mesures thermiques de 2015 et de 2016 enregistrées aux câbles AKU F2 et AKU F4 ainsi que celles réalisées manuellement de 2007 à 2015 au câble HT232 ainsi qu'en 2008 aux câbles AKU F2 et AKU F3 (tableau 15 et tableau 16). De 2009 à 2012, le régime thermique du sol à AKU_F4 s'est considérablement réchauffé en raison des températures plus clémentes pour atteindre une couche active de 3.71 m en 2012. Depuis, le maximum de la couche active semble s'être stabilisé et remonte légèrement. Aucune mesure de neige n'a été prise par l'équipe du MTMDET, mais l'analyse des profils thermiques des câbles AKU F2 et AKU F4 indique qu'un important couvert nival recouvre l'accotement/fossé nord en hiver. La topographie est peu favorable à l'accumulation de neige suggérant que l'accumulation de neige qui s'y trouve résulte du déneigement. La présence de ce couvert nival en marge de remblai au nord de la piste en hiver a pour effet d'emmagasiner la chaleur dans le sol tout en isolant celui-ci des températures froides de l'hiver empêchant ainsi le front de dégel de remonter. L'instrumentation récente et l'automatisation du forage AKU_F2 à l'automne 2015 ont démontré que le pergélisol en pied de remblai du côté nord la piste a un profil thermique chaud et une couche active très importante dont le maximum atteint 6.70 m de profondeur.

L'extrémité nord-est de la piste présente un tout autre régime thermique avec une remontée graduelle récente du front de dégel aux stations HT162 et AKU_F1. L'état du pergélisol est moins critique avec une épaisseur de couche active variant entre 2.26 m (AKU_F1) et 2.48 m (HT162). La dynamique thermique des deux sites est similaire et est caractérisée par un approfondissement considérable du front de dégel en 2010 suivie d'une remontée graduelle jusqu'en 2016 retrouvant une épaisseur similaire à celle enregistrée en 2008. Le régime thermique des stations AKU_F1 et HT162 suggère que le couvert neigeux n'est pas critique à cet endroit. En l'absence de couvert neigeux, le câble HT183 qui se situe dans la piste a enregistré une remontée marquée du front de dégel à la suite des températures froides en 2013. Depuis 2013, le maximum de dégel s'est approfondi de façon lente et régulière.

Câble	Influence du couvert nival	Distance de la piste	Profondeur moyenne du dégel (m)	Tendance
AKU_F1	Faible	Terrain naturel	-2.26	Remontée récente + stabilisation
AKU_F2	Forte	Épaulement	-6.68	Fortement dégradé
AKU_F4	Forte	Fossé	-3.61	Remontée récente + stabilisation
HT162	Faible	Terrain naturel	-2.48	Remontée récente + stabilisation
HT183	Faible	Piste	-1.70	Approfondissement récent
HT232*	-	Terrain naturel	-1.05	Remontée récente + stabilisation

Tableau 15 : Synthèse de l'état du pergélisol aux câbles à thermistances de l'aéroport d'Akulivik.*Câble à lectures manuelle et ponctuelle.

				Épa	uleme	ent/	Épaulement/								
	Piste Périphérie				rie	Pé	ériphér	ie	Terrain naturel			Terrain naturel			
	AKULIVIK HT183			AKULIVIK AKU_F2			AKULIVIK AKU_F4			AKULIVIK HT162			AKULIVIK AKU_F1		
	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)
2004															
2005															
2006															
2007															
2008							3.47			1.98			1.98		
2009	1.86						3.16	0.31	8.9	2.34	0.36	18.1	2.05	0.07	3.5
2010	1.91	0.05	2.4				3.47	-0.31	-9.8	2.86	0.52	22.3	2.72	0.67	32.7
2011	1.76	-0.15	-7.7				3.47	0	0	2.54	-0.32	-11.2	2.05	-0.67	-24.6
2012							3.9	-0.43	-12.4	2.67	0.13	4.9	2.48	0.44	21.4
2013	1.32	-0.43	-24.7				3.87	0.03	0.8	2.37	-0.3	-11.1	2.29	-0.2	-8.1
2014	1.59	0.27	20.2				3.82	0.05	1.3	2.5	0.13	5.4	2.30	0.01	0.44
2015	1.54	-0.05	-3.2	6.66			3.71	0.21	5.5	2.31	-0.19	-7.6	2.23	-0.07	-3
2016	1.77	0.23	14.9	6.7	0.04	0.6				2.47	0.16	6.9			

Tableau 16 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum aux différents sites d'Akulivik pour les années 2004 à 2016.

: Augmentation de la couche active

: Diminution de la couche active

4.4 SALLUIT

4.4.1 CARACTÉRISTIQUES DES DÉPÔTS DE SURFACES ET DÉTAIL DE L'INSTRUMENTATION

4.4.1.1 SYNTHÈSE DE LA RÉPARTITION SPATIALE, DE L'ÉPAISSEUR ET DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUE DES DÉPÔTS SUPERFICIELS

L'aéroport de Salluit, situé à 225 m d'altitude sur des hauts plateaux, repose sur une mosaïque de trois types d'unités géologiques de surface, à savoir : des dépôts de till épais (> 2 m), des couvertures de till mince et discontinu sur le roc et des affleurements rocheux. La topographie du secteur se caractérise par un relief ondulé où alternent sommets et creux (L'Hérault et al., 2012). Sur les sommets, le roc affleure ici et là, tandis que dans les creux topographiques, le till peut atteindre des épaisseurs de plus de 7 m. C'est également à l'intérieur de ces creux topographiques, souvent mal drainés, que s'accumulent tourbe et colluvions dans lesquelles se développent fréquemment des réseaux de coins de glace (L'Hérault et al., 2012). Sur les pentes, souvent à partir de 8° d'inclinaison, mais parfois moins, des lobes de gélifluxion et des ostioles à bourrelet se forment en surface du till, processus lents et limités à la couche active dont l'épaisseur est comprise entre 1.80 et 2.2 m (L'Hérault et al., 2012). Les principaux signes de dégradation recensés à l'aéroport lors des travaux de caractérisation en 2008 correspondaient à des tassements et des dépressions le long de l'accotement ainsi qu'à l'accumulation de l'eau dans les fossés combinés à un mauvais réseau de drainage (Allard et al., 2007). La piste d'atterrissage de Salluit ainsi que ses infrastructures ont été achevées en 1988. La piste a une longueur totale de 1190 m, du chaînage 1+810 m au chaînage 3+000 m, et une largeur de 44 m. Son axe est orienté sud-sud-ouest nord-nord-est. La piste repose à une altitude d'environ 220 m à son extrémité sud-sud-ouest et 226.1 m à son extrémité nord-nord-est (L'Hérault et al., 2012).

4.4.1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol à Salluit comprend quatre câbles à thermistances automatisés et trois câbles à thermistances à lectures manuelles (figure 43 et tableau 17) :

- SAL_F2 : Le câble SAL_F2, instrumenté en 2015, comporte 7 thermistances entre la surface et 15 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté est de la piste au chaînage 2+510 m à 10 m du pied du remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- SAL_F3 : Le câble SAL_F3, instrumenté en 2012, comporte 21 thermistances entre la surface et 15 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans le remblai de la piste, sous une pente douce tronquée qui a été construite pour combler partiellement une dépression topographique entre la piste, sous laquelle des tassements se produisaient, et le terrain naturel. Il se trouve du côté est de la piste au chaînage 2+030 m et l'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **SAL_F4** : Le câble SAL_F4, instrumenté en 2002, comporte 11 thermistances entre la surface et 13 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté est de la

piste, au chaînage 2+185 m, dans le fossé de drainage à 1 m du pied du remblai. Comme le câble n'est pas équipé de système d'acquisition, la lecture des températures se fait à intervalle ponctuel et irrégulier.

- HT154 : Le câble HT154, instrumenté en 1987 et automatisé en 2002, comporte 11 thermistances entre 1 et 20 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé à environ 75 m du côté ouest de la piste, au niveau du chaînage 2+460 m, en terrain naturel (dans le roc). L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10.
- HT155 : Le câble HT155, instrumenté en 1987 et automatisé en 2014, comporte 11 thermistances entre 0.75 et 19.75 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé sous le remblai du tarmac, à environ 75 m du côté ouest de la piste, au niveau du chaînage 2+450. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000 qu'il partage avec le câble HT172.
- **HT172**: Le câble HT172, instrumenté en 1987 et automatisé en 2014, comporte 25 thermistances entre 0.25 et 19.50 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans le remblai près du centre piste au chaînage 2+650. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000 qu'il partage avec le câble HT155.
- HT160 et HT179 : Les câbles HT160 et HT179, installés en 1987, comportent tous deux 11 thermistances réparties entre 0.25 et 5 m et 2.32 et 7.07 m respectivement. Le câble HT160 est localisé à 25 m de la piste en terrain naturel (till mince sur du roc) et le câble HT179 à 10 m du bord dans le remblai de la piste. Les deux câbles forment un transect de la piste au terrain naturel au chaînage 2+900 m approximativement. Comme les câbles ne sont pas équipés de système d'acquisition, la lecture des températures se fait à intervalle ponctuel et irrégulier.



Figure 43 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport de Salluit, Nunavik.

SALLUIT										
Câbles à thermistances	Miseen service	Mise en Système Répartition des thermistances (cm) Caservice d'acquisition								
SAL_F2	16-10-2015	CR1000	5-25-50-75-100-200	HT179						
SAL_F3	08-10-2012	CR1000	0-50-100-150-200-250-300-350-400-415-500	HT160						
			550-600-650-700-750-800-850-900-1100-1500	SAL_F4						
HT154	17-07-1987	CR10	100-200-300-400-600-800-1000-1200-1500-1800-2000							
HT155	30-06-2014	CR1000	75-175-275-375-575-775-975-1175-1475-1775-1975							
HT172	30-06-2014	CR1000	25-50-100-130-200-230-300-330-400-500-530-600-700							
			730-800-900-930-1100-1130-1400-1430-1700-1730-1930-1950							

Tableau 17 : Sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Salluit

4.4.2 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Dans le cadre d'une étude régionale pour le compte du Ministère de la Sécurité publique (MSP), une station météorologique a été installée à l'aéroport en 2002 afin de mesurer la température de l'air ainsi que la vitesse du vent et sa direction. Cette station visait à mesurer les conditions climatiques sur les hauts plateaux ou est localisé l'aéroport. Malheureusement, cette station a subi un bris d'équipement à l'automne 2007 et en 2008 ce qui explique la perte de données durant cette période. En juillet 2014, Environnement Canada a procédé à l'installation d'une station météorologique à l'aéroport de Salluit. Notons que devant ce dédoublement d'efforts, nous avons

démantelé la station du Centre d'études nordiques à l'aéroport au cours de l'été 2016. La température moyenne journalière est présentée à la figure 44. Depuis le début du suivi climatique, la tendance indique que la température de l'air s'est réchauffée jusqu'en 2012, mais que depuis, la tendance s'est inversée à la suite des hivers froids et étés relativement frais de 2012 à 2016.



Figure 44 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Salluit pour la période de 2002 à 2016.

4.4.2.1 ÉVOLUTION DES INDICES CLIMATIQUES : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES, MENSUELLES ET SAISONNIÈRES DE L'AIR, DÉBUT, FIN, DURÉE ET MOYENNE DES SAISON DE GEL ET DE DÉGEL ET DEGRÉSJOURS DE GEL ET DE DÉGEL

Les températures de l'air enregistrées indiquent que l'année climatique la plus froide demeure 2013-2014, avec une moyenne annuelle de 5.93 °C, et l'année la plus chaude 2009-2010 avec une moyenne annuelle de -2.54 °C, comparativement à la moyenne de -4.18 °C pour toute la période. L'année 2015-2016, avec une moyenne de -4.00 °C a été quant à elle légèrement au-dessus de la moyenne de la période de référence. Depuis 2013, les saisons de gel ont été marquées par des températures très froides alors que la saison de dégel 2015-2016 a été la plus chaude enregistrée à Salluit pour la période de 2005 à 2016.

Pour la période de 2005 à 2016, la saison de gel s'amorce en moyenne le 5 octobre, mais peut varier de plus de 43 jours d'une année à l'autre, et est d'une durée d'en moyenne 236 jours. De même, la saison de dégel débute en général autour du 30 mai avec une variation interannuelle de 30 jours, et dure en moyenne 125 jours. Pour l'année 2015-2016, la saison de gel a débuté le 4 octobre et a duré 249 jours alors que la saison de dégel a débuté le 10 juin et s'est terminée le 3 octobre, pour un total de 115 jours. La température moyenne enregistrée durant la saison de gel 2015-2016 est de -14.23 °C et de 5.88 °C durant la saison de dégel 2016. La moyenne de la température de l'air pour la saison de gel se situe en deçà de la moyenne de la période de référence. Cependant, la saison de dégel a été la plus chaude enregistrée depuis le début 2005 (tableau 18). Comme mentionné précédemment, les températures froides enregistrées à Salluit

depuis l'année 2012-2013 ont inversé la tendance des dernières années qui était au réchauffement (L'Hérault et *al.*, 2012; Roger et *al.*, 2016). Cette dernière indique maintenant une baisse de la température moyenne annuelle de -0.1 °C par an. Or, cette baisse s'effectue principalement lors de la période hivernale (tendance de -0.25 °C par an), car la tendance de la moyenne saisonnière estivale est toujours à la hausse (0.04 °C par an). Il est à noter que ces valeurs de tendance ne tiennent pas en compte les années climatiques de 2007-2008 et de 2008-2009.

Ces tendances dans les températures moyennes sont aussi présentes dans le cumul des degrésjours de gel et de dégel, représentés par les indices de gel (Fi) et de dégel (Ti), ainsi que dans le ratio entre ces deux indices. Pour la période de 2005 à 2016, la tendance de Fi est à l'augmentation alors que celle de Ti est à la baisse. Pour l'année 2015-2016, l'indice de gel de 3715 et de dégel de 771 sont tous deux au-dessus de la moyenne enregistrée pour la période de 2005 à 2016 et indiquent un hiver plus froid et un été plus chaud. Le ratio Fi/Ti obtenu de 4.82 est supérieur à la moyenne de 4.66 ce qui indique, malgré un été chaud, que le sol a emmagasiné moins de chaleur.



Figure 45 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport de Salluit pour la période de 2005 à 2016.

La moyenne mensuelle de la température de l'air détaillée au tableau 19 indique que les températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) hivernales sont légèrement plus basses et estivales légèrement plus hautes que la moyenne pour la période de 2005 à 2016. Cette différence est plus importante durant les mois d'avril, dont la moyenne mensuelle est de 3.68 °C sous la moyenne mensuelle enregistrée depuis 2005.

	SALLUIT													
Indices	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	Moyenne		
	Saison de gel													
Début (jj-mmm)	27-oct	05-oct	17-sept	08-oct	24-sept	21-oct	30-sept	04-oct	22-oct	14-sept	04-oct	05-oct		
Fin (jj-mmm)	15-mai	05-juin	10-mai	05-juin	24-mai	02-juin	30-mai	05-juin	20-mai	09-juin	09-juin	29-mai		
Durée (jour)	200	243	236	240	242	224	243	244	210	268	249	236		
Moyenne (°C)	-14.23	-13.42	n.d.	n.d.	-11.14	-13.67	-13.94	-13.64	-17.79	-14.97	-15.32	-14.23		
					Saiso	n de dége								
Début (jj-mmm)	16-mai	06-juin	11-mai	06-juin	25-mai	03-juin	31-mai	06-juin	21-mai	10-juin	10-juin	30-mai		
Fin (jj-mmm)	04-oct	16-sept	07-oct	23-sept	20-oct	29-sept	03-oct	21-oct	13-sept	03-oct	03-oct	02-oct		
Durée (jour)	141	102	149	109	148	118	125	137	115	115	115	125		
Moyenne (°C)	5.23	6.22	n.d.	n.d.	6.06	6.14	6.85	3.79	5.93	5.41	7.32	5.88		
			-	-	Année	climatiqu	e		-					
TMAA (°C)	-4.50	-3.60	n.d.	n.d.	-2.54	-3.76	-3.54	-4.92	-5.93	-4.78	-4.00	-4.18		
Indice de gel (FI)	2862	3170	n.d.	n.d.	2718	3084	3419	3345	3754	4056	3715	3347		
Indice de dégel (TI)	765	657	n.d.	n.d.	920	736	867	583	699	637	771	737		
Ratio (FI/TI)	3.74	4.82	n.d.	n.d.	2.96	4.19	3.94	5.74	5.37	6.37	4.82	4.66		

Tableau 18 Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti)à l'aéroport de Salluit pour la période de 2005 à 2016.

Tableau 19 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport de Salluit pour la période de 2005 à 2016.

