

Monitoring des thermistances - collecte et interprétation des données: aéroports
de Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq
au Nunavik.

CONTRAT GQ093505

Rapport Final

Allard, M., Sarrazin, D. et Roger J.
Centre d'études nordiques, Université Laval

Rapport produit pour le compte du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec,
Ministère des Transports du Québec

Janvier 2013

janvier 2013

Madame Anick Guimond
Transports Québec
Bureau de la coordination du Nord-du-Québec
80, avenue Québec
Rouyn-Noranda (Québec)
J9X 6R1, Qc, Canada

Objet : rapport final

Chère Madame Guimond

Il me fait plaisir de vous transmettre avec la présente notre rapport final pour le contrat susmentionné et portant sur les aéroports du Nunavik. Nous l'avons intitulé « *Monitoring des thermistances – collecte et interprétation des données : aéroports d'Inukjuak, Puvirnituq, Akulivik, Salluit, Quaqtaq, Kangirsuk, Aupaluk et Tasiujaq au Nunavik* ».

Ce fut un plaisir de réaliser ce projet pour Transports Québec. Nous sommes certes disposés à répondre à toutes les questions que pourriez nous poser relativement à ce rapport. De plus, je profiterai de notre prochaine rencontre pour utiliser les résultats de ce rapport dans le contexte de l'adaptation des aéroports aux changements climatiques.

Accepter, chère Madame Guimond, l'expression de mes meilleurs sentiments.



Michel Allard

Chercheur, Centre d'études nordiques

Professeur, département de géographie

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
1.0 INTRODUCTION.....	12
2.0 INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES	13
3.0 VILLAGES (Aéroports)	14
3.1 INUKJUAK	16
3.1.1 Description.....	16
3.1.2 Localisation.....	17
3.1.3 Température de l'air.....	19
3.1.3.1 Températures moyennes mensuelles dans l'air.....	19
3.1.3.2 Moyennes saisonnières.....	21
3.1.3.3 Moyennes quotidiennes	21
3.1.3.4 Seuils.....	22
3.1.3.5 Degrés-jours (gel-dégel)	23
3.1.4 Températures du sol	24
3.1.4.1 Données totales.....	24
3.1.4.2 Printemps	26
3.1.4.3 Couche active	26
3.1.4.4 Profondeurs ciblées (lecture manuelle des câbles F3 et F4)	28
3.2 PUVIRNITUQ	29
3.2.1 Description.....	29
3.2.2 Localisation.....	29
3.2.3 Température de l'air	34
3.2.3.1 Moyennes mensuelles.....	34
3.2.3.2 Moyennes saisonnières.....	35
3.2.3.3 Moyennes quotidiennes	36

3.2.3.4	Seuils à Puvirnituq	37
3.2.3.5	Degrés-jours (gel-dégel)	38
3.2.4	Températures du sol	40
3.2.4.1	Ensemble des données	40
3.2.4.2	Printemps	44
3.2.4.3	Couche active	44
3.2.4.4	Profondeurs ciblées	47
3.3	AKULIVIK.....	50
3.3.1	Description.....	50
3.3.2	Localisation	50
3.3.3	Températures de l'air	55
3.3.3.1	Moyennes mensuelles.....	55
3.3.3.2	Moyennes saisonnières.....	56
3.3.3.3	Moyennes quotidiennes de l'air	57
3.3.3.4	Seuils.....	59
3.3.3.5	Degrés-jours (gel-dégel)	60
3.3.4	Températures du sol	62
3.3.4.1	Données totales.....	62
3.3.4.2	Printemps	65
3.3.4.3	Couche active	66
3.3.4.4	Profondeurs ciblées	68
3.4	SALLUIT	70
3.4.1	Description.....	70
3.4.2	Localisation.....	70
3.4.3	Températures de l'air	73
3.4.3.1	Moyennes mensuelles.....	73
3.4.3.2	Moyennes saisonnières.....	74
3.4.3.3	Moyennes quotidiennes	75
3.4.3.4	Seuils.....	76
3.4.3.5	Degrés-jours (gel-dégel)	77
3.4.4	Températures du sol	79
3.4.4.1	Données totales.....	79

3.4.4.2	Printemps	82
3.4.4.3	Couche active	82
3.4.4.4	Profondeurs ciblées	83
3.5	QUAQTAQ.....	85
3.5.1	Description.....	85
3.5.2	Localisation.....	85
3.5.3	Températures de l'air	89
3.5.3.1	Moyennes mensuelles.....	89
3.5.3.2	Moyennes saisonnières.....	90
3.5.3.3	Moyennes quotidiennes.....	91
3.5.3.4	Seuils.....	91
3.5.3.5	Degrés-jours (gel-dégel)	92
3.5.4	Températures du sol	95
3.5.4.1	Données totales	95
3.5.4.3	Couche active	98
3.5.4.4	Profondeurs ciblées	99
3.6	KANGIRSUK.....	100
3.6.1	Description.....	100
3.6.2	Localisation.....	100
3.6.3	Températures de l'air	103
3.6.3.1	Moyennes mensuelles.....	103
3.6.3.2	Moyennes saisonnières.....	104
3.6.3.3	Moyennes quotidiennes.....	105
3.6.3.4	Seuils.....	106
3.6.3.5	Degrés-jours (gel-dégel)	107
3.6.4	Températures du sol	109
3.6.4.1	Données totales	109
3.6.4.2	Printemps	109
3.6.4.3	Couche active	109
3.6.4.4	Profondeurs ciblées	110
3.7	AUPALUK	111
3.7.1	Description.....	111

3.7.2	Localisation.....	111
3.7.3	Températures de l'air	114
3.7.3.1	Moyennes mensuelles.....	114
3.7.3.2	Moyennes saisonnières.....	115
3.7.3.3	Moyennes quotidiennes.....	116
3.7.3.4	Seuils.....	117
3.7.3.5	Degrés-jours (gel-dégel)	118
3.7.4	Températures du sol	120
3.7.4.1	Données totales	120
3.7.4.2	Printemps	121
3.7.4.3	Couche active	122
3.7.4.4	Profondeurs ciblées	124
3.8	TASIUJAQ.....	125
3.8.1	Description.....	125
3.8.2	Localisation.....	125
3.8.3	Températures de l'air	129
3.8.3.1	Moyennes mensuelles.....	129
3.8.3.2	Moyennes saisonnières.....	131
3.8.3.3	Moyennes quotidiennes.....	132
3.8.3.4	Seuils.....	133
3.8.3.5	Degrés-jours.....	134
3.8.4	Températures du sol	136
3.8.4.1	Données totales	136
3.8.4.2	Printemps	138
3.8.4.3	Couche active	138
3.8.4.4	Profondeurs ciblées	140
4.0	CONCLUSION.....	141
5.0	RÉFÉRENCES.....	144

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Carte de localisation des sites instrumentés au Nunavik	15
Figure 2	Station d’Inukjuak au pied du remblai de la piste.	17
Figure 3	Carte de localisation des sites de forage à Inukjuak.....	18
Figure 4	Moyennes mensuelles de la température de l’air pour Inukjuak.	20
Figure 5	Températures moyennes de l’air pour Inukjuak.	22
Figure 6	Évolution du cumul des degrés-jours de gel pour Inukjuak.	23
Figure 7	Évolution du cumul des degrés-jours de dégel pour Inukjuak.	24
Figure 8	Températures du sol à la station d’Inukjuak.	25
Figure 9	Températures à la surface du sol à Inukjuak.....	25
Figure 10	Températures du sol en mai et juin 2009 pour Inukjuak.	26
Figure 11	Températures à l’interface du mollisol aux abords de la piste d’Inukjuak.....	27
Figure 12	Profondeur maximale atteinte par le dégel en 2008 pour Inukjuak	27
Figure 13	Profil thermique au forage F3 à Inukjuak.....	28
Figure 14	Profil thermique au forage F4 à Inukjuak	28
Figure 15	Station sur le remblai de piste à Puvirnituk en 2008	30
Figure 16	Nouvelle station d’acquisition de données pour F2, installée sur la berme à convection.....	31
Figure 17	Schéma de localisation des stations automatisées à Puvirnituk.....	32
Figure 18	Carte de localisation des forages à Puvirnituk.	33
Figure 19	Moyennes mensuelles des températures de l’air pour Puvirnituk	35
Figure 20	Moyennes saisonnières pour Puvirnituk.....	36
Figure 21	Températures moyennes de l’air pour Puvirnituk.	37
Figure 22	Évolution des degrés-jours de gel à Puvirnituk.....	39
Figure 23	Évolution des degrés-jours de dégel à Puvirnituk	40
Figure 24	Station de référence à Puvirnituk.....	41
Figure 25	Câble HT177 dans la piste à Puvirnituk.	42
Figure 26	Câble HT296 dans la piste à Puvirnituk.	42
Figure 27	Câble HT297 dans la piste à Puvirnituk.	43
Figure 28	Câble F2 au pied du remblai de la piste de Puvirnituk.....	43
Figure 29	Câble F5 en amont de la vallée transversale à la piste de Puvirnituk.....	44
Figure 30	Coupe transversale de la piste avec puits instrumentés à Puvirnituk en 2008.	45
Figure 31	Températures au pied du remblai à Puvirnituk F2 au 25 septembre 2011.....	46
Figure 32	Températures au pied du remblai à Puvirnituk F5 au 25 septembre 2011.	46
Figure 33	Évolution de la profondeur de dégel dans le roc à Puvirnituk HT303.....	47
Figure 34	Températures à 7m et 9m sous la piste à Puvirnituk HT177	47
Figure 35	Profil thermique à 7 mètres de profondeur à Puvirnituk.....	48
Figure 36	Profil thermique à 9 mètres de profondeur à Puvirnituk.....	49
Figure 37	Station dans le milieu naturel près de la piste d’Akulivik.....	51
Figure 38	Station automatisée au point F4 à Akulivik.....	51

Figure 39	Station automatisée HT-183 sur le remblai de piste d'Akulivik.	52
Figure 40	Schéma de localisation des stations automatisées d'Akulivik.	53
Figure 41	Carte de localisation des stations et forages à Akulivik	54
Figure 42	Moyennes mensuelles de l'air	56
Figure 43	Moyennes saisonnières estivales pour Akulivik.	57
Figure 44	Températures moyennes de l'air pour Akulivik.	58
Figure 45	Évolution des degrés-jours de gel à Akulivik.	61
Figure 46	Évolution des degrés-jours de dégel pour Akulivik.	62
Figure 47	Données totales de HT162 à Akulivik.	63
Figure 48	Données totales pour F1 à Akulivik.	63
Figure 49	Données totales pour HT183 à Akulivik.	64
Figure 50	Données totales pour F4 à Akulivik.	64
Figure 51	Profil des températures dans la piste au printemps à Akulivik.	65
Figure 52	Profil des températures à 90 cm de profondeur à Akulivik.	66
Figure 53	Évolution de la couche active pour Akulivik.	67
Figure 54	Températures à l'interface de la couche active à Akulivik.	67
Figure 55	Profil thermique pour F2 au 28 octobre 2008.	69
Figure 56	Profil thermique pour F3 au 28 octobre 2008.	69
Figure 57	Station à lecture manuelle près du remblai de piste à Salluit.	70
Figure 58	Schéma de localisation des points de lectures à Salluit.	71
Figure 59	Carte de localisation des forages à Salluit.	72
Figure 60	Graphique des températures moyennes mensuelles pour Salluit.	74
Figure 61	Moyennes saisonnières pour Salluit.	75
Figure 62	Température moyenne de l'air pour Salluit	76
Figure 63	Évolution des degrés-jours de gel pour Salluit.	78
Figure 64	Évolution des degrés-jours de dégel pour Salluit.	79
Figure 65	Températures à Salluit pour HT-155	80
Figure 66	Températures à Salluit pour HT-160	80
Figure 67	Températures à Salluit pour HT-172	81
Figure 68	Températures à Salluit pour HT-179	81
Figure 69	Évolution de la couche active pour HT-155 à Salluit.	82
Figure 70	Évolution de la couche active pour HT-160 à Salluit.	83
Figure 71	Profil thermique pour F01 à Salluit.	83
Figure 72	Profil thermique pour F02 à Salluit.	84
Figure 73	Profil thermique pour F03 à Salluit.	84
Figure 74	Profil thermique pour F04 à Salluit.	84
Figure 75	Profil thermique pour F05 à Salluit.	85
Figure 76	Station sur le remblai à Quaqtaq.	86
Figure 77	Station dans le milieu naturel à Quaqtaq.	86
Figure 78	Câble à lecture manuelle à Quaqtaq.	86
Figure 79	Schéma de localisation des stations à Quaqtaq	87
Figure 80	Carte de localisation des sites instrumentés à Quaqtaq.	88

Figure 81	Moyennes mensuelles pour Quaqlaq	90
Figure 82	Moyennes saisonnières pour Quaqlaq.....	91
Figure 83	Température de l'air pour Quaqlaq	91
Figure 84	Évolution des degrés-jours de gel pour Quaqlaq.	94
Figure 85	Évolution des degrés-jours de dégel pour Quaqlaq.	94
Figure 86	Données du câble HT-156 en milieu naturel à Quaqlaq.	95
Figure 87	Donnée du câble HT-175 sous la piste à Quaqlaq.....	95
Figure 88	Données du câble HT-178 sous la piste à Quaqlaq.	96
Figure 89	Présence d'eau en marge de la piste et effets sur les températures du sol.	97
Figure 90	Épisode de remontée des températures dans le sol en mai et juin à Quaqlaq.	97
Figure 91	Évolution de la couche active au câble HT-156 à Quaqlaq.	98
Figure 92	Profondeur de dégel pour HT-175 et HT-178 à Quaqlaq.	99
Figure 93	Températures du sol en milieu naturel à Quaqlaq.	99
Figure 94	Station automatisée sur le remblai de piste à Kangirsuk.	100
Figure 95	Carte de localisation de la station automatisée à Quaqlaq.	101
Figure 96	Localisation de la station à Kangirsuk.....	102
Figure 97	Moyennes mensuelles de la température de l'air pour Kangirsuk.	104
Figure 98	Moyennes saisonnières pour Kangirsuk.	105
Figure 99	Moyennes quotidiennes de la température de l'air pour Kangirsuk.....	106
Figure 100	Évolution des degrés-jours de gel pour Kangirsuk.	108
Figure 101	Évolution des degrés-jours de dégel pour Kangirsuk.	108
Figure 102	Données totales enregistrées à la station de Kangirsuk.....	109
Figure 103	Évolution de la couche active à Kangirsuk.....	110
Figure 104	Températures du sol à Kangirsuk	110
Figure 105	Station dans le milieu naturel à Aupaluk.....	111
Figure 106	Schéma de localisation des stations à Aupaluk.	112
Figure 107	Carte de localisation des stations à Aupaluk.	113
Figure 108	Moyennes mensuelles pour la température de l'air à Aupaluk.	115
Figure 109	Moyennes saisonnières pour Aupaluk.	116
Figure 110	Températures moyennes quotidiennes de l'air pour Aupaluk.....	116
Figure 111	Évolution des degrés-jours de gel pour Aupaluk.....	119
Figure 112	Évolution des degrés-jours de dégel pour Aupaluk.....	120
Figure 113	Données totales pour Aupaluk HT-299.	120
Figure 114	Donnée totales pour Aupaluk HT-294.	121
Figure 115	Profils thermiques au printemps pour Aupaluk.	122
Figure 116	Évolution de la couche active dans la piste à Aupaluk.	123
Figure 117	Évolution de la couche active en milieu naturel à Aupaluk.....	123
Figure 118	Températures du sol à 17 et 19 m de profondeur pour Aupaluk.....	124
Figure 119	Schéma de localisation pour Tasiujaq.	126
Figure 120	Station près du remblai de la piste à Tasiujaq.....	127
Figure 121	Station en milieu naturel à Tasiujaq.....	127
Figure 122	Station près du remblai de piste à Tasiujaq.	127

Figure 123	Carte de localisation des sites automatisés à Tasiujaq	128
Figure 124	Moyennes mensuelles de la température de l'air pour Tasiujaq.....	131
Figure 125	Moyennes saisonnières pour Tasiujaq.....	132
Figure 126	Températures moyennes de l'air à Tasiujaq.....	133
Figure 127	Évolution des degrés-jours de gel pour Tasiujaq.....	135
Figure 128	Évolution des degrés-jours de dégel pour Tasiujaq.....	136
Figure 129	Températures du sol à HT-180.	136
Figure 130	Températures du sol à HT-181.	137
Figure 131	Températures du sol à HT-304.	137
Figure 132	Températures au printemps dans la piste à Tasiujaq.....	138
Figure 133	Évolution de la couche active pour HT-304 à Tasiujaq.....	139
Figure 134	Évolution de la couche active pour HT-181 à Tasiujaq.....	139
Figure 135	Évolution de la couche active pour HT-180 à Tasiujaq.....	140
Figure 136	Températures du sol à 11m de profondeur pour Tasiujaq.	140

LISTE DES TABLEAUX

Table 1	Tableau des moyennes des températures de l'air pour Inukjuak.	19
Table 2	Tableau des moyennes saisonnières de l'air.	21
Table 3	Jours cumulés en fonction de seuils.	22
Table 4	Degrés-jours cumulés	23
Table 5	Tableau des températures moyennes mensuelles pour Puvirnituq.	34
Table 6	Tableau des moyennes saisonnières à Puvirnituq.	36
Table 7	Tableau du cumul de jours en fonction de seuils.	38
Table 8	Tableau du cumul des degrés-jours.	38
Table 9	Moyennes mensuelles pour Akulivik	55
Table 10	Tableau des moyennes saisonnières pour Akulivik.	57
Table 11	Tableau du cumul des jours selon des seuils.	59
Table 12	Tableau du cumul des degrés-jours.	60
Table 13	Tableau des moyennes mensuelles pour Salluit.	74
Table 14	Tableau des moyennes saisonnières pour Salluit.	75
Table 15	Cumul des journées en fonction de seuils pour Salluit.	77
Table 16	Tableau du cumul des degrés-jours.	77
Table 17	Moyennes mensuelles pour Quaqtaq.	89
Table 18	Moyennes saisonnières pour Quaqtaq.	90
Table 19	Tableau du nombre de jours selon des seuils établis.	92
Table 20	Tableau des degrés-jours pour Quaqtaq.	93
Table 21	Moyennes mensuelles pour Kangirsuk.	103
Table 22	Moyennes saisonnières pour Kangirsuk.	104
Table 23	Tableau du nombre de jours selon des seuils établis.	107
Table 24	Tableau du cumul des degrés-jours pour Kangirsuk.	107
Table 25	Moyennes mensuelles pour la température de l'air à Aupaluk.	114
Table 26	Moyennes saisonnières pour Aupaluk.	115
Table 27	Tableau du nombre de jours selon des seuils établis.	118
Table 28	Tableau du cumul de degrés-jours pour Aupaluk.	118
Table 29	Moyennes mensuelles pour la température de l'air à Tasiujaq.	130
Table 30	Moyennes saisonnières pour Tasiujaq.	131
Table 31	Tableau du nombre de jours selon des seuils établis.	134
Table 32	Tableau du cumul des degrés-jours pour Tasiujaq.	134
Table 33	Sommaire des sites instrumentés au Nunavik.	141

1.0 INTRODUCTION

Au Nunavik, les infrastructures aéroportuaires sont construites sur le sol gelé en permanence (pergélisol). Avec l'augmentation des températures des dernières années, certains indices de la fonte du pergélisol apparaissent. Il y a, par conséquent, un intérêt à suivre l'évolution de ce processus et d'en comprendre davantage les impacts sur les infrastructures. Depuis 2004, plusieurs aéroports du Nunavik ont été instrumentés pour suivre l'évolution du régime thermique du pergélisol sous les pistes et dans le terrain naturel dans leur voisinage immédiat. Cette démarche permet d'assurer un suivi du changement climatique et d'en évaluer l'impact dans le sol de même que de relier les changements de température aux impacts observables sur les pistes, comme, par exemple, les affaissements localisés. Les résultats qui découlent de l'application de cette méthodologie et les tendances observées pourront faciliter la prise de décision par les gestionnaires, orienter les travaux de réfection et d'entretien et définir des priorités d'intervention dans les mois et les années à venir.

Ce projet concerne en particulier huit aéroports du Nunavik. À l'exception de ceux de Kangirsuk et d'Inukjuak qui ont été instrumentés en 2005 et 2008 respectivement, il existait à ces aéroports des données partielles prises sur l'initiative des chercheurs dans les années 1990. La comparaison est donc faite entre ces données anciennes et les données récentes afin de documenter les changements thermiques survenus. La description du projet prévoit qu'une tournée annuelle des sites doit être effectuée afin de récupérer les données enregistrées durant les douze mois précédents et, aussi, pour entretenir les équipements en bon état de marche. En 2012, la tournée s'est effectuée entre le 20 septembre et le 15 octobre.

2.0 INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Les fichiers de toutes les données recueillies aux huit sites sont disponibles sur le disque compact joint à ce rapport. Le disque ne comprend pas qu'une mise à jour des données, il contient les fichiers couvrant la totalité des enregistrements jusqu'à la plus récente récupération en septembre 2012. Une copie électronique de ce rapport se trouve également sur ce disque. D'autre part, certaines données présentées dans ce rapport viennent compléter les informations relatives au pergélisol et aux diagnostics établis à propos de l'état des pistes dans le rapport d'Allard et al. (2007), maintenant disponible en ligne sur le site d'OURANOS¹.

Une station automatisée consiste soit en une structure pyramidale à base rectangulaire construite avec des tiges d'acier perforées de type *mécano* ou d'un fût aménagé sur un remblai de piste. C'est ce qui soutient les instruments ainsi que les diverses composantes de la station. Parmi celles-ci, le boîtier d'aluminium est fixé à même la structure; sa fonction principale est de protéger les composantes électroniques du système des intempéries. Le capteur de mesure de la température de l'air est dans un abri qui permet l'aération du capteur, minimisant ainsi l'effet de radiation solaire directe sur la thermistance.

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

Le système d'acquisition automatique de données est l'élément central de la station. Ce module de contrôle est activé avec une programmation qui lui est propre et permet de mesurer le signal des différents capteurs et d'enregistrer celui-ci dans une mémoire pendant plusieurs mois. Le modèle utilisé est le CR10X 2 M -55 pour la majorité des sites bien qu'une nouvelle génération (CR1000) a fait son apparition sur les sites instrumentés depuis 2008 (Inukjuak et Akulivik). Un module d'extension (AM 16/32) est utilisé sur certaines stations afin de multiplier le nombre de canaux pour mesurer les températures. Cet élément augmente la capacité de mesure des systèmes d'acquisition

de données. Un ordinateur portable est nécessaire afin d'écrire un programme pour le système d'acquisition de données, de communiquer avec les stations, d'observer l'acquisition en direct et de procéder à la récupération des données à chaque visite. La programmation est propre à ces systèmes et diffère selon les équipements en fonction sur un site donné.

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

3.0 VILLAGES (Aéroports)

Inukjuak	P.	7
Puvirnituk	P.	13
Akulivik	P.	31
Salluit	P.	48
Quaqtaq	P.	63
Kangirsuk	P.	77
Aupaluk	P.	87
Tasiujaq	P.	99

¹ http://www.ouranos.ca/doc/produit_f.html

[L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes](#). Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P. et A. Tarussov. (2007). Rapport final au FACC, 199 p.

RÉSEAU DE STATIONS DE SUIVI DES INFRASTRUCTURES AU NUNAVIK

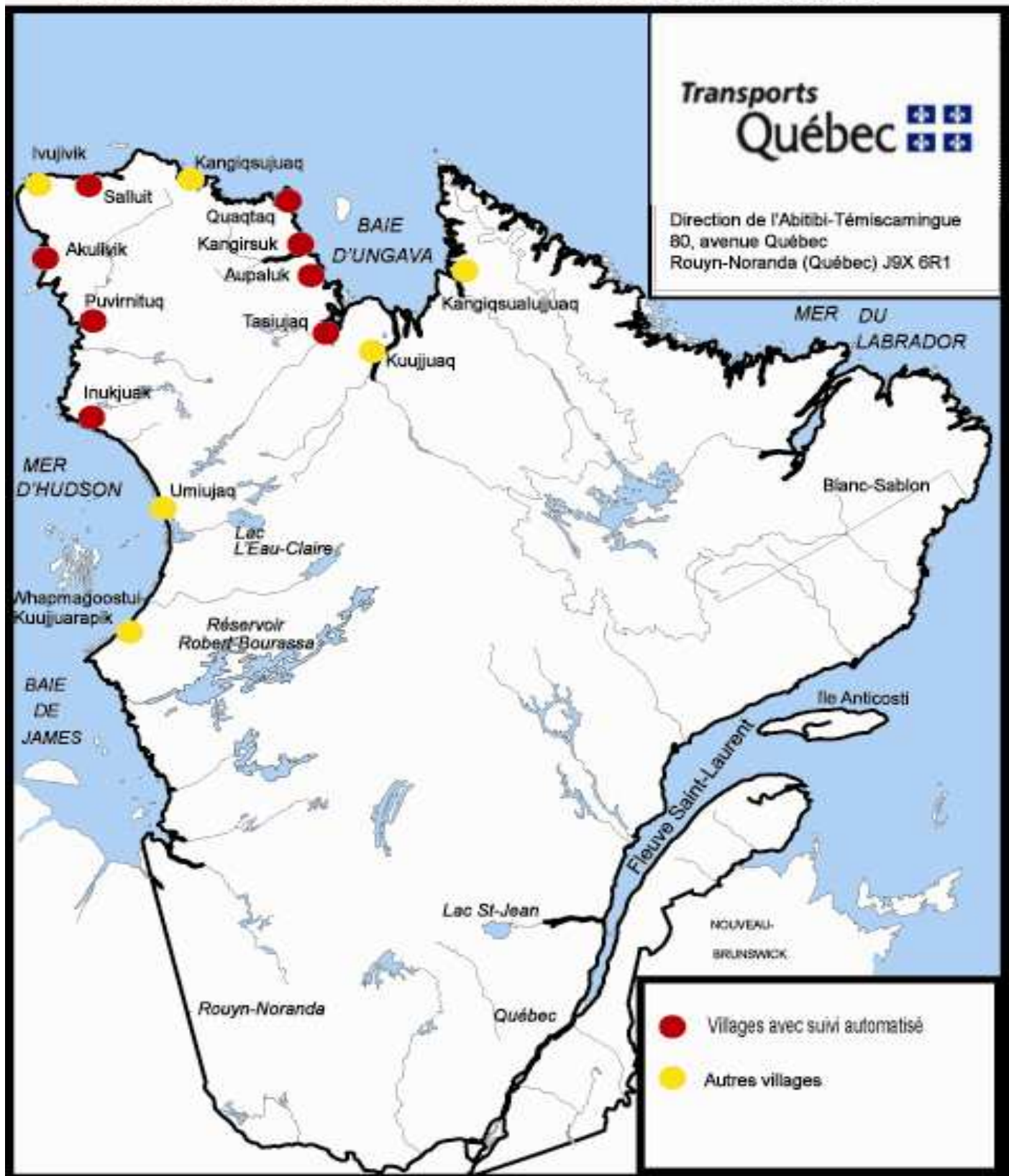


Figure 1 Carte de localisation des sites instrumentés au Nunavik

3.1 INUKJUAK

3.1.1 Description

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique à Inukjuak comprend une station complètement automatisée avec (1) câble à thermistances. Ce câble à thermistances (F2) a été mis en place suite à la campagne de forage du Ministère au Nunavik en 2008. Une station automatisée mesure en continu les températures dans le sol et dans l'air. Un chapelet de 14 thermistances s'étale sur 12 mètres de profondeur à partir de la surface du sol naturel. La station automatisée est située à quelques mètres du remblai de piste (figure 2). Une thermistance est logée dans un abri de radiation et est utilisée pour la température de l'air. En plus du câble instrumenté, deux (2) autres puits de forage (F3 - F4) ont fait l'objet de lectures, mais de façon ponctuelle à l'aide d'un multimètre. Les puits ont été remplis d'huile de silicone afin de stabiliser thermiquement l'intérieur du tubage en PVC. Ceci nous permettra éventuellement d'y loger un câble à thermistances et de procéder à des lectures manuelles.