						SAL	LUIT						
Mois	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	x mensuelle
Janvier	-28.76	-22.36	-22.44	n.d.	n.d.	-20.14	-18.11	-24.90	-24.42	-20.74	-28.83	-22.06	-23.27
Février	-24.40	-22.20	-19.72	n.d.	n.d.	-16.67	-26.21	-23.01	-24.04	-24.21	-31.18	-25.64	-23.73
Mars	-17.50	-14.44	-25.00	n.d.	n.d.	-16.97	-22.62	-20.75	-16.48	-24.98	-24.12	-22.98	-20.58
Avril	-8.31	-8.25	-11.70	-9.25	-11.24	-7.01	-15.72	-12.63	-11.60	-15.14	-12.62	-15.24	-11.56
Mai	-1.46	-1.39	-8.32	0.79	-7.36	-2.84	-6.56	-2.82	-6.10	-1.18	-5.01	-3.74	-3.83
Juin	3.75	2.94	0.54	5.12	0.25	2.58	2.95	6.65	1.16	4.12	1.21	2.69	2.83
Juillet	8.59	9.22	8.42	n.d.	n.d.	9.58	9.27	8.95	7.05	7.78	9.29	10.03	8.82
Août	7.79	8.01	8.78	10.43	5.74	10.99	9.37	8.59	6.92	8.30	7.55	10.49	8.36
Septembre	2.75	3.11	2.18	1.58	1.79	5.28	1.93	3.65	1.41	0.13	1.53	4.37	2.48
Octobre	0.01	-0.82	-1.00	-0.19	-4.35	-0.01	-2.30	-3.42	-2.39	-2.19	-4.86	-4.31	-2.15
Novembre	-7.97	-7.48	n.d.	n.d.	-8.03	-4.13	-7.93	-8.90	-12.41	-11.51	-10.66	-7.68	-8.67
Décembre	-17.43	-14.17	n.d.	n.d.	-12.57	-8.47	-17.37	-15.00	-22.30	-17.14	-19.75	-18.38	-16.26

4.4.3 ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

4.4.3.1 CÂBLE AUTOMATISÉ HT154 : 2002 À 2016

Le câble HT154 est muni de 11 thermistances distribuées verticalement entre 1 et 20 m de profondeur. Le portrait général des températures du sol présenté aux figure 46 A et B et figure 47 permet de constater qu'il y a un refroidissement généralisé du profil thermique à cet endroit depuis l'année chaude de 2010. Entre 2002 et 2011, la température moyenne du sol jusqu'à 20 m n'a cessé d'augmenter. Toutefois, depuis 2012, on observe un léger refroidissement des températures en profondeur qui s'explique par la succession d'années froides caractérisées par des températures de l'air inférieures à la moyenne pour la période 2012 à 2015. L'hiver 2009-2010 et l'été 2010, qui ont été particulièrement chauds, ont eu des répercussions importantes sur la couche active (figure 48). De 2009 à 2010, la couche active a augmenté de 22 %, passant de 3.78 m à 4.50 m. Toutefois, la conductivité élevée du roc combinée aux températures froides des années suivantes ont permis une remonté rapide du front de dégel lequel a atteint -3.16 m en 2015, soit une réduction de la couche active de 30 % par rapport à l'année chaude de 2010. En 2016, le maximum atteint par le dégel de la couche active a augmenté légèrement, suivant la tendance de la température de l'air, pour atteindre 3.55 m de profondeur. Suite à l'année chaude de 2010, le pergélisol compris entre 8 et 18 m de profondeur s'est maintenu à des températures plus chaudes durant quelques années pour ensuite s'équilibrer de nouveau avec les conditions plus froides qui caractérisent la période 2013-2015.



Figure 46 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT154 localisé dans le roc à l'ouest de la piste d'atterrissage de Salluit pour la période de A) 2008 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 47 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT154 localisé dans le roc à l'ouest de la piste d'atterrissage de Salluit pour la période de 2006 à 2016.



Figure 48 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT154 localisé dans le roc à l'ouest de la piste d'atterrissage de Salluit pour les années 2002 à 2016.

4.4.3.2 CÂBLE AUTOMATISÉ HT172 : 2015-2016

Le câble HT172 est installé sous la piste près du centre piste. Il traverse 5.3 m de remblai avant de pénétrer dans le till en dessous. Les valeurs de températures obtenues couvrent la période d'octobre 2015 à juillet 2016 seulement à cause d'un problème technique. Le portrait général des températures du sol présenté à la figure 49 permet de constater que ce dernier est fortement influencé par les fluctuations de la température de l'air étant donné l'absence d'un couvert végétal et d'un couvert nival dû au déneigement de la piste. La courte série disponible ne permet cependant pas de déterminer la profondeur atteinte par le dégel en 2016, mais est estimée à 1.61 m en date du 16 octobre 2015 (regel déjà entamé).



Figure 49 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT172 localisé au chaînage 2+600 dans le remblai de la piste d'atterrissage de Salluit pour l'année 2015-2016.

4.4.3.3 CÂBLE AUTOMATISÉ SAL_F2 : 2015 À 2016

À l'automne 2015, le forage SAL_F2 a été instrumenté et automatisé. Toutefois, en raison de l'obstruction du tuyau de PVC à deux mètres de profondeur, seulement 7 thermistances sur 14 ont pu être installées. Aussi, un problème avec la batterie est survenu au suite à la mise en fonction de la station et aucune donnée n'est disponible.

4.4.3.4 CÂBLE AUTOMATISÉ SAL_F3 : 2012 À 2016

Le câble SAL_F3 (figure 50) se situe à mi-pente du remblai à l'extrémité sud-est de la piste d'atterrissage. Le forage SAL_F3 a été automatisé à l'automne 2012 et est muni d'un câble de 21 thermistances distribuées verticalement entre 0 m et 15 m de profondeur. Le portrait global

des températures enregistrées et disponibles pour la période de 2012 est présenté aux figure 51 A et B et figure 52. Il est possible d'y observer que les températures de surface sont influencées par le couvert nival durant la saison de gel ainsi que par une très longue période zéro allant jusqu'à plus de 5 mois lors du regel de la couche active en 2015 à 3 m de profondeur. Il en est de même lors du dégel où la température du sol demeure près du point de fusion plus d'un mois avant qu'elle augmente rapidement de nouveau. Le maximum atteint par le dégel à cet endroit est d'ailleurs estimé entre 2.86 (2014 et 2016) et 3.22 m (2015) de profondeur. Depuis 2012, les températures moyennes selon la profondeur indiquent que le profil thermique du sol s'est refroidi en surface, mais que la tendance est encore au réchauffement en profondeur (figure 53).



Figure 50 : Station d'enregistrement du câble à thermistances automatisé SAL_F3 localisé au chaînage 2+030 m du côté est de la piste d'atterrissage de Salluit.



Figure 51 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances SAL_F3 localisé au chaînage 2+030 m du côté est de la piste d'atterrissage de Salluit pour la période de A) 2012 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 52 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances SAL_F3 localisé au chaînage 2+030 m du côté est de la piste d'atterrissage de Salluit pour la période de 2012 à 2016.



Figure 53 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances SAL_F3 localisé au chaînage 2+030 m du côté est de la piste d'atterrissage de Salluit pour les années 2013 à 2016.

4.4.3.5 LES CÂBLES À LECTURES MANUELLES HT155 HT160, HT179 ET SAL_F4

Initialement installé dans le milieu naturel au sud-est du terminal, le câble HT155 mesurant 19.57 m s'est retrouvé sous la portion sud du tarmac à Salluit lors de son expansion de 4900 m² en 2010 (tiré de la demande de modification de certification; Projet :154120056). L'épaisseur de matériel ajouté par-dessus le terrain naturel lors de la construction du tarmac est inconnue, mais a été estimée à 3 m dans le cadre de ce rapport afin d'avoir une image réaliste du comportement thermique du câble HT155. D'après la Figure 54A, l'enfouissement du câble sous 7.45 m de matériel a eu comme résultat de refroidir les deux premiers mètres (du terrain d'origine) de manière considérable. Alors que cette baisse des températures se produit près de l'ancienne surface du sol, le pergélisol en profondeur se réchauffe progressivement en raison du réajustement du profil thermique à la nouvelle géométrie du terrain. Cette augmentation des températures en profondeur s'est accélérée depuis les dernières années passant de -4.02 °C en 2010 à -2.58 °C en 2014 à 17.75 m de profondeur (profondeurs ajustées). Le câble HT155 a été automatisé à l'été 2014, mais en raison d'un problème avec l'instrumentation, la prise de données s'est interrompue en novembre 2014. Depuis, le câble a été réparé et remis en fonction, mais un autre problème technique a causé l'arrêt de l'enregistrement en juillet 2016. Pour cette raison les données enregistrées en 2015 ont été traitées de la même manière que les années précédentes.

Les lectures ponctuelles effectuées aux câbles HT160 et HT 179, localisé à l'extrémité nord de la piste, indiquent que le profil thermique dans le terrain naturel s'est réchauffé en profondeur depuis 1987 jusqu'en 2010, alors que celui localisé sous la piste indique plutôt un refroidissement depuis 1987 jusqu'en 2015 (figure 54 – B et C). Étant donné la faible profondeur des câbles à ces deux endroits il est difficile de faire ressortir des tendances à long terme avec les températures en profondeur et les premiers mètres sont en général sujets aux variations quotidiennes de la température de l'air. Le câble HT160 s'est beaucoup dégradé depuis sa mise en place en 1987 et seulement cinq thermistances fonctionnent en date de 2015. Seules les thermistances situées dans les premiers 2.5 m ont enregistré des données empêchant l'utilisation de ce dernier à des fins d'analyses. Les données recueillies montrent un profil en date du 15 octobre 2015 sous les - 2 °C entre 0.5 m et 2.5 m.



Figure 54 : Température selon la profondeur au câble à thermistances A) HT155 localisé dans l'extension de 2010 du tablier (selon des lectures ponctuelles effectuées entre le 10 et le 20 octobre de chaque année; le gris représente le remblai ajouté au-dessus du câble lors des travaux d'extension de 2010), ainsi qu'aux câbles à thermistances à lecture manuelle B) HT160 et C) HT179.

4.4.4 FAITS SAILLANTS RELATIFS AU PERGÉLISOL À L'AÉROPORT DE SALLUIT

La position du front de dégel dans le secteur de l'aéroport a beaucoup varié depuis la construction de l'aéroport. L'analyse des valeurs de température enregistrées par les câbles aux différents sites sur l'aéroport permet de constater qu'elles ont diminué suivant la tendance des températures de l'air. Cette diminution s'effectue principalement dans les premiers mètres du sol qui s'ajustent graduellement à ces nouvelles conditions (tableau 20 et tableau 21). Cependant, on y observe toujours l'impact des années plus chaudes en profondeur, dont la température est toujours à la hausse à certains endroits. En effet, les profils thermiques des câbles plus profonds HT154 et HT172 indiquent que depuis 2010, le sol s'est refroidi de près de 3 °C à 4 m profondeur au câble HT154, alors qu'à 20 m, le sol s'est réchauffé de 0.08 °C au câble HT154 et de -0.23 °C au câble HT172. Ce refroidissement dans la partie supérieure du profil thermique permet un regel du pergélisol et un rétablissement d'une couche active plus mince.

L'agrandissement du tablier, où est installé le câble HT155, a permis la remontée du front de dégel et le refroidissement des températures de surface au niveau de l'ancien terrain naturel. En profondeur, le sol s'est considérablement réchauffé depuis 1987 avec des températures oscillant les -2 °C entre 7 et 22.75 m de profondeur contrairement aux températures, sous les -6 °C, enregistrées en 1987. Toutefois, l'épaisseur du matériau granulaire ajouté lors de l'agrandissement du tablier devra être connue plus précisément afin d'améliorer l'analyse. À l'extrémité sud-est de la piste, les données thermiques mesurées par le câble automatisé SAL_F3 placé dans le talus à pente tronquée du remblai ont permis d'estimer une épaisseur de couche active variant entre 2.86 et 3.22 m pour la période 2012 à 2016. Le sol sous le talus est donc gelé en permanence et les profils indiquent une diminution dans l'épaisseur maximale de la couche active depuis l'automatisation du câble.

Câble	Influence du couvert nival	Localisation	Profondeur moyenne du dégel (m)	Tendance front de dégel et régime thermique
HT154	Faible	Terrain naturel – roc	-3.54	Remontée importante + stabilisation
HT172	Faible	Piste	-1.61 (en date du 16 octobre 2015)	Refroidissement en profondeur
SAL_F3	Forte	Épaulement	-2.96	Remontée récente
HT155*	Faible	Tablier	-	Ajustement aux nouvelles conditions – réchauffement en profondeur
HT160*	-	Terrain naturel	-	Refroidissement
HT179*	Faible	Piste	-	Refroidissement

Tableau 20 : Synthèse de l'état du pergélisol aux câbles à thermistances de l'aéroport de Salluit.*Câble à lectures manuelle et ponctuelle.

	Épa	uleme	nt/						
	Pé	ériphér	ie	Terrain naturel					
	SAL	LUIT SAL	_F3	SALLUIT HT154					
	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)			
2004				3.03					
2005				3.23	0.2	6.6			
2006				3.75	0.52	16.1			
2007				3.54	-5.6				
2008				3.78	0.07	6.7			
2009				3.71	-0.07	-1.8			
2010				4.49	21.3				
2011				3.8	-15.5				
2012				3.84	0.04	1			
2013	2.88			3.29	3.29 -0.55				
2014	2.86	-0.02	-0.7	3.5	0.22	6.5			
2015	3.22	0.36	12.6	3.16	-9.9				
2016	2.86	-0.36	-11.2	3.55	-0.39	-12.3			

Tableau 21 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum aux différents sites de l'aéroport de Salluit pour les années 2004 à 2016.

: Augmentation de la couche active

: Diminution de la couche active

4.5 QUAQTAQ

4.5.1 CARACTÉRISTIQUES DES DÉPÔTS DE SURFACES ET DÉTAIL DE L'INSTRUMENTATION

4.5.1.1 SYNTHÈSE DE LA RÉPARTITION SPATIALE, DE L'ÉPAISSEUR ET DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUE DES DÉPÔTS SUPERFICIELS

Situé dans la zone de pergélisol continu à une altitude d'environ 30 m, l'aéroport de Quaqtaq a été achevé en 1989. La piste d'atterrissage est orientée dans un axe nord-ouest sud-est (155-335°) avec une longueur totale de 1190 m, du chaînage 0+640 m au chaînage 1+830 m, et une largeur de 44 m (L'Hérault et al., 2012). La piste d'atterrissage repose sur trois unités qui se résument à : 1) des affleurements rocheux de gneiss granitique, 2) des dépôts de sable et gravier littoraux et pré-littoraux et 3) des dépôts minces de sable fin silteux mal drainés d'origine alluviale qui recouvrent un till (L'Hérault et al., 2012). Récemment, les fossés autour de la piste ont été refaçonnés. Ils ont été reconfigurés en les éloignant du pied immédiat du remblai en construisant une pente douce tronquée et en leur donnant un profil transversal évasé. Ainsi moins de neige s'accumule dans les fossés et le drainage y est favorisé. La pente douce du remblai, aussi munie d'une membrane étanche, doit en principe favoriser le regel du pergélisol et étancher la piste par le gel, favorisant ainsi le maintien du pergélisol. Les fossés à l'extrémité sud de la piste ont aussi été re-profilés tandis que, du côté est, ils ont été aménagés de façon à évacuer rapidement l'eau de fonte au printemps. L'intention générale est d'éviter l'ennoiement de la structure de la piste au printemps, car il s'agit d'une source de chaleur qui avait commencé à provoquer le dégel du pergélisol sous l'ouvrage au début des années 2010. Cette mesure d'adaptation a été appliquée afin de provoquer la reformation du pergélisol dans le remblai et en périphérie, assurant ainsi l'intégrité à long terme de l'ouvrage.

4.5.1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Quaqtaq comprend cinq câbles à thermistances automatisés et un câble à thermistances à lectures manuelles (figure 55 et tableau 22) :

- HT156 : Le câble HT156, installé en 1988 et automatisé en 2004, comporte 11 thermistances entre 0.56 et 19.56 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1.5 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. Il est localisé du côté est de la piste à la hauteur du chaînage 1+570 m à 43 m de la piste en terrain naturel (sables et graviers). L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- HT158 : Le câble HT158, instrumenté en 1988, comporte 11 thermistances entre 1.37 et 20.37 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté ouest de la piste à la hauteur du chaînage 1+150 m à 54 m du pied du remblai en terrain naturel (dans le roc). Comme le câble n'est pas équipé de système d'acquisition, la lecture des températures se fait à intervalle ponctuel et irrégulier.

- HT175 et QUA2015_F3 : Le câble HT175, installé en 1988 et automatisé en 2004, comporte 11 thermistances entre 1.55 et 20.55 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans le remblai du centre piste au chaînage 1+635 m. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X. En 2015, le câble QUA2015_F3 a été installé pour remplacer le câble HT175, irrémédiablement endommagé lors des travaux de réfection en 2013.
- HT178 : Le câble HT178, installé en 1988 et automatisé en 2004, comporte 11 thermistances entre 0.45 et 5 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans le remblai du centre piste au chaînage 1+295 m. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **QUA2015_F1** : Le câble QUA2015_F1, instrumenté en 2015, comporte 12 thermistances entre 0.15 et 10 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté ouest de la piste au chaînage 1+290 m à 2.6 m du pied du remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.
- **QUA2015_F2** : Le câble QUA2015_F2, instrumenté en 2015, comporte 12 thermistances entre 0.15 et 10 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté ouest de la piste au chaînage 1+650 m à 9 m du pied du remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR1000.



Figure 55 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport de Quaqtaq, Nunavik.

Les forages HT156, HT175 et HT178 ont été instrumentés lors de la construction de l'aéroport en 1988 à partir de câbles à thermistances. L'acquisition de données en continu s'effectue à l'aide d'un enregistreur de données de types CR10X, installé depuis 2004. Les trois câbles sont équipés de 11 thermistances réparties de 0.56 et 19.56 m pour le câble HT156, de 1.55 et 20.55 m pour le câble HT175 et de 0.45 à 5 m pour le câble HT178.

Les forages QUA2015_F1 et QUA2015_F2 ont été instrumentés et automatisés à l'aide d'un système d'acquisition CR1000 à l'automne 2015 et sont muni chacun d'un câble de 12 thermistances dont les profondeurs varient entre 0.15 et 10 m. Le câble HT158 possède 11 thermistances dont les profondeurs varient entre 1.37 m et 20.37 m, mais n'a pas été automatisé. Les lectures doivent se prendre de manière manuelle et ponctuelle à l'aide d'un multimètre (tableau 22).