Dans le cas présent, un câble avec une (1) thermistance a été descendu graduellement dans les puits lors d'une tournée en 2008. Le temps de stabilisation de la température pour chaque lecture faite selon cette méthode est relativement long et la température lue peut être apparaître légèrement plus élevée qu'en réalité. Il serait préférable de loger en permanence des câbles à thermistances dans certains puits jugés importants pour le suivi du régime thermique. Il devient alors beaucoup plus facile de multiplier le nombre de lectures manuelles à ces puits et dès lors d'intensifier le suivi.



Figure 2 Station d'Inukjuak au pied du remblai de la piste.

Pour la station automatisée, les trois (3) premières thermistances (5 cm – 10 cm – 20 cm) ont été directement insérées dans le sol naturel. Ceci a pour but de minimiser l'influence du tubage et du rayonnement solaire sur les températures à la surface du sol. Les onze (11) thermistances dans le tubage en PVC mesurent la température à partir de 50 cm jusqu'à 12 mètres de profondeur. La répartition des thermistances le long du chapelet se note ainsi (50-100-200-300-400-500-600-700-800-900-1000-1200).

3.1.2 Localisation

Les puits de suivi sont situés le long de la piste de part et d'autre du remblai. La localisation des sites apparaît sur la figure 3. Le point en rouge (F2), identifie le site de la station automatisée tandis que les points en bleu (F1 – F3 – F4 – F5 – F6) montrent l'emplacement exact des autres forages. Les points 5 et 6 n'ont pas été retenus pour un suivi puisque le roc a été atteint à faible profondeur. Le point de forage F1 n'a pas été suivi, car le tubage n'a pas été rempli d'huile de silicone puisqu'une priorité a été donnée aux autres puits. Ceci avait pour but de rentabiliser l'usage de l'huile de silicone disponible au moment des travaux.



Figure 3 Carte de localisation des sites de forage à Inukjuak.

3.1.3 Température de l'air

La station d'Inukjuak est dotée d'un capteur à 1,5 m du sol pour enregistrer la température de l'air. Les données de ce capteur sont présentées à la figure 5. Le remblai de neige au pied du remblai influence la qualité des données pour la température de l'air. Le capteur est sous le couvert nival jusqu'au dégel, moment où les données recommencent à fluctuer selon la température de l'air. L'épaisseur du couvert de neige au pied du remblai excède donc 1,5 m et cela jusqu'au début du mois de juin. Les statistiques sont construites à partir des enregistrements de la station d'Environnement Canada à Inukjuak.

3.1.3.1 Températures moyennes mensuelles dans l'air

Les moyennes ont été calculées à partir des données en ligne d'Environnement Canada. Au bas du tableau 1, les moyennes annuelles montrent un écart considérable pour la dernière décennie. Les moyennes mensuelles en 2010 sont supérieures à celle de 2009 pour tous les mois sauf le mois de juillet. De plus, les mois de février, avril, septembre, novembre et décembre 2010 ont enregistrés les températures les plus élevées de la décennie (tableau 1).

Table 1 Tableau des moyennes des températures de l'air pour Inukjuak.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janvier	-24.79	-25.66	-18.38	-24.43	-25.69	-22.32	-21.66	-23.27	-24.46	-19.97	-17.45	-24.48
Février	-27.66	-28.98	-26.02	-21.18	-24.93	-22.80	-23.20	-26.25	-24.13	-18.46	-23.73	-24.42
Mars	-14.35	-22.46	-20.20	-20.85	-17.96	-12.92	-22.14	-22.20	-20.97	-15.13	-21.97	-18.58
Avril	-8.89	-11.83	-12.45	-12.61	-7.63	-5.64	-9.48	-9.35	-9.94	-5.32	-13.54	-11.16
Mai	4.66	-4.08	-0.86	-4.82	2.51	1.03	-3.75	0.90	-4.61	-0.66	-3.68	-1.22
Juin	6.30	4.14	3.49	4.48	6.29	5.66	5.03	9.36	5.69	5.23	6.39	8.02
Juillet	14.60	11.62	11.39	9.35	9.64	11.20	9.54	13.96	14.71	12.54	10.67	10.35
Août	11.21	12.33	10.73	7.78	10.64	10.92	10.16	13.56	10.00	11.59	11.42	11.87
Septembre	7.01	6.44	7.05	5.12	7.41	6.33	5.17	5.55	5.58	7.50	6.04	7.67
Octobre	1.95	0.13	0.65	1.67	3.33	2.05	1.80	2.42	0.24	2.71	2.26	-0.51
Novembre	-4.38	-8.65	-4.64	-5.33	-5.47	-4.76	-8.03	-7.07	-4.41	-2.00	-5.37	-6.01
Décembre	-8.44	-13.90	-11.50	-20.38	-16.49	-10.80	-19.08	-18.72	-12.09	-7.23	-16.83	-13.00
	-3.57	-6.74	-5.06	-6.77	-4.86	-3.50	-6.30	-5.09	-5.37	-2.43	-5.48	-5.12

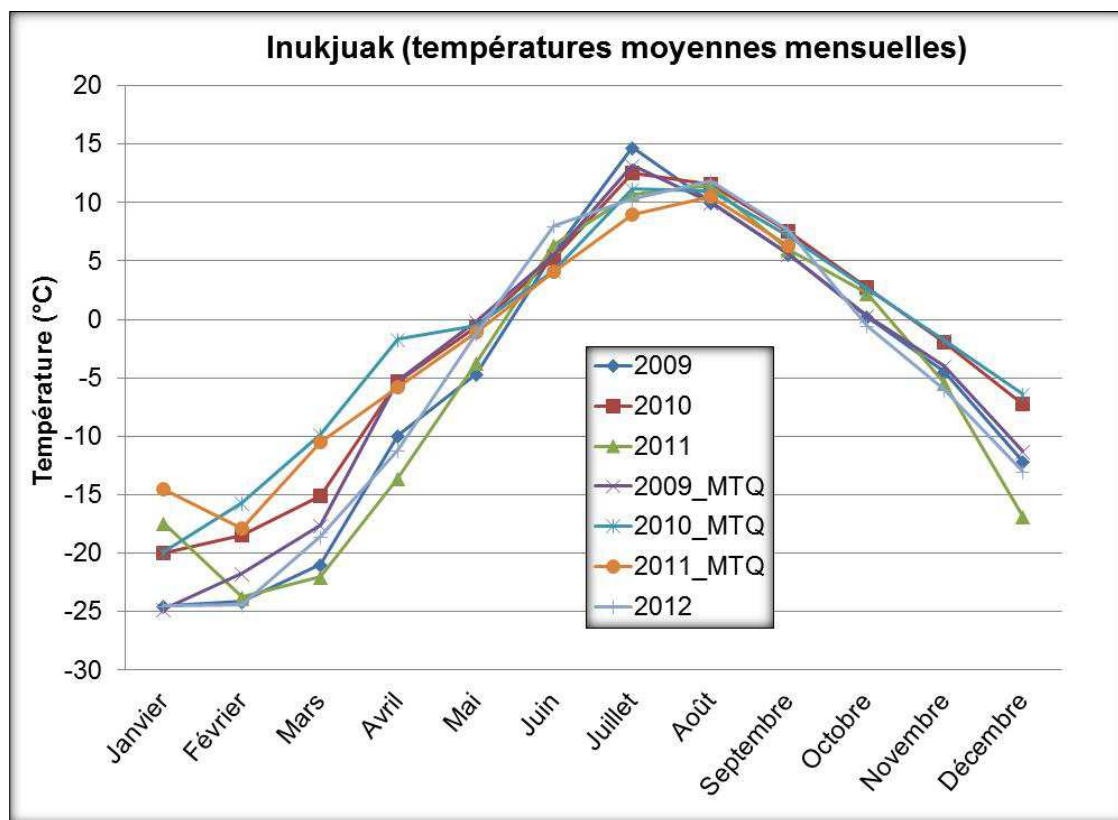


Figure 4 Moyennes mensuelles de la température de l'air pour Inukjuak.

La figure 4 met en évidence la différence entre les données de la station d'Environnement Canada et celles issues de la station en marge de la piste d'Inukjuak. Lorsque le capteur est sous la neige en période hivernale (février, mars, avril et mai) les températures sont plus élevées. En mai 2010, il n'y a pas de variation importante (0.46°C), ce qui permet de croire que le capteur était dégagé dès le mois de mai contrairement à juin pour 2009. Pour mai 2009, ceci s'explique en partie par d'importantes précipitations (73.5 mm). Ceci a eu pour effet d'isoler le capteur jusqu'au mois de juin. En juillet, par contre, la moyenne est inférieure à celle enregistrée par la station d'Environnement Canada. La station est située au pied d'un remblai de plusieurs mètres d'épaisseur. Ce remblai apporte une certaine protection contre les vents. La berme réduit également la période où le pied du remblai est exposé au soleil.

3.1.3.2 Moyennes saisonnières

L'alternance des saisons est provoquée par la rotation de la Terre combinée à l'inclinaison de l'axe des pôles. Il y a par conséquent, une variation de la date de début des saisons d'une année à l'autre. Pour les fins de cet exercice, nous retiendrons les dates suivantes pour les transitions saisonnières, le 20 mars, le 21 juin, le 22 septembre et le 21 décembre. L'hiver s'étalera alors du 21 décembre 2008 au 19 mars 2009 dans ce cas-ci. En 2010, c'est l'automne qui se démarque avec une moyenne supérieure de 2.72 °C à 2009 et 3.94 °C par rapport à 2008. Pour 2012, la moyenne estivale a été de 10.32°C, ce qui est comparable aux années précédentes depuis le début de l'automatisation en 2008.

Table 2 Tableau des moyennes saisonnières de l'air.

	2008	2009	2010	2011	2012
Printemps		-6.21	-3.52	-6.59	-4.11
Été		10.90	10.77	9.84	10.32
Automne	-4.72	-3.50	-0.86	-1.44	-4.53
Hiver	-23.98	-17.26	-19.20	-23.07	

3.1.3.3 Moyennes quotidiennes

La station d'Inukjuak est dotée d'un capteur à 1,5 m du sol pour enregistrer la température de l'air. Les données quotidiennes de ce capteur sont présentées à la figure 5. La courbe rouge représente les données de la station au pied du remblai et la courbe bleue représente les données de la station d'Environnement Canada. L'accumulation de neige au pied du remblai au-dessus du capteur a un effet sur la réponse du capteur. La hauteur du capteur de température de l'air devrait être rehaussée afin de permettre une représentation plus juste des températures. La variation annuelle de l'effet nival sur le capteur atmosphérique peut apporter des indices sur l'accumulation saisonnière aux abords de la piste.

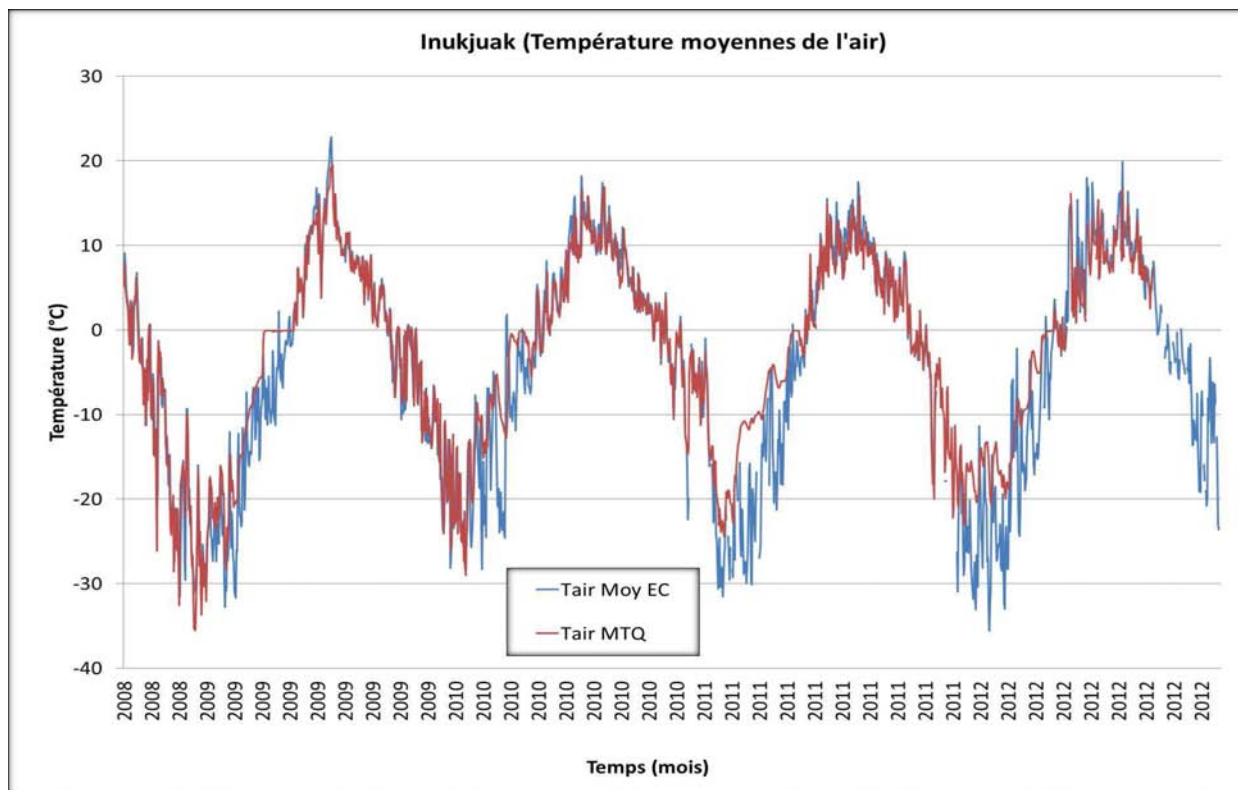


Figure 5 Températures moyennes de l'air pour Inukjuak.

3.1.3.4 Seuils

Le nombre de journées où la température atteint un seuil prédéterminé a été calculé. Les journées cumulées pour les températures négatives sont obtenues avec les valeurs minimales. Pour les cumuls positifs, les températures maximales ont été utilisées. Le résultat de ce cumul paraît sous forme de tableau. Dans le tableau 3, nous observons que la température minimale de l'air a atteint le seuil de -20°C à 110 reprises durant la période hivernale de 2008-2009 et seulement à 62 reprises à l'hiver 2009-2010. De ce nombre, 36 journées ont enregistré des températures inférieures à -30°C à l'hiver 2008-2009 et seulement 10 pour l'hiver 2009-2010.

Table 3 Jours cumulés en fonction de seuils.

Seuils	< -30°C	< -20°C	> 15°C	> 20°C
2008			43	22
2009	36	104	38	18
2010	10	62	38	8
2011	25	77	35	5
2012	32	88	44	16

3.1.3.5 Degrés-jours (gel-dégel)

Pour la période hivernale 2008-2009, le nombre de degrés-jours de gel a totalisé 3343 tandis que le nombre de degrés-jours de dégel a atteint 1161 pour 2009 (tableau 4). En 2010, le nombre de degrés-jours de gel a atteint 2455 ce qui constitue un déficit de 888 degrés-jours de gel par rapport à l'hiver 2008-2009. En 2010, le nombre de degrés-jours de dégel a été de 1283 comparativement à 1146 pour 2011 et 1161 pour 2009. En 2012, il y eu un total de 2789 degrés-jours de gel et 1186 degrés-jours de dégel.

Table 4 Degrés-jours cumulés

	Gel	Dégel
2009	3343	1161
2010	2364	1283
2011	2455	1146
2012	2789	1186

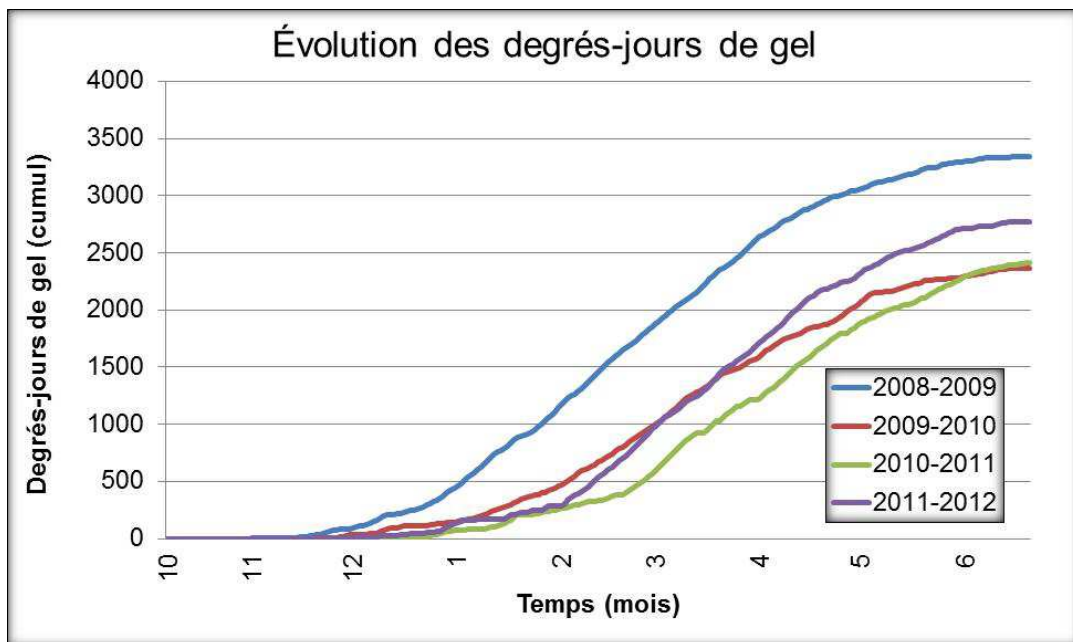


Figure 6 Évolution du cumul des degrés-jours de gel pour Inukjuak.

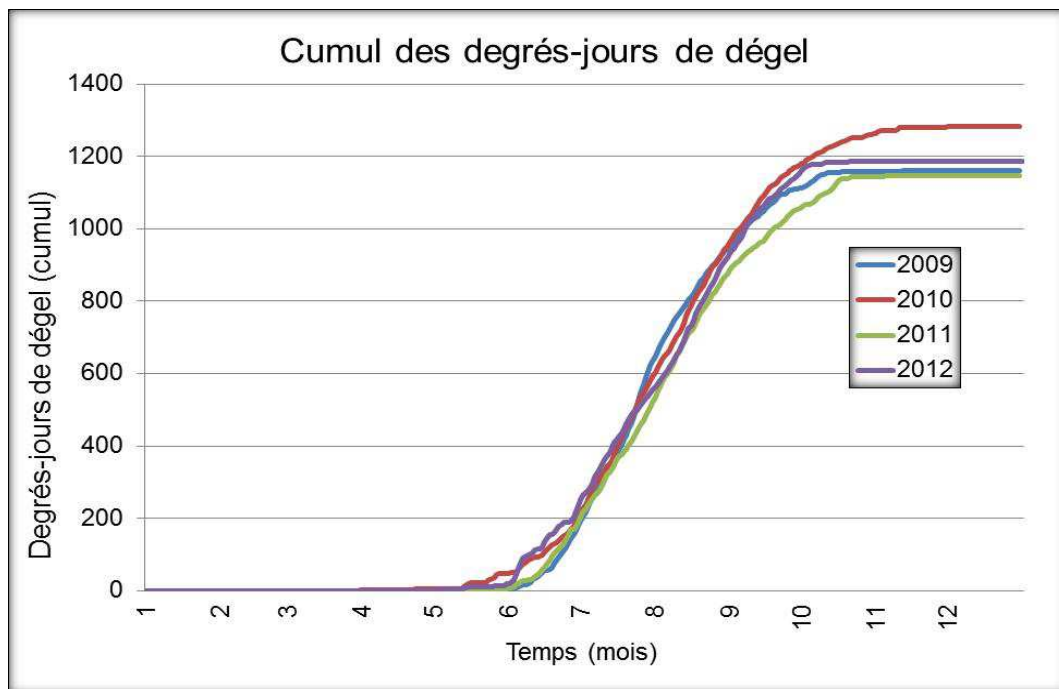


Figure 7 Évolution du cumul des degrés-jours de dégel pour Inukjuak.

3.1.4 Températures du sol

3.1.4.1 Données totales

Les données du câble à thermistances F2 sont présentées aux figures 8 et 9. L'étendue de la période s'échelonne du début de l'automatisation en octobre 2008 jusqu'au téléchargement le plus récent des données en septembre 2012. En période hivernale, les fluctuations des températures négatives de l'air ne semblent avoir aucun impact sur les températures enregistrées dans le sol. Le couvert de neige doit, par conséquent, être trop important en bordure de piste pour que l'influence des températures de l'air se répercute dans le sol. Néanmoins, la couche active finit par descendre à 0°C, bien que tardivement, car ce n'est qu'en avril que les températures sont toutes faiblement négatives dans les cinq premiers mètres. Il est à noter que la température à 5 m devient négative avant celle de 3 m, ce qui implique un regel vers le haut. Les températures à la surface du sol (5 – 10 – 20 cm) quant à elles (figure 9), permettent de conclure que l'influence du couvert de neige s'est prolongée jusqu'au 18 juin 2009, 4 juin en 2010, 10 juin 2011 et 6 juin pour 2012. Enfin, la température de la couche active atteint à peine des valeurs négatives en hiver.

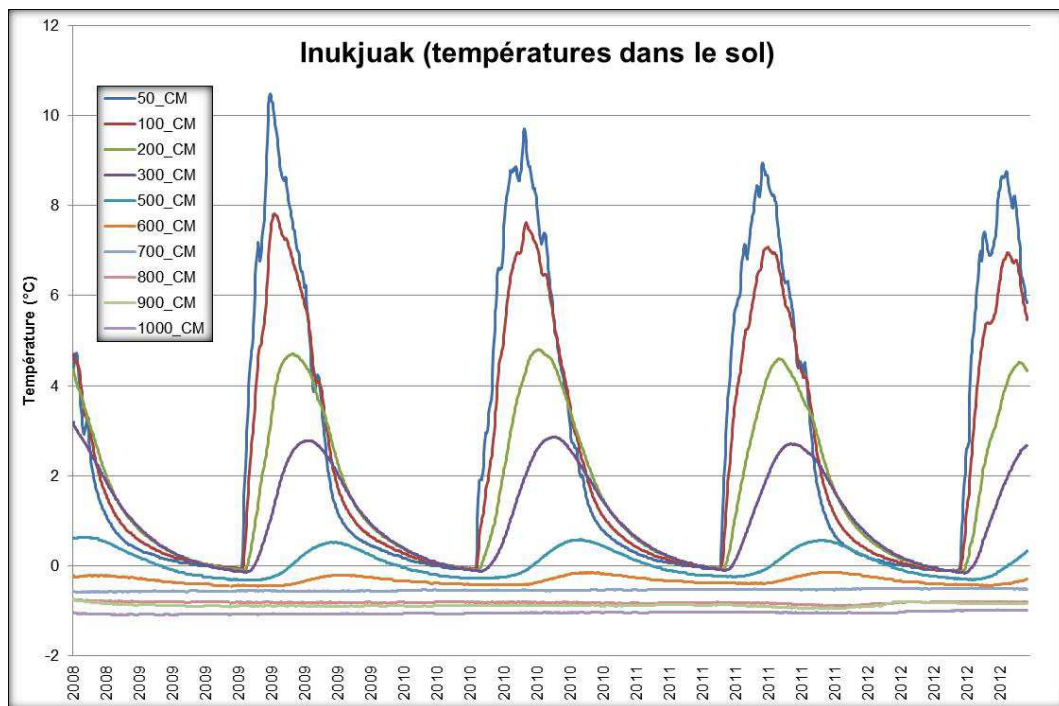


Figure 8 Températures du sol à la station d’Inukjuak.

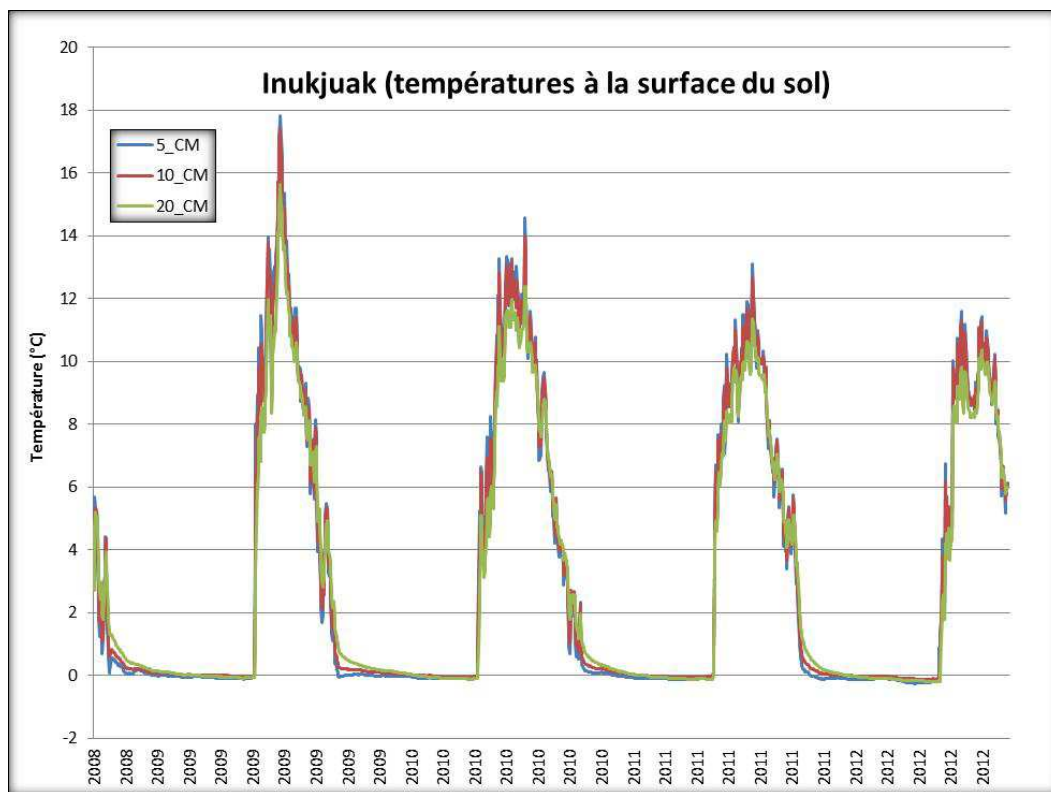


Figure 9 Températures à la surface du sol à Inukjuak.