QUAQTAQ										
Câbles à thermistances	Mise en service	Vise en Système Répartition des thermistances (cm) service d'acquisition								
HT156	18-06-2004	CR10X	56-156-256356-556-756-956-1156-1456-1756-1956	HT158						
HT175 et	18-06-2004	CR10X	155-255-355-455-655-855-1055-1255-1555-1855-2055							
QUAQ2015_F3										
HT178	18-06-2004	CR10X	45-50-100-150-200-250-300-350-400-450-500							
QUA2015_F1	11-10-2015	CR1000	15-50-100-150-200-250-350-450-550-650-800-1000							
QUA2015_F2	11-10-2015	CR1000	15-50-100-150-200-250-350-450-550-650-800-1000							

Tableau 22 : Tableau	sommaire de l'instrumentation	à l'aéroport de Quaqtaq.
		1 1 1

4.5.2 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

La station de référence HT156 est dotée d'un capteur pour enregistrer la température de l'air et les données recueillies couvrent la période de 2004 à 2016 (figure 56). Comme les données ont été téléchargées à la fin du mois de septembre 2016, l'année climatique n'est pas complète. Cependant, les données obtenues jusqu'à cette date indiquent que la tendance est au refroidissement de la température de l'air pour la période couverte.



Figure 56 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Quaqtaq pour la période de 2004 à 2016.

4.5.2.1 ÉVOLUTION DES INDICES CLIMATIQUES : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES, MENSUELLES ET SAISONNIÈRES DE L'AIR, DÉBUT, FIN, DURÉE ET MOYENNE DES SAISON DE GEL ET DE DÉGEL ET DEGRÉSJOURS DE GEL ET DE DÉGEL

Depuis le début de la période de couverture des données de 2004 à 2016, l'année 2009-2010 a été la plus chaude, avec une moyenne de -1.90 °C et l'année 2014-2015 a été la plus froide avec une moyenne de -5.19 °C (figure 57 et tableau 23). L'année climatique 2015-2016 n'est pas complète, mais les données obtenues jusqu'à cette date indiquent que la saison de gel, avec une moyenne de la température de -12.18 °C, a été légèrement plus froide que la moyenne pour la période d'enregistrement qui est de -12.04 °C.

Les trois dernières années climatiques enregistrées à Quaqtaq ont été particulièrement froides et ont permis d'inverser la tendance de la température de l'air qui indique maintenant une légère baisse de près de 0.13 C/an. Cette diminution de la température s'effectue surtout lors de la période hivernale (-0.17 °C par an). La tendance dans les températures estivales quoi qu'aussi en déclin, indique une diminution moins importante avec une tendance de -0.05 °C/an.

Pour la période de 2005 à 2016, la saison de gel s'amorce en moyenne le 16 octobre, mais peut varier de plus de 26 jours d'une année à l'autre. La durée moyenne de la saison de gel est de 224 jours. De même, la saison de dégel débute en général autour du 29 mai avec une variation interannuelle de 21 jours, et dure en moyenne 139 jours. Pour l'année 2015-2016, la saison de gel a débuté le 8 octobre et a duré 224 jours alors que la saison de dégel a débuté le 6 juin. Comme les données ont été téléchargées durant la période de dégel, la fin ainsi que la durée de la saison n'ont pu être déterminées.

Le cumul des degrés-jours de gel et de dégel, représentés par les indices de gel (Fi) et de dégel (Ti), ainsi que dans le ratio entre ces deux indices indique que, pour la période de 2005 à 2016, la tendance de Fi est à l'augmentation (61 degrés-jours/an) alors que celle de Ti est à la baisse (13 degrés-jours/an). Pour l'année 2015-2016, l'indice de gel de 2956 degrés-jours indique un hiver plus froid que la moyenne observée (2710 degrés-jours).

Les températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) détaillées au tableau 24 indiquent qu'elles sont légèrement plus basses durant l'hiver et légèrement plus hautes en été que la moyenne pour la période de 2005 à 2016.



Figure 57 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport de Quaqtaq pour la période de 2005 à 2016.

	QUAQTAQ												
Indices	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	Moyenne	
					Sais	on de gel							
Début (jj-mmm)	28-oct	23-oct	18-oct	13-oct	13-oct	02-nov	08-oct	07-oct	22-oct	12-oct	08-oct	16-oct	
Fin (jj-mmm)	26-mai	02-juin	15-mai	02-juin	24-mai	31-mai	31-mai	05-juin	17-mai	01-juin	05-juin	28-mai	
Durée (jour)	210	222	210	232	223	210	236	241	207	232	241	224	
Moyenne (°C)	-10.94	-10.89	-14.61	-12.52	-9.24	-11.20	-11.10	-10.52	-14.93	-14.29	-12.18	-12.04	
					Saiso	n de dége	I						
Début (jj-mmm)	27-mai	03-juin	16-mai	03-juin	25-mai	01-juin	01-juin	06-juin	18-mai	02-juin	06-juin	29-mai	
Fin (jj-mmm)	22-oct	17-oct	12-oct	12-oct	01-nov	07-oct	06-oct	21-oct	11-oct	07-oct	n.d.	14-oct	
Durée (jour)	148	136	149	131	160	128	127	137	146	127	n.d.	139	
Moyenne (°C)	5.25	4.88	4.68	4.45	5.43	4.89	6.23	4.17	5.03	3.91	n.d.	4.89	
		-	-		Année	climatiqu	e				-		
TMAA (°C)	-2.85	-3.01	-4.97	-4.03	-1.90	-3.16	-2.43	-3.17	-4.95	-5.19	n.d.	-3.57	
Indice de gel (FI)	2320	2431	3084	2927	2074	2374	2647	2555	3107	3337	2956	2710	
Indice de dégel (TI)	786	674	706	594	876	634	800	581	753	507	n.d.	691	
Ratio (FI/TI)	2.95	3.61	4.37	4.93	2.37	3.74	3.31	4.40	4.13	6.58	n.d.	4.04	

Tableau 23 : Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport de Quaqtaq pour la période de 2005 à 2016.

						QUA	QTAQ						
Mois	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	$ar{x}$ mensuelle
Janvier	-26.20	-19.34	-17.28	-23.08	-19.97	-16.57	-13.72	-19.76	-19.94	-17.69	-26.56	-18.38	-19.88
Février	-20.98	-18.77	-15.72	-23.95	-19.42	-12.89	-22.78	-19.01	-20.41	-23.28	-28.09	-22.00	-20.61
Mars	-15.41	-12.63	-18.49	-19.83	-17.28	-14.62	-19.47	-18.17	-12.81	-21.53	-21.17	-18.81	-17.52
Avril	-6.19	-6.52	-9.00	-7.95	-10.04	-6.12	-12.89	-9.17	-9.05	-12.87	-10.53	-10.81	-9.26
Mai	-0.81	-0.53	-4.45	-0.25	-4.95	-1.26	-4.11	-1.31	-3.86	-1.33	-2.29	-1.56	-2.22
Juin	3.66	3.39	2.93	3.28	2.29	3.20	2.62	5.25	1.75	4.66	2.19	2.67	3.16
Juillet	5.98	8.92	7.71	8.06	8.00	7.86	8.11	7.48	6.14	6.90	5.23	5.82	7.18
Août	8.01	7.30	7.59	7.70	5.53	9.36	6.04	8.39	6.75	9.16	5.81	7.55	7.43
Septembre	4.10	4.54	2.96	3.22	3.25	5.48	3.66	4.52	3.00	2.55	2.55	4.12	3.66
Octobre	0.82	0.78	-0.76	-0.05	-1.76	2.12	-0.41	-0.61	-0.29	-0.53	-2.18	1.62	-0.10
Novembre	-5.05	-4.87	-7.06	-6.33	-5.11	-1.32	-5.18	-5.59	-7.14	-7.39	-7.08	n.d.	-5.65
Décembre	-13.64	-10.05	-17.90	-18.06	-9.52	-4.59	-13.47	-11.67	-17.45	-13.95	-15.57	n.d.	-13.26
$ar{x}$ annuelle	-5.48	-3.98	-5.79	-6.44	-5.75	-2.45	-5.97	-4.97	-6.11	-6.28	-8.14	n.d.	-5.59

Tableau 24 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport de Quaqtaq pour la période de 2005 à 2016.

4.5.3 ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

4.5.3.1 CÂBLE AUTOMATISÉ HT156 : 2004 À 2016

Le câble HT156, utilisé comme référence, se situe dans des sables et graviers littoraux et prélittoraux en terrain naturel non loin de la piste d'atterrissage. Le portrait général des températures du sol présenté aux figure 58 A et B et figure 59 permet de constater un refroidissement généralisé du profil thermique depuis 2010.

Le régime thermique en surface est principalement conditionné par les températures de l'air. En effet, l'influence des hivers froids enregistrés en 2014, 2015 et 2016 se répercute dans les températures du sol. Cependant, ce refroidissement s'effectue en surface, dans les 15 premiers mètres, alors qu'en deçà de cette profondeur, les températures moyennes annuelles du sol sont toujours en augmentation. Ainsi, la température moyenne annuelle du sol à 2.56 m de profondeur est passée de -1.02 °C en 2010 à -3.79 °C en 2015. À l'inverse, la température moyenne annuelle du sol à 19.56 m de profondeur est passée de -3.30 °C en 2010 à -3.06 °C en 2015. L'année particulièrement chaude de 2010 a eu beaucoup d'impact sur les températures du sol, où le maximum de la couche active a atteint son maximum enregistré à cet endroit. De 2009 à 2010 l'épaisseur de la couche active a augmenté de 26.8 % passant de 2.34 m à 2.86 m. Par la suite, une succession d'années plus ou moins froides a permis au maximum de dégel de remonter de façon saccadée à 1.82 m en 2016 (figure 60). La corrélation importante entre les températures de l'air et les températures près de la surface suggère que l'épaisseur du couvert neigeux n'isole pas complètement le sol en hiver et permet un échange thermique air-sol.



Figure 58 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT156 localisé en terrain meuble à l'est de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 59 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT156 localisé en terrain meuble à l'est de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période de 2007 à 2016.



Figure 60 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT156 localisé en terrain meuble à l'est de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour les années 2004 à 2016.

4.5.3.2 CÂBLE AUTOMATISÉ HT178 : 2004 À 2016

Le câble HT178 (figure 61) se situe au chaînage 1+290 m. Il traverse le remblai et le géotextile jusqu'à une profondeur de 5 m dans un dépôt de sable silteux. Le portrait général des températures du sol présenté aux figure 62 A et B et figure 63 permet de constater un refroidissement généralisé du profil thermique depuis 2010.

Le régime thermique en surface est principalement conditionné par les températures de l'air. En effet, l'influence des hivers froids enregistrés en 2014, 2015 et 2016 se répercute dans les températures du sol. Ainsi, la température moyenne annuelle du sol à 2.5 m de profondeur est passée de -2.26 °C en 2010, à -2.45 en 2013 et à -4.36 °C en 2015. Contrairement aux autres câbles, le maximum de dégel enregistré au câble HT178 est survenu en 2012, après un approfondissement de 11 %, atteignant 2.70 m de profondeur. Par la suite, la succession d'années plus ou moins froides a permis au maximum de dégel de remonter de façon saccadée à 2.33 m en 2016 (figure 64).



Figure 61 : Station d'enregistrement du câble HT178.



Figure 62 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT178 localisé au chaînage 1+290 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 63 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT178 localisé au chaînage 1+290 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période de 2007 à 2016.



Figure 64 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT178 localisé au chaînage 1+290 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour les années 2004 à 2016.

4.5.3.3 CÂBLE AUTOMATISÉE QUA2015_F1 : 2015-2016

Le câble QUA2015_F1 est localisé au chaînage 1+290 à 7 m du bord du côté nord-est de la piste d'atterrissage de Quaqtaq, dans la pente douce tronquée qui fut aménagée pour assurer la reprise du pergélisol le long du fossé de drainage de la piste. Le câble installé atteint 10 m de profondeur. Il traverse des unités de sédiments alluviaux sableux superficiels et de till et se termine dans le roc en profondeur. Les résultats de la première année d'acquisition couvrant d'octobre 2015 à octobre 2016 sont présentés aux figure 65 et figure 66. La température moyenne journalière selon la profondeur indique que ce dernier est relativement peu influencé par le couvert nival. La moyenne annuelle des températures en fonction de la profondeur est légèrement plus chaude à celles observées aux autres câbles. En effet, on enregistre une moyenne annuelle de -2.78 °C à 4.5 m de profondeur, alors qu'elle est de -3.60 et de -4.00 °C pour la même profondeur aux câbles HT156 et HT178 respectivement. La profondeur maximum de dégel enregistrée en 2015 et 2016 à cet endroit atteint 2.11 et 2.24 m (figure 67).


Figure 65 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances QUA2015_F1 localisé du côté nord-est à 7 m du bord de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période d'octobre 2015 à octobre 2016.



Figure 66 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances QUA2015_F1 localisé du côté nord-est à 7 m du bord de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période d'octobre 2015 à octobre 2016.



Figure 67 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances QUA2015_F1 localisé du côté nord-est à 7 m du bord de la piste d'atterrissage de Quaqtaq pour la période d'octobre 2015 à octobre 2016.

4.5.3.4 CÂBLE AUTOMATISÉE QUA2015_F2

Le câble QUA2015_F2, localisé du côté ouest de la piste à 9 m du pied du remblai. L'instrumentation de la station d'enregistrement du câble QUA2015_F2, installé à l'été 2015, a été endommagée par l'eau durant l'année 2015-2016. Il n'y a donc pas de données disponibles pour la période.

4.5.3.5 CÂBLE AUTOMATISÉE HT175 OU QUA2015_F3

Lors des travaux de réfection de la piste à l'été 2012, le câble HT175 a été sectionné. Pour cette raison, l'acquisition des données a été interrompue depuis 2012. En l'absence de données depuis 4 ans, le régime thermique du pergélisol n'a pu être analysé. Le nouveau câble de remplacement (QUA2015_F3) a été installé et rebranché au même endroit en 2016.

4.5.4 FAITS SAILLANTS RELATIFS AU PERGÉLISOL À L'AÉROPORT DE QUAQTAQ

L'épaisseur de la couche active sous la piste était relativement stable jusqu'en 2009 avec des variations annuelles du front de dégel sous les 2 %. Depuis, une augmentation du front de dégel a été enregistrée à tous les câbles en 2010, 2012, 2014 et 2015 (tableau 25 et tableau 26). Ces augmentations varient en importance selon la localisation par rapport à la piste, ainsi que selon la nature des matériaux et des conditions de surface.

Il est encore trop tôt pour évaluer l'efficacité du réseau du fossé de drainage amélioré et du reprofilage du remblai réalisé à l'été 2012 sur le régime thermique, car les deux nouveaux câbles viennent d'être installés. Seul le câble QUA2015_F1 possède suffisamment de données pour faire une analyse partielle. Cette dernière révèle que le pergélisol s'est reformé sous la pente douce nouvellement profilée à cet endroit. Le pergélisol y est encore légèrement plus chaud à 4.5 m qu'aux autres sites, mais les valeurs de couches active enregistrées se situent entre celles de la piste et du terrain naturel.

	Influence du couvert		Profondeur moyenne	
Câble	nival	Localisation	du dégel (m)	Tendance front de dégel
HT156	Faible	Terrain naturel	-1.78	Variation interannuelle importante - Stabilisation
HT178	Faible	Piste	-2.43	Remonté récente
HT175	Faible	Piste	-	-
QUA2015_F1	Faible	Épaulement	-2.17	-

						Épaulement/						
		Piste			Piste		Périphérie			Terrain naturel		
	QUA		Г175	QUAQTAQ HT178		Г178	QUAQTAQ QUA2015_F1			QUAQTAQ HT156		
	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)
2004	2.38	0.33	16.1	2.34								
2005	2.38	0	0	2.39	0.05	2.1						
2006	2.41	0.03	1.26	2.42	0.03	1.3						
2007	2.35	-0.06	-2.49	2.4	-0.02	-0.8						
2008	2.3	-0.05	-2.13	2.39	-0.01	-0.4						
2009	2.31	-0.01	-0.43	2.39	0.00	0				1.6		
2010	2.51	0.06	2.6	2.51	0.13	5.4				2.03	0.43	26.8
2011				2.43	-0.09	-3.4				1.68	-0.35	-17.3
2012				2.70	0.27	11.1				1.92	0.24	14.2
2013				2.43	-0.27	-9.9				1.78	-0.14	-7.3
2014				2.51	0.08	3.1				1.97	0.19	10.6
2015				2.32	-0.19	-7.4	2.11			1.69	-0.28	-14.2
2016				2.33	0.01	0.43	2.24	-0.13	6.16	1.82	0.13	7.7

Tableau 26 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum aux différents sites de l'aéroport de Quaqtaq pour les années 2004 à 2016.

: Augmentation de la couche active

: Diminution de la couche active

4.6 KANGIRSUK

4.6.1 CARACTÉRISTIQUES DES DÉPÔTS DE SURFACES ET DÉTAIL DE L'INSTRUMENTATION

4.6.1.1 SYNTHÈSE DE LA RÉPARTITION SPATIALE, DE L'ÉPAISSEUR ET DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUE DES DÉPÔTS SUPERFICIELS

Achevé en 1987, l'aéroport de Kangirsuk est situé dans la zone de pergélisol continu sur la rive nord de la rivière Arnaud (Allard et *al.*, 2007). La piste d'atterrissage, qui est d'une longueur totale de 1190 m et d'une largeur de 60 m, est orientée selon un axe nord-est sud-sud-ouest (Allard et *al.*, 2009). Juchée à une altitude de plus de 95 m, elle repose en majeure partie sur une couverture de sables et graviers grossiers oxydés (L'Hérault et *al.*, 2012). En raison de sa composition granulométrique, cette couche superficielle est considérée stable au dégel. (L'Hérault et *al.*, 2012). Toutefois une zone en déblai, entre les chaînages 0+760 m et 1+040 m, est construite sur un till riche en glace qui a provoqué des tassements lors de son dégel dans les années passées.

Le tassement dans la zone en déblai constitue le principal problème géotechnique ciblé à cet aéroport. Cette section a fait l'objet d'un suivi par Tremblay et Doré (1988). Des tassements de 0.23 m ont été enregistrés l'année suivant la construction de l'aéroport. En 2004, le tassement cumulatif dans cette section depuis la construction de la piste avait été évalué à 0.46 m (Beaulac, 2005). Le suivi a été poursuivi par le MTMDET entre 2007 et 2010 qui a mesuré des tassements cumulatifs compris entre 0.02 et 0.05 m à partir des plaques de tassements installées dans l'accotement et au centre-piste (L'Hérault et *al.*, 2012). Lors de la réalisation des travaux de forage au mois de juin 2009, ces signes de dégradation de l'infrastructure étaient toujours présents et une dépression non recensée était clairement visible entre le chaînage 1+075 m et 1+115 m.

4.6.1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Kangirsuk comprenait jusqu'à l'été 2016 deux câbles à thermistances automatisés (figure 68 et tableau 27). Ils ont été détruits par inadvertance lors des travaux de resurfaçage de la piste et de rénovation du système d'éclairage.

- HT1 : Le câble HT1, instrumenté en 2005, comporte 9 thermistances entre 0.56 et 19.56 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1.25 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air. Il est localisé dans le remblai au centre piste, au chaînage 0+850 m. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10 qu'il partage avec le câble KANGIR_F2.
- **KANGIR_F2** : Le câble KANGIR_F2, instrumenté en 2010, comporte 10 thermistances entre 0.05 et 6.5 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté est de la piste à la hauteur du chaînage 0+916 m à 2 m du pied de remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10 qu'il partage avec le câble HT1.



Figure 68 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport de Kangirsuk, Nunavik.

Tableau 27 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport de Kangirsuk.

KANGIRSUK										
Câbles à thermistances	Mise en service	Système d'acquisition	Répartition des thermistances (cm)	Câbles à lectures manuelles						
HT1	15-06-2005	CR10	66-75-100-125-150-175-200-250-291							
KANGIR_F2	13-10-2010	CR10	5-50-100-150-200-250-350-450-550-650							

4.6.2 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Le boîtier des deux câbles est doté d'un capteur pour enregistrer la température de l'air fixé à 1.25 m du sol. Les données sont enregistrées en continue depuis juin 2005 jusqu'en octobre 2016 (figure 69). Ainsi, les valeurs enregistrées indiquent que la tendance est au refroidissement de la température de l'air pour la période couverte.



Figure 69 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Kangirsuk pour la période de 2005 à 2016.

4.6.2.1 ÉVOLUTION DES INDICES CLIMATIQUES : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES, MENSUELLES ET SAISONNIÈRES DE L'AIR, DÉBUT, FIN, DURÉE ET MOYENNE DES SAISON DE GEL ET DE DÉGEL ET DEGRÉSJOURS DE GEL ET DE DÉGEL

L'année climatique 2015-2016 est marquée par des températures de l'air légèrement supérieures à la moyenne pour la période de 2005 à 2016. En effet, la TMAA mesurée de -3.56 °C est légèrement plus chaude que la moyenne de -3.94 °C pour la période de référence. Durant cette période, l'année 2009-2010 a été la plus chaude, avec une moyenne de -1.85 °C et l'année 2014-2015 a été la plus froide avec une moyenne de -5.72 °C (figure 70 et tableau 28).

Depuis 2013, les températures de l'air froides enregistrées à Kangirsuk ont permis d'inverser la tendance de la température de l'air qui indique maintenant une légère baisse de près de 0.07 C/an. Cette diminution de la température s'effectue surtout lors de la période hivernale (- 0.16 °C par an). La tendance dans les températures estivales quant à elles indique une tendance à l'augmentation de -0.02 °C/an.

Pour la période de 2005 à 2016, la saison de gel s'amorce en moyenne le 15 octobre, mais peut varier de plus de 21 jours d'une année à l'autre. La durée moyenne de la saison de gel est de 221 jours. La saison de dégel débute en général autour du 26 mai avec une variation interannuelle de 25 jours, et dure en moyenne 140 jours. Pour l'année 2015-2016, la saison de gel a débuté le 7 octobre et a duré 242 jours alors que la saison de dégel a débuté le 6 juin et a duré 122 jours.

Le cumul des degrés-jours de gel et de dégel, représentés par les indices de gel (Fi) et de dégel (Ti), ainsi que dans le ratio entre ces deux indices indique que, pour la période de 2005 à 2016, la

tendance de Fi est à l'augmentation (69 degrés-jours/an) alors que celle de Ti est à la baisse (12 degrés-jours/an). Pour l'année 2015-2016, l'indice de gel de 3395 degrés-jours indique un hiver plus froid que la moyenne observée (3152 degrés-jours), alors que l'indice de dégel de 840 indique un été plus frais que la moyenne de 895. Le ratio Fi/Ti obtenu de 4.04 est supérieur à la moyenne de 3.60, ce qui indique que, malgré un été chaud, le sol a emmagasiné moins de chaleur.



Figure 70 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport de Kangirsuk pour la période de 2005 à 2016.

Tableau 28 : Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi que des indices
de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport de Kangirsuk pour la période de 2005 à 2016

KANGIRSUK												
Indices	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	Moyenne
Saison de gel												
Début (jj-mmm)	27-oct	24-oct	14-oct	11-oct	11-oct	26-oct	20-oct	06-oct	22-oct	13-oct	07-oct	15-oct
Fin (jj-mmm)	11-mai	31-mai	11-mai	29-mai	24-mai	30-mai	29-mai	03-juin	15-mai	30-mai	05-juin	25-mai
Durée (jour)	196	219	210	230	225	216	222	240	205	229	242	221
Moyenne (°C)	-13.86	-13.03	-16.61	-14.68	-10.33	-12.93	-14.15	-12.10	-17.53	-16.87	-13.91	-14.18
Saison de dégel												
Début (jj-mmm)	12-mai	01-juin	12-mai	30-mai	25-mai	31-mai	30-mai	04-juin	16-mai	31-mai	06-juin	26-mai
Fin (jj-mmm)	23-oct	13-oct	10-oct	10-oct	25-oct	19-oct	05-oct	21-oct	12-oct	06-oct	06-oct	13-oct
Durée (jour)	164	134	151	133	153	141	128	139	149	128	122	140
Moyenne (°C)	6.11	6.26	6.42	5.65	6.62	5.92	7.83	5.87	6.42	5.42	6.79	6.30
		-	-	-	Année	climatiqu	e	-		-		
TMAA (°C)	-3.87	-3.38	-5.10	-4.51	-1.85	-3.50	-3.16	-3.11	-5.56	-5.72	-3.56	-3.94
Indice de gel (FI)	2740	2868	3518	3400	2345	2803	3163	2930	3612	3894	3395	3152
Indice de dégel (TI)	1016	854	976	765	1022	852	1012	829	980	703	840	895
Ratio (FI/TI)	2.70	3.36	3.60	4.44	2.29	3.29	3.13	3.54	3.69	5.54	4.04	3.60

La moyenne mensuelle de la température de l'air détaillée au tableau 29 indique que les températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) hivernales sont légèrement plus basses et estivales légèrement plus hautes que la moyenne pour la période de 2005 à 2016. Cette différence est plus importante durant le mois d'avril, dont la moyenne mensuelle est de 2.24 °C sous la moyenne mensuelle enregistrée depuis 2005.

KANGIRSUK													
Mois	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	$ar{x}$ mensuelle
Janvier	n.d.	-23.43	-20.22	-26.49	-23.42	-19.79	-17.07	-24.14	-23.28	-20.30	-29.72	-20.34	-22.56
Février	n.d.	-21.09	-17.61	-26.55	-21.71	-13.67	-25.80	-22.18	-22.55	-25.52	-33.19	-24.57	-23.13
Mars	n.d.	-13.47	-20.39	-20.72	-19.74	-15.63	-21.66	-19.96	-13.26	-23.93	-24.90	-21.10	-19.52
Avril	n.d.	-6.73	-9.62	-8.24	-10.40	-5.96	-14.10	-9.95	-9.98	-13.65	-11.03	-12.43	-10.19
Mai	n.d.	0.74	-4.58	1.00	-4.76	-0.80	-4.13	-1.07	-3.42	-0.44	-1.85	-1.41	-1.89
Juin	7.32	5.71	4.47	6.07	3.75	4.49	3.76	7.26	4.04	6.75	3.42	4.14	5.10
Juillet	9.08	11.16	10.27	10.97	9.70	9.58	10.48	9.46	8.52	8.55	7.20	8.30	9.44
Août	9.27	8.67	9.08	9.72	7.30	11.30	8.49	10.34	9.11	11.52	8.56	9.84	9.43
Septembre	4.78	5.07	3.29	3.78	3.86	5.75	4.44	5.37	3.73	3.05	3.12	4.56	4.23
Octobre	0.54	0.53	-1.36	-0.85	-2.57	1.51	-0.77	-1.46	-0.43	-0.22	-3.16	-1.94	-0.85
Novembre	-7.23	-7.18	-9.36	-8.77	-6.80	-2.85	-8.07	-8.09	-10.04	-10.34	-9.45	n.d.	-8.02
Décembre	-18.01	-14.67	-22.29	-22.00	-11.42	-7.46	-17.39	-14.21	-23.15	-17.34	-18.31	n.d.	-16.93
$ar{x}$ annuelle	n.d.	-4.56	-6.53	-6.84	-6.35	-2.79	-6.82	-5.72	-6.72	-6.82	-9.11	n.d.	-6.24

Tableau 29 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport de Kangirsuk pour la période de 2005 à 2016.

4.6.3 ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

4.6.3.1 CÂBLE AUTOMATISÉ HT1 : 2008 À 2016

Le câble HT1 (figure 70) se situe dans la piste d'atterrissage de Kangirsuk. Ce dernier traverse 1.4 m de remblai, puis le terrain d'origine formé de till. Les données enregistrées couvrent la période de juin 2005 à juillet 2016. Ce dernier a été sectionné lors des travaux de réfection de la piste, mais devrait être remis en fonction dès 2017. Le portrait général des températures du sol présenté aux figure 72 A et B et figure 73 permet de constater un refroidissement généralisé du profil thermique depuis 2010. En réponse à l'hiver anormalement chaud de 2009-2010, les températures du sol au centre-piste s'étaient considérablement réchauffées. Les saisons de gel et de dégel particulièrement chaudes de l'année 2009-2010 avaient eu pour effet d'augmenter l'épaisseur de la couche active de 19 % par rapport au maximum antérieur, passant de 1.92 à 2.29 m de profondeur (figure 74). Depuis, une alternance d'années plus ou moins chaudes faisant varier la profondeur maximum du dégel s'est terminée par une remontée du maximum enregistré à 1.87 m (diminution de 17 %) en 2015, soit la couche active la plus mince enregistrée depuis 2005.



Figure 71 : Station d'enregistrement commune aux câbles HT1 et Kangir_F2.



Figure 72 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT1 localisé en marge du remblai au chaînage 0+850 m du côté est de la piste d'atterrissage de Kangirsuk pour la période de A) 2008 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 73 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT1 localisé en marge du remblai au chaînage 0+850 m du côté est de la piste d'atterrissage de Kangirsuk pour la période de) 2007 à 2016



Années	Profondeur maximum du dégel (m)
2005	-2.16
2006	-2.23
2007	-2.08
2008	n.d.
2009	-1.92
2010	-2.29
2011	-2.18
2012	-2.26
2013	-2.09
2014	-2.27
2015	-1.87

Figure 74 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT1 localisé en marge du remblai au chaînage 0+850 m du côté est de la piste d'atterrissage de Kangirsuk pour les années 2005 à 2015.

4.6.3.2 CÂBLE AUTOMATISÉ KANGIR_F2

Le câble KANGIR_F2, localisé du côté est de la piste à 2 m du pied de remblai. Le câble a été installé en 2010, mais n'a jamais fonctionné. Durant les travaux de réfection de la piste en 2016, le câble a été sectionné. Il devrait être remis en fonction dès 2017.

4.6.4 FAITS SAILLANTS RELATIFS AU PERGÉLISOL À L'AÉROPORT DE KANGIRSUK

En l'absence d'un couvert nival, le régime thermique du pergélisol au centre-piste fluctue proportionnellement et de manière synchrone en fonction des températures de l'air. La couche active sous la piste a été moins profonde en 2015 que les années précédentes en raison des mois froids de l'hiver 2014-2015 et de l'été frais qui a suivi (tableau 30 et tableau 31). Ainsi, tant que cette situation perdurera, la piste ne subira pas de tassements.

Tableau 30 : Synthèse de l'état du pergélisol aux câbles à thermistances de l'aéroport de Kangirsuk.

	Influence du couvert		Profondeur moyenne	Tendance front de
Câble	nival	Localisation	du dégel (m)	dégel
HT1	Faible	Épaulement	-2.14	Remontée récente

Tableau 31 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum au câble HT1 installé à l'aéroport de Tasiujaq pour les années 2004 à 2016.

	Épaulement/										
	P	ériphér	ie								
	KAN	IGIRSUK	HT1								
	z (m)	∆ (m)	Δ (%)								
2004											
2005	2.16										
2006	2.23	0.07	3.2								
2007	2.08	-0.15	-6.7								
2008											
2009	1.923	-0.16	-7.5								
2010	2.29	0.37	19								
2011	2.18	-0.11	-4.7								
2012	2.26	0.08	3.7								
2013	2.09	-0.18	-7.8								
2014	2.27	0.18	8.6								
2015	1.87	-0.39	-17.4								
2016											

: Augmentation de la couche active

: Diminution de la couche active

4.7 AUPALUK

4.7.1 CARACTÉRISTIQUES DES DÉPÔTS DE SURFACES ET DÉTAIL DE L'INSTRUMENTATION

4.7.1.1 Synthèse de la répartition spatiale, de l'épaisseur et des propriétés géotechnique des dépôts superficiels

L'aéroport d'Aupaluk ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1990. La piste d'atterrissage, d'une longueur de 1070 m et d'une largeur de 40 m est orientée selon un axe nord-nord-est-sudsud-ouest à une altitude moyenne de 29 m. L'aéroport et le village sont établis sur une série d'anciennes plages marines soulevées lors du relèvement isostatique consécutif à la déglaciation. Les sols sableux et gravelleux du secteur de l'aéroport sont marqués par de nombreux sillons et fentes de gel associés à un réseau de coins de glace (Allard et *al.*, 2007).

4.7.1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Aupaluk comprend deux câbles à thermistances automatisés (figure 75 et tableau 32) :

- HT294 : Le câble HT294, instrumenté en 2004, comporte 11 thermistances entre 0.50 et 5.50 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans le remblai au centre piste, au chaînage 5+370 m. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- **HT299**: Le câble HT1, instrumenté en 1990 et automatisé en 1997, comporte 11 thermistances entre 0.10 et 19.10 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à 1.25 m au-dessus du sol pour le suivi de la température de l'air en continu depuis 2004. Il est localisé du côté ouest de la piste à la hauteur du chaînage 5+384 m à 45 m de la piste en terrain naturel (sables et graviers). L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.



Figure 75 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport d'Aupaluk, Nunavik.

AUPALUK										
Câbles à thermistances	Mise en service	Système d'acquisition	Répartition des thermistances (cm)	Câbles à lectures manuelles						
HT294	15-06-2004	CR10X	50-100-150-200-250-300-350-400-450-500-550							
HT299	21-10-1997	CR10X	10-110-210-310-510-710-910-1110-1410-1710-1910							

Tableau 32 : Tableau sommaire de l'instrumentation à l'aéroport d'Aupaluk.

4.7.2 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Le boîtier du câble HT299, localisé en terrain naturel est doté d'un capteur pour enregistrer la température de l'air fixé à 1.25 m du sol. Les données sont enregistrées en continue depuis juin 2005 jusqu'en octobre 2016 (figure 76). Ainsi, les valeurs enregistrées indiquent que la tendance est au refroidissement de la température de l'air pour la période couverte. Tout comme l'ensemble des villages du Nunavik, les températures moyennes journalières de l'air indiquent un refroidissement depuis 2013 renversant la tendance de la dernière décennie.



Figure 76 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport d'Aupaluk pour la période de 2004 à 2016.

4.7.2.1 ÉVOLUTION DES INDICES CLIMATIQUES : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES, MENSUELLES ET SAISONNIÈRES DE L'AIR, DÉBUT, FIN, DURÉE ET MOYENNE DES SAISON DE GEL ET DE DÉGEL ET DEGRÉSJOURS DE GEL ET DE DÉGEL

Depuis le début de la période de couverture des données de 2004 à 2016, l'année 2009-2010 a été la plus chaude, avec une moyenne de -1.65 °C et l'année 2014-2015 a été la plus froide avec une moyenne de -5.73 °C (figure 77 et tableau 33). L'année climatique 2015-2016 n'est pas complète, mais les données obtenues jusqu'à cette date indiquent que la saison de gel, avec une moyenne de la température de -14.63 °C, a été légèrement plus froide que la moyenne pour la période d'enregistrement qui est de -13.77 °C.

Les trois dernières années climatiques enregistrées à Aupaluk ont été particulièrement froides et ont permis d'inverser la tendance de la température de l'air qui indique maintenant une légère baisse de près de 0.12 C/an. Cette diminution de la température s'effectue surtout lors de la période hivernale (-0.23 °C par an). La tendance dans les températures estivales quoi qu'aussi en déclin, indique une diminution moins importante avec une tendance de -0.003 °C/an.