3.1.4.2 Printemps

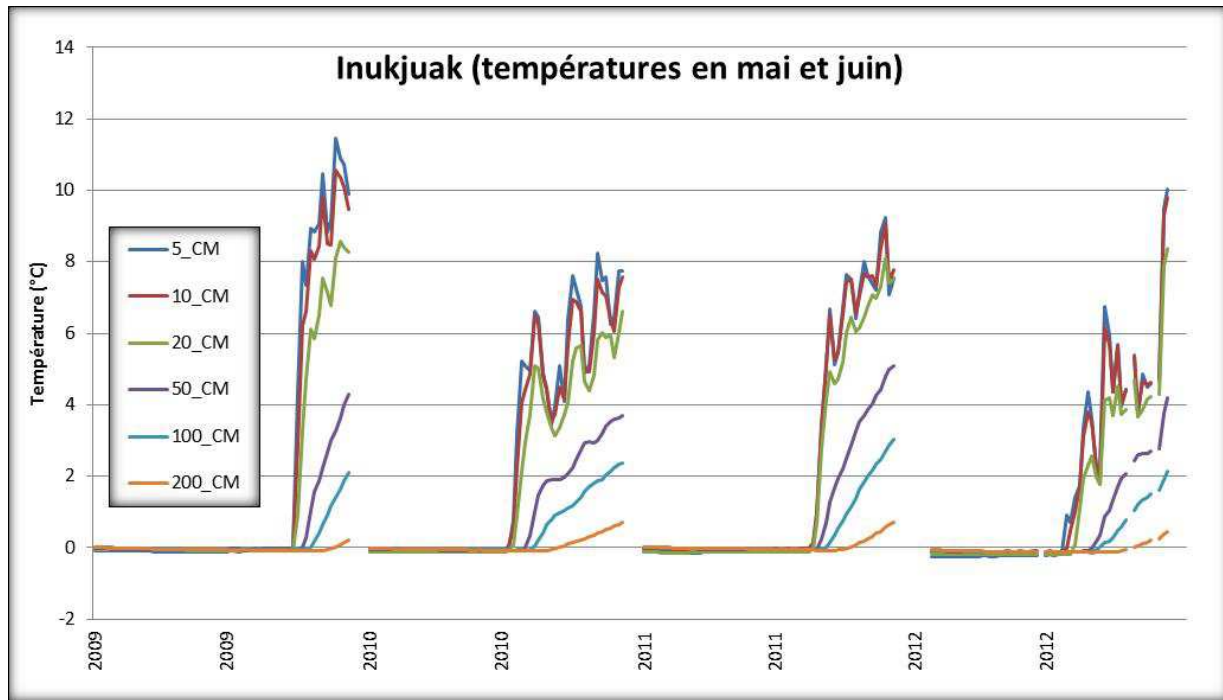


Figure 10 Températures du sol en mai et juin 2009 pour Inukjuak.

3.1.4.3 Couche active

Les données du câble à thermistances situé en marge du remblai de la piste à Inukjuak permettent d'affirmer que le sol dégèle sur une épaisseur supérieure à 5 mètres. Selon les données des figures 11 et 12, la couche active pourrait atteindre jusqu'à 5,75 m de profondeur à cet endroit. Comme les températures atmosphériques hivernales n'ont aucune incidence sur le régime thermique du sol, la couche active ne peut que s'épaissir avec le temps. Depuis 2008, la couche active fluctue entre 569 cm et 575 cm. Seule une modification du régime d'accumulation nivale pourrait faire rehausser le plafond du pergélisol à cet endroit. La température du sol à 7 m de profondeur a d'ailleurs augmenté de 0,05 °C depuis l'automatisation.

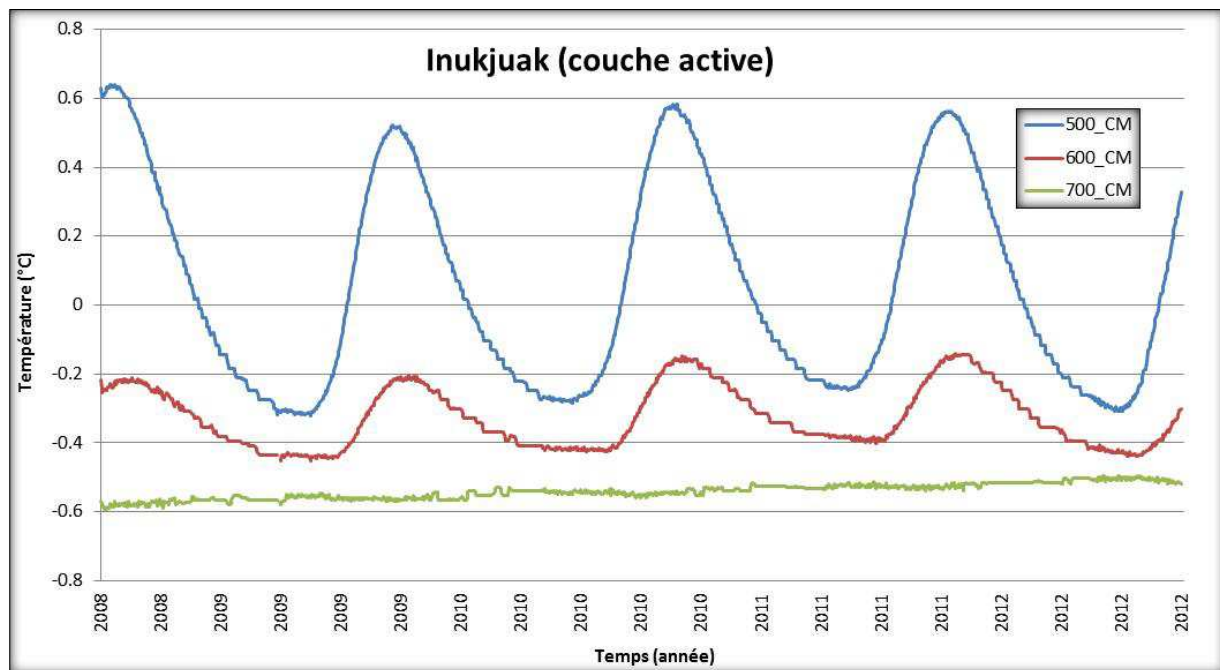


Figure 11 Températures à l'interface du mollisol aux abords de la piste d'Inukjuak.

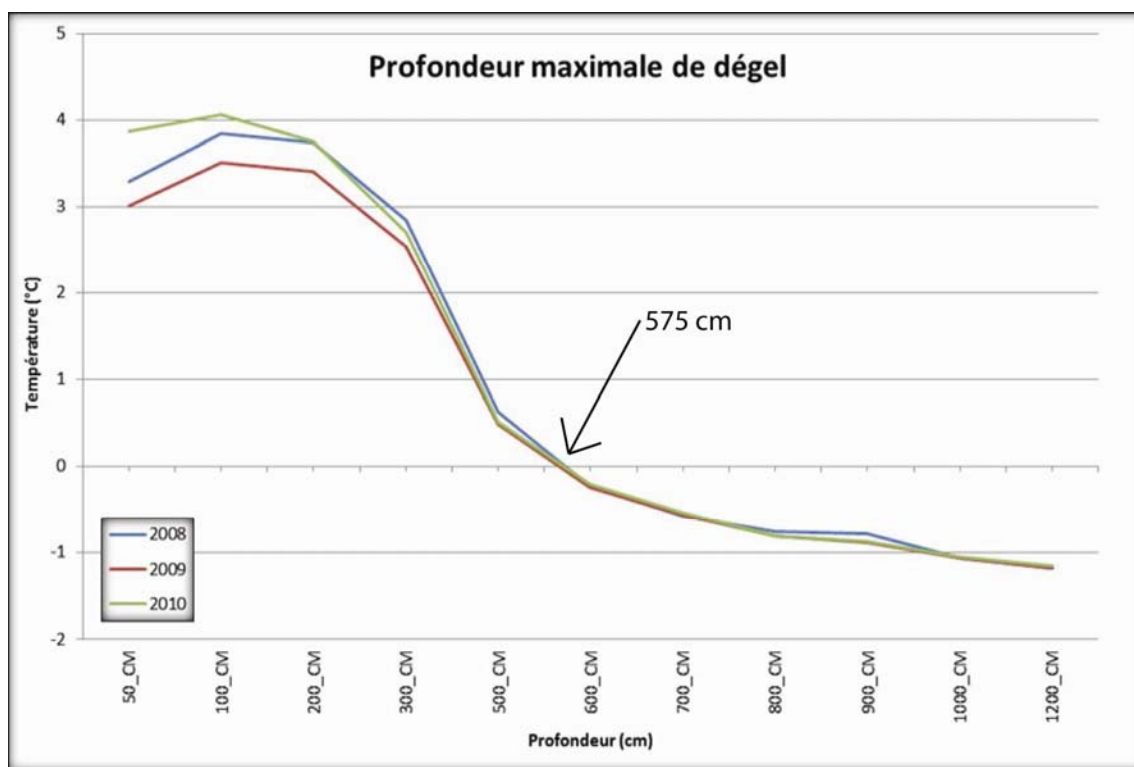


Figure 12 Profondeur maximale atteinte par le dégel en 2008 pour Inukjuak

3.1.4.4 Profondeurs ciblées (lecture manuelle des câbles F3 et F4)

Les puits F3 et F4 présentent des données préliminaires, il est nécessaire de mentionner que les valeurs sont légèrement biaisées par la méthode. En effet, plusieurs jours, voir semaines sont nécessaires afin d'obtenir un profil en équilibre avec le milieu naturel suite à une perturbation. Les données qui en découlent sont toutefois utiles et permettent d'énoncer certains constats.

Le pergélisol est présent dans les sédiments aux abords de la piste d'Inukjuak aux points F3 et F4 (figure 13 et 14). L'épaisseur de la couche active (mollisol) est de 714 cm au point F3 et de 635 cm au point F4.

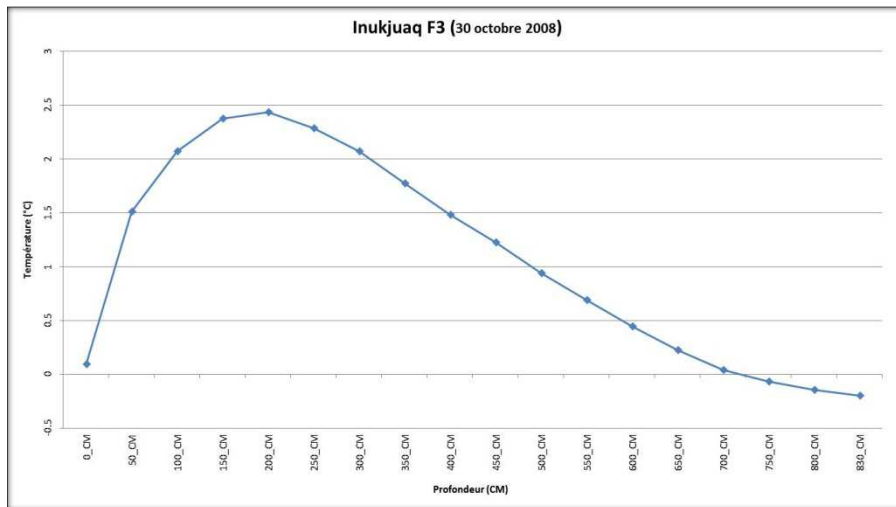


Figure 13 Profil thermique au forage F3 à Inukjuak.

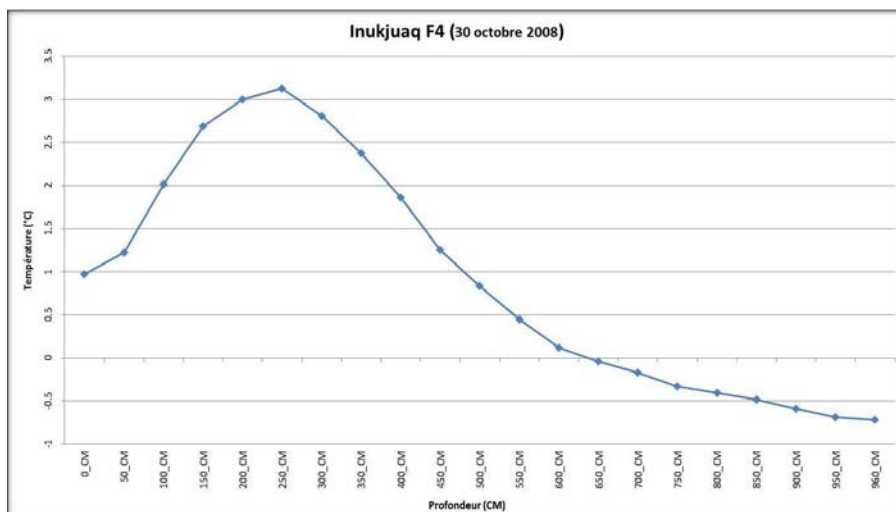


Figure 14 Profil thermique au forage F4 à Inukjuak

3.2 PUVIRNITUQ

3.2.1 Description

Lors de la construction de la piste, trois câbles à thermistances (HT177, HT296 et HT297) furent installés selon un alignement transversal à même le remblai au chaînage 6+670 m, là où son épaisseur était la plus importante. Ces câbles ne furent automatisés qu'en 2005; jusqu'alors, les données étaient recueillies manuellement et étaient très fragmentaires. Les données récupérées récemment dénotaient des anomalies et ont été rejetées. Un hiatus est alors perceptible pour les trois câbles à thermistances (HT177, HT296 et HT297) depuis 2010. Les anomalies coïncident avec la période où d'importants travaux ont été effectués à cet endroit (rechargement de la piste, construction de la berme).

Lors de la campagne de forage de 2008, cinq (5) forages ont été faits dont certains font l'objet d'un suivi. Trois tubages de PVC ont été remplis d'huile de silicone. Ce sont les points F1, F2 et F5 qui sont identifiés sur la carte de localisation (figure 18). Le câble F2 est indiqué en rouge puisqu'il a fait l'objet d'une automatisation. Le câble F2 a été instrumenté à l'aide de plusieurs thermistances et est relié à une station automatisée située sur le côté du remblai de la piste (figure 16). Un boîtier sert de point de jonction pour les câbles à thermistances et le multiplexeur (AM 16/32).

Lors des travaux d'excavation en 2009, le point de mesure F1 a été détruit. Par contre, les puits F2 et F5 ont fait l'objet d'un projet de suivi automatisé. Deux stations de suivi automatisé ont été ajoutées en septembre 2009. La première station prend en charge le câble F5 en plus de capteurs placés à même la berme pour en assurer un suivi thermique. La seconde station accumule les données du câble F2 ainsi que des capteurs situés dans la berme.

3.2.2 Localisation

La station de référence a été placée à l'endroit d'un forage effectué en juin 2005 dans une petite vallée perpendiculaire à la piste (figure 17). Cette vallée traverse la piste d'est en ouest et le remblai y est particulièrement épais. L'épaisseur du remblai excède 7 mètres par endroits. C'est à même cette épaisseur de remblai que se trouvent les 3 câbles à thermistances situés dans la piste (figure 15). La station F2 se trouve

directement au pied du remblai de la piste sur la nouvelle berme (figure 16). La station F5 est située complètement de l'autre côté de la piste (figure 18).



Figure 15 Station sur le remblai de piste à Puvirnituk en 2008



Figure 16 Nouvelle station d'acquisition de données pour F2, installée sur la berme à convection.

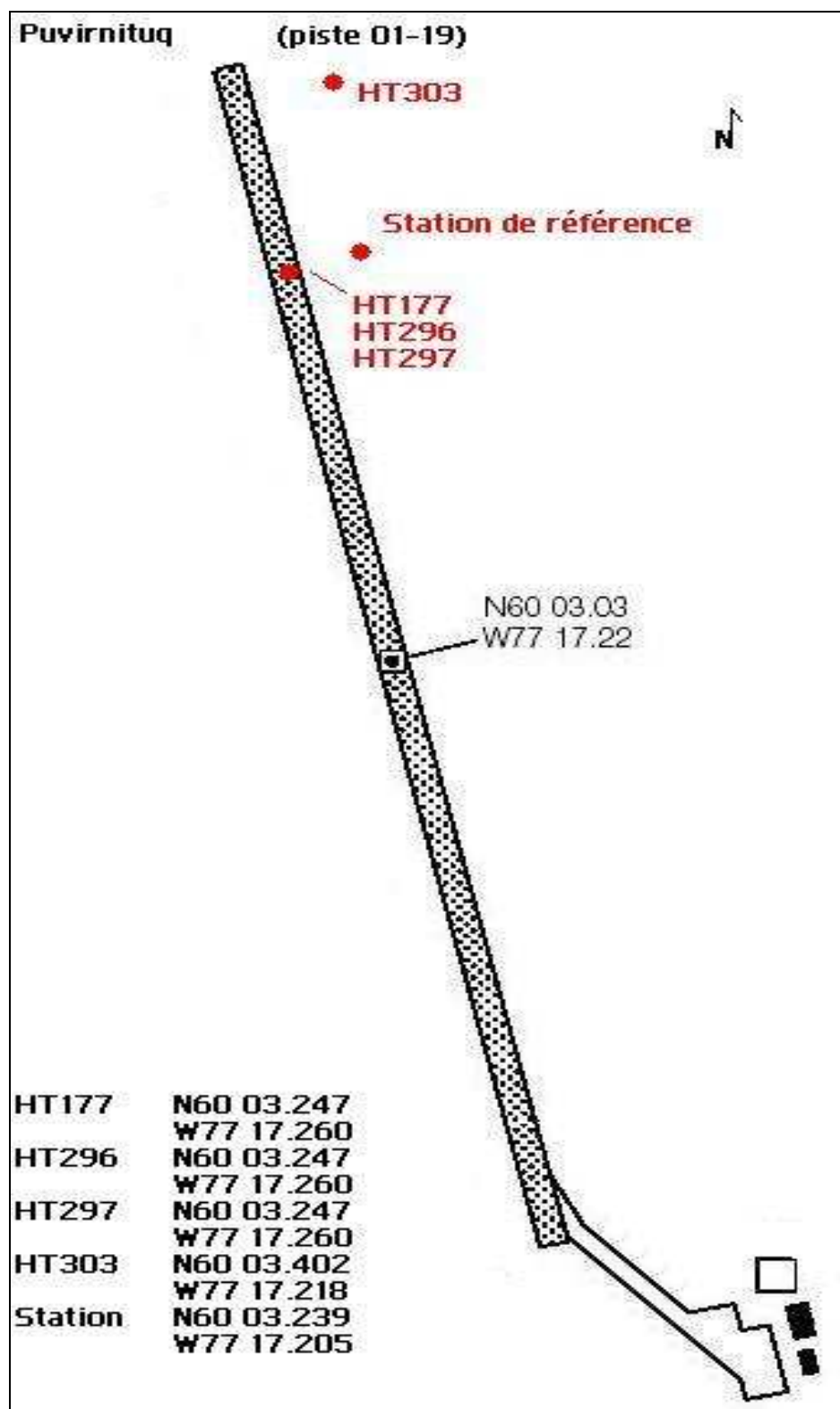


Figure 17 Schéma de localisation des stations automatisées à Puvirnituk



Figure 18 Carte de localisation des forages à Puvirnituk.

3.2.3 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 de référence. Les données sont enregistrées sur une base horaire pour ensuite être compilées en moyennes.

3.2.3.1 Moyennes mensuelles

Les moyennes mensuelles enregistrées à la station de référence sont présentées sous la forme d'un tableau (table 5) et d'un graphique (figure 19). La moyenne annuelle paraît au bas de la table 5 pour chaque année depuis l'automatisation de la station. Le mois de juillet 2008 et 2009 ont enregistré une moyenne mensuelle élevée (14,27°C et 14,85°C). La moyenne annuelle pour 2009 est pratiquement identique à celle enregistrée en 2008 (-6,12°C et -6,13°C). Pour l'année 2010, la moyenne annuelle est de -2,98°C et en 2011, celle-ci est de -6,09°C.

Table 5 Tableau des températures moyennes mensuelles pour Puvirnitug

Moy. Mensuelles	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janvier		-24.56	-23.55	-26.74	-25.30	-21.99	-18.03	-26.76
Février		-24.28	-23.24	-28.05	-24.89	-19.06	-24.67	-24.84
Mars		-13.81	-22.81	-22.34	-22.10	-16.75	-23.06	-20.72
Avril		-6.18	-11.10	-10.02	-10.66	-6.18	-14.03	-11.87
Mai		0.29	-4.76	1.60	-5.35	-1.36	-4.41	-1.01
Juin		5.61	4.37	9.65	4.84	5.26	5.85	8.30
Juillet		11.18	10.08	14.27	14.85	12.75	10.50	11.28
Août		9.65	10.91	10.99	12.79	10.71	11.26	11.99
Septembre		6.49	5.58	4.39	4.66	5.10	7.42	6.86
Octobre		2.45	1.27	-0.21	1.08	-1.76	1.96	0.42
Novembre		-6.62	-5.69	-10.67	-8.57	-6.57	-2.54	-6.54
Décembre		-18.19	-13.20	-21.68	-21.76	-12.49	-7.95	-15.9
Moyenne Annuelle		-4.41	-7.35	-6.12	-6.13	-2.98	-6.09	

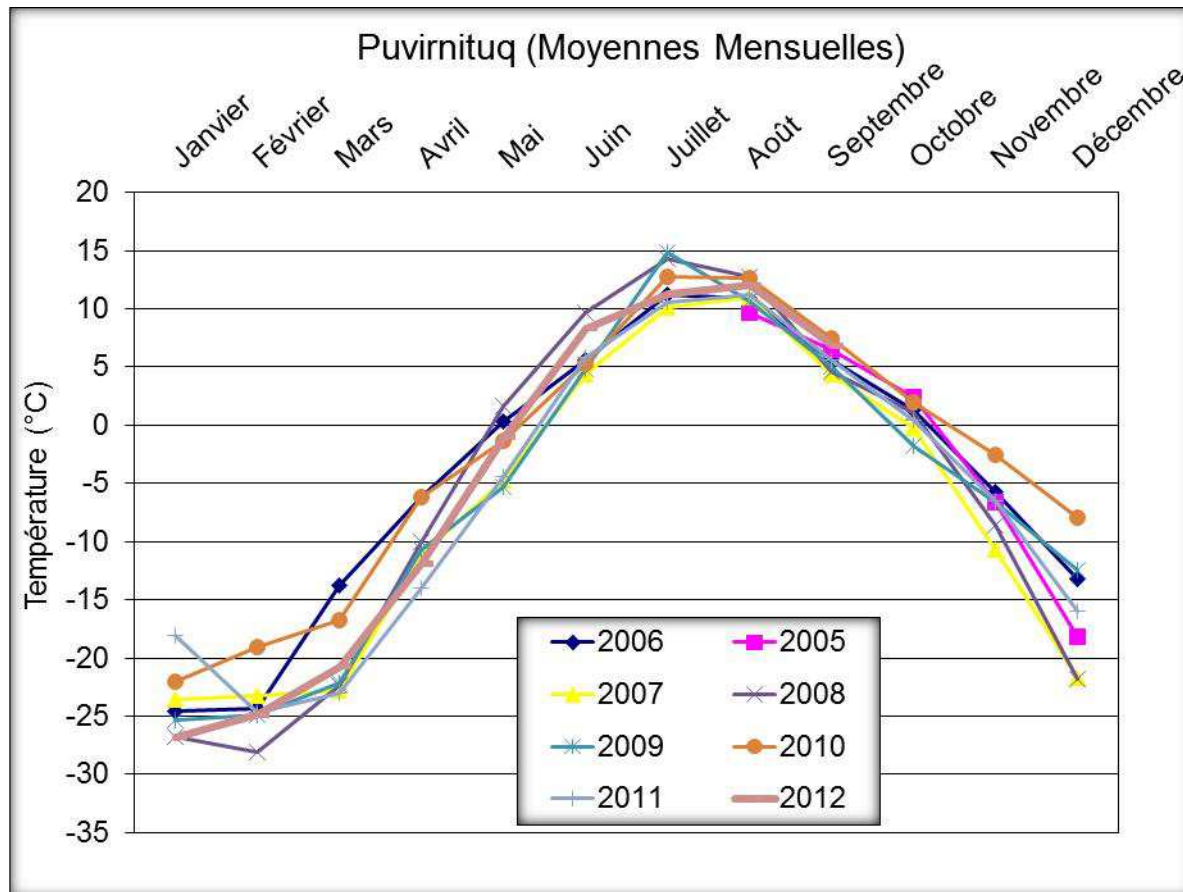


Figure 19 Moyennes mensuelles des températures de l'air pour Puvirnituk

3.2.3.2 Moyennes saisonnières

Les moyennes saisonnières pour Puvirnituk paraissent au tableau 6 et à la figure 20 selon les années d'enregistrement. L'hiver le plus froid depuis 2005 a été celui de 2008 avec une moyenne de -26,46°C. L'année 2008 a aussi enregistré les valeurs les plus élevées pour l'été soit 11,37°C suivi de près par 2010 avec une moyenne saisonnière de 11,36°C. L'automne 2010 affiche aussi une moyenne supérieure aux autres avec -1,61°C. Depuis 2007, les hivers et les étés affichent des températures moyennes à la hausse (figure 20).