Pour la période de 2005 à 2016, la saison de gel s'amorce en moyenne le 19 octobre, mais peut varier de plus de 25 jours d'une année à l'autre. La durée moyenne de la saison de gel est de 213 jours. De même, la saison de dégel débute en général autour du 21 mai avec une variation

interannuelle de 34 jours, et dure en moyenne 149 jours. Pour l'année 2015-2016, la saison de gel a débuté le 9 octobre et a duré 216 jours alors que la saison de dégel a débuté le 13 mai. Comme les données ont été téléchargées durant la période de dégel, la fin ainsi que la durée de la saison n'ont pu être déterminées.

Le cumul des degrés-jours de gel et de dégel, représentés par les indices de gel (Fi) et de dégel (Ti), ainsi que dans le ratio entre ces deux indices indique que, pour la période de 2005 à 2016, la tendance de Fi est à l'augmentation (62 degrés-jours/an) alors que celle de Ti est à la baisse (8 degrés-jours/an). Pour l'année 2015-2016, l'indice de gel de 3179 degrés-jours indique un hiver plus froid que la moyenne observée (2942 degrés-jours).



Figure 77 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport d'Aupaluk pour la période de 2005 à 2016.

La moyenne mensuelle de la température de l'air détaillée au tableau 34 indique que les températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) hivernales et estivales de 2016 sont légèrement plus basses que la moyenne pour la période de 2005 à 2016. Cette différence est plus importante durant le mois d'avril, dont la moyenne mensuelle est de 3.53 °C sous la moyenne mensuelle enregistrée depuis 2005.

AUPALUK												
Indices	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	Moyenne
Saison de gel												
Début (jj-mmm)	28-oct	25-oct	15-oct	13-oct	16-oct	03-nov	21-oct	11-oct	24-oct	20-oct	09-oct	19-oct
Fin (jj-mmm)	09-mai	30-mai	29-avr	27-mai	23-mai	29-mai	27-mai	02-juin	15-mai	16-mai	12-mai	20-mai
Durée (jour)	193	217	197	226	219	207	219	234	203	208	216	213
Moyenne (°C)	-13.17	-12.25	-16.63	-14.07	-9.96	-12.26	-13.31	-11.31	-16.91	-16.96	-14.63	-13.77
Saison de dégel												
Début (jj-mmm)	10-mai	31-mai	30-avr	28-mai	24-mai	30-mai	28-mai	03-juin	16-mai	17-mai	13-mai	21-mai
Fin (jj-mmm)	24-oct	14-oct	12-oct	15-oct	02-nov	20-oct	10-oct	23-oct	19-oct	08-oct	n.d.	17-oct
Durée (jour)	167	136	165	140	162	143	135	142	156	144	n.d.	149
Moyenne (°C)	6.47	6.77	5.87	5.32	6.66	6.44	7.77	6.43	6.54	5.49	n.d.	6.38
					Année	climatiqu	e					
TMAA (°C)	-3.35	-2.74	-5.38	-4.37	-1.65	-2.91	-2.77	-2.44	-5.18	-5.73	n.d.	-3.65
Indice de gel (FI)	2569	2676	3299	3210	2198	2568	2951	2687	3451	3571	3179	2942
Indice de dégel (TI)	1091	928	978	756	1091	934	1061	922	1036	807	n.d.	960
Ratio (FI/TI)	2.35	2.88	3.37	4.25	2.02	2.75	2.78	2.92	3.33	4.42	n.d.	3.11

Tableau 33 Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport d'Aupaluk pour la période de 2005 à 2016.

Tableau 34 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport d'Aupaluk pour la période de 2005 à 2016.

						AUP	ALUK						
Mois	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	<i>x</i> mensuelle
Janvier	-27.44	-22.09	-19.33	-25.14	-22.56	-19.76	-16.58	-23.25	-22.17	-20.38	-28.38	-19.20	-22.19
Février	-21.97	-21.13	-17.54	-25.40	-20.63	-13.13	-24.16	-21.29	-21.67	-24.13	-31.39	-23.59	-22.17
Mars	-16.14	-12.68	-19.76	-19.91	-19.02	-14.50	-20.06	-18.63	-12.23	-23.43	-23.29	-20.05	-18.31
Avril	-6.03	-5.69	-8.27	-7.36	-9.68	-5.01	-13.01	-9.45	-9.11	-12.60	-9.60	-12.56	-9.03
Mai	0.76	1.83	-3.77	1.50	-3.93	-0.58	-2.88	-0.06	-2.03	-0.28	-0.18	-0.60	-0.85
Juin	6.48	6.40	5.01	5.32	4.14	4.76	3.91	6.95	4.61	7.86	4.38	4.31	5.34
Juillet	9.66	11.07	10.95	9.77	7.62	9.50	10.86	9.94	9.20	8.36	8.16	7.89	9.41
Août	9.75	8.26	9.42	9.59	7.41	11.90	9.10	10.51	9.07	10.76	8.55	10.14	9.54
Septembre	5.29	5.96	3.89	4.98	4.76	6.25	5.56	6.26	4.93	4.00	3.95	5.30	5.09
Octobre	1.43	1.43	-0.35	0.17	-1.52	2.41	0.21	0.04	0.74	1.18	-1.67	-0.88	0.27
Novembre	-6.23	-6.01	-8.90	-8.08	-5.60	-2.15	-6.73	-6.78	-8.62	-8.71	-8.48	n.d.	-6.94
Décembre	-16.88	-13.39	-20.37	-21.12	-11.14	-6.30	-16.24	-13.57	-22.24	-16.31	-17.18	n.d.	-15.89

4.7.3 ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

4.7.3.1 CÂBLE AUTOMATISÉ HT294 : 2004 À 2016

Le câble HT294 (figure 78) est situé dans la piste d'atterrissage d'Aupaluk, à environ 20 m du bord, au chaînage 5+386 m. À cet endroit, le remblai mesure 3.6 m d'épaisseur, donc le câble de 5 m de longueur pénètre le sol naturel sur 1.4 m, soit dans la couche active et dans environ 40 cm de pergélisol pré-construction. La température du sol selon la profondeur (figure 79 A et B et figure 80) permettent de constater que le profil thermique du sol à cet endroit s'est considérablement réchauffé de l'installation jusqu'en 2010, mais que depuis il s'est refroidi. Ainsi, la température moyenne annuelle du sol à 5 m de profondeur est passée de -3.57 °C en 2005, à -2.47 en 2011 et à -3.69 °C en 2015. L'hiver anormalement chaud de 2009-2010 a eu beaucoup de répercussions sur les températures du sol. Ce réchauffement généralisé a eu pour effet d'augmenter de 0.21 m (variation de 7 %) l'épaisseur de la couche active, valeur relativement faible par rapport aux autres aéroports, mais considérable pour cette station dont le front de dégel était passablement stable depuis plusieurs années. Cette augmentation moins marquée du front de dégel à Aupaluk peut s'expliquer par des températures estivales plutôt constantes contrairement aux autres villages. La profondeur maximale atteinte par le front de dégel, malgré une légère augmentation au cours de la période 2004-2012, se limite au remblai. Les quelques années froides récentes de 2012 à 2016 ont même favorisé une remontée de la base de la couche active dans l'infrastructure (figure En 2016, le maximum de dégel atteint dans la piste était de 2.91 m de profondeur, c'est-àdire près de 0.70 m au-dessus de l'ancienne surface du sol pré-construction.



Figure 78 : Station d'enregistrement du câble automatisé HT294.



B)

Figure 79 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT294 localisé au chaînage 5+386 m dans le remblai de la piste d'atterrissage d'Aupaluk pour la période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 80 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT294 localisé au chaînage 5+386 m dans le remblai de la piste d'atterrissage d'Aupaluk pour la période de 2006 à 2016.



Figure 81 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT294 localisé au chaînage 5+386 m dans le remblai de la piste d'atterrissage d'Aupaluk pour les années de 2004 à 2016.

4.7.3.2 CÂBLE AUTOMATISÉ HT299 : 2008 À 2016

Le câble HT299 (figure 82) est situé dans le milieu naturel à une quarantaine de mètres de l'accotement ouest de la piste au chaînage 5+384 m. Il est utilisé comme station de référence dans le milieu naturel non perturbé, à proximité de la piste. Les données à 3.1 m ont été retirées, car elles sont aberrantes depuis le début de l'acquisition. Dans un premier temps, le forage HT299 a été très peu affecté par l'hiver anormalement chaud enregistré en 2009-2010 contrairement à HT294 et à l'ensemble des stations de monitoring du réseau. Il n'a subi qu'un approfondissement de 0.09 m (figure 83 A et B). Depuis, le profil thermique du sol s'est refroidi et l'épaisseur de la couche active a fortement diminué passant de 2.53 m en 2005 à 0.90 m en 2016 (pratiquement son niveau de 1990 lors de la construction de l'aéroport) (figure 85). Le dégel arrive plus abruptement à la station HT299 que sous la piste, probablement dû à une percolation de l'eau dans le sol à la suite de la fonte du couvert nival. D'ailleurs, le couvert neigeux a une influence sur les températures du sol lors de la saison de gel en isolant et diminuant les échanges de chaleur entre le sol et l'atmosphère. Le réchauffement rapide en surface lors du dégel, probablement dû à la convection, est passager et rapidement atténué lors de la reprise de la conduction (Allard et al., 2009). La présence probable d'une nappe perchée autour de 2 m de 2004 à 2008, lorsque la couche active était plus épaisse, couplée à l'artefact causé par l'absence de prise de mesures entre 2,1 m et 5,1 m (forçant une interpolation exagérée) explique le retard du regel observé dans la représentation graphique de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps (figure 84, voir encadré) durant cette période. Ce problème prend fin à l'été 2008, lorsque la base de la couche active est remontée au-dessus de 2.1 m.



Figure 82 : Station d'enregistrement du câble automatisé HT299.



Figure 83 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT299 localisé au chaînage 5+384 m dans le milieu naturel à une quarantaine de mètres de l'accotement ouest de la piste d'atterrissage d'Aupaluk pour la période de A) 2008 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 84 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT299 localisé au chaînage 5+384 m dans le milieu naturel à une quarantaine de mètres de l'accotement ouest de la piste d'atterrissage d'Aupaluk pour la période de 2007 à 2016.



Figure 85 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT299 localisé au chaînage 5+384 m dans le milieu naturel à une quarantaine de mètres de l'accotement ouest de la piste d'atterrissage d'Aupaluk pour les années 2004 à 2016.

4.7.4 FAITS SAILLANTS RELATIFS AU PERGÉLISOL À L'AÉROPORT DE AUPALUK

Malgré une couche active relativement épaisse (tableau 35 et tableau 36), l'état du pergélisol sous la piste (HT294) n'est pas considéré critique, car le front de dégel est situé dans le remblai. De plus, ce remblai repose sur un sol non gélif (Allard et *al.*, 2007). En milieu naturel (HT299), l'état du pergélisol se porte bien avec une diminution graduelle du front de dégel de 2.53 m en 2005 à 0,90 m en 2016. Le drainage dans la partie sud-ouest de la piste est beaucoup plus problématique. Le gonflement et la fonte répétés des buttes saisonnières à noyau de glace provoquent un déchirement du couvert végétal (Allard et *al.*, 2007). De plus, des plans d'eau sporadiques et des buttes saisonnières à noyau de glace ont été observés le long du remblai dans ce secteur. Il y a quelques années, des correctifs ont été apportés à la clôture dont les poteaux étaient victimes du « frost-jacking » dans ce secteur (figure 86).



Figure 86 : Problèmes de A) et B) « frost-jacking » et C) de plans d'eau sporadiques observés à Aupaluk.

Câble	Influence du couvert nival	Localisation	Profondeur moyenne du dégel (m)	Tendance front de dégel
HT294	Faible	Piste	-2.94	Remontée récente
HT299	Faible	Terrain naturel	-1.91	Remontée

Tableau 35 : Synthèse de l'état du pergélisol aux câbles à thermistances de l'aéroport de Aupaluk.

		Piste		Terrain naturel					
	AUP	ALUK H	Г294	AUPALUK HT299					
	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	∆(%)			
2004	2.79			2.53					
2005	2.89	0.1	3.6	2.44	-0.09	-3.5			
2006	2.92	0.03	1	2.81	0.37	15.1			
2007	2.91	-0.01	-0.3	2.48	-0.33	-11.7			
2008	2.94	0.03	1						
2009	2.835	-0.1	-3.6	1.89	0.59	23.7			
2010	3.05	0.21	7.4	1.98	0.09	4.7			
2011	3.06	0.01	0.3	1.89	-0.09	-4.5			
2012	3.06	0	0	1.78	-0.11	-5.8			
2013	2.98	-0.08	-2.5	1.59	-0.19	-10.6			
2014	3.03	0.05	1.7	1.63	0.04	2.5			
2015	2.88	-0.16	-5.2	0.94	-0.69	-42.3			
2016	2.91	0.03	1.04	0.90	-0.04	-4.3			

Tableau 36 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum aux différents sites d'Aupaluk de Tasiujaq pour les années 2004 à 2016.

: Augmentation de la couche active

: Diminution de la couche active

4.8 TASIUJAQ

4.8.1 CARACTÉRISTIQUES DES DÉPÔTS DE SURFACES ET DÉTAIL DE L'INSTRUMENTATION

4.8.1.1 SYNTHÈSE DE LA RÉPARTITION SPATIALE, DE L'ÉPAISSEUR ET DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUE DES DÉPÔTS SUPERFICIELS

L'aéroport est situé sur une terrasse fluviale sur la rive nord de la rivière Bérard. L'aéroport a été achevé en 1990. La piste d'atterrissage, d'une longueur effective de 1190 m et d'une largeur de 44 m, est orientée selon un axe nord-nord-est-sud-sud-ouest à une altitude moyenne de 34 m (Allard et *al.*, 2007). Une des particularités de la piste de Tasiujaq est qu'elle traverse, entre les chaînages 5+820 m et 5+865 m, un ancien méandre abandonné qui forme un petit lac peu profond. Le drainage naturel de ce lac s'effectue principalement par un ruisseau qui coule parallèlement à la piste, du côté ouest, en direction nord (L'Hérault et *al.*, 2012).

Les tassements différentiels qui affectent surtout le bord de piste et le talus du remblai constituent les principaux problèmes relevés. Il a été démontré que l'accumulation de neige par le vent et par les opérations de déneigement en bordure de remblai est la principale source de chaleur qui fait dégeler le pergélisol en pied de remblai. En 2010 est aussi apparue une dépression transversale associée probablement à un écoulement traversant latéralement le remblai de la piste. De telles infiltrations porteuses de chaleur seront susceptibles de se reproduire ailleurs à mesure que les mares d'eau déjà existantes s'agrandiront et submergeront la base du remblai. À court terme, c'est le principal danger qui menace la piste (L'Hérault et *al.*, 2012). Cette piste a été le lieu d'installation de planches d'essais qui continuent de tester des solutions d'ingénierie pour stabiliser les bords de remblais, comme des pentes douces, les drains de chaleur et les remblais à convection.

4.8.1.2 LOCALISATION ET DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air à Tasiujaq comprend quatre câbles à thermistances automatisés :

- HT180 : Le câble HT180, installé en 1989 lors de la construction et automatisé en 1993, comporte 9 thermistances entre 0.60 et 5 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé au centre piste sous le remblai et traverse une couche d'isolant rigide de 50 mm placée au contact entre le remblai et le sol naturel, au chaînage 5+090 m. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.
- HT181: Le câble HT181, installé en 1989 lors de la construction et automatisé en 1995, comporte 11 thermistances entre 0.65 et 5.40 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé dans le remblai de la piste, au chaînage 5+300 m. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X qu'il partage avec le câble TAS_F2.
- **HT304** : Le câble HT304, installé en 1989 lors de la construction et automatisé en 1993, comporte 13 thermistances entre 0.05 et 11 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique et d'une thermistance logée dans un abri de radiation à environ 1.25 m au-dessus

du sol pour le suivi de la température de l'air. Il est localisé à 48 m à l'est de la piste, en terrain naturel (dans une barre alluviale de sables et graviers) vis-à-vis chaînage 5+215 m. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X.

 TAS_F2 : Le câble TAS_F2, instrumenté en 2010, comporte 16 thermistances entre 0.10 et 13.50 m dans le sol afin d'assurer le suivi du régime thermique. Il est localisé du côté ouest de la piste, au chaînage 5+310, à 10 m du pied de remblai. L'enregistrement des données se fait à l'aide d'un système d'acquisition CR10X qu'il partage avec le câble HT181.



Figure 87 : Plan de localisation de l'instrumentation pour le suivi du régime thermique du pergélisol et de la température de l'air l'aéroport de Tasiujaq, Nunavik.

rubicuu 57 rubicuu sommune ue rimstrumentution u rucroport ue rusiujug	Tableau 37 Tableau	sommaire de	l'instrumentation (à l'aéroport d	de Tasiujag.
--	--------------------	-------------	---------------------	----------------	--------------

	TASIUJAQ										
Câbles à thermistances	Mise en service	Système d'acquisition	Répartition des thermistances (cm)	Câbles à lectures manuelles							
HT180	27-08-1993	CR10X	60-61-100-150-200-250-300-350-400-450-500 cm								
HT181	21-09-1995	CR10X	65-90-140-190-240-290-340-390-440-490-540 cm								
HT304	27-08-1993	CR10X	0-5-10-20-50-100-150-200-300-400-500-700-900-1100 cm								
TAS_F2	10-10-2010	CR10X	10-25-50-75-100-150-200-250-300-400-500-600-700-900-1100-1350 cm								

4.8.2 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Le boîtier du câble HT304, localisé en terrain naturel, est doté d'un capteur pour enregistrer la température de l'air fixé à 1.25 m du sol. Tout comme l'ensemble des villages du Nunavik, l'hiver 2015 à Tasiujaq a été marqué par des températures froides. La tendance des températures moyennes journalières de l'air indique que la tendance est à un refroidissement pour la période de 2004 à 2016 (figure 88).