Table 6 Tableau des moyennes saisonnières à Puvirnituk.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Printemps		-2.19	-6.28	-3.13	-6.59	-4.08	-7.34	-4.79
Été		9.54	8.98	11.37	10.89	11.36	9.53	10.59
Automne	-4.02	-3.88	-7.94	-7.02	-5.35	-1.61	-4.40	
Hiver	-22.33	-23.39	-26.46	-25.04	-18.55	-20.55	-24.59	

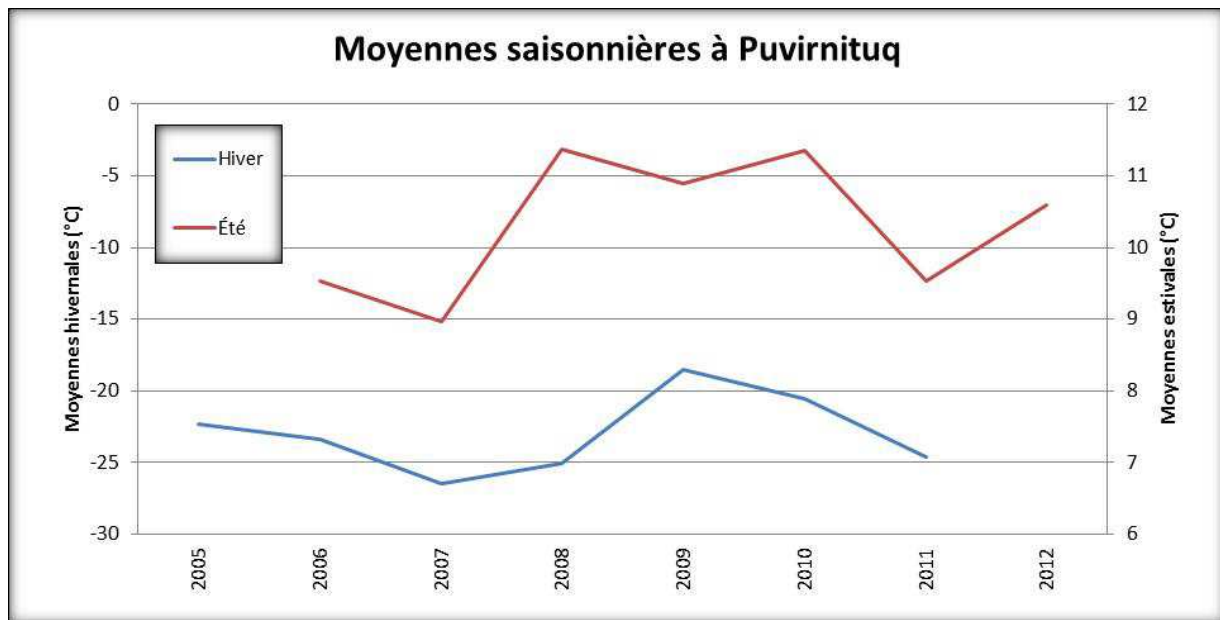


Figure 20 Moyennes saisonnières pour Puvirnituk.

3.2.3.3 Moyennes quotidiennes

Un graphique illustrant la température de l'air moyenne sur une base horaire pour la période d'enregistrement montre clairement à quel point l'été 2008 a été chaud. La zone des températures positives, soit celles au-dessus de 0 °C, laisse entrevoir un été 2008 beaucoup plus chaud que les trois précédents (2005-2006-2007). L'aire des températures négatives, c'est-à-dire sous le 0 °C, fait ressortir un hiver froid pour 2007-2008 comparativement aux deux précédents (2005-2006 et 2006-2007). Les températures pour les hivers 2009-2010 et 2010-2011 ne sont pas aussi basses que les hivers précédents.

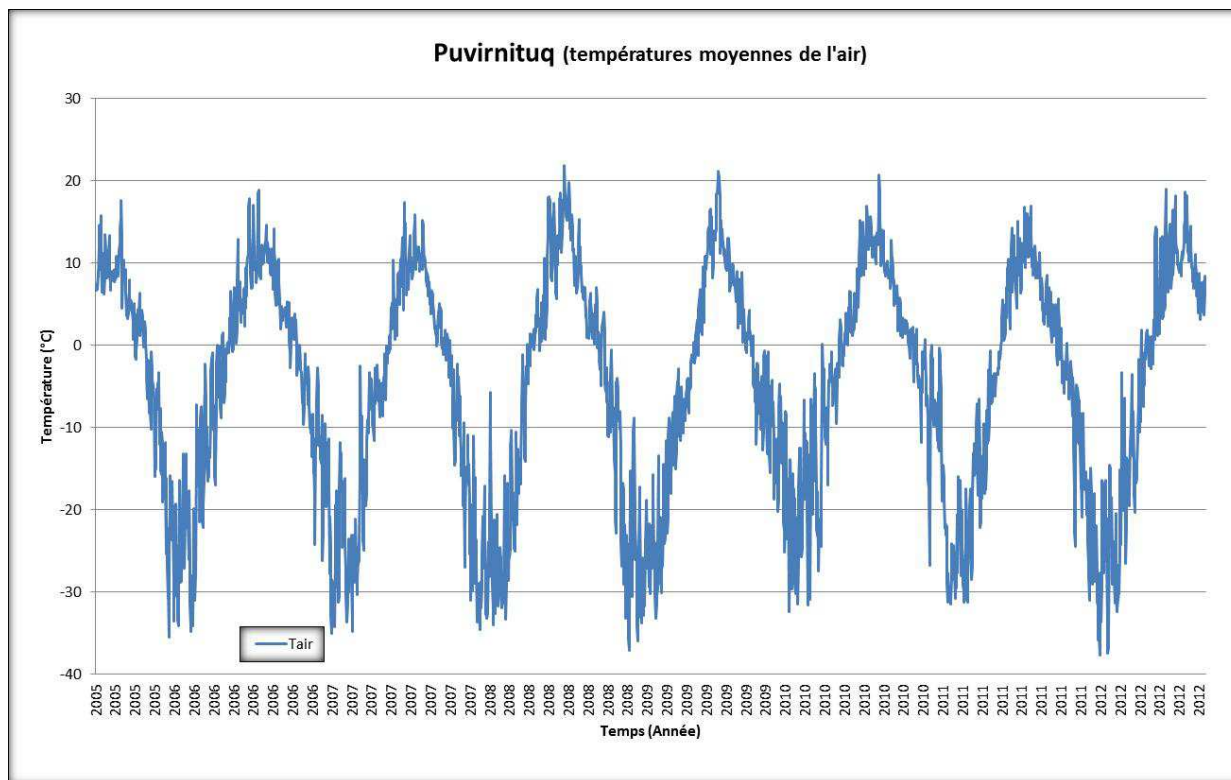


Figure 21 Températures moyennes de l'air pour Puvirnituk.

3.2.3.4 Seuils à Puvirnituk

Les hivers 2007-2008 et 2008-2009 ont été relativement froids et longs comparativement aux deux hivers précédents. Le nombre de jours où la température minimale quotidienne est descendue sous -20°C a été de 120 jours et 115 jours respectivement. Cette valeur était de 86 jours pour l'hiver 2005-2006 et de 89 jours pour l'hiver 2006-2007. Il y a donc eu plus de 30 jours de plus à l'hiver 2007-2008 où la température minimale était inférieure à -20°C . Le nombre de fois où la température est passée sous le seuil des -30°C a également été plus élevé à l'hiver 2007-2008 avec un décompte de 66 journées. Pour ce qui est de l'été, les statistiques montrent qu'il y a eu 29 journées où la température a excédé 20°C comparativement à 5 pour 2007. Les données de 2005 n'ont pas été retenues puisque les premières données débutent en juillet. À l'été 2009, il y a eu 15 journées où les températures ont excédé 20°C , 11 pour 2010, seulement 6 pour 2011 et un total de 18 pour l'été 2012.

Table 7 Tableau du cumul de jours en fonction de seuils.

	<-30°C	<-20°C	>15°C	>20°C
2005			19	5
2006	36	86	30	10
2007	41	89	21	5
2008	66	120	57	29
2009	52	115	44	15
2010	23	79	44	11
2011	38	93	35	6
2012	45	115	38	18

3.2.3.5 Degrés-jours (gel-dégel)

Le nombre de jours de gel pour les hivers ainsi que le nombre de degrés-jours de dégel annuels sont présentés dans le tableau 8. Le nombre de degrés-jours de gel a été de 3666 pour l'hiver 2007-2008. Il y a donc eu une augmentation notable des degrés-jours de gel en 2008. Cette tendance s'est poursuivie à l'hiver 2008-2009 avec plus de 3616 degrés-jours de gel. Le nombre de degrés-jours de dégel a aussi connu une forte hausse à l'été 2008 avec 1383 degrés-jours de dégel (tableau 8). Pour 2010, le nombre de degrés-jours de gel est le plus bas avec 2641 et le nombre de degrés-jours de dégel est élevé avec 1262 suivant de près le sommet atteint en 2008. En date du dernier relevé à la fin de septembre 2012, le nombre de degrés-jours de dégel s'élevait à 1200. Il y a, en moyenne, une quarantaine de degrés-jours de dégel qui s'ajoute pour l'automne.

Table 8 Tableau du cumul des degrés-jours.

	Gel	Dégel
2006	2853	1115
2007	3164	944
2008	3666	1383
2009	3616	1118
2010	2641	1262
2011	2859	1065
2012	3321	1200 en date

Rapportée graphiquement, cette statistique permet de suivre l'évolution de la saison de gel durant la période hivernale. Ceci enlève toute ambiguïté au fait de s'arrêter sur une date précise pour délimiter les saisons. Nous observons que les températures négatives

s'installent généralement vers la fin du mois d'octobre et peuvent se poursuivre jusqu'à la fin du mois de mai (figure 22). Le graphique 22 permet de constater que les hivers 2007-2008 et 2008-2009 ont enregistré des températures plus basses tout au long de l'hiver comparativement aux deux hivers précédents. Bien que l'hiver 2005-2006 semble froid de décembre à février, la courbe change abruptement de pente en mars. Ceci est une conséquence directe de la faible moyenne enregistrée en mars 2006. L'année 2010 se démarque des autres avec la courbe la moins élevée avec le plus bas nombre de degrés-jours de gel suivi de près par 2011.

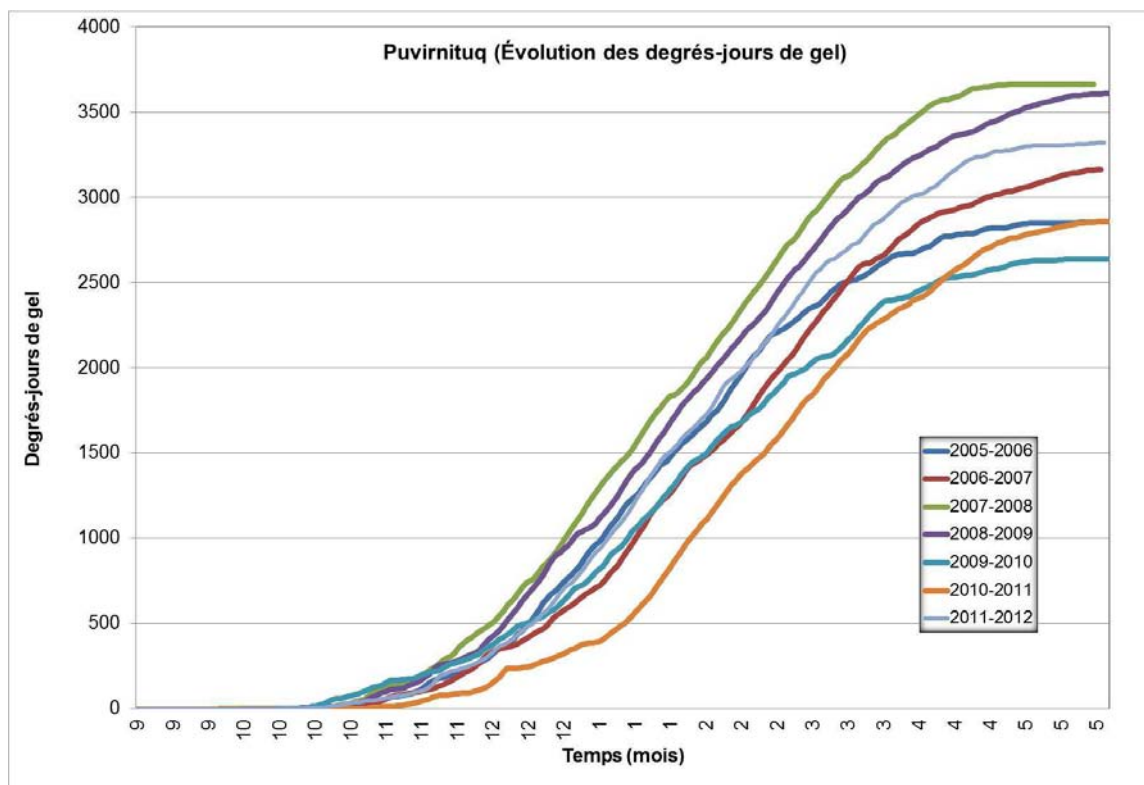


Figure 22 Évolution des degrés-jours de gel à Puvirnituk.

La saison des degrés-jours de dégel débute généralement en mai et se termine au début du mois d'octobre (figure 23). La pente plus abrupte de l'évolution des degrés-jours de dégel indique que le cumul des températures positives ($>0^{\circ}\text{C}$) est plus court et s'étale sur quatre mois comparativement à huit pour la saison du cumul de températures négatives. Il y a par conséquent deux mois (mai et octobre) où le cumul est faible voir nul puisque ce sont des

mois de transition où la température oscille autour du 0 °C. Le graphique 23 permet de constater un retard dans les printemps 2007 et 2009 où le cumul des températures positives n'a débuté qu'en juin. L'écart croissant entre la courbe de 2006 et 2008 indique une forte augmentation du nombre de degrés-jours de dégel pour chaque mois (juillet, août et septembre). Les étés 2008 et 2010 sont ceux présentant le plus grand nombre de degrés-jours de dégel depuis le début du suivi bien que 2012 talonne 2010.

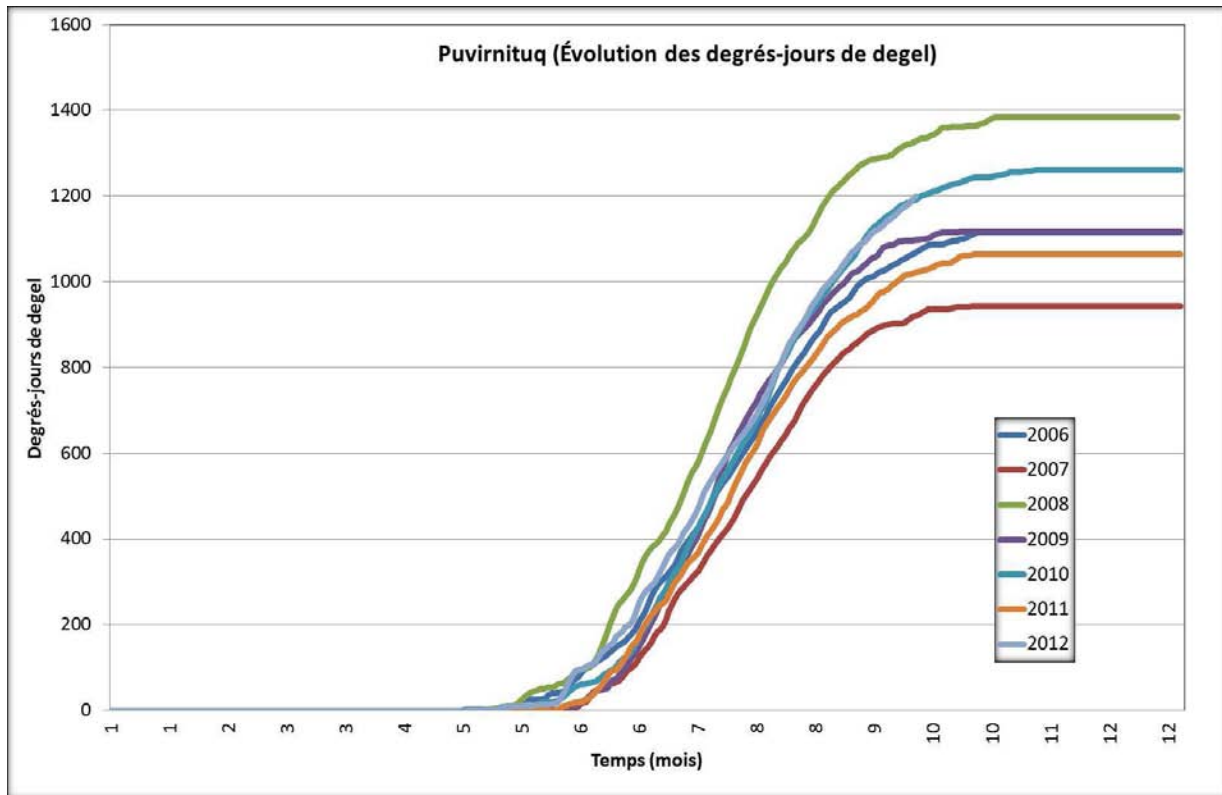


Figure 23 Évolution des degrés-jours de dégel à Puvirnituk.

3.2.4 Températures du sol

3.2.4.1 Ensemble des données

Les données des différents câbles à thermistances sont présentées sous forme graphique (figures 24 à 29). Chaque câble est représenté sur un graphique qui lui est propre. Le câble de référence est situé dans le milieu naturel dans une petite vallée transversale. La profondeur maximale est de 375 cm. Les câbles HT177, HT296 et HT297 ont été implantés dans la piste lors de la construction. Le câble HT297 est celui

situé le plus près du rebord de piste et le câble HT177 est celui le plus près du centre de la piste. Le câble à thermistances F2 est situé directement au pied du remblai de la piste. Le câble F2 présente un hiatus dans les données entre les mois de juin 2009 et octobre 2009. Ce bris correspond à la période où d'importants travaux de réfection de la piste étaient en cours. Une berme d'environ 2 mètres d'épaisseur a alors été déposée sur l'emplacement du câble F2 (figure 16). Le câble est instrumenté sur 15 mètres de profondeur à partir du niveau du sol naturel. Le câble F5 est localisé en amont de la petite vallée transversale soit de l'autre côté de la piste.

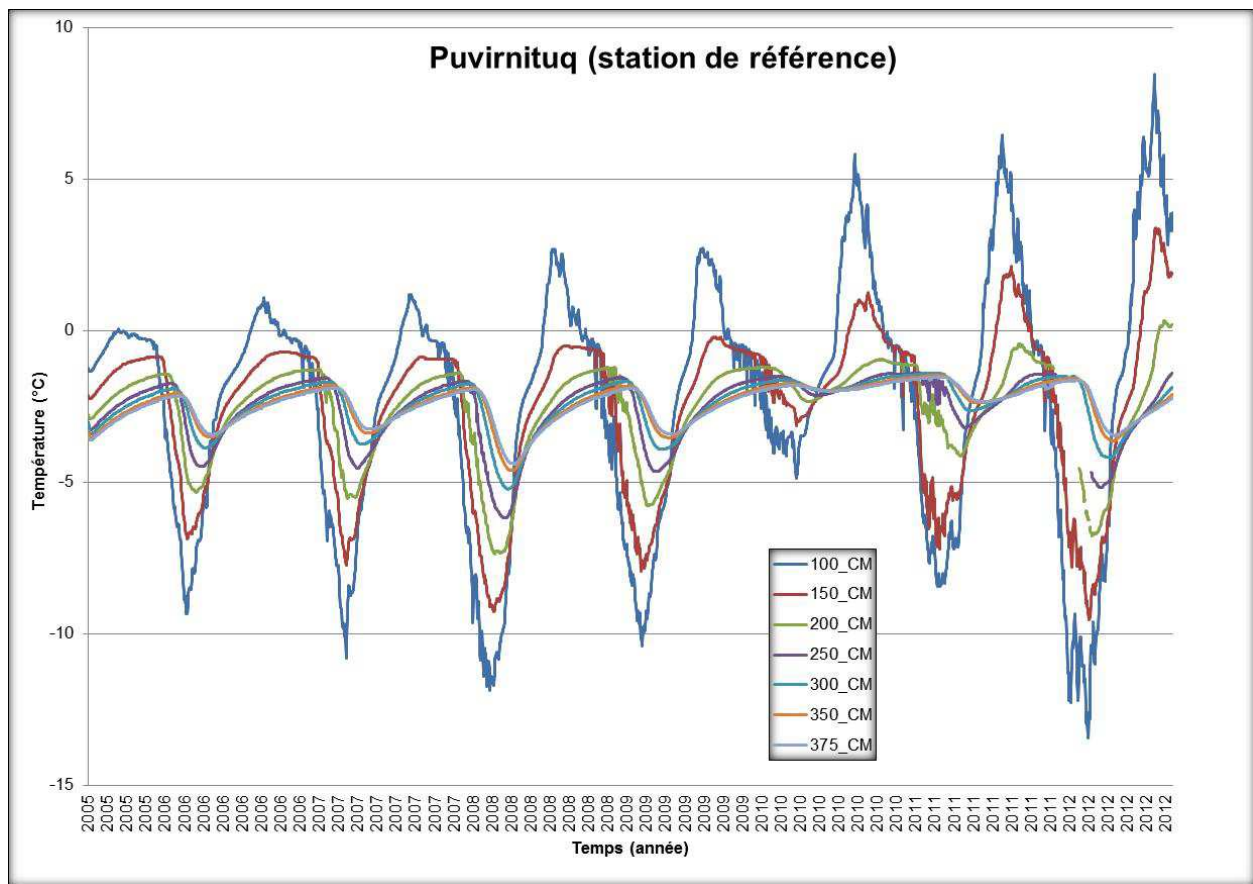


Figure 24 Station de référence à Puvirnituk

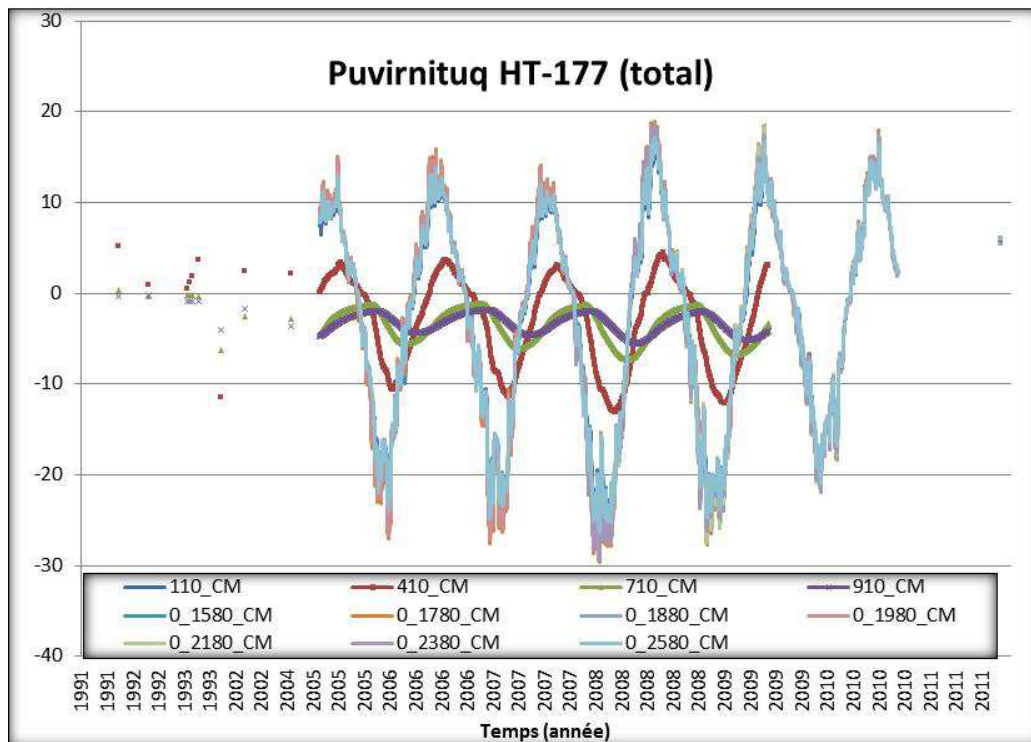


Figure 25 Câble HT177 dans la piste à Puvirnituk.

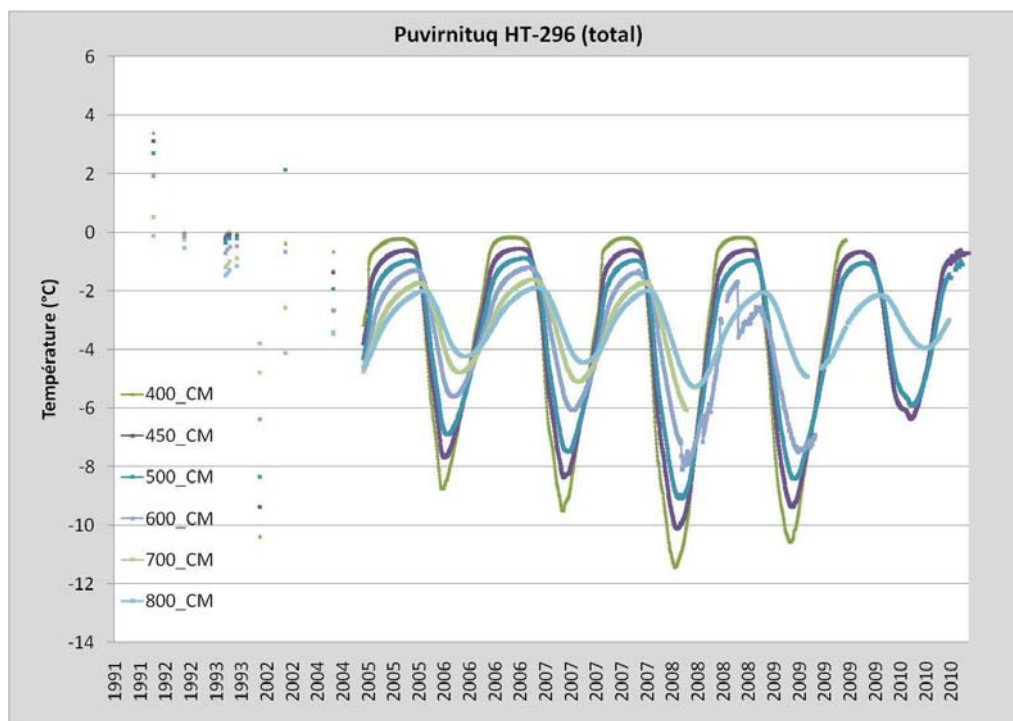


Figure 26 Câble HT296 dans la piste à Puvirnituk.

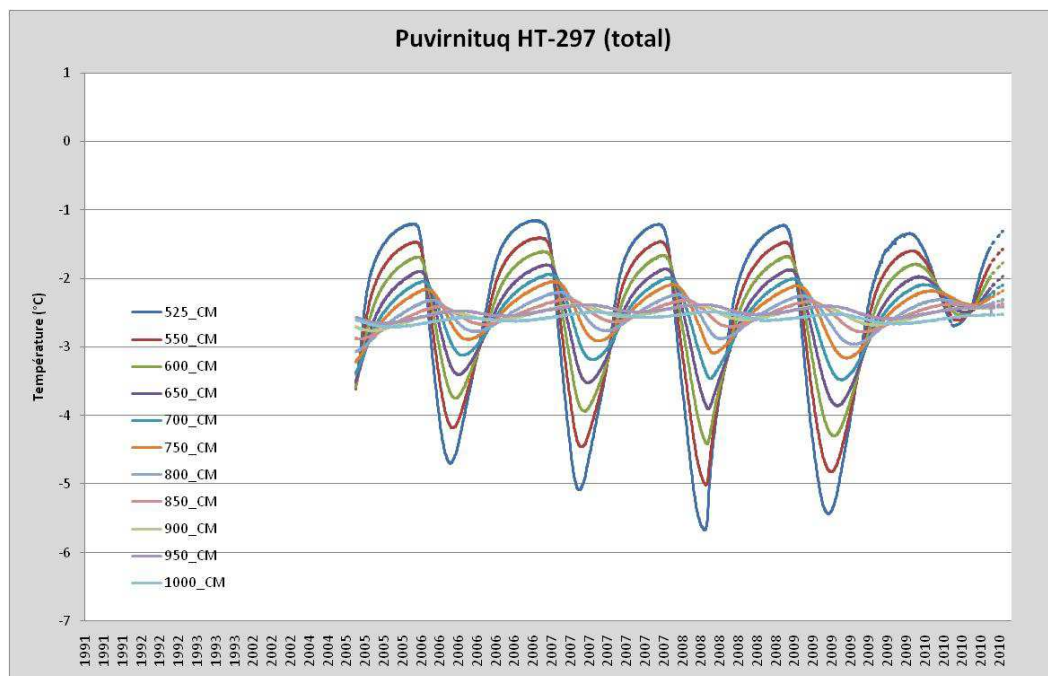


Figure 27 Câble HT297 dans la piste à Puvirnituk.

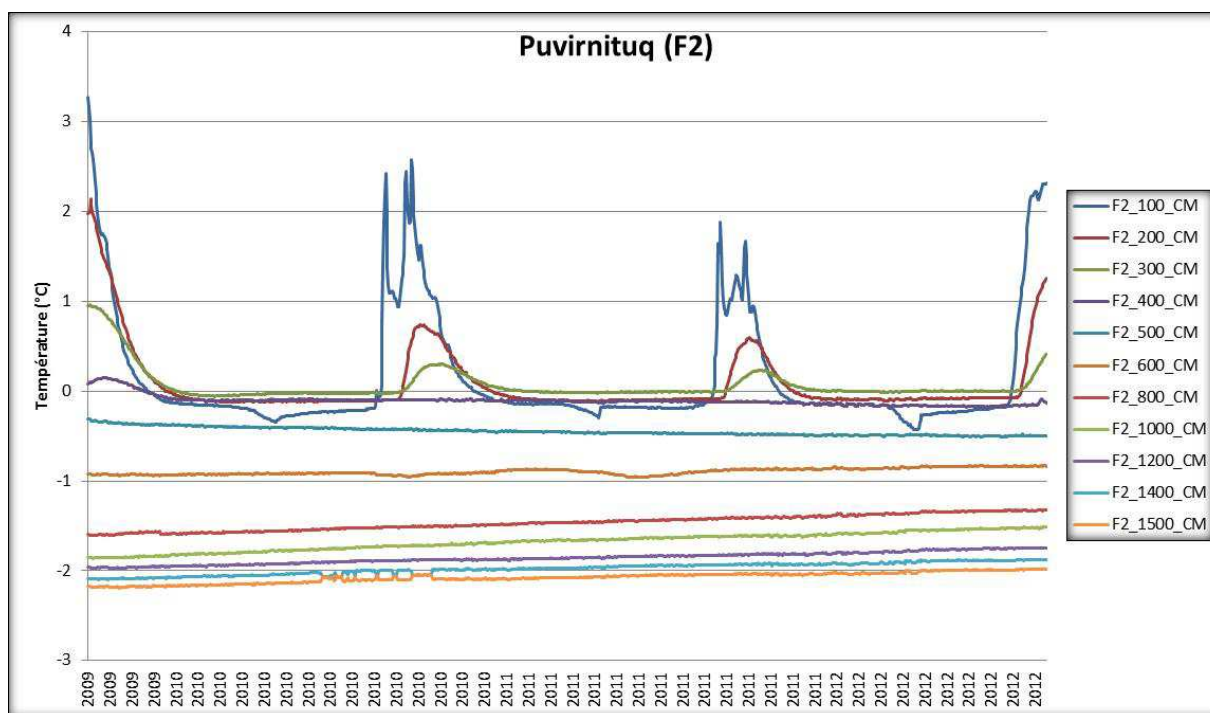


Figure 28 Câble F2 au pied du remblai de la piste de Puvirnituk.

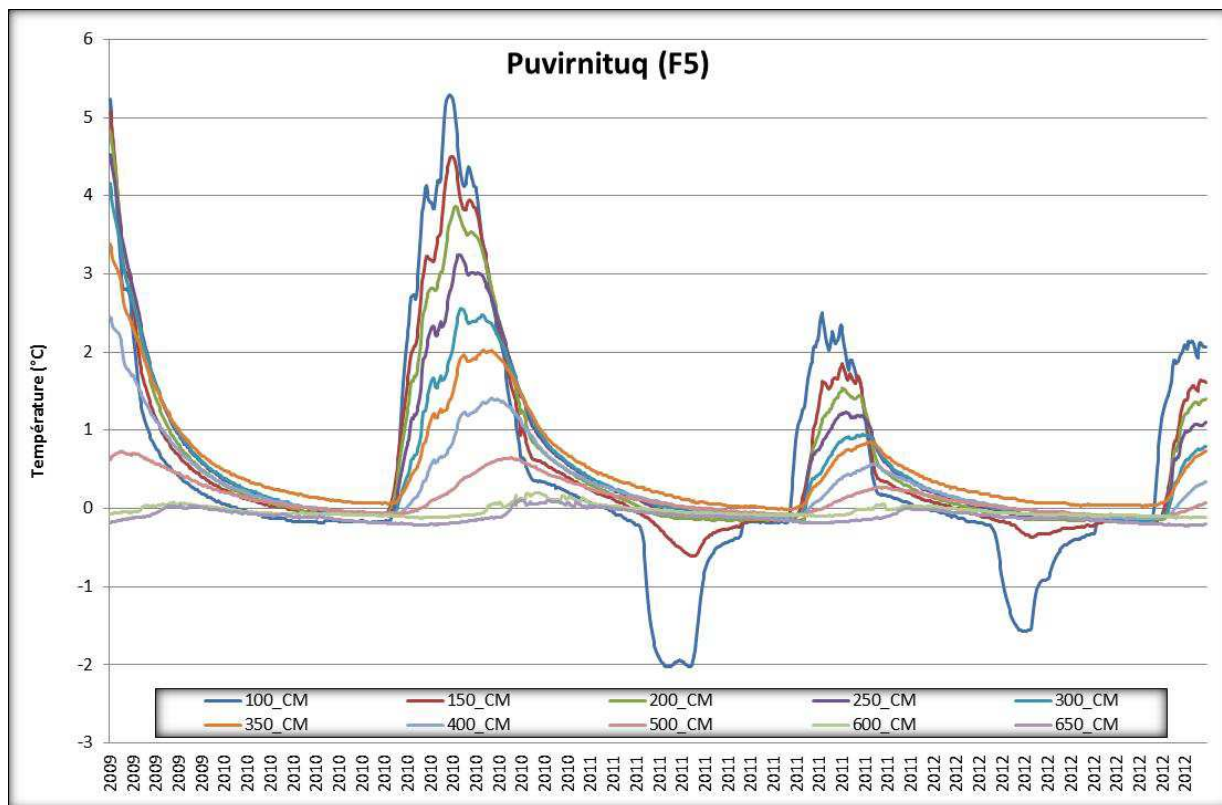


Figure 29 Câble F5 en amont de la vallée transversale à la piste de Puvirnituk.

3.2.4.2 Printemps

3.2.4.3 Couche active

Les données de la station de référence située dans le milieu naturel indiquent que le sol a dégelé sur une épaisseur de 142 cm. Il a toutefois été noté que le tubage dans lequel le câble à thermistances est logé dépassait hors du sol. Il y a eu tassement au niveau de la surface du sol et/ou soulèvement gélival du tube. Depuis la mise en place du tubage en 2005, il y a eu un déplacement de 40 cm du tubage. L'épaisseur du sol qui dégèle annuellement a, par conséquent, moins fluctué depuis 2005 que ne l'indiquent les données. Le suivi du régime thermique dans la piste permet de constater que le dégel n'atteint pas la base du remblai de piste et par conséquent le sol naturel sous-jacent. Ceci ne peut être sûr qu'à l'emplacement même des câbles dans la piste (figure 30). Les trois câbles à thermistances (HT-177, HT-296 et HT-297) sont situés au chaînage 6 + 180. À cet endroit, l'épaisseur du remblai fait 7 mètres d'épaisseur.

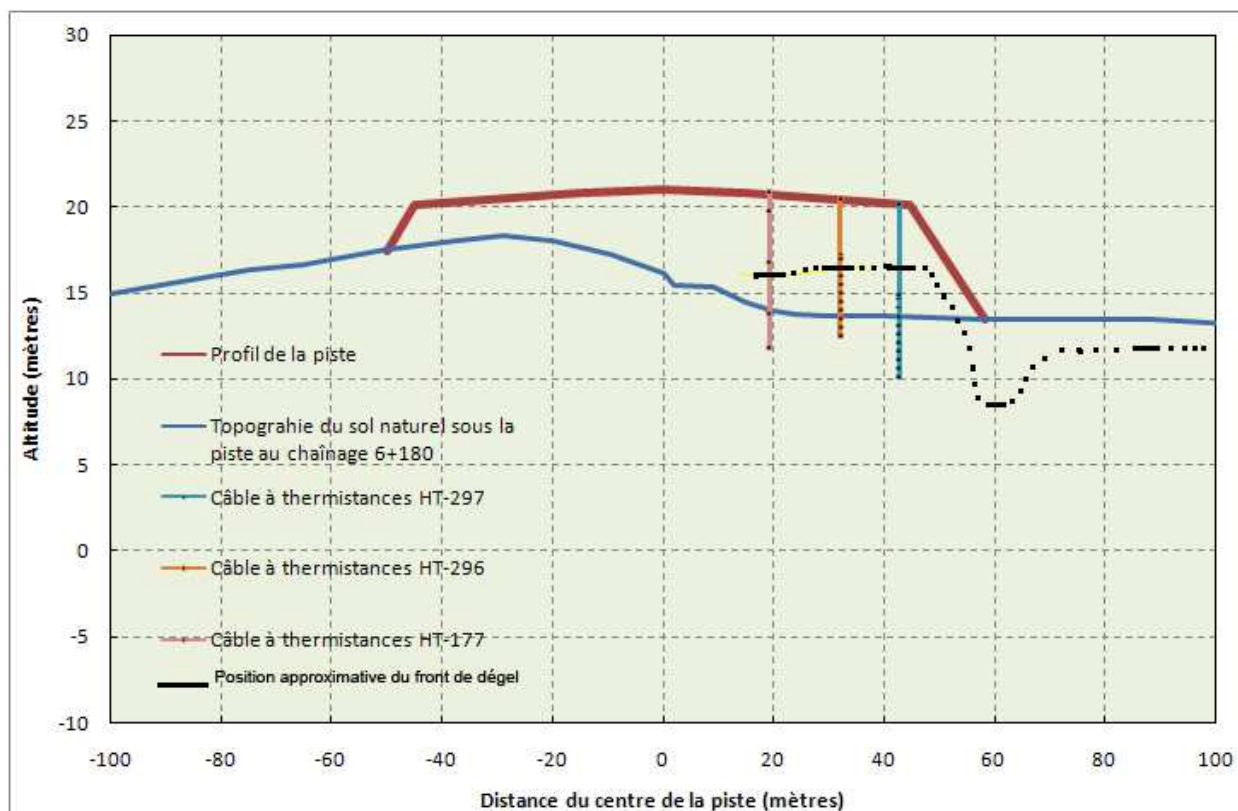


Figure 30 Coupe transversale de la piste avec puits instrumentés à Puvirnituk en 2008.

La profondeur maximale de dégel à l'endroit du câble situé au pied du remblai (F2) a été de 3,25 m de profondeur en 2011 (figure 31). Le dégel atteint une profondeur moins importante que lors de l'analyse des données de 2008 (5,54 m). En 2008, le puits de forage était encore perturbé par les opérations de forage. De plus, l'ajout d'une berme de plus de 2 mètres d'épaisseur sur ce site favorise une remontée du plafond du pergélisol. L'épaisseur de la couche active est alors passée de 5,54 m en 2008 à 5 m en 2009, 3,75 m en 2010 pour finalement atteindre 3,25 m en septembre 2011. Les données de 2011 montrent l'abaissement des courbes thermiques jusqu'à 6 m de profondeur tandis que le profil à 8 m continue de se réchauffer (figure 31). Pour le site situé de l'autre côté de la piste (F5), le dégel atteint 6,50 m de profondeur (figure 32). La profondeur maximale atteinte par le dégel en 2011 peut s'étendre au-delà de cette profondeur puisque le maximum n'est atteint qu'en décembre de chaque année. Pour la piste, seul le câble HT 177 peut nous aider à déterminer la profondeur maximale atteinte

par le dégel (figure 34). Depuis l'automatisation des câbles dans la piste en 2005, la profondeur maximale atteinte par le dégel varie entre 535 cm et 565 cm. Il faut cependant faire attention puisque ces valeurs sont calculées à partir de thermistances distancées de 3 mètres.

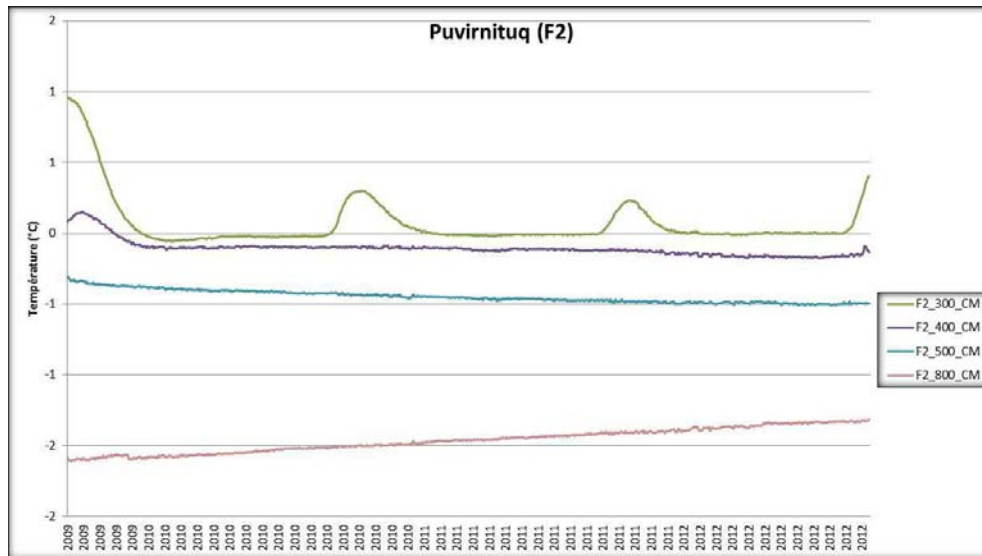


Figure 31 Températures au pied du remblai à Puvirnituk F2 au 25 septembre 2011.

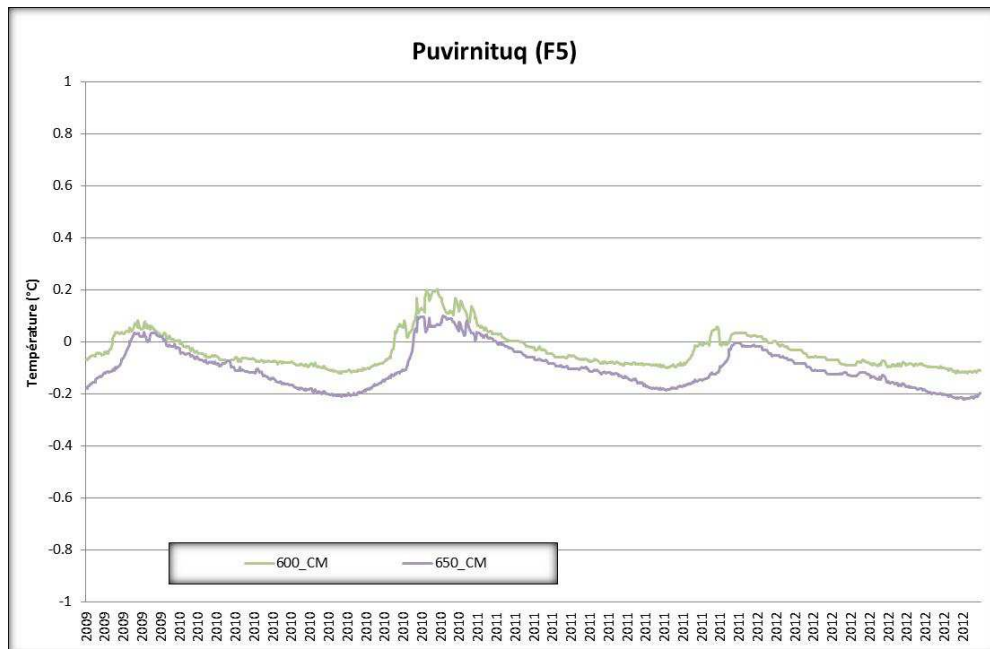


Figure 32 Températures au pied du remblai à Puvirnituk F5 au 25 septembre 2011.

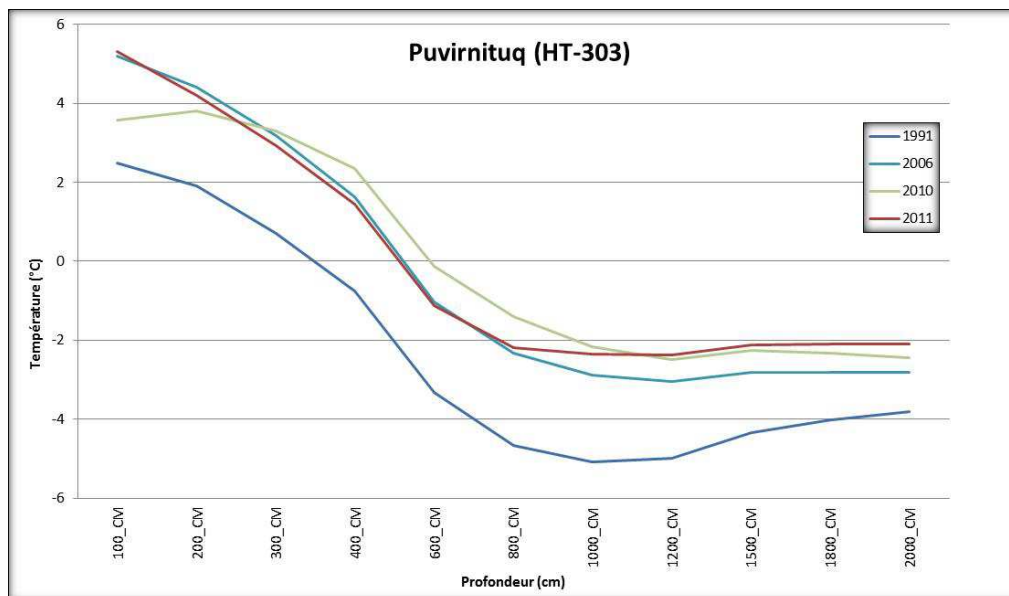


Figure 33 Évolution de la profondeur de dégel dans le roc à Puvirnituk HT303

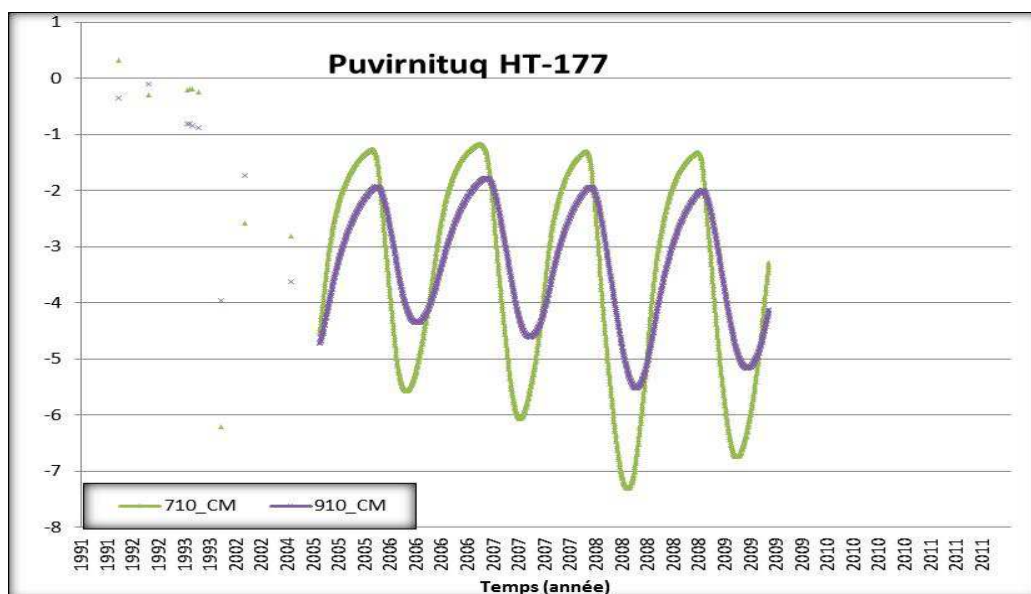


Figure 34 Températures à 7m et 9m sous la piste à Puvirnituk HT177

3.2.4.4 Profondeurs ciblées

Selon la position des câbles à thermistances par rapport au centre de piste, le signal de l'onde thermique réagit différemment. En effet, le câble à thermistance situé près du bord de piste (HT-297) présente une amplitude beaucoup plus faible que les deux autres face aux variations annuelles de température (figure 35). Cette variation d'amplitude se produit à la même profondeur. Plus on s'éloigne du centre de piste, plus l'amplitude diminue. Cette

différence augmente avec la profondeur (figure 36). En effet, à 900 cm (9 mètres) de profondeur, l'amplitude est très faible bien que la température soit toujours négative (-2,5 °C). Il a été envisagé que l'apport de neige qui s'accumule annuellement contre le remblai de piste pouvait causer cette baisse d'amplitude (Allard et Sarrazin, 2007). De plus, la baisse d'amplitude ne serait perceptible qu'en période hivernale. La moyenne annuelle pour 700 cm, soit la surface du sol naturel sous le remblai, est de -3,3 °C et -3,2 °C pour les câbles plus près du centre de piste tandis que le câble près du rebord de piste affiche une température légèrement plus élevée, soit de -2,5 °C. Le hiatus de données depuis 2009 découle des travaux majeurs effectués en marge de la station avec de la machinerie lourde. Les câbles à thermistances HT-177, HT-296 et HT-297 feront l'objet d'une maintenance complète pour 2012. Le profil thermique du câble HT-297 à 7 m de profondeur perd beaucoup d'amplitude pour 2010, suite à un cumul faible de degrés-jours de gel et un nombre élevé de degrés-jours de dégel.

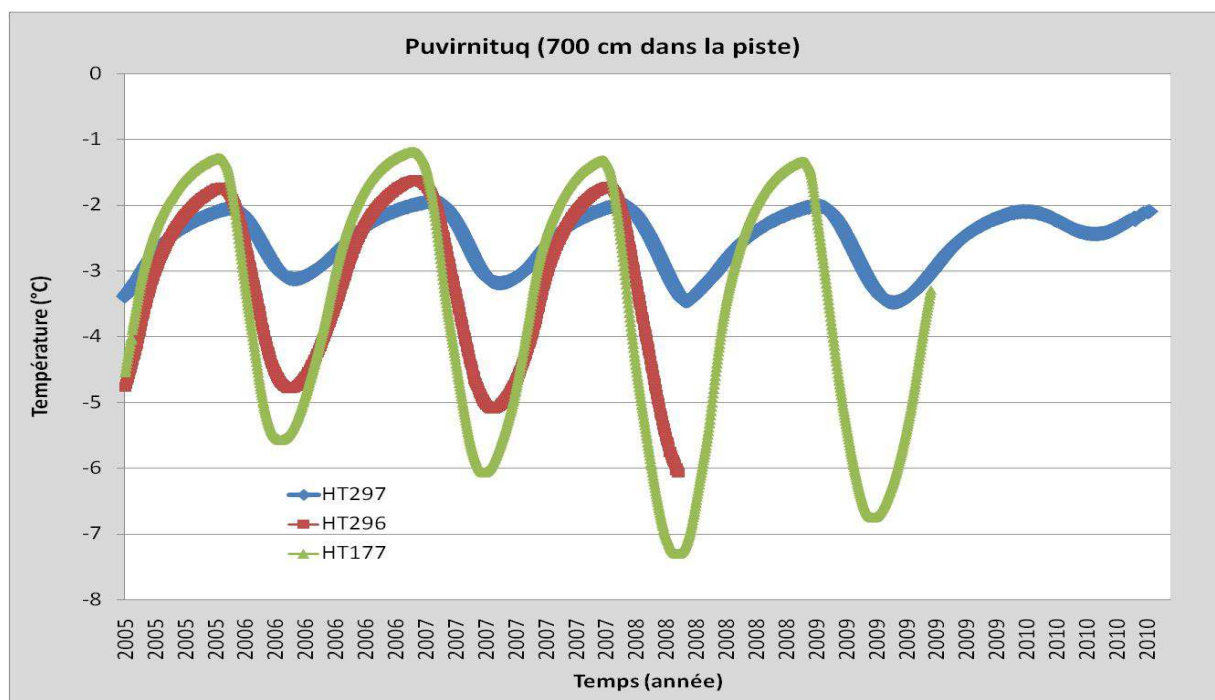


Figure 35 Profil thermique à 7 mètres de profondeur à Puvirnituk.

La baisse d'amplitude est d'autant plus importante à 900 cm de profondeur, ce qui soulève une autre hypothèse. Les câbles près du centre de piste (HT-177 et HT-296) seraient logés essentiellement dans le roc ce qui expliquerait la grande amplitude saisonnière de l'onde

thermique surtout à cette profondeur. Cette amplitude est comparable à d'autres sites au Nunavik où nous mesurons le régime thermique dans le roc. L'explication réside dans le fait que le roc a une conductivité thermique beaucoup plus grande que les sédiments meubles. La diffusivité thermique est plus élevée, ce qui raccourcit le déphasage thermique dans le temps ainsi que l'amortissement de l'onde thermique avec la profondeur (courbe rouge sur la figure 36). Le signal thermique se propagera alors plus rapidement et plus profondément dans le roc que dans l'argile. Le comportement de l'onde thermique près du rebord de piste (courbe bleue) rend bien compte de ce phénomène. L'argile a une diffusivité plus faible ce qui amplifie le déphase dans le temps et l'amortissement en profondeur (figure 36). Ceci est d'autant plus important que l'argile contient une certaine quantité d'eau non gelée aux environs de -2 °C. La chaleur latente associée à la présence de cette eau vient donc diminuer l'amplitude thermique et caractériser le régime thermique au droit du puits instrumenté HT-297. Une perte d'amplitude est toujours présente sur le profil thermique à 9 m de profondeur pour l'année 2010 et les données sont absentes pour 2011 suite à un bris.