Figure 88 : Température moyenne journalière de l'air (TMJA) enregistrée à l'aéroport de Tasiujaq pour la période de 2004 à 2016.

4.8.2.1 ÉVOLUTION DES INDICES CLIMATIQUES : TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES, MENSUELLES ET SAISONNIÈRES DE L'AIR, DÉBUT, FIN, DURÉE ET MOYENNE DES SAISON DE GEL ET DE DÉGEL ET DEGRÉSJOURS DE GEL ET DE DÉGEL

L'année climatique 2015-2016 est marquée par des températures de l'air légèrement supérieures à la moyenne pour la période de 2005 à 2016. En effet, la TMAA mesurée de -3.97 °C est légèrement plus chaude que la moyenne de -3.74 °C pour la période de référence. Durant cette période, l'année 2009-2010 a été la plus chaude, avec une moyenne de -1.73 °C et l'année 2014-2015 a été la plus froide avec une moyenne de -6.82 °C (figure 89 et tableau 38).

Les trois dernières années climatiques enregistrées à Tasiujaq ont été particulièrement froides et ont permis d'inverser la tendance de la température de l'air qui indique maintenant une légère baisse de près de 0.17 C/an. Cette diminution de la température s'effectue surtout lors de la période hivernale (-0.32 °C par an). La tendance dans les températures estivales, quoi qu'aussi en déclin, indique une diminution moins importante avec une tendance de -0.03 °C/an.

Pour la période de 2005 à 2016, la saison de gel s'amorce en moyenne le 21 octobre, mais peut varier de plus de 25 jours d'une année à l'autre. La durée moyenne de la saison de gel est de 201 jours. De même, la saison de dégel débute en général autour du 12 mai avec une variation interannuelle de 52 jours, et dure en moyenne 160 jours. Pour l'année 2015-2016, la saison de gel a débuté le 10 octobre et a duré 214 jours alors que la saison de dégel a débuté le 12 mai et a duré 149 jours.

Le cumul des degrés-jours de gel et de dégel, représentés par les indices de gel (Fi) et de dégel (Ti), ainsi que dans le ratio entre ces deux indices indique que, pour la période de 2005 à 2016, la tendance de Fi est à l'augmentation (68 degrés-jours/an) alors que celle de Ti est à la baisse (6 degrés-jours/an). Pour l'année 2015-2016, l'indice de gel de 3257 degrés-jours indique un hiver plus froid que la moyenne observée (2943 degrés-jours), alors que l'indice de dégel de 1082 est légèrement inférieur à la moyenne de 1162. Le ratio Fi/Ti obtenu de 3.1 est supérieur à la moyenne de 2.57, ce qui indique que, malgré un été chaud, le sol a emmagasiné moins de chaleur.



Figure 89 : Températures moyennes climatiques (en noir) et saisonnières (saison de gel en gris et de dégel en rouge) de l'air à l'aéroport de Tasiujaq pour la période de 2005 à 2016.

					TAS	SIUJAQ						
Indices	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008	2008- 2009	2009- 2010	2010- 2011	2011- 2012	2012- 2013	2013- 2014	2014- 2015	2015- 2016	Moyenne
Saison de gel												
Début (jj-mmm)	29-oct	27-oct	10-oct	29-oct	17-oct	03-nov	24-oct	12-oct	25-oct	28-oct	10-oct	21-oct
Fin (jj-mmm)	07-mai	29-mai	07-avr	26-mai	12-mai	27-mai	09-mai	16-mai	14-mai	24-avr	11-mai	11-mai
Durée (jour)	190	214	180	209	207	205	198	216	201	178	214	201
Moyenne (°C)	-13.19	-12.76	-17.35	-15.33	-10.68	-12.41	-14.76	-12.29	-17.15	-19.78	-15.11	-14.62
Saison de dégel												
Début (jj-mmm)	08-mai	30-mai	08-avr	27-mai	13-mai	28-mai	10-mai	17-mai	15-mai	25-avr	12-mai	12-mai
Fin (jj-mmm)	26-oct	09-oct	28-oct	16-oct	02-nov	23-oct	11-oct	24-oct	27-oct	09-oct	08-oct	19-oct
Durée (jour)	171	132	203	142	173	148	154	160	165	167	149	160
Moyenne (°C)	7.79	7.92	5.54	6.61	7.21	7.53	8.43	6.71	7.52	6.14	7.17	7.14
Année climatique												
TMAA (°C)	-2.70	-2.42	-5.90	-4.36	-1.73	-2.44	-3.16	-2.79	-4.82	-6.82	-3.97	-3.74
Indice de gel (FI)	2536	2750	3147	3220	2225	2580	2950	2690	3468	3549	3257	2943

Tableau 38 : Sommaire des moyennes annuelle et saisonnière, débuts, fins et durée de saison de gel ainsi que des indices de gel (Fi) et dégel (Ti) à l'aéroport de Tasiujaq pour la période de 2005 à 2016.

Indice de dégel (TI)	1270	1056	1297	952	1269	1130	1315	1092	1260	1063	1082	1162
Ratio (FI/TI)	2.00	2.60	2.43	3.38	1.75	2.28	2.24	2.46	2.75	3.34	3.01	2.57

La moyenne mensuelle de la température de l'air détaillée au tableau 39 indique que les températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) hivernales et estivales de 2016 sont légèrement plus basses que la moyenne pour la période de 2005 à 2016. Cette différence est plus importante durant le mois d'avril, dont la moyenne mensuelle est de 4.52 °C sous la moyenne mensuelle enregistrée depuis 2005. Les mois de février, mars et avril 2016 furent sous les moyennes mensuelles de la période 2004-2015. En effet, les températures de -28.39 °C, -31.52 °C et -22.95 °C pour les mois de janvier, février et mars se situent au moins 5 °C sous les moyennes mensuelles et -9 °C pour le mois de février 2015. L'année 2010 reste la plus chaude avec des températures hivernales anormalement chaudes et une moyenne annuelle de -1.6 °C soit 3 °C audessus de la moyenne annuelle de 2004-2014. En effet, la moyenne mensuelle des mois de février, mars, avril, novembre et décembre fut alors de plus de 3 °C au-dessus de la moyenne mensuelle pour la période 2004-2015. La variabilité interannuelle des moyennes saisonnières pour la période 2004-2015 est plus importante en hiver avec une différence de 6.25 °C entre l'hiver le plus chaud et celui le plus froid tandis qu'elle est de seulement 2.93 °C entre l'été le plus chaud et le plus froid. En effet, les températures mensuelles anormalement chaudes ou froides sont plus fréquentes en hiver comparativement à l'été où celles-ci suivent majoritairement la moyenne calculée pour la période 2004-2015.

	TASIUJAQ													
Mois	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	$ar{x}$ mensuelle	
Janvier	-27.25	-22.13	-20.04	-24.60	-23.10	-20.48	-17.71	-23.93	-22.66	-21.18	-28.63	-19.70	-22.62	
Février	-21.90	-21.43	-18.51	-25.74	-21.09	-13.05	-24.19	-22.17	-21.94	-23.76	-31.66	-24.41	-22.49	
Mars	-16.24	-12.20	-19.98	-19.97	-19.23	-14.21	-19.52	-18.16	-11.90	-23.47	-23.33	-20.30	-18.21	
Avril	-5.71	-4.94	-8.38	-7.01	-9.20	-4.64	-12.65	-9.41	-8.87	-12.56	-8.95	-13.32	-8.80	
Mai	2.45	3.22	-3.90	2.57	-3.75	-0.53	-2.60	0.56	-1.23	0.40	0.36	0.01	-0.20	
Juin	7.88	7.52	5.76	8.17	5.59	5.75	5.41	9.49	5.51	9.96	5.63	5.47	6.85	
Juillet	11.75	12.36	12.78	12.40	9.86	11.60	12.15	11.81	10.66	10.00	11.18	10.27	11.40	
Août	10.86	9.76	10.43	11.65	9.30	13.72	11.37	12.28	10.38	12.61	10.38	11.78	11.21	
Septembre	6.20	6.33	4.46	5.69	5.53	6.90	6.40	7.39	5.56	4.36	4.85	6.19	5.82	
Octobre	1.88	1.55	-0.25	0.54	-1.23	2.31	0.57	0.07	1.23	1.92	-1.39	n.d.	0.65	
Novembre	-6.05	-6.08	-8.93	-8.54	-5.48	-2.17	-6.58	-6.72	-8.74	-8.77	-8.59	n.d.	-6.97	
Décembre	-16.78	-13.74	-20.46	-21.16	-12.47	-6.40	-15.69	-13.82	-22.26	-16.41	-17.44	n.d.	-16.06	
\bar{x} annuelle	-4.41	-3.32	-5.58	-5.50	-5.44	-1.77	-5.25	-4.38	-5.35	-5.57	-7.30	n.d.	-4.95	

Tableau 39 : Températures moyennes mensuelles de l'air (TMMA) enregistrées à l'aéroport de Tasiujaq pour la période de 2005 à 2016.
4.8.3 ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL

4.8.3.1 CÂBLE AUTOMATISÉ HT180 : 2007 À 2016

Le câble HT180, qui atteint 5 m de profondeur, se situe dans la piste au chaînage 5+090 m, à l'emplacement d'une ancienne butte de sable qui a été déblayée et isolée (figure 90). Le portrait général des températures du sol présenté aux figure 91 A et B et figure 92 permet de constater que les hivers froids de 2014, 2015 et 2016, ainsi que les étés relativement frais de 2013 et 2015 ont eu un impact sur les températures du sol, qui sont globalement à la baisse depuis 2013. Depuis 2014, correspondant au maximum de dégel enregistré, l'épaisseur de la couche active a diminué, passant de 3.13 à 3.04 m de profondeur (figure 93). Cette remontée du front de dégel est similaire au régime thermique observé pour le câble HT181, lui aussi localisé dans la piste. Cependant, la remontée relativement moins importante du front de dégel observée au câble HT180 est certainement due à la couche isolante en mousse de polystyrène au contact du remblai et du sol naturel. Ce même phénomène fut observé lors des températures anormalement chaudes enregistrées à l'hiver 2009-2010.



Figure 90 : Station d'enregistrement recueillant les lectures des câbles automatisés HT181 et TAS_F2.



Figure 91 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT180 localisé au chaînage 5+090 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période de A) 2007 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 92 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT180 localisé au chaînage 5+090 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période de 2008 à 2016.



Figure 93 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT180 localisé au chaînage 5+090 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour les années 2008 à 2016.

4.8.3.2 CÂBLE AUTOMATISÉ HT181 : 2004 À 2016

Le câble HT181 (figure 94) mesure 5 m et se situe au chaînage 5+300 m dans le remblai de la piste où aucun isolant n'est présent. Les températures moyennes journalières enregistrées à cette station sont présentées à la figure 95 A et B. Elles permettent de constater entre autres que le régime thermique en surface est principalement conditionné par les températures de l'air. Les hivers froids de 2014, 2015 et 2016, ainsi que les étés relativement frais de 2013 et 2015 ont eu un impact sur les températures du sol, qui sont globalement à la baisse depuis 2013. Chaque année, depuis le début de l'enregistrement, il y a un ralentissement du dégel et du regel à environ 2.75 m de profondeur. Ce ralentissement peut être expliqué par la présence d'une nappe perchée qui retarde le gel et le dégel (phénomène de chaleur latente ou d'enthalpie lors du changement d'état) (figure 96). Les données de températures du sol indiquent une diminution de l'épaisseur de la couche active d'environ 7 % entre 2010 et 2016 passant de 3.71 à 3.41 m d'épaisseur, tandis que le front de dégel n'a remonté que de 2 % pour la même période à la station HT180 (figure 97).



Figure 94 : Emplacement de la station d'enregistrement du câble à thermistance HT181 localisé au chaînage 5+300 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.



Figure 95 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances HT181 localisé au chaînage 5+300 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période de A) 2004 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 96 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances HT181 localisé au chaînage 5+300 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période de 2007 à 2016.



Figure 97 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances HT181 localisé au chaînage 5+300 m dans le remblai de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour les années 2004 à 2016.

4.8.3.3 CÂBLE AUTOMATISÉ HT304 : 2004 À 2016

Le câble HT304 (figure 98) se situe en terrain naturel à une quarantaine de mètres de la piste et mesure 11 m de profondeur. Les données de températures du sol couvrent la période 2004 à 2016, mais depuis 2008 (à vérifier) le tube dans lequel est installé le câble est remonté de plus de 0.75 m. Les températures selon la profondeur sont présentées à la figure 99, mais la profondeur réelle des thermistances est inconnue. Le câble devra être réajusté, ou du moins mesurer la profondeur exacte des thermistances, pour poursuivre l'analyse thermique à cet endroit.



Figure 98 : Station d'enregistrement du câble automatisé HT304 avec son capteur de température de l'air.



Figure 99 : Température du sol selon la profondeur en fonction du temps au câble à thermistances HT304 localisé en terrain naturel à une quarantaine de mètres de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période de 2004 à 2016. L'encadré noir correspond à la période où le câble a remonté et où les profondeurs seraient à vérifier.

4.8.3.4 CÂBLE AUTOMATISÉ TAS_F2 : 2010 À 2016

Le câble TAS_F2, localisé en pied de remblai (figure 90) mesure 13.5 m de profondeur. Les données de températures en fonction de la profondeur couvrent la période de 2010 à 2016 et sont présentées à la figure 100 A et B, ainsi qu'à la figure 101. Depuis le début de la période d'enregistrement, il est possible de remarquer que l'amplitude des variations a augmenté durant la saison de dégel et qu'elle s'est atténuée durant la saison de gel, notamment durant l'hiver 2016. Ce phénomène pourrait être expliqué par la combinaison de deux facteurs soit : la remontée du câble à thermistance d'environ 0.10 m, ce qui expliquerait les variations de températures plus importantes en surface, ainsi que par la modification du couvert nival à cet endroit. La présence de neige serait la cause de l'augmentation des températures en hiver et de l'augmentation subséquente de la couche active. Cette dernière, contrairement aux autres sites, s'est approfondie de 0.41 m depuis 2013 pour atteindre 2.46 m de profondeur en 2016, niveau du maximum de dégel le plus bas enregistré à cet endroit. Les températures moyennes selon la profondeur indiquent cependant que le profil s'est refroidi dans les 13 premiers mètres depuis 2011, alors qu'il se réchauffe à la dernière thermistance (figure 102).



Figure 100 : Température du sol selon la profondeur (mètres) et température de l'air (Tair) au câble à thermistances TAS_F2 localisé au chaînage 5+310 m à 10 m du pied du remblai du côté ouest de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période de A) 2010 à 2016 et B) 2015-2016.



Figure 101 : Température du sol selon la profondeur (mètre) en fonction du temps au câble à thermistances TAS_F2 localisé au chaînage 5+310 m à 10 m du pied du remblai du côté ouest de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour la période de 2010 à 2016.



Figure 102 : Profondeur maximale du front de dégel au câble à thermistances TAS_F2 localisé au chaînage 5+310 m à 10 m du pied du remblai du côté ouest de la piste d'atterrissage de Tasiujaq pour les années 2010 à 2016.

4.8.4 FAITS SAILLANTS RELATIFS AU PERGÉLISOL À L'AÉROPORT DE TASIUJAQ

Les profils thermiques des stations HT180, HT181 et HT304 à l'aéroport de Tasiujaq confirment que le pergélisol s'est généralement dégradé en milieu naturel à l'aéroport de Tasiujaq depuis 2004 (tableau 40). En effet, la dégradation est plus importante dans le milieu naturel (HT304) avec un approfondissement de la couche active de plus de 35 % depuis 2004 contrairement à une augmentation de 7 % sous la piste (HT181) pour la même période (tableau 41). Cependant, cet approfondissement semble s'être stabilisé depuis 2013, dont les variations sont beaucoup moins importantes que pour la période 2004 à 2012 La remontée du front de dégel sous la piste est attribuable aux températures froides de l'hiver 2014 et 2015 alors que le déneigement de la piste a favorisé l'échange thermique et la remontée du front de dégel de 6 % (HT181) et 2 % (HT180), comme prévu dans les modèles (L'Hérault et *al.*, 2012). De façon générale la couche d'isolant à l'interface entre le remblai et le sol naturel au câble HT180 a limité la profondeur maximale du dégel durant les années chaudes. Sa présence amortit légèrement les remontées du plafond du pergélisol lors des années froides (figure 103).

Câble	Influence du couvert nival	Localisation	Profondeur moyenne du dégel (m)	Tendance front de dégel
HT180	Faible	Piste	-3.04	Approfondissement + stabilisation
HT181	Faible	Piste	-3.49	Remontée récente
HT304	Faible	Terrain naturel	-2.33	Approfondissement
TAS_F2	Faible	Épaulement	-2.24	Approfondissement

Fableau 40 : Synthèse de	l'état du pergélisol au	câbles à thermistance	de l'aéroport de	Tasiujaq.
--------------------------	-------------------------	-----------------------	------------------	-----------

Tableau 41 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum aux différents sites de l'aéroport de Tasiujaq pour les années 2004 à 2016.