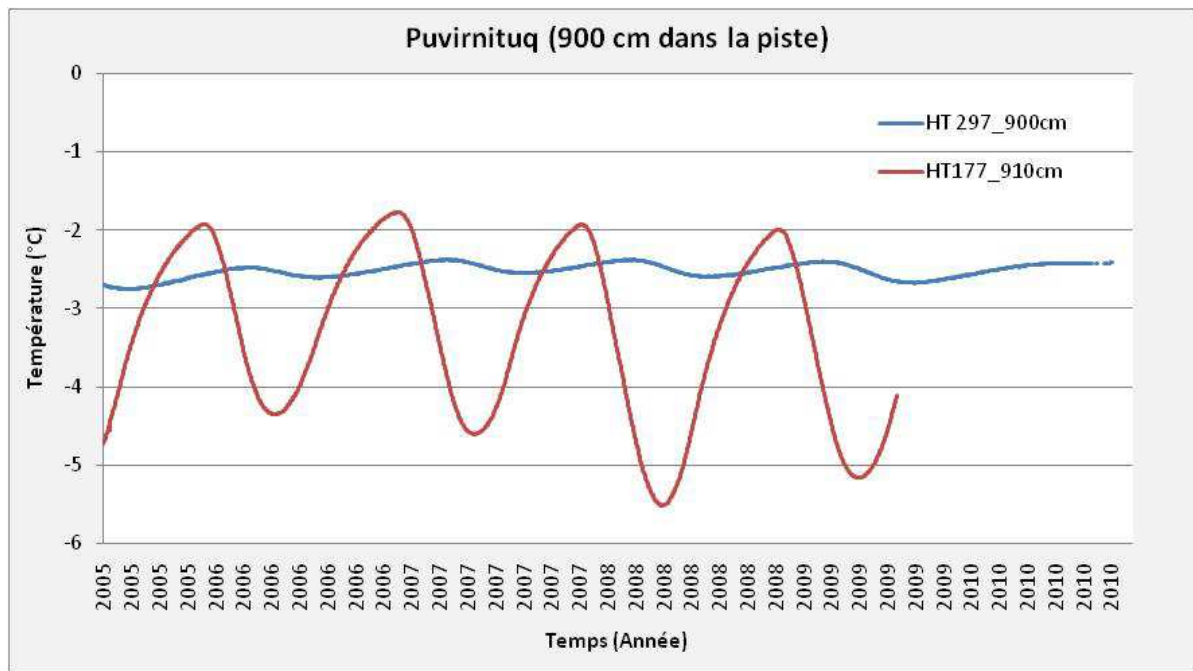


Figure 36 Profil thermique à 9 mètres de profondeur à Puvirnituk.

3.3 AKULIVIK

3.3.1 Description

L'instrumentation pour le suivi du régime thermique à Akulivik comprend cinq (5) câbles à thermistances dont quatre sont automatisés (HT162, HT183, F1 et F4) (figure 41), tandis que l'autre ne permet que des mesures manuelles à l'aide d'un multimètre. Lors de la campagne de forage du Ministère en 2008, quatre (4) nouveaux puits ont été dotés d'un tubage en PVC et remplis d'huile de silicone (figure 41). Deux de ces forages (F1 et F4) ont été instrumentés à l'aide de câbles à thermistances et automatisés. Pour le forage F1, le câble à thermistances est relié à un multiplexeur (AM 16/32) à la sortie du puits. Le multiplexeur est ensuite relié à la station HT-162 à l'aide d'un câble souterrain. Un boîtier temporaire a été placé afin de protéger les équipements des intempéries. Les deux autres puits (F2 et F3) ont été lus manuellement en 2008 à l'aide d'un multimètre et d'une thermistance.

3.3.2 Localisation

Le câble HT162 est situé dans le till, dans le champ, à proximité du côté sud de la piste au chaînage 5+960 m (figure 37) ; il mesure la température du sol jusqu'à 5 m. Doté d'un capteur pour la température de l'air, il sert également de site de référence. Le câble HT183 est installé dans le remblai de la piste à 5,5 m de son côté sud, au chaînage 5+960 m (figure 39). Il mesure des températures jusqu'à 5 m de profondeur, dans le till. Le câble HT232 est situé du côté nord de la piste, au chaînage 5+492 m, dans les sédiments marins sableux. Les températures sont mesurables jusqu'à 17,5 m de profondeur, mais ce câble, lu manuellement ne permet que de recueillir des données de manière sporadique. Une nouvelle station a été placée à l'endroit du forage F4 (figure 38) de 2008.



Figure 37 Station dans le milieu naturel près de la piste d'Akulivik.



Figure 38 Station automatisée au point F4 à Akulivik.



Figure 39 Station automatisée HT-183 sur le remblai de piste d'Akulivik.

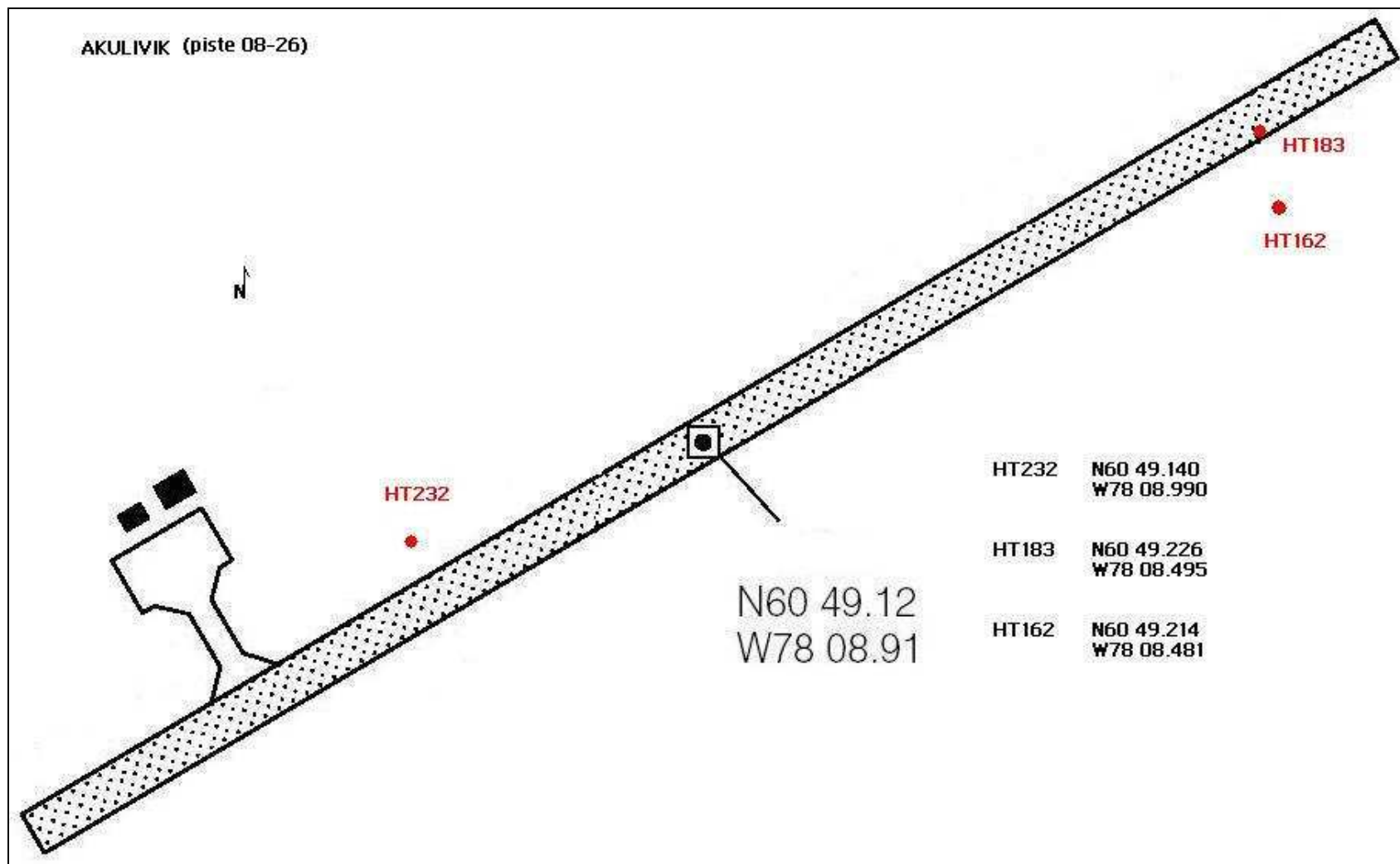


Figure 40 Schéma de localisation des stations automatisées d'Akulivik.

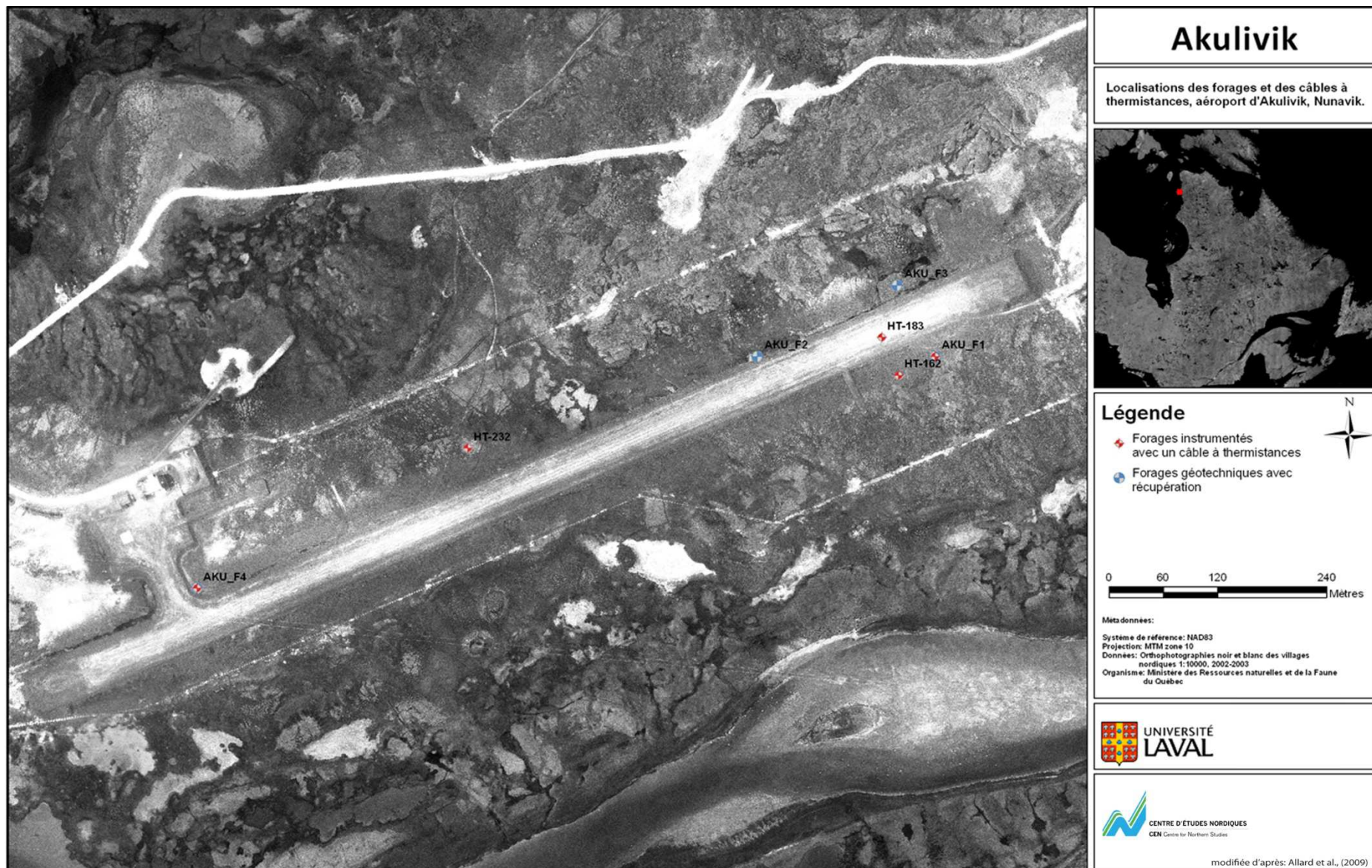


Figure 41 Carte de localisation des stations et forages à Akulivik

3.3.3 Températures de l'air

La station de référence est dotée de 2 câbles à thermistances automatisés (HT 162 et F1). De plus, un capteur pour enregistrer la température de l'air est fixé à 1,5 m de hauteur (figure 37). Les données sont enregistrées et cumulées sur une base horaire.

3.3.3.1 Moyennes mensuelles

Le tableau 9 présente les données sous forme numérique, ce qui permet de calculer des moyennes annuelles pour Akulivik. En 2005, la moyenne annuelle a été de -5,96 °C tandis qu'en 2006 elle était de -4,44 °C, de -7,24 °C pour l'année 2007 et de -6,18°C pour l'année 2008 (tableau 9). L'année 2008 se distingue par une grande variabilité des températures. Certains mois présentent des températures basses comme en février (-27 °C) et mars (-22 °C) tandis que d'autres affichent des températures supérieures aux moyennes mesurées antérieurement comme le mois de juin (7,4 °C) et juillet (11,7 °C). L'année 2009 se distingue par une moyenne de 14,57°C pour le mois de juillet, la plus élevée depuis l'automatisation. La moyenne annuelle pour 2009 s'établit à -5,81°C et -3,00°C pour 2010. En 2010, les mois de février, avril, août, septembre, novembre et décembre affichent les moyennes les plus élevées depuis l'instrumentation du site (en orange au tableau 9). L'année 2011 fait un retour à des températures plus près des normales climatiques (-7,0°C) avec une moyenne annuelle de -6,32°C.

Table 9 Moyennes mensuelles pour Akulivik

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janvier		-28.26	-22.84	-22.78	-24.73	-23.53	-20.33	-17.31	-25.79
Février		-25.06	-22.84	-21.06	-26.99	-23.62	-18.90	-24.74	-23.22
Mars		-17.18	-13.26	-21.85	-21.74	-21.59	-16.53	-22.36	-20.48
Avril		-7.80	-6.75	-11.30	-10.18	-10.03	-5.51	-14.28	-11.87
Mai		1.09	-0.44	-4.99	1.31	-5.53	-1.79	-4.74	-1.38
Juin		4.02	3.86	2.72	7.38	3.73	3.70	4.03	6.11
Juillet	7.84	7.64	9.51	8.46	11.72	14.57	11.27	8.34	9.86
Août	8.65	8.59	10.09	10.08	11.26	10.33	11.87	10.53	10.89
Septembre	4.34	5.56	5.39	3.98	4.54	4.58	7.37	4.78	6.11
Octobre	0.68	2.24	1.28	-0.26	1.05	-1.30	2.20	0.45	
Novembre	-6.56	-5.69	-5.24	-9.51	-7.62	-6.03	-2.08	-5.24	
Décembre	-22.55	-16.64	-12.07	-20.38	-20.14	-11.34	-7.31	-15.29	
Annuelle		-5.96	-4.44	-7.24	-6.18	-5.81	-3.00	-6.32	

Les moyennes mensuelles de la température de l'air sont présentées à la figure 42. Ce qui ressort rapidement, à première vue, est la courbe en bleu de 2008 et celle de 2010. La courbe de 2008 se distingue particulièrement en juin et juillet où elle se détache des autres de façon significative tandis que celle de 2010 est plutôt marquée par les mois d'automne. Une grande variabilité mensuelle est observable pour les mois de décembre, janvier, février et mars (figure 42). La courbe orange de 2009 montre une moyenne mensuelle élevée pour juillet.

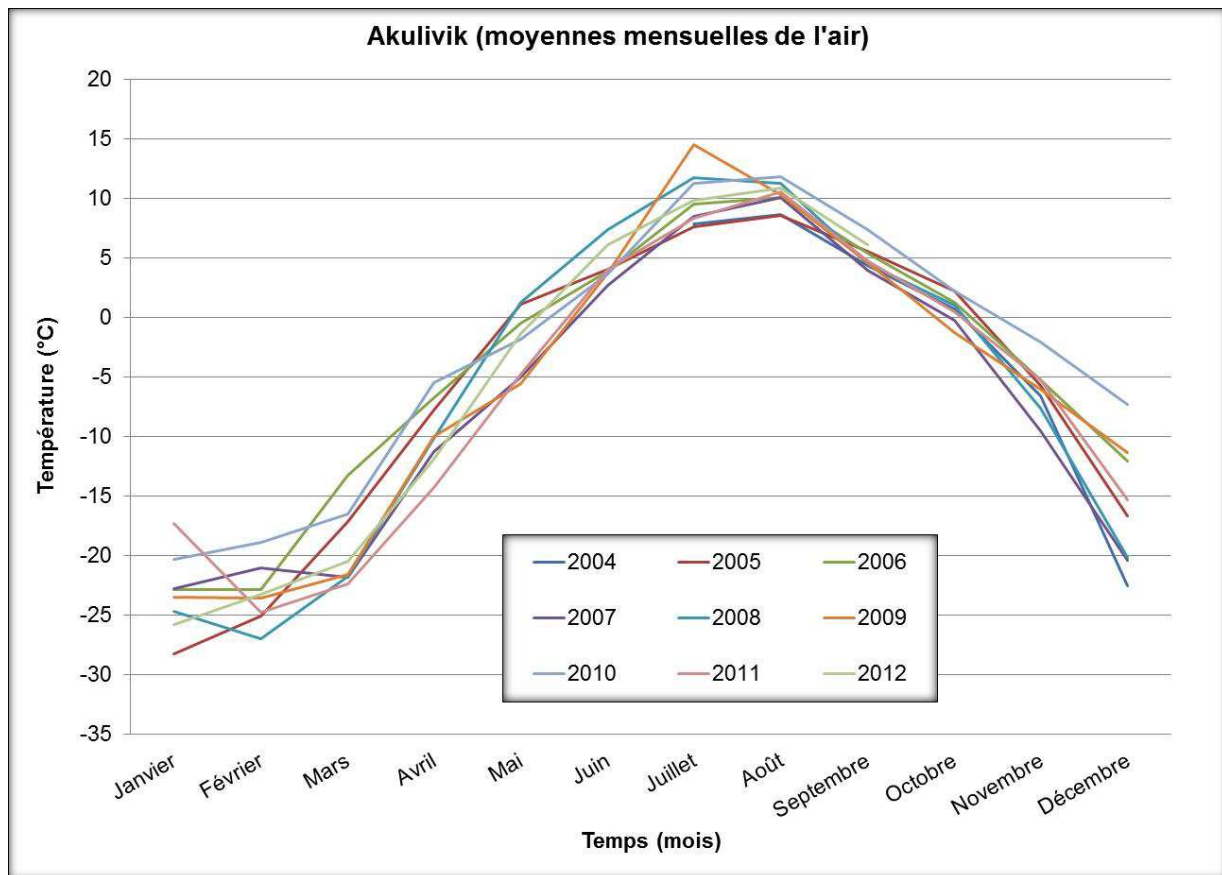


Figure 42 Moyennes mensuelles de l'air

3.3.3.2 Moyennes saisonnières

Les moyennes saisonnières pour Akulivik sont calculées depuis 2004, l'année de l'automatisation des câbles à thermistances (tableau 10). Une tendance à la hausse se trace pour les moyennes estivales à Akulivik (figure 43). En effet, la moyenne pour les étés 2004 et 2005 se chiffrait entre 7,18°C et 7,70 °C. Cette valeur s'est élevée à 8,45°C

en 2006 et 9,78°C en 2008. Pour 2009, la moyenne a atteint 10,31°C et 10,38°C pour 2010 (tableau 10). L'été 2010 a donc enregistré la moyenne la plus élevée au cours des sept dernières années (figure 42). L'hiver 2010 a également été le plus doux depuis l'automatisation du site en 2004 tandis que le printemps 2011 est celui ayant enregistré les températures les plus basses.

Table 10 Tableau des moyennes saisonnières pour Akulivik.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
hiver		-24.23	-20.67	-22.09	-25.30	-23.79	-17.88	-20.21	-23.59
printemps		-3.54	-3.09	-6.60	-3.61	-6.51	-4.23	-7.65	-5.08
été	7.70	7.18	8.45	7.70	9.78	10.31	10.38	8.12	9.25
automne	-6.41	-4.09	-3.37	-7.23	-6.09	-4.71	-1.23	-4.02	

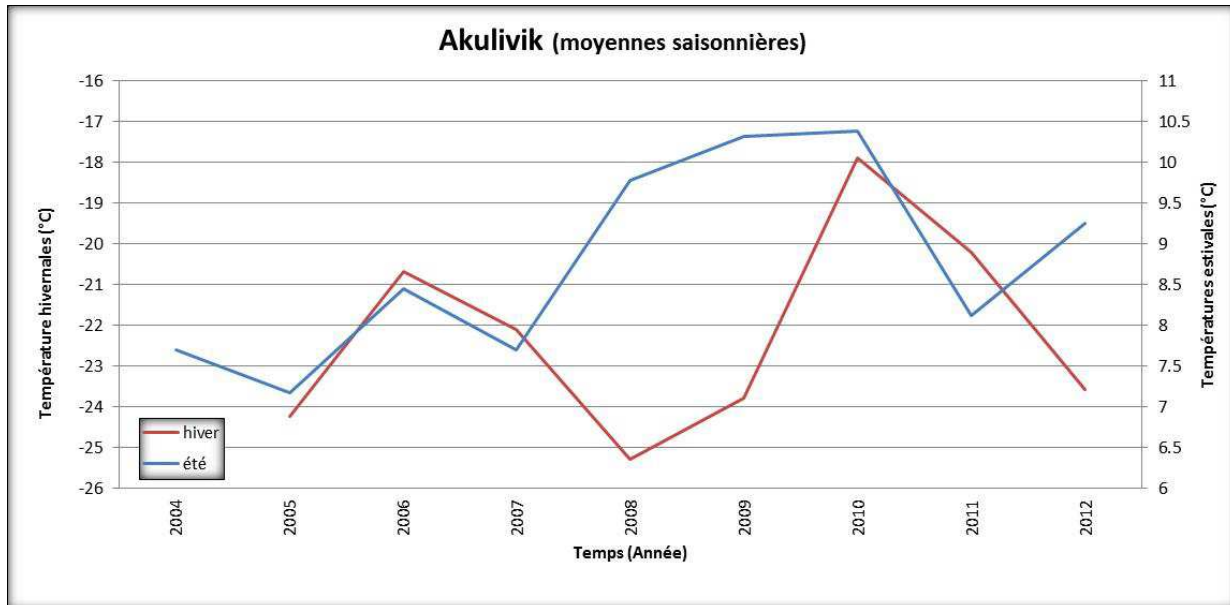


Figure 43 Moyennes saisonnières estivales pour Akulivik.

3.3.3.3 Moyennes quotidiennes de l'air

Un graphique illustrant la température de l'air moyenne sur une base horaire pour la période d'enregistrement montre clairement les températures exceptionnellement chaudes de l'été 2008, 2009 et 2010 (figure 44). La zone des températures positives, soit celles au-dessus du 0 °C, laisse entrevoir des étés 2008, 2009 et 2010 beaucoup plus chauds que les quatre précédents (2004-2005-2006-2007). Une attention particulière doit être portée sur le

printemps 2005 où la moyenne quotidienne excède 10 °C. En fait, l'épisode s'est déroulé sur une période de 8 jours (20 au 27 mai 2005). La température maximale a excédé les 10 °C tout au long de cette période pour atteindre un sommet de 21 °C le 23 mai 2005. Le maximum atteint le 22 mai 2005 a été de 15 °C, de 17 °C le 26 mai et de 18 °C le 27 mai 2005.

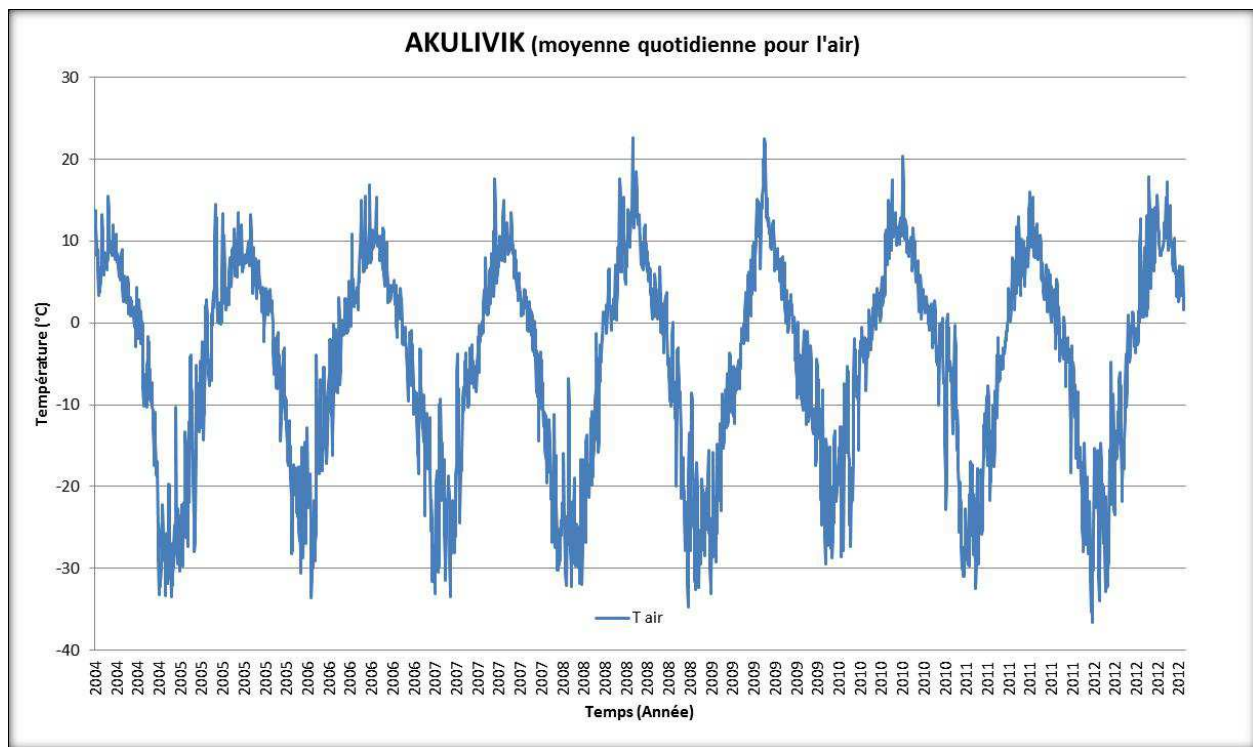


Figure 44 Températures moyennes de l'air pour Akulivik.

Ceci est d'ailleurs la seule fois en 2005 que les températures ont dépassé le seuil des 20 °C (figure 44). La température maximale a toutefois été atteinte à l'été 2008. En effet, le 25 juillet, la température moyenne quotidienne de l'air a été de 22,6 °C avec un maximum horaire atteint de 28,7 °C entre 14:00 et 15:00 heures. Il faut préciser que cette valeur représente un maximum horaire et non absolu, car le 28,7 °C est la moyenne de température de l'air pour une heure complète. De plus, le seuil de 28 °C a été atteint pendant trois (3) heures consécutives. La température a atteint 20 °C dès 6:00 heures le matin et est demeuré au-dessus de ce seuil jusqu'à 24:00 heures (minuit) soit pendant plus de 18 heures le 25 juillet 2008. En 2009, la température a excédé

25°C plus de 6 jours consécutifs entre le 24 et le 29 juillet. Le maximum atteint le 27 juillet 2009 a été de 27,39°C tandis qu'une température de 20,94°C est enregistrée le 15 août 2010 et 20,66°C le 31 juillet 2011. Pour 2012, le maximum atteint s'élève à 24 °C le 28 juin. En juin 2012, il y a eu 6 journées dont la température excédait 18°C dont 4 au-dessus de 20°C.

3.3.3.4 Seuils

Si le seuil des 20 °C n'a été atteint qu'une seule fois en 2005, il en fut tout autrement en 2008 et 2009 où ce seuil a été atteint à huit (8) et onze (11) reprises (tableau 11). Le total des jours où la température maximale a dépassé 15 °C est beaucoup plus important en 2008 que les années antérieures. Il y a eu 38 journées, soit plus du double de 2004-2005-2006 et 2007, où la température de l'air a été supérieure à 15 °C à l'été 2008 (tableau 11). L'hiver 2007-2008 a été caractérisé par des températures froides tout au long de l'hiver. Il y a eu 111 journées à l'hiver 2007-2008 où la température a atteint -20 °. Pour 2009, il y a eu 109 journées sous le seuil des -20°C. L'hiver 2004-2005 a été celui ayant cumulé le plus grand nombre de journées où la température était sous -30 °C avec un cumul total de 49 journées. En 2010, le seuil des -30°C a été atteint à sept reprises et celui des -20°C à 67 reprises. Pour 2012, la température a excédé le seuil du 20°C à 9 reprises dont 4 au mois de juin.

Table 11 Tableau du cumul des jours selon des seuils.

	<-30°C	<-20°C	>15°C	>20°C
2004			12	1
2005	49	102	15	1
2006	16	80	14	5
2007	31	81	14	2
2008	38	111	38	8
2009	26	109	36	11
2010	7	67	27	4
2011	29	85	17	2
2012	35	96	30	9

3.3.3.5 Degrés-jours (gel-dégel)

Les années 2008, 2009 et 2010 présentent un nombre de degrés-jours de gel et de degrés-jours de dégel supérieur aux années précédentes (tableau 12). Bien qu'une variabilité se perçoive lors de la période hivernale, il en est autrement pour la saison de degrés-jours de dégel. L'année 2008 a enregistré le plus grand cumul des températures positives depuis l'automatisation du site en 2005 suivi de très près par 2010. Le nombre de degrés-jours de dégel a atteint 1173 pour l'année 2008 et 1144 pour 2010. L'année 2011 présente un cumul total de 895 degrés-jours de dégel et 2803 degrés-jours de gel. Il y a eu plus de 3176 degrés-jours de gel en 2012 et 1029 degrés-jours de dégel au moment du téléchargement des données.

Table 12 Tableau du cumul des degrés-jours.

	Gel	Dégel
2005	3332	977
2006	2693	966
2007	3019	803
2008	3484	1173
2009	3414	1051
2010	2501	1144
2011	2803	895
2012	3176	1029

Rapportée sous forme graphique, la croissance du nombre de degrés-jours de gel permet de suivre l'évolution de la période hivernale selon les années (figure 45). La saison où il y a cumul des températures négatives débute vers la fin du mois d'octobre et ce peu importe l'année visée. La courbe de 2008 (violet) se démarque dès le début de la saison par une forte accumulation des degrés-jours de gel. Ceci se poursuit tout au long de la saison et l'année 2008 termine au premier rang pour le nombre de degrés-jours de gel. Elle est suivie de près par 2004-2005 et 2008-2009, ensuite, vient l'hiver 2006-2007 et au dernier rang l'hiver 2005-2006. L'hiver 2009-2010 est celui ayant cumulé le plus faible nombre de degrés-jours de gel avec 2501 (courbe orange).

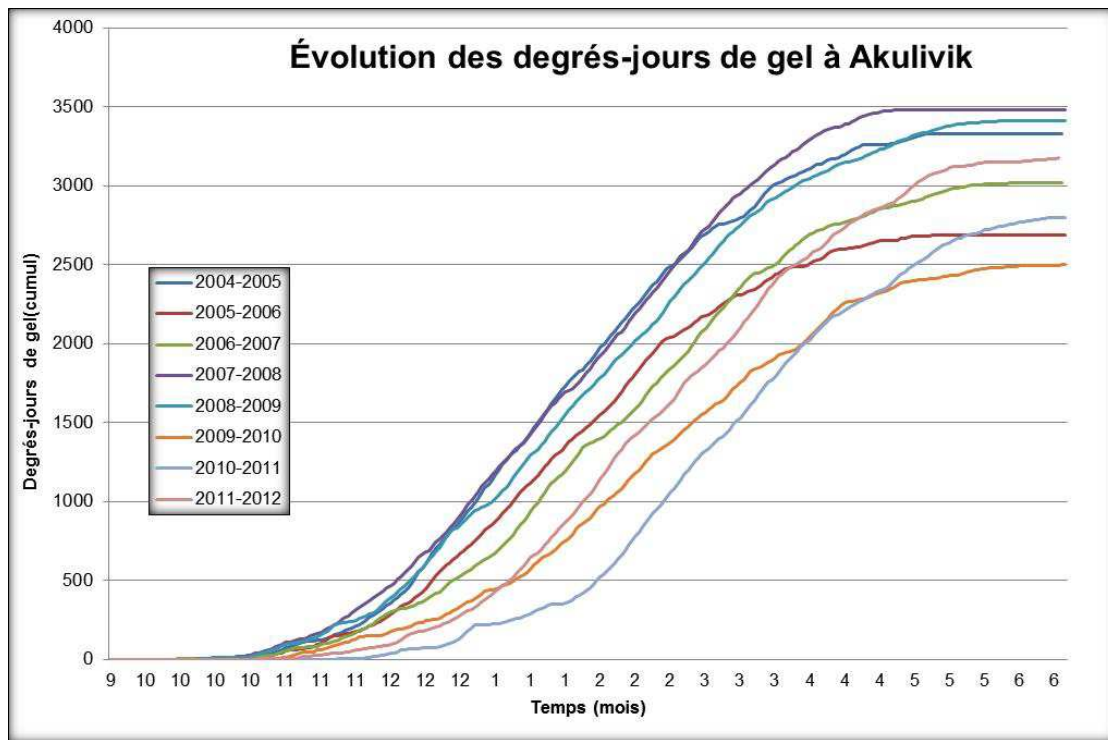


Figure 45 Évolution des degrés-jours de gel à Akulivik.

L'évolution des degrés-jours de dégel amène des informations supplémentaires, lorsque rapportée sous forme graphique (figure 46). L'année 2008 termine au premier rang du groupe avec un cumul totalisant 1173 degrés-jours de dégel. L'année 2010 suit de près 2008 avec un cumul de 1144 degrés-jours de dégel. Contrairement au profil des degrés-jours de gel, le profil des degrés-jours de dégel semble être moins linéaire. Il faut noter ici le printemps 2005 en forme de marche d'escalier. Il y a donc une plus grande variabilité de l'amorce du printemps que de l'automne. Pour 2005, le printemps 2005 a été particulièrement hâtif avec un cumul rapide des degrés-jours de dégel. Il faut souligner ici que le maximum annuel en 2005, pour la température de l'air (21,2 °C), a d'ailleurs été atteint en mai (23 mai 2005). Une autre semaine de températures au-dessus des normales saisonnières au printemps 2005 est venu caractériser la courbe des degrés-jours de dégel (11 au 18 juin 2005). Bien que la moyenne de mai 2008 (1,3 °C) soit plus élevée que 2005 (1,1 °C), la température maximale atteinte n'a été que de 11 °C. La courbe pour 2011 laisse prévoir un cumul similaire à celui de 2007 soit tout juste au-dessus des 800 degrés-jours de dégel tandis que 2012 atteint presque le niveau de 2009.

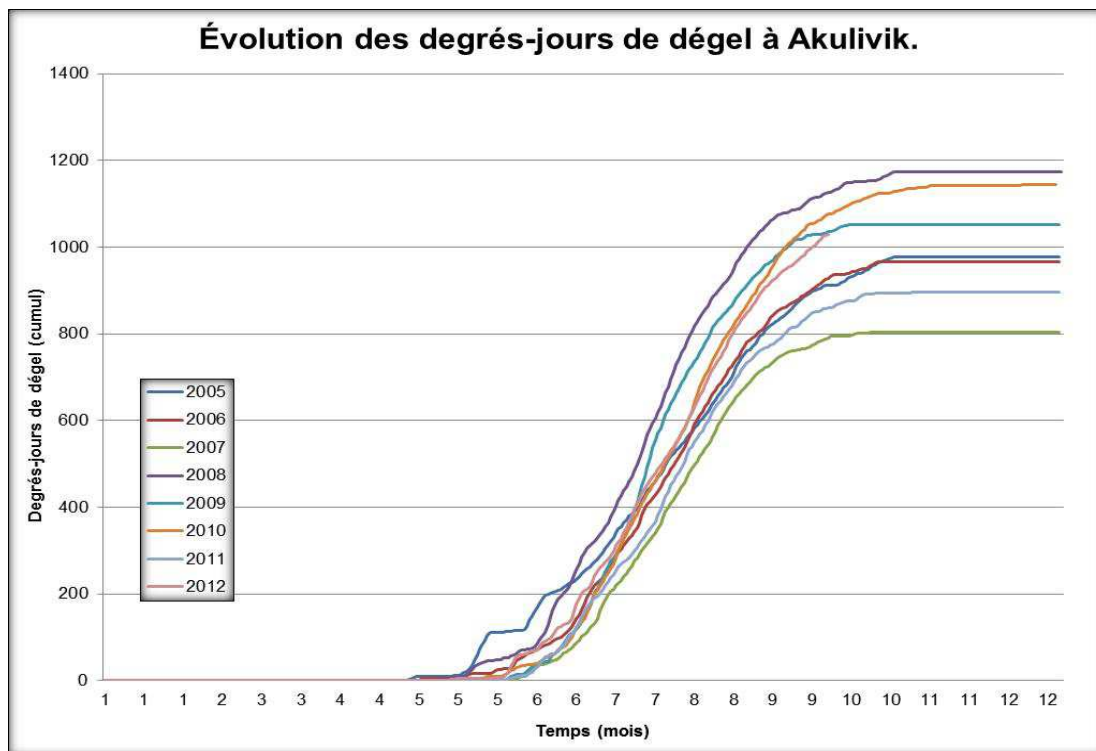


Figure 46 Évolution des degrés-jours de dégel pour Akulivik.

3.3.4 Températures du sol

La station de référence est alimentée en données de températures du sol par deux câbles à thermistances. Le premier est instrumenté sur une profondeur de 500 cm (HT-162) tandis que le second (F1) mesure le régime thermique jusqu'à 950 cm de profondeur. Un câble à thermistances à lecture manuelles (HT-232) fait aussi l'objet d'une analyse. La station en marge de la piste (HT-183) mesure le régime thermique sous la piste jusqu'à 540 cm de profondeur. Une nouvelle station (F4) mise en place en 2008 est instrumentée jusqu'à 950 cm de profondeur.

3.3.4.1 Données totales

Les données enregistrées sur chacun des câbles à thermistances à Akulivik sont présentées sur les figures 47 à 50 inclusivement. Pour les câbles HT-162 et HT-183, les données ponctuelles avant l'automatisation de 2004 paraissent sur la première portion des graphiques. De plus, un hiatus de neuf ans n'apparaît pas. Il n'y a eu aucune donnée ponctuelle entre 1993 et 2002. L'échelle de temps en abscisse se trouve donc tronquée à cet endroit.

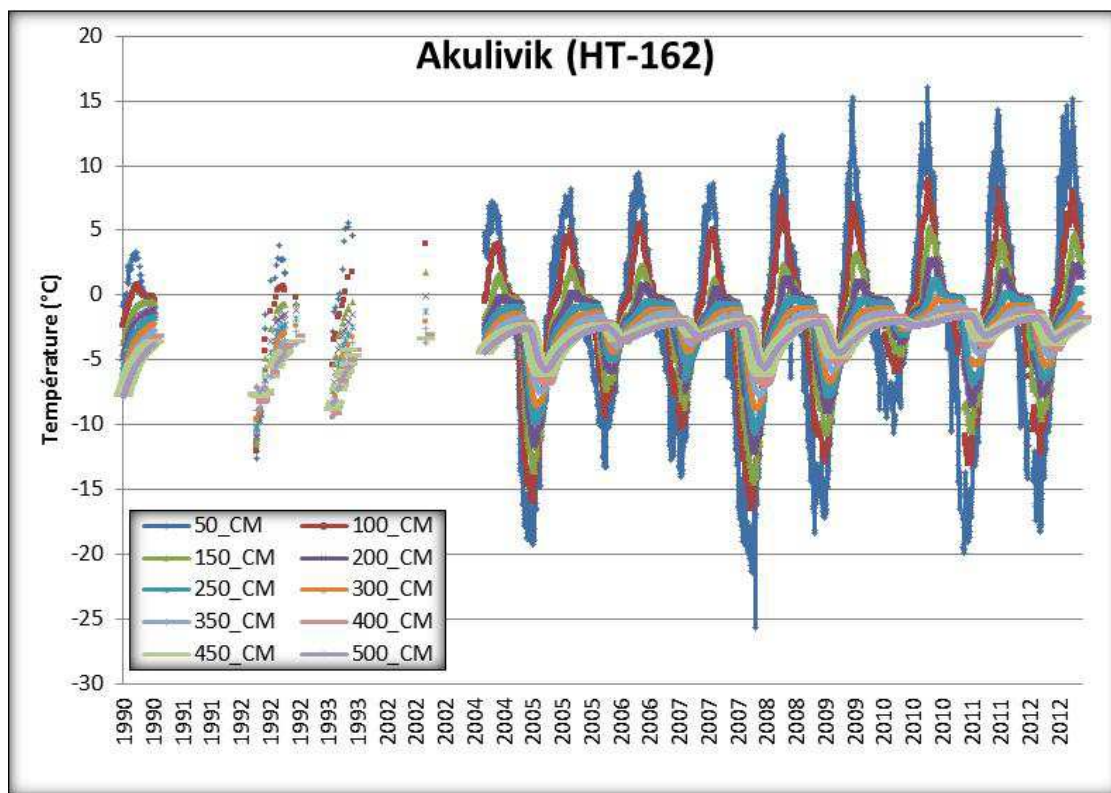


Figure 47 Données totales de HT162 à Akulivik.

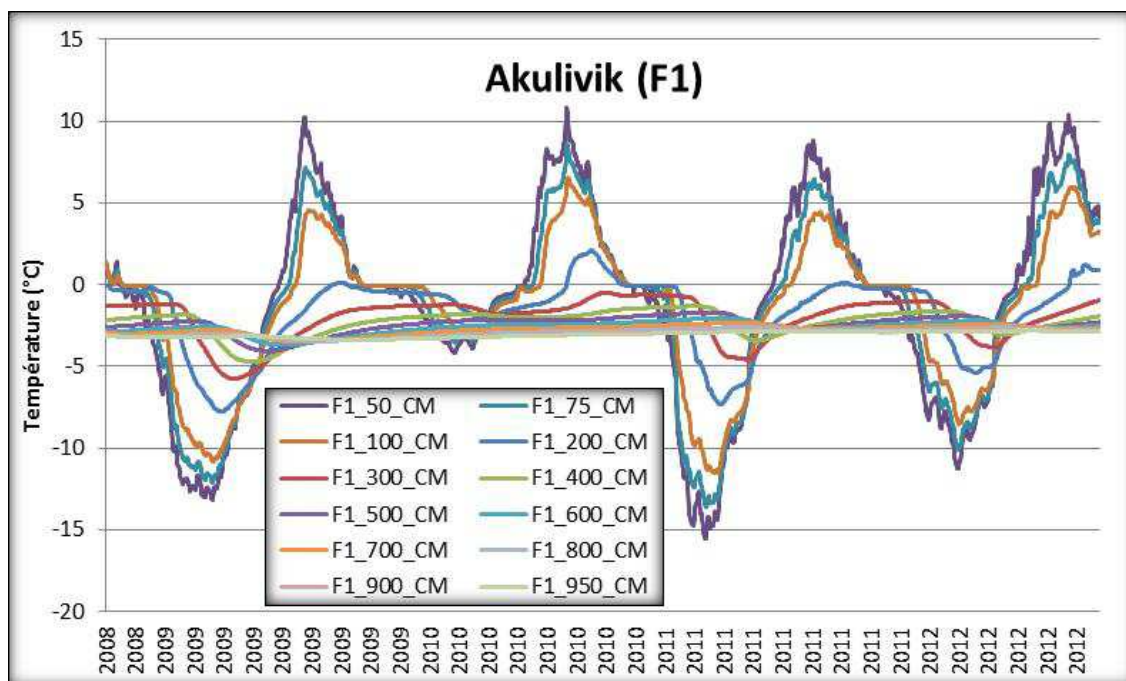


Figure 48 Données totales pour F1 à Akulivik.

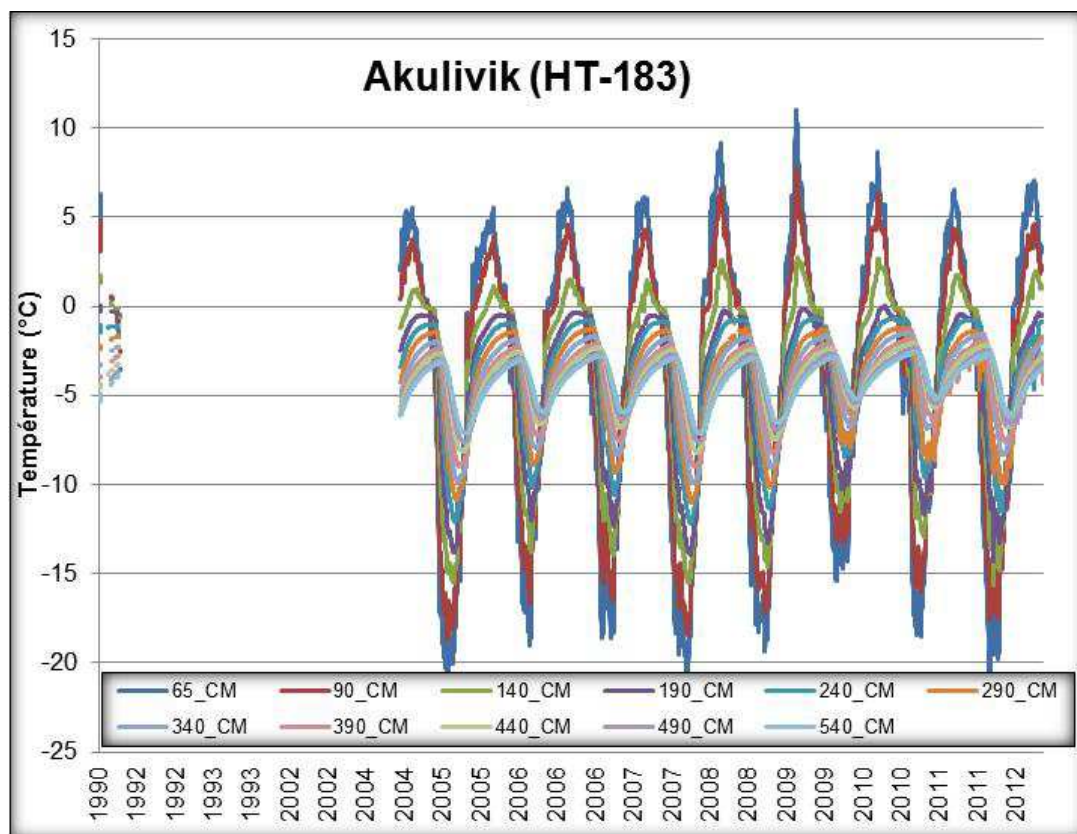


Figure 49 Données totales pour HT183 à Akulivik.

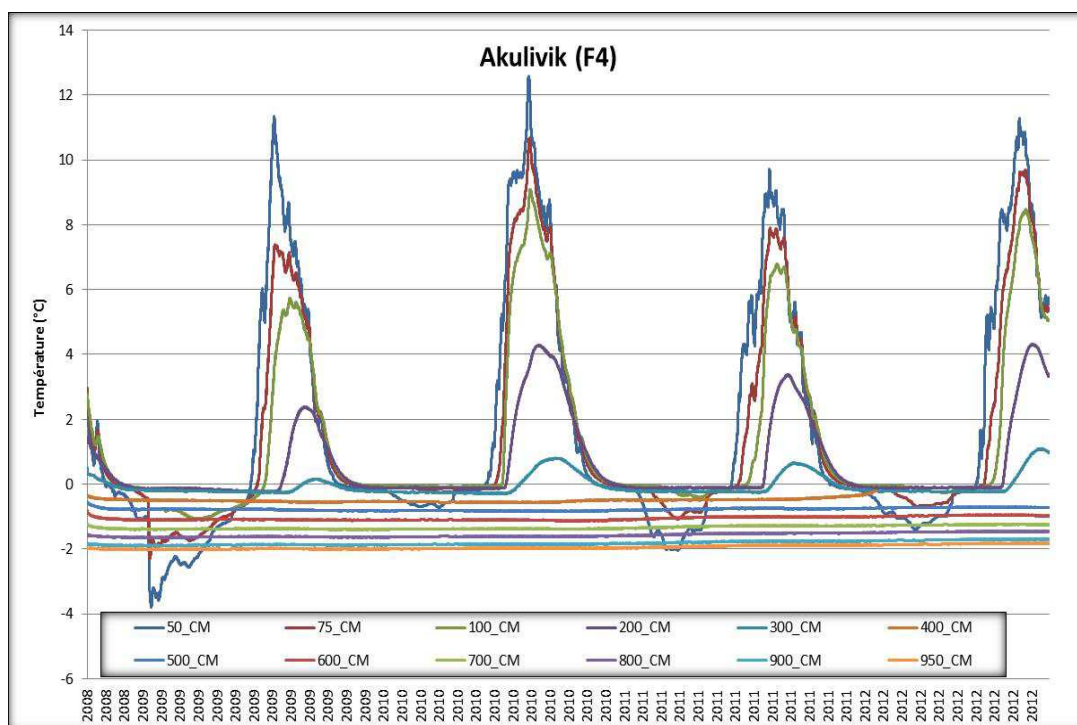


Figure 50 Données totales pour F4 à Akulivik.

3.3.4.2 Printemps

Des données ciblées provenant du câble à thermistances situé dans la piste (HT-183) sont présentées à la figure 51. Ce graphique vise la période du mois d'avril au mois de juin. Cette période correspond à la période où les températures transitent au-dessus du point de congélation. Une transition rapide des températures au-dessus du point de congélation provoque la fonte rapide du couvert nival. Ce phénomène se distingue dans les profils de température jusqu'à plusieurs mètres de profondeur. Les courbes sont caractérisées par une remontée de quelques degrés en quelques heures du profil. Cette remontée brusque se perçoit bien sur le profil de 2005 (figure 52) où la courbe 2005 (90 cm) bondit de 5°C en moins de 24 heures et tôt en saison. Le printemps 2005 est donc caractérisé comme étant un printemps hâtif tout comme celui de 2006 et 2008. Le printemps 2009 a été tardif tout comme celui de 2007, 2010, 2011 et 2012. La transition des températures dans le remblai de piste est plus graduelle au printemps 2010 alors que la remontée rapide des températures à 90 cm de profondeur est moins importante et beaucoup plus tardive (figure 52). La courbe de 2010 n'est pas caractérisée par une remontée abrupte des températures suite à une fonte rapide.

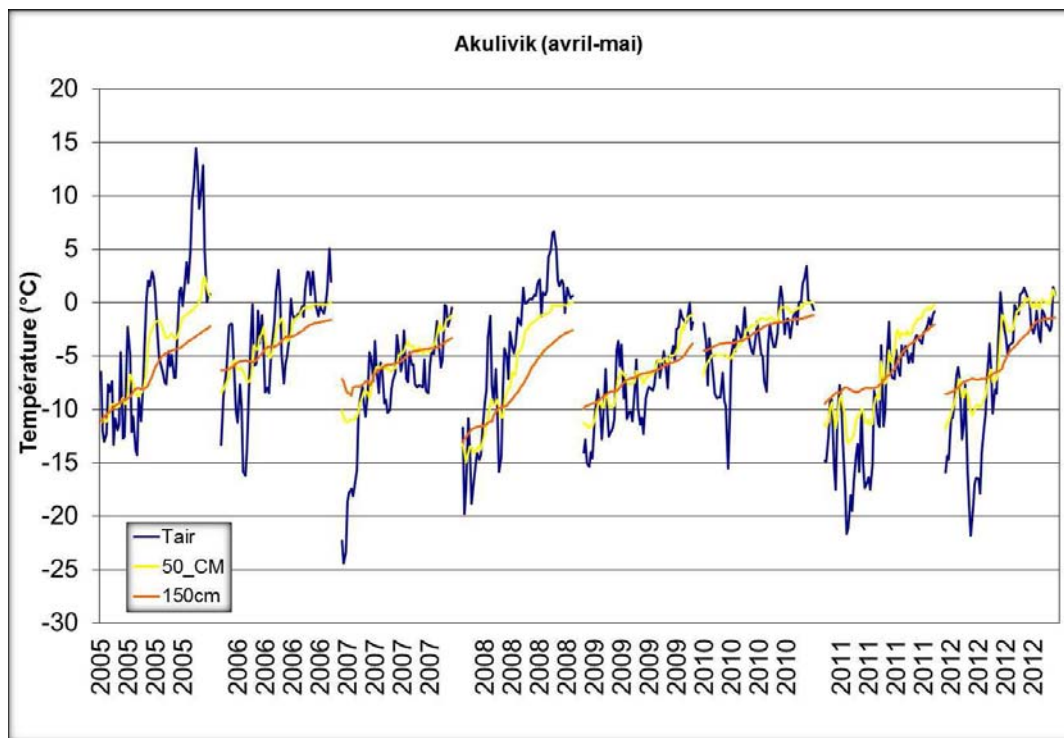


Figure 51 Profil des températures dans la piste au printemps à Akulivik.