							Épa	auleme	nt/							
		Piste			Piste		P	ériphér	ie	Terrain naturel						
	TAS	UJAQ HI	181	TAS	UJAQ HI	180	TA	SIUJAQ	F2	TASIUJAQ HT304						
	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	∆(%)	z (m)	∆ (m)	∆(%)	z (m)	∆ (m)	∆(%)				
2004	3.21									1.92						
2005	3.41	0.2	6.2							2.08	0.16	8.3				
2006	3.51	0.1	2.9							2.24	0.16	7.6				
2007	3.33	-0.18	-5.1							2.1	-0.14	-6.2				
2008	3.52	0.19	5.7	2.94						2.23	0.13	6.1				
2009				2.97	-0.03	-1.1										
2010	3.71	0.19	5.2	3.08	0.11	3.6	2.4			2.39	0.16	7.2				
2011	3.67	-0.04	-1	3.07	-0.01	-0.5	1.99	-0.41	-17.1	2.33	-0.06	-2.4				
2012	3.73	0.06	1.6	3.10	0.04	1.2	2.17	0.18	9	2.51	0.18	7.8				
2013	3.60	-0.13	-3.6	3.05	-0.05	-1.7	2.05	-0.12	-5.5	2.51	0	0				
2014	3.63	0.03	0.9	3.13	0.08	2.6	2.27	0.22	10.7	2.56	0.05	2.1				
2015	3.47	-0.16	-4.3	3.02	-0.11	-3.6	2.36	0.09	4	2.51	-0.05	-1.8				
2016	3.43	3.43 -0.04 1.2		3.04	0.02	0.7	2.46	0.1	4.2	2.60	0.09	3.6				

: Augmentation de la couche active

: Diminution de la couche active



Figure 103 : Enveloppe des températures maximums, minimums et moyennes selon la profondeur pour le site HT180 localisé sous de l'isolant dans la piste et le site HT181 localisé dans la piste d'atterrissage de Tasiujaq.

5 DISCUSSION

Afin de faciliter l'analyse globale des températures du sol enregistrées aux différents sites de monitorage, les valeurs obtenues ont été comparées, selon le lieu, mais aussi selon le positionnement par rapport à l'infrastructure : 1) dans la zone d'emprise de l'infrastructure, qui comprend la piste ainsi que les épaulements et la périphérie de l'infrastructure (correspondant approximativement à la zone d'accumulation de neige) et 2) dans le terrain naturel servant de référence (figure 104).



Figure 104 : Localisation des différentes zones où est localisé l'instrumentation en fonction de leur positionnement par rapport à l'infrastructure.

L'état thermique du pergélisol sous les infrastructures aéroportuaires du Nunavik varie d'un village à l'autre. Malgré une variation marquée du front de dégel en fonction du village, une tendance est toutefois remarquée en ce qui a trait aux périodes d'augmentation et de diminution de l'épaisseur de la couche active. Les années 2005, 2006, 2008 à 2010, 2012, 2014 et 2016 ont été caractérisées par une augmentation de la couche active de l'ordre de 2.36 % à 8.91 % en moyenne tandis que les années 2007, 2011, 2013 et 2015 ont été caractérisées par une diminution de 4.41 % à 6.63 % en moyenne pour tous les villages (tableau 42). En 2009, malgré un approfondissement généralisé de la profondeur du dégel dans le terrain naturel ainsi que dans les talus de remblai et en périphérie des pistes, il y a eu une diminution de la profondeur de dégel enregistrée aux câbles localisés dans les pistes d'en moyenne 1.28 %. Il en est de même en 2010, malgré un approfondissement marqué et généralisé de la couche active sous les pistes et en terrain naturel, la moyenne sous les talus de remblai et en périphérie des talus de remblai et en périphérie de talus de remblai et en périphérie des pistes d'en moyenne 1.28 %. Il en est de même en 2010, malgré un approfondissement marqué et généralisé de la couche active sous les pistes et en terrain naturel, la moyenne sous les talus de remblai et en périphérie de la piste s'est vue diminuer légèrement de 0.28 %.

	Moyer	nne pour t villages	ous les	M	oyenne pi	ste	Épaule	Moyenne ment/pér	iphérie	Moyenne terrain naturel						
Année	z (m)	Δ (m) Δ(%)		z (m)	Δ (m)	∆(%)	z (m)	Δ (m)	∆(%)	z (m)	Δ (m)	Δ(%)				
2005	2.44	0.09	3.33	2.77	0.09	2.98	2.16			2.19	0.09	3.80				
2006	2.61	0.17	7.68	2.82	0.05	1.62	2.23	0.07	3.20	2.51	0.32	14.88				
2007	2.49	-0.12	-4.41	2.75	-0.07	-2.17	2.08	-0.15	-6.70	2.33	-0.17	-6.08				
2008	2.88	0.08	4.42	2.82	0.04	1.04	4.58			2.27	0.12	8.93				
2009	2.93	0.09	3.64	2.47	-0.03	-1.28	4.30	0.04	0.33	2.17	0.22	9.56				
2010	3.11	0.19	8.91	2.79	0.13	4.43	4.03	-0.07	-0.28	2.60	0.42	19.30				
2011	2.98	-0.16	-5.72	2.80	-0.06	-2.46	3.93	-0.10	-3.97	2.31	-0.29	-9.56				
2012	3.18	0.07	3.99	3.15	0.09	3.48	4.03	-0.05	0.07	2.47	0.16	7.66				
2013	2.91	-0.18	-6.63	2.68	-0.19	-8.48	3.72	-0.16	-4.65	2.28	-0.19	-7.00				
2014	2.98	0.08	4.04	2.78	0.10	5.70	3.73	0.02	2.03	2.39	0.11	4.88				
2015	3.19	-0.13	-5.55	2.64	-0.13	-4.74	4.18	-0.05	-1.06	2.17	-0.22	-10.63				
2016	3.09	0.02	2.36	2.70	0.05	3.65	4.38	-0.05	0.19	2.34	0.05	3.08				

Tableau 42 : Tableau synthèse de la variation (en mètre et en pourcentage) des profondeurs de dégel maximum moyennes en fonction de leur positionnement par rapport à l'infrastructure pour les années 2004 à 2016.

5.1 RÉGIME THERMIQUE DU PERGÉLISOL : SOUS LES PISTES D'ATTERRISSAGE ET EN PÉRIPHÉRIE DES AÉROPORTS DU MTMDET AU NUNAVIK

INUKJUAK

À Inukjuak, le pergélisol aux sites des câbles INU_F2 et INU_F4, situés dans l'épaulement aux deux extrémités de la piste, est caractérisé par des maximums de dégel très profond de 5.70 et 7.60 m respectivement. Les variations de couche active aux deux câbles sont cependant faibles et ne dépassent pas 2 % de variation interannuelle.

PUVIRNITUQ

À Puvirnituq, les deux câbles PUV_F2 (côté est de la piste) et PUV_F5 (côté ouest de la piste) installés dans les bermes le long de la partie centrale de la piste indiquent que le front du dégel a remonté considérablement de 26 % et de 15 % respectivement depuis 2009. Cependant, le câble PUV_F5 indique que le front de dégel se trouve en moyenne 2.53 m de plus profond qu'au câble PUV_F2.

AKULIVIK

À Akulivik, le câble HT183 installé sous la piste à l'extrémité nord-est a enregistré une remontée du front de dégel de 17 % entre 2009 et 2015 pour s'établir aux profondeurs estimées en 1992 de 1.54 m. Néanmoins, le front de dégel s'est approfondi de près de 15 % au cours de l'année 2016. Le nouveau câble installé au pied du remblai démontre que le pergélisol est fortement dégradé à cet endroit avec un maximum atteint par la couche active de 6.70 m, la plus profonde enregistrée à l'aéroport en 2015. L'autre câble installé en pied de remblai, indique aussi une dégradation du

pergélisol à cet endroit, malgré une couche active moins épaisse, elle s'est approfondie de 7.6 % de 2012 à 2015.

SALLUIT

À Salluit, les câbles HT172 et HT179 situés sous la piste ont enregistré une diminution généralisée des températures du sol entre 2 et 14 m de 1987 à 1994. De 1994 à 2015, le régime thermique s'est réchauffé demeurant toutefois plus froid que les températures mesurées en 1987. Malgré ce réchauffement, les températures de sols mesurées aux sites HT172 et HT179 en date du 15 octobre 2015 demeurent sous les 0 °C. Le câble SAL_F3 installé dans l'épaulement indique une remontée de 0.36 m de 2015 à 2016 portant le front de dégel à des valeurs similaires à 2012.

QUAQTAQ

À Quaqtaq, le câble HT178 situé sous la piste a aussi enregistré une baisse du front de dégel à la suite des températures anormalement chaudes de 2010. Cependant, la base de la couche active a remonté de 0.37 m entre 2012 et 2016, soit une diminution de 14 %, pour retrouver une profondeur de dégel de 2.33 m, valeur similaire à 2004. Le nouveau câble installé en 2015 en bordure de piste (7 m de distance du bord) révèle que la couche active à cet endroit est en moyenne de 2.18 m et que le pergélisol a envahi la nouvelle pente douce aménagée récemment.

KANGIRSUK

À Kangirsuk, le câble HT1 situé sous la piste a été très affecté par les températures chaudes de 2010. De 2009 à 2010, la couche active a augmenté de 37 % pour atteindre son épaisseur maximum de 2,29 m en 2010. Toutefois, les températures froides enregistrées à l'hiver 2015 ont permis une importante remontée du front de dégel de 18 % pour atteindre 1,87 m soit, la couche active la plus mince mesurée depuis 2005.

AUPALUK

À Aupaluk, le câble HT294 situé sous la piste a aussi été très affecté par les températures chaudes de 2010. De 2009 à 2010, le front de dégel a gagné 0.21 m pour atteindre 3.05 m en 2010. Le front de dégel a toutefois remonté pour s'établir à 2.91 m soit à peine 0.12 m plus bas que la profondeur estimée en 2004.

TASIUJAQ

Cette même tendance caractérisée par une baisse du front de dégel en 2010 suivi d'une hausse en 2015 a été enregistrée par les câbles HT180 et HT181 à Tasiujaq. Le câble HT181 a enregistré une remontée du front de dégel de 0.30 m entre 2012 et 2015 pour s'établir à 3.43 m en 2016. Malgré cette remontée, le front de dégel demeure 0.22 m plus bas que la valeur observée en 2004. Les températures au câble HT180, où une couche isolante avait été placée au contact du remblai et du sol naturel, ont quant à elles fluctué de façon synchrone avec le câble HT181, mais montrent de moins grandes amplitudes de variation et la profondeur du front de dégel n'a varié depuis 2008 que de 0.10 m pour s'établir à 3.04 m en 2016. Ainsi, le profil thermique du câble HT181 est légèrement plus chaud, surtout entre 1 et 3 m, qu'au site HT180, sous une couche d'isolant. Le câble TAS_F2 localisé au pied du remblai montre une dégradation du pergélisol dont la couche active s'est épaissie de 0.47 m depuis 2011. L'analyse de température du sol durant l'hiver 2016 indique que le couvert nival à cet endroit est fort probablement la cause du réchauffement observé.

Depuis 2012, la succession d'années froides ou proches de la moyenne observée des températures de l'air a été favorable à un certain regel passager du pergélisol sous les pistes, ce qui ne peut qu'avoir contribué à leur stabilité. L'année 2016 a été un peu plus chaude que la précédente, abaissant légèrement le front de dégel et augmentant les températures de surface. Les signes de dégradation du pergélisol observés touchent principalement les zones d'épaulement et de périphérie des pistes, coïncidant avec les secteurs d'accumulation de neige déblayée et accumulée par le vent.

5.2 Régime thermique du pergélisol : en terrain naturel aux aéroports du MTMDET au Nunavik

La tendance observée sous les pistes d'atterrissage depuis 2010 est aussi notée aux sites en milieu naturel peu enneigé d'Akulivik, Quaqtaq et Tasiujaq avec une diminution à l'été 2011, 2013 et 2015 entrecoupée d'une augmentation de la couche active à l'été 2012, 2014 et 2016.

À Aupaluk, le câble HT299 a enregistré une importante remontée de 64 % du front de dégel entre 2004 et 2015, dont la profondeur estimée a varié de 2.53 m en 2004 à 0.90 m en 2015. Dans ce cas, il apparaît que le regel de la nappe perchée dans la couche active profonde de l'année 2010 a recréé des conditions favorables de transfert par conduction.

À Salluit, pour une première année, la profondeur de dégel enregistrée au câble HT154 ne suit pas la tendance observée aux autres câbles. En effet, la profondeur maximum de dégel s'est vue diminuée malgré l'augmentation généralisée. Cette augmentation est d'ailleurs de plus de 12 % comparativement à l'année précédente.

À Tasiujaq, le câble à thermistances HT304 semble suivre la tendance climatique observée aux autres câbles et dans la piste. Néanmoins, l'augmentation apparente du dégel de 0.52 m de l'épaisseur de la couche active entre 2004 et 2016 est probablement un artefact lié à la remontée du câble à thermistances suite au soulèvement par le gel du tube dans lequel il se trouve.

5.3 COMPARAISON DU RÉGIME THERMIQUE : EN MILIEU NATUREL, EN PÉRIPHÉRIE ET SOUS LES PISTES D'ATTERRISSAGE.

L'analyse de la température moyenne du sol en fonction de la profondeur a révélé qu'à tous les villages (Akulivik, Quaqtaq et Tasiujaq) équipés de câbles dans les trois types de terrain, il existe un gradient de température entre la piste déneigée, dans le talus de remblai et en périphérie de

l'infrastructure, ainsi que dans le terrain naturel (figure 105). Ce phénomène est particulièrement vrai à Akulivik où il existe une différence de plus de 5 °C à 5 m de profondeur. Malgré le fait que tous les villages ne soient pas équipés de câbles dans les trois types de milieux, les épaulements sont généralement l'endroit où se trouve le pergélisol le plus chaud ou en dégradation (figure 106), à l'exception du câble HT1 à Kangirsuk qui enregistre des températures similaires aux pistes et milieux naturels.



Figure 105 : Température moyenne annuelle du sol selon la profondeur aux câbles à thermistances installés à l'aéroport d'Akulivik, de Quaqtaq et de Tasiujaq pour l'année 2014-2015 (et 2015-2016 pour les câbles AKU_F2 et QUA2015_F1). En gris, les câbles localisés sous la piste, en brun et orangé, les câbles localisés en talus de remblai ou en périphérie de l'infrastructure et en vert, les câbles localisés en terrain naturel.

La conductivité élevée des remblais, le type de sédiments sous les pistes et, en principe, l'absence d'eau limitant les effets de chaleur latente sont les principaux facteurs qui peuvent expliquer la stabilité plus grande du pergélisol sous les pistes que sous les accotements et les terrains naturels. Le déneigement des pistes d'atterrissage en hiver a permis aux hivers froids enregistrés en 2011, 2013 et 2015 de refroidir les remblais et a favorisé la remontée du front de dégel. De même, la présence de neige soufflée par le vent ou déblayée mécaniquement sur les épaulements et en périphérie de l'infrastructure isole le sol et empêche l'extraction de chaleur en hiver. L'été, s'il y a présence d'eau stagnante en pied de talus ou dans les fossés, le phénomène peut être amplifié par l'apport de chaleur latente. Malgré le fait qu'il n'y a pas de signes de dégradation visibles liés à la dégradation du pergélisol sous les talus de remblai et à proximité des pistes à l'heure actuelle, cette problématique pourrait potentiellement causer des tassements localisés et une perte de

capacité portante dans les secteurs riches en glace et à moyen terme la dégradation pourrait s'étendre sous la piste.





Les zones d'épaulement et la périphérie directe des infrastructures aéroportuaires constituent un secteur sensible au dégel du pergélisol et deviennent un élément clé dans le suivi des températures du sol en vue d'en évaluer la stabilité à long terme. Il est donc primordial de conserver et de préserver l'équipement en place notamment lors des travaux de réfection (p. ex. Tasiujaq qui débuteront en 2017) et de mise à niveau des infrastructures, ainsi que lors du déneigement. En effet, les câbles et stations d'enregistrement localisés en bordures sont plus à risque de bris étant donné qu'ils sont situés dans la zone où est tassée la neige.

6 CONCLUSION

Les données de la température de l'air étudiées dans ce présent rapport permettent d'avoir un portrait général des fluctuations climatiques récentes. À noter que les données de 2016 n'ont pas été intégrées au sommaire à tous les aéroports, car les mois d'octobre, novembre et décembre étaient manquants pour la plupart des villages. Pour l'ensemble des communautés du Nunavik, 2010 fut l'année la plus chaude avec une moyenne annuelle de près de 3 °C au-dessus de la température moyenne de la période 2005-2014 (série temporelle complète). Ce réchauffement a principalement été observé en hiver où les mois de janvier, février, mars, avril, novembre et décembre ont été anormalement chauds avec des moyennes mensuelles dépassant pour la plupart de 3 °C les moyennes mensuelles calculées pour la période 2005-2014. Il est aussi possible de confirmer que l'hiver 2014-2015 et l'été 2015 constituent l'année climatique la plus froide de la décennie écoulée pour l'ensemble des villages du Nunavik depuis 10 ans. L'impact de cette année froide a été positif pour les infrastructures de transport sur pergélisol.

L'augmentation projetée des températures, des précipitations et des événements de fonte aura un impact direct sur les infrastructures aéroportuaires renforçant la nécessité des suivis de l'état du pergélisol et des infrastructures. Dans ce contexte, il s'avère essentiel de maintenir et d'améliorer le suivi thermique du pergélisol sous et en périphérie des infrastructures aéroportuaires afin de suivre les variations thermiques à venir susceptibles d'affecter l'intégrité des infrastructures.

7 **BIBLIOGRAPHIE**

- Allard, M., R. Lévesque, M. K. Seguin et J.-A. Pilon (1993). Les caractéristiques du pergélisol et les études préliminaires aux travaux de génie au Québec nordique, Centre d'études nordiques, Université Laval, 94 p.
- Allard, M. et Sarrazin, D. (2007), Monitoring des thermistances collecte et interprétation des données : Aéroports de Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk, Quaqtaq, Akulivik, Salluit et Puvirnituq au Nunavik. Rapport Annuel au Ministère des Transports (Québec), Centre d'études nordiques, Université Laval, 41 p.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P. et Tarussov, A. (2007) L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. Rapport final au FACC, 199 p.
- Allard, M., Doré, G., L'Hérault, E., Verreault, J., Sarrazin, D. (2009). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du MTQ au Nunavik. Rapport d'étape 2, Centre d'études nordiques, Université Laval, 83 p.
- Allard, M., L'Hérault, E., Doyon, J. et Sarrazin, D. (2010) L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit, Nunavik. Rapport final préparé pour le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT), Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 38 p. Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. ArcticNet, Québec, Québec, Canada, 318 p.
- Allard, M., Sarrazin, D. et Roger, J. (2013) Monitoring des thermistances-collecte et interprétation des données : aéroports de Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq au Nunavik. Réalisé pour le compte du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec, Ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 147 p.
- Allard, M et Lemay, M. (2013) Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. ArcticNet, Québec, Québec, Canada, 318 p.
- Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E. et Sarrazin, D. (2013) Le pergélisol et les changements climatiques au Nunavik et Nunatsiavut : importance en matière d'infrastructures municipales et de transports *in* Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. *Edited by* Allard, M. and Lemay, M. ArcticNet, Québec, Québec, Canada, 318 p.
- Barrette, C., Brown, R. et Charron, I. (2016) Tendances et variabilité climatique de la région du projet de parc Wolstenholme, Nunavik. Rapport du CEN en prep.
- Barette, C., Bourdages, L., Brown, R., Chaumont, D., Dibike, Y., Frigon, A., Logan, T. et Paquin, D. (2013) Projections des changements climatiques au Nunavik et au Nunatsiavut pour 2050 *in* Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée

d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. *Edited by* Allard, M. and Lemay, M. ArcticNet, Québec, Québec, Canada, 318 p.

- Beaulac, I. et Doré, G. (2005) Bilan de la condition des pistes et des chemins d'accès menant aux aéroports du Nunavik, Université Laval, Département de génie civil, rapport GCT-2005-09, 123 p.
- Beaulac, I. (2006) Impacts de la fonte du pergélisol et adaptations des infrastructures de transport routier et aérien au Nunavik. Département de génie civil. Québec, Université Laval. Thèse (M.Sc.), 250 p.
- Brown, R., Lemay, M., Allard, M., Barrand, N.E., Barrette, C., Bégin, Y., Bell, T., Bernier, M., Bleau, S., Chaumont, D., Dibike Y., Frigon, A., Leblanc, P., Paquin, D., Sharp, M.J. et Way, R. 2013.
 Variabilité et changements climatiques dans la péninsule du Nunavik et du Nunatsiavut (IRIS de la région subarctique de l'Est du Canada). Dans M. Allard et M. Lemay (rédacteurs) Le Nunavik et le Nunatsiavut : de la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact des changements climatiques et de la modernisation. ArticNet inc. Québec, Canada, p.57-115.
- Brown, R. et Lemay, M. (2013) Variabilité et changements climatiques dans la péninsule du Nunavik et du Nunatsiavut (IRIS de la région subarctique de l'Est du Canada. *in* Le Nunavik et le Nunatsiavut : De la science aux politiques publiques. Une étude intégrée d'impact régional des changements climatiques et de la modernisation. *Edited by* Allard, M. and Lemay, M. ArcticNet, Québec, Québec, Canada, 318 p.
- Caya, D., Laprise, R., Giguère, M., Bergeron, G., Blanchet, J.-P., Stocks, B.J., Boer, G.J. and McFarlane, N.A. (1995) Description of the Canadian Regional Climate Model. Water, Air and Soil Pollution, 82 :477-482.
- Caya, D. and Laprise, R. (1999) A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model : The Canadian RCM. Monthly Weather Review, 127 :341-362.
- Duhaime, G., Lévesque, S. et Caron, A. (2015) Le Nunavik en chiffres 2015 version intégrale. Repéré à <u>http://www.chaireconditionautochtone.fss.ulaval.ca/documents/pdf/Le-Nunavik-en-chiffres-2015-18-08-15-.pdf</u>
- Ford, J. D., Bell, T. et St. Hilaire-Gravel, D. (2010) Vulnerability of community infrastructure to climate change in Nunavut : A case study from Arctic Bay *In* CAVIAR – Community Adaptation and Vulnerability in Arctic Regions. *Edited by* Hovelsrud, G. K., and Smit B., Springer, p. 107-130.
- Forbes, D. L., Mate, D., Bourgeois, J., Bell, T., Budkewitsch, P., Chen, W., Gearheard, S., Illauq, N. and Smith, I. R. (2007) Integrated mapping and change detection for adaptation planning in an Arctic coastal community, Clyde River, Nunavut. Proceedings, Arctic Coastal Zones at Risk, Tromsø, Norway. LOICZ : 42-47.
- Gravel Gaumond, F. et Doré, G. (2013) Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituq. Rapport final réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec (MTQ), Groupe de recherche en ingénierie des chaussées, Département de génie civil, Université Laval, 243 p.
- L'Hérault, E., M. Allard, C. Barrette, G. Doré, et D. Sarrazin (2012). Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements

climatiques pour les aéroports d'Umiujaq, Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk et Tasiujaq, Nunavik. Rapport final. Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec. Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval. 224 p.

- L'Hérault, E., Allard, M., Fortier, D., Carbonneau, A.-S., Lemieux, C. et Doyon-Robitaille, J. (2012) Production de cartes prédictives des caractéristiques du pergélisol afin de guider le développement de l'environnement bâti pour quatre communautés du Nunavik. Rapport final préparé pour Ouranos, Centre d'études nordiques, Université Laval, 86 p.
- Lemieux, C., Allard, M., Fortier. D., Grandmont, K., Larrivée, K., L'Hérault, E. et Carbonneau, A.-S. (2013) Une évaluation de l'état du parc immobilier du Ministère de la santé et des services sociaux du Québec en fonction de la sensibilité du pergélisol au Nunavik. Rapport final préparé pour le Ministère de la Santé et des Services Sociaux. Québec, Centre d'études nordiques, 72 p.
- Lévesque, R., M. Allard, M. K. Séguin et P.-A. Pilon (1990). Données préliminaires sur le régime thermique du pergélisol dans quelques localités du Nunavik, Québec. Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. C. d. é. Nordiques. Université Laval, Québec. 54 : 207-213.
- Music, B. and Caya, D. (2007) Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). Journal of Hydrometeorology, 8 :969-988.
- Irvine, M. L., Bell, T., Smith, I. R., and Forbes, D. L. (2009) Building on unstable ground : Identifying physical landscape constraints on infrastructure sustainability and planning in Nunavut communities. Annual Science Meeting, ArcticNet NCE, Victoria, 08-11 December.
- Plummer, D.A., Caya, D., Frigon, A., Cote, H., Giguere, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R. and De Elia, R. (2006) Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. Journal of Climate, 22 :2302-2315.
- Roger, J., Allard, M., L'Hérault, E., Sarrazin, D., Aubé-Michaud, S. et Mathon-Dufour, V. (2016). Suivi de l'évolution des conditions de pergélisol et de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires du MTQ au Nunavik dans le contexte de CC. Rapport final au Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports du Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval, 130 p.
- Savard, C. (2006). Imagerie électrique de la sous-fondation pergélisolée des pistes d'atterrissage au Nunavik. Québec, Université Laval. 244 p.
- Sarrazin, D., Allard, M., Doré, G., L'Hérault, E., Roger, J., Bilodeau, J.P. (2012) Évaluation des conditions de pergélisol sous la piste 05-27 de l'aéroport de Kuujjuaq en prévision de l'impact du réchauffement climatique. Rapport préparé pour Transports Canada, Québec, Centre d'études nordiques, Université Laval
- Tremblay, C. and Doré, G. (1988) Airport network and housing construction programs in northern Québec, Canada. In Permafrost, Fifth International Conference. Proceedings, Trondheim, Norway, p. 1500-1506.
- Verreault, J. (2015). Caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation pour les aéroports du Nunavik (Doctoral dissertation, Université Laval).

8 ANNEXES

8.1 ANNEXE A: TABLEAU SOMMAIRE DES PROFONDEURS DE DÉGEL PAR STATIONS EN FONCTION DE LEUR LOCALISATION SOUS L'INFRASTRUCTURE.

ĺ						Câb	les à th	nermist	ances	localise	és sous	les pis	tes														c	âbles à	thermis	tances	en milie	u natur	el							
	AKU	LIVIK H	T183	QUA	QTAQ HI	175	QUA	AQTAQ H	T178	AUP	ALUK HI	294	TAS	IUJAQ HT	181	TASI	UJAQ HT18	30		PUVIRN	ITUQ PUV	_FOR1A	AK	ULIVIK HT	162	AKU	JLIVIK AK	J_F1	SA	LLUIT HT	154	QU	AQTAQ HT	156	AUF	ALUK HT	299	TAS	IUJAQ HT	304
ľ	z (m)	Δ (m)	A (%)	z (m)	۸ (m)	۸ (%)	7 (m)	A (m)	۸ (%)	z (m)	Δ (m)	A (%)	z (m)	Δ (m)	۸ (%)	7 (m)	Δ (m) Δ	(%)		z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	∆(%)	z (m)	Δ (m)	∆(%)
2004	2 ()	<u> </u>	L (70)	2 38	±0.33	+16 10	2 3/	Δ (iii)	L (70)	2 70	± (iii)	L (70)	3 21	± (,	□ (/0)	2 (11)	<u> </u>	(/0)	2004										3.03						2.53			1.92		
2004				2.30	0.55	0	2.34	+0.05	+21	2.75	+0.10	+36	3 / 1	+0.20	+62				2005	1.01									3.23	+ 0.20	+ 6.6				2.44	- 0.09	- 3.5	2.08	+0.16	+ 8.3
2005				2.50	+0.03	+1.26	2.55	+0.03	+13	2.05	+0.10	+10	3 5 1	+ 0.10	+ 2 9				2006	1.22	+0.21	+ 20.7							3.75	+ 0.52	+ 16.1				2.81	+ 0.37	+ 15.1	2.24	+0.16	+ 7.6
2000				2.41	-0.06	-2.49	2.42	- 0.03	- 0.8	2.52	- 0.01	- 0.3	3.31	- 0.18	- 5 1				2007	1.21	- 0.01	- 0.8							3.54	- 0.21	- 5.6				2.48	- 0.33	- 11.7	2.10	- 0.14	- 6.2
2007				2.35	-0.05	-2.45	2.40	- 0.02	- 0.0	2.01	+0.01	+1.0	3.55	+0.10	+ 5 7	2 9/			2008	1.38	+ 0.17	+ 14.0	1.98			1.98			3.78	+ 0.07	+ 6.7							2.23	+0.13	+ 6.1
2000	1 96			2.30	0.03	0.42	2.35	0.01	0.4	2.54	0.10	2.6	5.52	10.15	1 3.7	2.072	0.02	1 1	2009	1.44	+0.16	+4.3	2.34	+ 0.36	+ 18.1	2.05	+ 0.07	+ 3.5	3.71	- 0.07	- 1.8	1.60			1.89	+ 0.59	+ 23.7			
2003	1.00	+0.05	+21	2.51	+0.01	+2 60	2.55	+0.13	+5.4	3.05	+0.10	+74	3 71	+0.19	+ 5 2	3.08	+0.11 +	3.6	2010	1.73	+ 0.29	+ 20.1	2.86	+ 0.52	+ 22.3	2.72	+ 0.67	+ 32.7	4.49	+ 0.79	+ 21.3	2.03	+ 0.43	+ 26.8	1.98	+ 0.09	+ 4.7	2.39	+0.16	+ 7.2
2010	1.76	0.15	77	2.51	10.00	12.00	2.51	0.00	2.4	2.05	+ 0.01	+0.2	2.67	0.04	1.0	2.07	0.01	0.5	2011	1.88	+ 0.15	+ 8.6	2.54	- 0.32	- 11.2	2.05	- 0.67	- 24.6	3.80	- 0.70	- 15.5	1.68	- 0.35	- 17.3	1.89	- 0.09	- 4.5	2.33	- 0.06	- 2.4
2011	1.70	- 0.15	- /./				2.45	+0.03	+ 11 1	2.06	0.01	+0.3	2 72	+ 0.04	- 1.0	2.10	+0.04 +	1.2	2012	2.07	+0.19	+ 10.1	2.67	+0.13	+ 4.9	2.48	+0.44	+21.4	3.84	+ 0.04	+ 1.0	1.92	+0.24	+ 14.2	1.78	- 0.11	- 5.8	2.51	+0.18	+ 7.8
2012	1 2 2	0.42	24.7				2.70	0.27	0.0	2.00	0.0	2.5	2.60	0.12	2.6	2.05	0.05	1.7	2013	2 12	+0.05	+24	2 37	- 0 30	- 11 1	2 29	- 0.20	- 8 1	3 2 9	- 0 55	- 14 3	1 78	-014	-73	1 5 9	- 0 19	- 10.6	2 51	0.0	0.0
2013	1.52	- 0.45	- 24.7				2.45	- 0.27	- 3.5	2.50	- 0.08	- 2.5	3.00	- 0.13	- 3.0	3.03	- 0.03 -	2.6	2014	2.26	+0.14	+66	2.50	+0.13	+ 5.4	2 30	+0.01	+0.44	3 50	+0.22	+65	1 97	+0.19	+ 10.6	1.63	+0.04	+ 2 5	2 56	+0.05	+ 2 1
2014	1.59	+ 0.27	+ 20.2				2.51	+ 0.08	+ 5.1	2.02	+0.05	+1.7	2.05	+ 0.05	+0.9	2.02	+ 0.08 +	2.0	2015	2.20	+0.10	+ 1 1	2.30	- 0.19	- 7.6	2.50	- 0.07	- 3.0	3.16	- 0.35	- 9.9	1.69	- 0.28	- 14 2	0.94	- 0.69	- 42.3	2.50	- 0.05	- 1.8
2015	1.54	- 0.05	- 3.2				2.32	- 0.19	- 7.4	2.88	- 0.16	- 5.2	5.47	- 0.16	- 4.3	5.02	- 0.11 -	5.0	2015	2.50	+0.10	+ 4.4	2.51	- 0.19	- 7.0	2.25	- 0.07	- 3.0	3.10	0.33	- 9.9	1.09	- 0.28	- 14.2	0.94	0.09	42.5	2.51	- 0.03	1.0
2016	1./7	+0.23	+14.9				2.33	+0.01	+0.43	2.91	+0.03	+1.04	3.43	- 0.04	+1.2	3.04	+0.02 +	0./	2016	2.70	+0.34	+16.9	2.47	+0.16	+6.9				3.55	- 0.39	- 12.3	1.82	+0.13	+ 7.7	0.90	- 0.04	- 4.3	2.60	+0.09	+ 3.6

											C	âbles à	thermi	stance	s dans l	'épaule	ment e	t en pé	riphéri	e										
	INUK	UUAK IN	U_F2	INUI	KJUAK IN	U_F4	PUVIR	PUVIRNITUQ PUV_F2			PUVIRNITUQ PUV_F5			KANGIRSUK HT1			AKULIVIK AKU_F2			AKULIVIK AKU_F4			SALLUIT SAL_F3			AQ QUA2	2015_F1	TASI	UJAQ TA	S_F2
	z (m)	z (m) Δ (m) Δ (%) z (m) Δ (Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	Δ (m)	Δ (%)	z (m)	∆ (m)	∆(%)
2004																														
2005													2.16																	
2006													2.23	+0.07	+ 3.2															
2007													2.08	- 0.15	- 6.7															
2008	5.68																		3.47											
2009	5.65	- 0.03	- 0.4				4.28			6.50			1.923	- 0.16	- 7.5				3.16	+0.31	+ 8.9									
2010	5.74	+ 0.09	+ 1.5				3.76	- 0.52	- 12.1	6.50	0.00	0.00	2.29	+0.37	+ 19.0				3.47	- 0.31	- 9.8							2.40		
2011	5.75	+0.01	+0.1				3.68	- 0.08	- 2.1	6.50	0.00	0.00	2.18	- 0.11	- 4.7				3.47	0.0	0.0							1.99	- 0.41	- 17.1
2012	5.76	+0.01	+0.1				3.82	+0.14	+ 3.8	6.25	- 0.25	- 3.8	2.26	+0.08	+ 3.7				3.90	- 0.43	- 12.4							2.17	+0.18	+ 9.0
2013	5.68	- 0.08	- 1.4				3.42	- 0.40	- 10.5	6.03	- 0.22	- 3.5	2.09	- 0.18	- 7.8				3.87	+ 0.03	+ 0.8	2.88						2.05	- 0.12	- 5.5
2014	5.71	+ 0.03	+0.5	_			3.31	- 0.11	- 3.2	5.85	- 0.18	- 3.0	2.27	+0.18	+ 8.6				3.82	+ 0.05	+ 1.3	2.86	- 0.02	- 0.7				2.27	+0.22	+ 10.7
2015	5.60	- 0.11	- 2.0	7.55			3.16	- 0.15	- 4.5	5.52	- 0.33	- 5.6	1.87	- 0.39	- 17.4	6.66			3.71	+0.21	+ 5.5	3.22	+0.36	+ 12.6	2.11			2.36	+ 0.09	+ 4.0
2016				7.64	+ 0.09	+ 1.2										6.70	+ 0.04	+0.6				2.86	- 0.36	- 11.2	2.24	-0.13	+6.16	2.46	+0.10	+ 4.2

: Augmentation de la couche active

: Diminution de la couche active