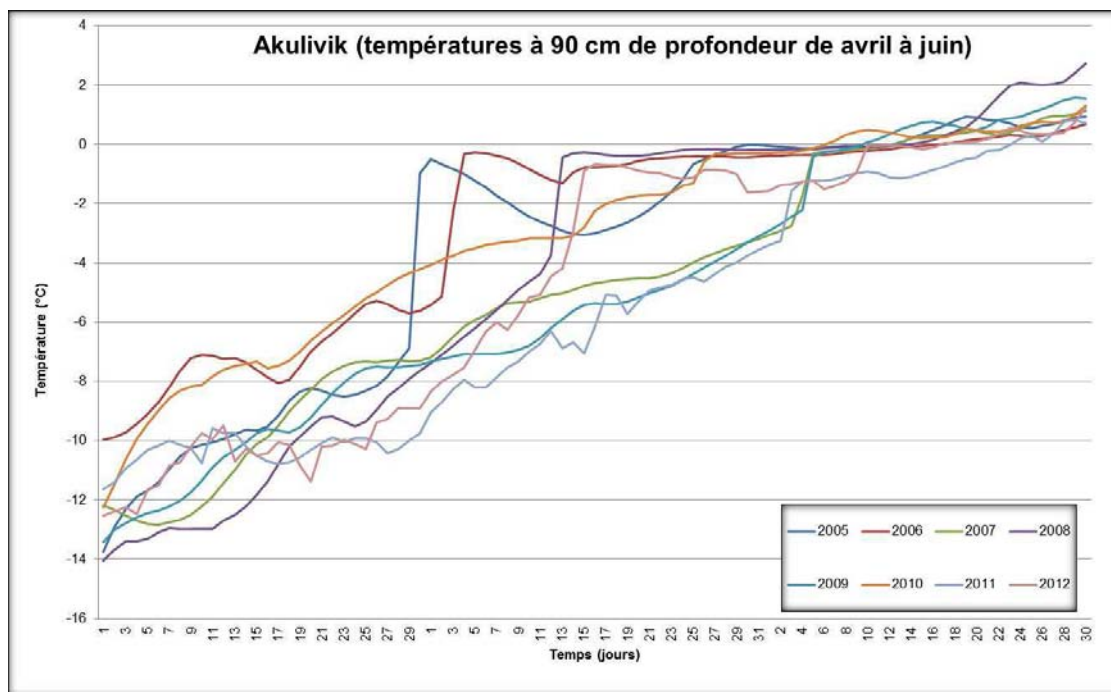


Figure 52 Profil des températures à 90 cm de profondeur à Akulivik.

3.3.4.3 Couche active

Le cumul des degrés-jours de dégel a une influence directe sur l'évolution de la couche active (mollisol). Le nombre plus faible de degrés-jours de dégel en 2007 s'est traduit par une remontée du plafond du pergélisol cette année-là (figure 53). Ce gain s'est effacé en 2008 avec un approfondissement de la couche active. Pour l'année 2009, l'épaisseur de la couche active ou mollisol est demeurée sensiblement la même. La profondeur maximale de dégel en 2009 a été d'environ 240 cm dans le milieu naturel soit une augmentation de 40 cm depuis 2004. Sous la piste, cette augmentation n'a été que de 17 cm. En 2004, le mollisol était estimé à 171 cm tandis qu'en 2009, il a été mesuré à 188 cm. Pour 2010, le mollisol s'est approfondi de près de 50 cm en milieu naturel et plus de 4 cm sous la piste. Le plafond du pergélisol sous le remblai de la piste réagit moins aux fluctuations climatiques interannuelles. Le nouveau câble F1 situé en milieu naturel a enregistré une augmentation de 67 cm de l'épaisseur de sol qui dégèle annuellement. Pour le nouveau câble à thermistances situé près de HT-162 et HT-183, le mollisol mesurait 207 cm d'épaisseur à l'automne 2009. Le câble à thermistance situé près de l'aérogare (F4), le mollisol faisait 321 cm d'épaisseur (figure 54). Selon

certaines informations obtenues auprès d'employés de maintenance de la piste, une importante accumulation de neige est observable à ce site. Ceci viendrait expliquer l'épaisseur plus importante de sol qui dégèle au gré des saisons.

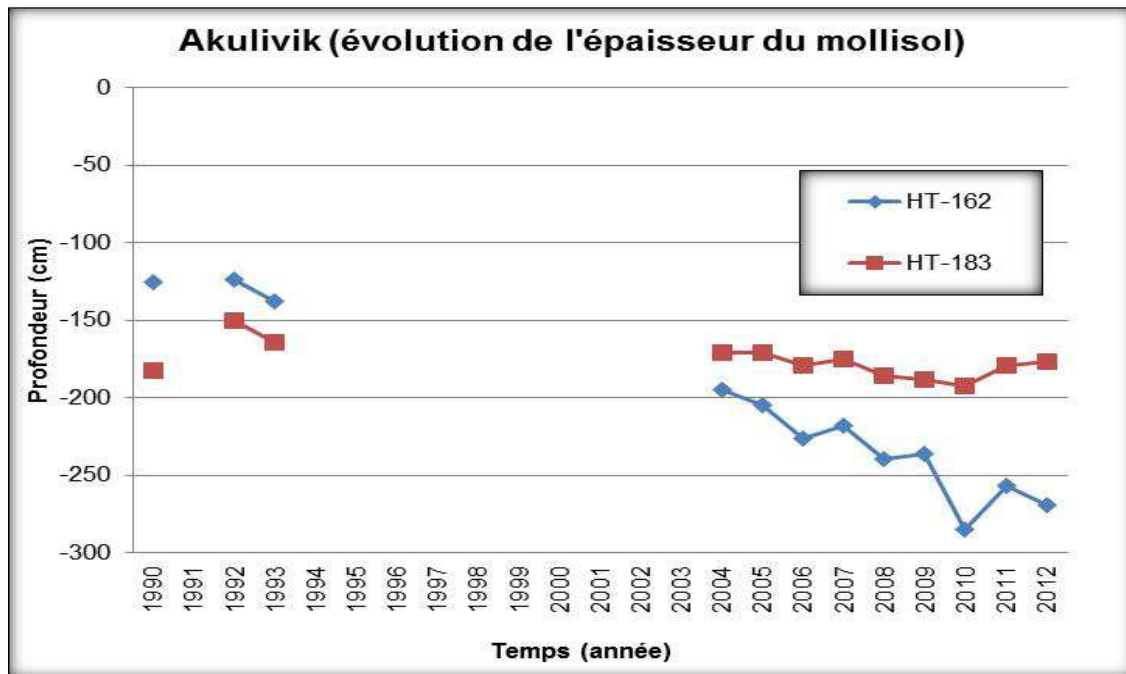


Figure 53 Évolution de la couche active pour Akulivik.

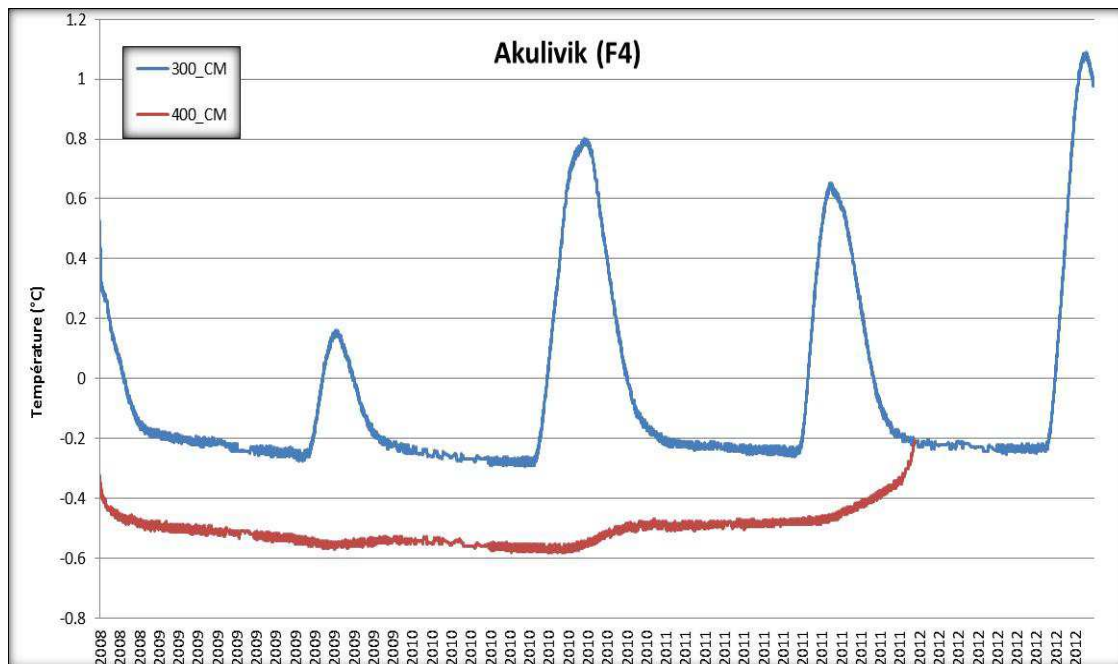


Figure 54 Températures à l'interface de la couche active à Akulivik.

3.3.4.4 Profondeurs ciblées

Suite aux travaux du Ministère en 2008, des données préliminaires proviennent de nouveaux puits de forages. Deux puits ont été instrumentés et automatisés (F1 et F4). Le puits F1 est situé à proximité du câble HT-162, ce qui apporte un élément de comparaison pour évaluer le régime thermique et la stabilité du profil. Les lectures manuelles des forages F2 et F3 indiquent des profondeurs de dégel de 625 cm et 587 cm respectivement (figure 55 et 56) en bordure de la piste. Les mesures ont été faites avec un câble muni d'une (1) thermistance qui a été descendu graduellement dans les puits. Ce procédé n'est pas idéal puisqu'il y a un mélange de l'huile de silicone lors de la descente du câble dans le tuyau. Un suivi est nécessaire afin de valider si la profondeur du mollisol est bel et bien de 600 cm (6 mètres) du côté nord de la piste d'Akulivik comparativement à 200 cm (2 mètres) du côté sud. Seul un câble logé en permanence permettra de valider ces profils. Pour une même profondeur, soit 900 cm (9 mètres), le pergélisol sur le côté sud de la piste serait à -3 °C tandis qu'il n'atteint pas -1 °C sur le côté nord. Le câble F4 est stabilisé depuis son automatisation et présente une température oscillant autour du -1,9°C.

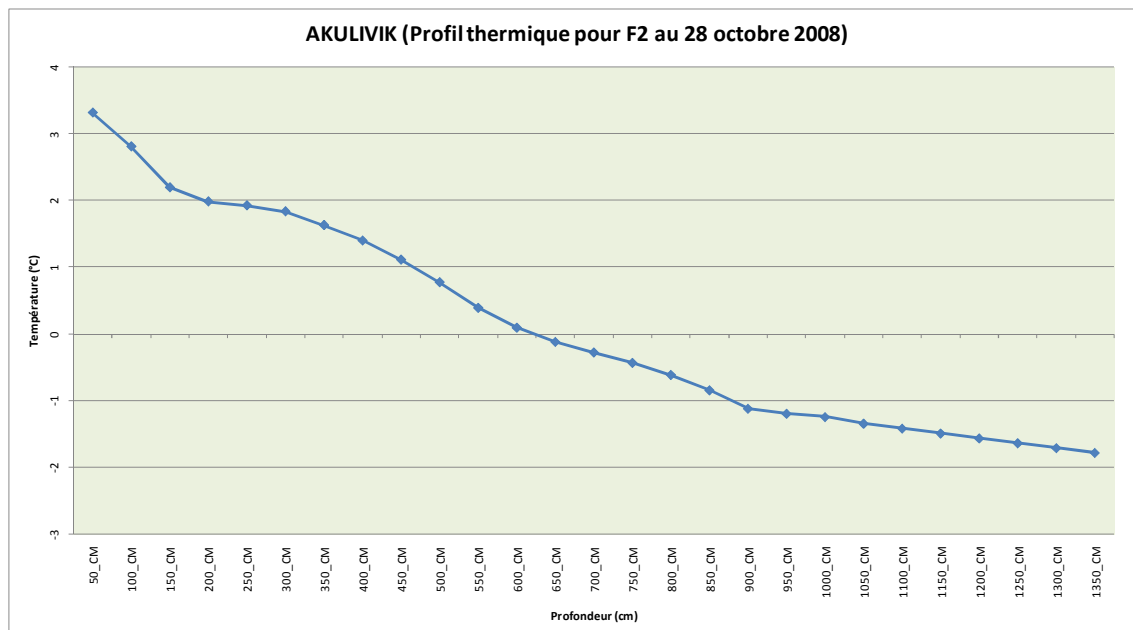


Figure 55 Profil thermique pour F2 au 28 octobre 2008.

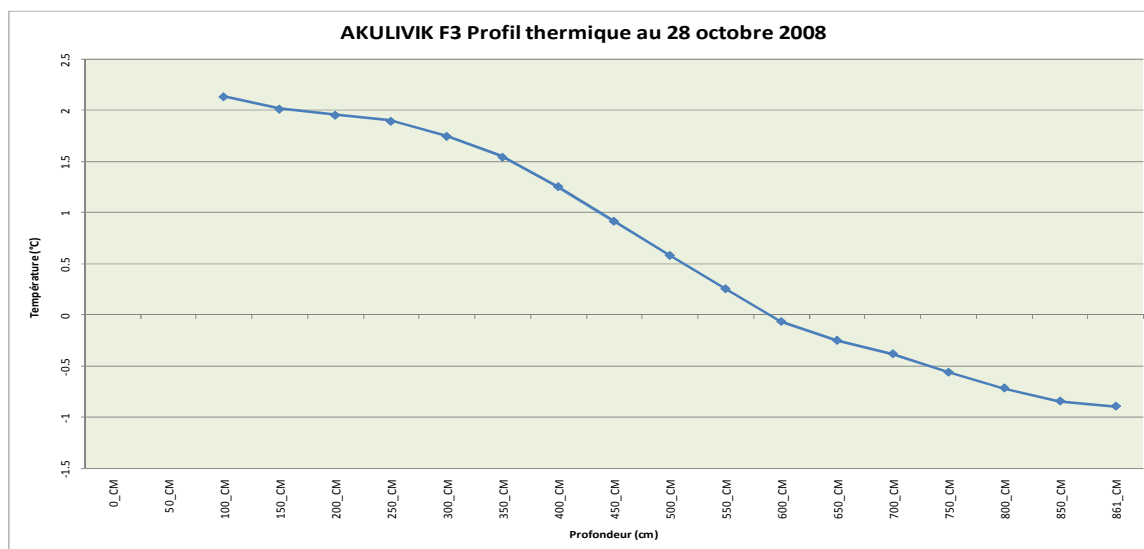


Figure 56 Profil thermique pour F3 au 28 octobre 2008

3.4 SALLUIT

3.4.1 Description

Lors de la construction de la piste de Salluit, cinq câbles à thermistances ont été installés dans le secteur de l'aéroport, soit deux sous la piste et trois dans le roc et le till juste à côté (figure 58). Lors de la campagne de forage du Ministère de 2008, six (6) forages ont été faits à Salluit (figure 59). Aucun de ces trous n'a fait l'objet d'une automatisisation, mais des levés ponctuels ont été effectués.

3.4.2 Localisation

Un câble de 19,75 m, HT155, a été installé en 1987 dans du till, près du lac dans le champ du côté ouest de la piste approximativement au chaînage 2+600 m, soit au sud de la voie de circulation. Près de lui, le câble HT172, de 19,30 m de long, est implanté dans la piste, à 20 mètres du bord ouest; il traverse environ 5,3 m de remblai avant de pénétrer dans le till en dessous. À l'extrémité nord de la piste, le câble HT160 atteint 5 m de profondeur et est situé dans le champ, dans du till mince sur du roc, tandis que HT179 atteint 7,07 m de profondeur sous la piste (figure 57). Ce dernier câble avait été installé en 1987 durant la construction avant que le remblai ne soit déposé sur le sol : le remblai fait 2,3 m d'épaisseur et la première thermistance se retrouve environ 30 cm plus bas à une profondeur estimée à 2,57 m sous la surface de la piste. Cinq (5) nouveaux forages se trouvent à proximité de la piste tandis que le sixième est situé près de la route d'accès menant à l'aéroport (figure 60).



Figure 57 Station à lecture manuelle près du remblai de piste à Salluit.

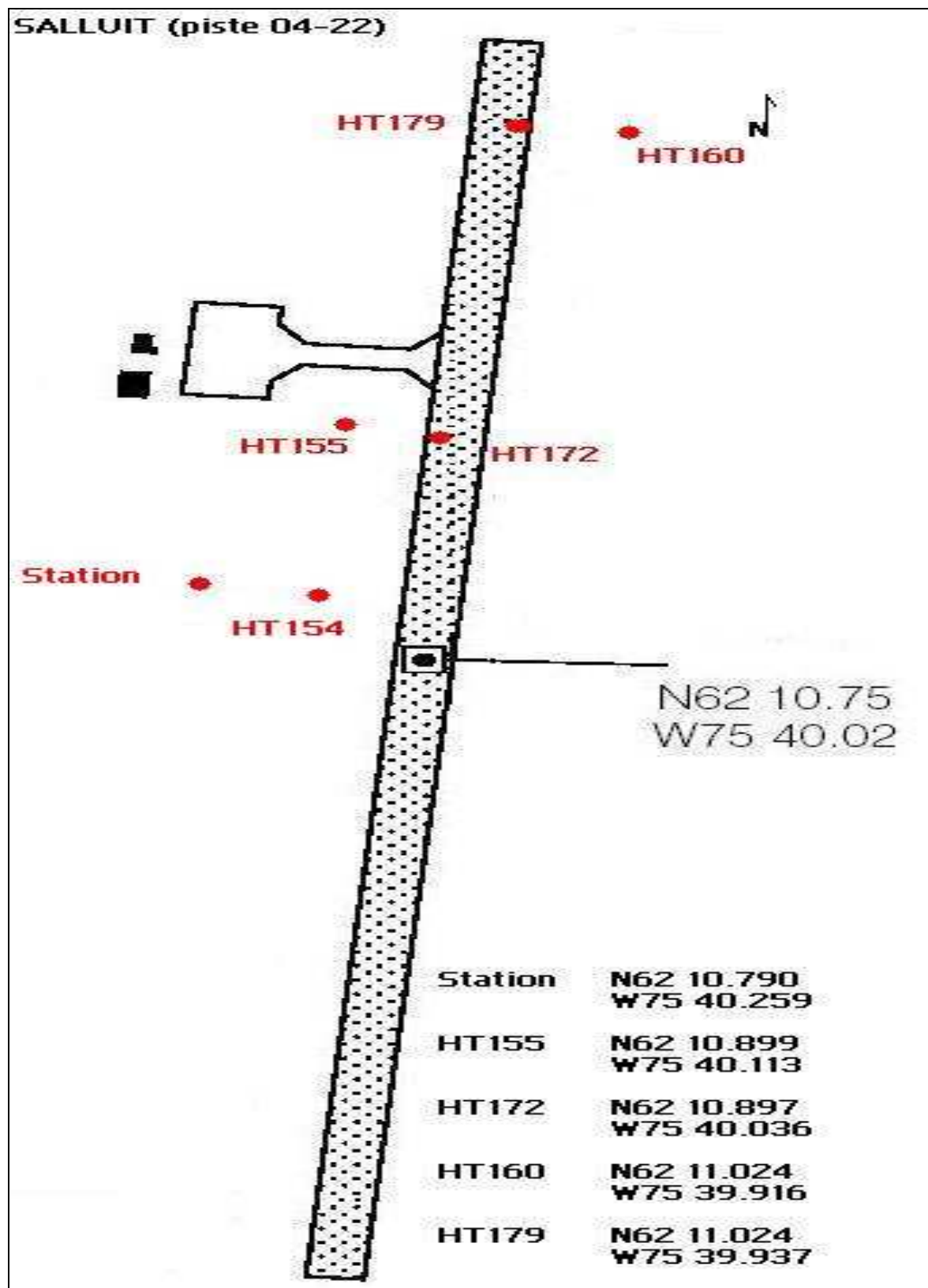


Figure 58 Schéma de localisation des points de lectures à Salluit.

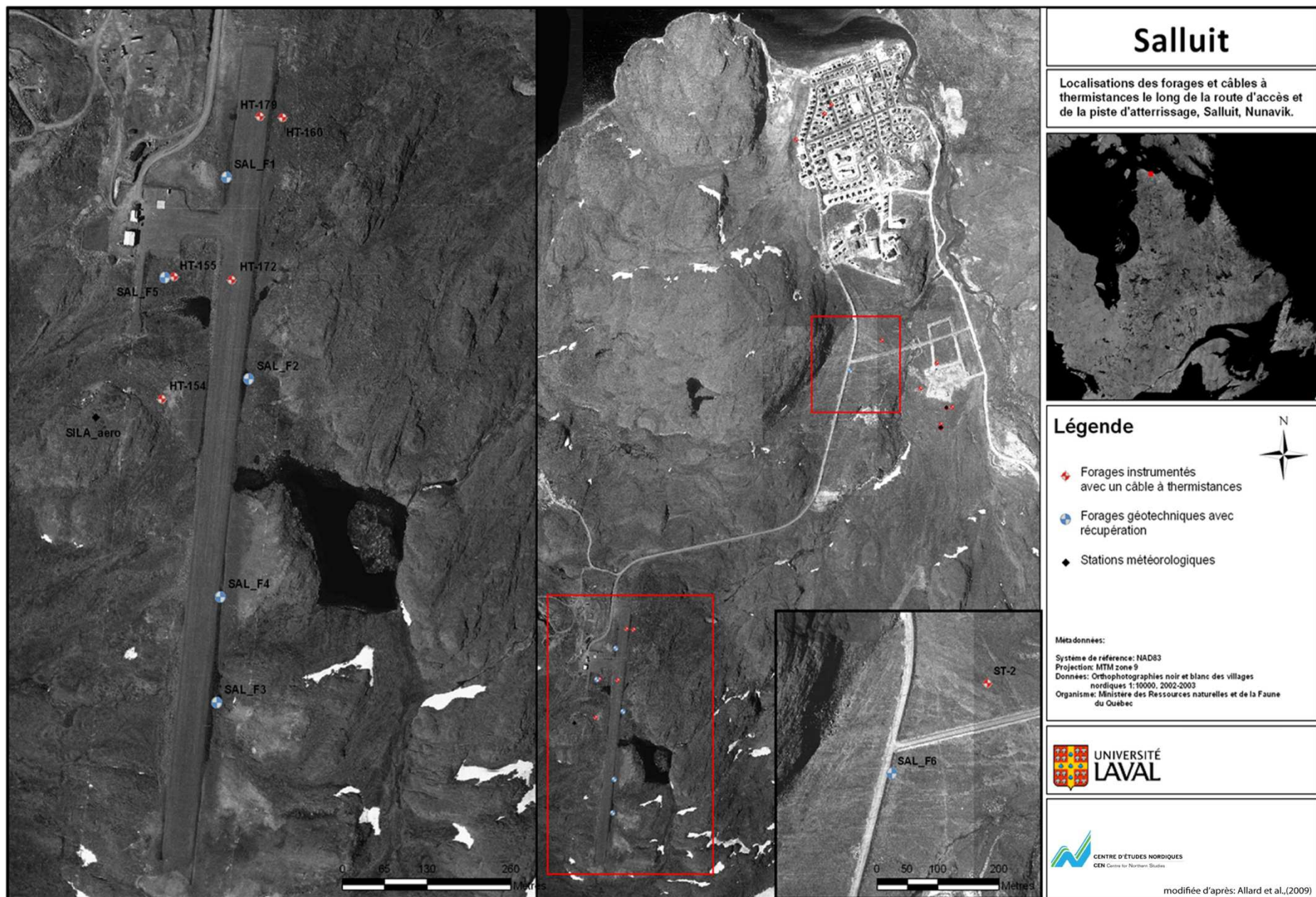


Figure 59 Carte de localisation des forages à Salluit

3.4.3 Températures de l'air

Une station a été installée à l'aéroport en 2002 pour mesurer la température de l'air ainsi que la vitesse du vent et sa direction. Cette station visait à mesurer les conditions sur les hauts plateaux pour ensuite comparer avec les données de la station située en fond de vallée. Malheureusement, cette station a subi un bris d'équipement à l'automne 2007 et en 2008. Les données manquantes sont comblées par celles issues de la station du village. Un hiatus dans les données subsiste toujours pour décembre 2007 et janvier 2008. Il faut en tenir compte lors des interprétations.

3.4.3.1 Moyennes mensuelles

Les températures moyennes mensuelles et annuelles paraissent au tableau 13 avec des données depuis la mise en service de la station en 2002. Les valeurs maximales (orange) et (jaune) ont été surlignées sur le tableau afin de repérer rapidement les valeurs extrêmes. L'année 2010 présente une variation à la hausse de plus de 3°C pour la moyenne annuelle. Il y a une forte variation des moyennes printanières pour les années 2005, 2006 et 2010 (figure 60). La moyenne annuelle est passée de -8,85°C en 2004 à -7°C l'année suivante pour se retrouver à -5,6°C en 2006 et -2,98°C en 2010. Pour 2011, la moyenne annuelle s'établit à -7,19°C. Cette valeur a été obtenue pour les données de l'aéroport en 2011 alors qu'au centre du village de Salluit, les données sont légèrement plus élevées. Sur le graphique à la figure 60, le mois de juillet 2009 se démarque des autres courbes avec une moyenne mensuelle de 12,54°C. Les mois de janvier, février, avril, août et septembre 2010 sont ceux présentant les moyennes les plus élevées depuis l'automatisation du site de Salluit en 2002 (tableau 13). Selon les données d'Environnement Canada pour Inukjuak et Kuujuaq, les mois d'octobre à décembre ont également été au-dessus des normales climatiques. Le mois de janvier 2011 a cumulé une moyenne mensuelle de -16,61°C, ce qui représente la moyenne la plus élevée pour un mois de janvier. Pour 2012, c'est le mois de juin qui présente la moyenne mensuelle la plus élevée de son groupe.

Table 13 Tableau des moyennes mensuelles pour Salluit.

Moy. Mensuelles	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janvier		-20.49	-24.19	-28.76	-22.36	-21.9	-23.07	-22.30	-19.27	-16.61	-24.90
Février		-29.65	-22.37	-24.40	-22.20	-19.4	-24.96	-22.10	-17.82	-24.80	-23.01
Mars		-24.70	-23.93	-17.50	-14.44	-21.2	-21.38	-19.74	-15.49	-21.77	-20.75
Avril		-12.72	-14.71	-8.31	-8.25	-9.69	-8.45	-10.59	-5.83	-14.24	-12.63
Mai		-1.69	-4.85	-1.46	-1.39	-5.3	1.03	-5.76	-1.26	-4.74	-2.82
Juin		2.07	1.42	3.75	2.94	3.423	5.72	3.82	3.96	2.95	6.65
Juillet		8.21	7.21	8.59	9.22	9.706	10.50	12.52	10.29	9.27	8.95
Août	8.46	7.67	6.35	7.79	8.01	9.897	10.34	8.04	11.74	9.19	8.59
Septembre	2.42	4.03	2.50	2.75	3.11	2.796	3.05	3.33	6.28	2.02	3.65
Octobre	-1.70	-1.66	-1.30	0.01	-0.82	-1.42	-0.06	-2.87	1.52	-2.30	
Novembre	-10.39	-6.97	-8.64	-7.97	-7.48	-9.7	-8.37	-6.47	-2.57	-7.93	
Décembre	-16.46	-14.18	-23.68	-17.43	-14.17	-18.9	-20.31	-11.34	-7.31	-17.37	
Moyenne Annuelle		-7.51	-8.85	-6.91	-5.65	-6.81	-6.33	-6.12	-2.98	-7.19	

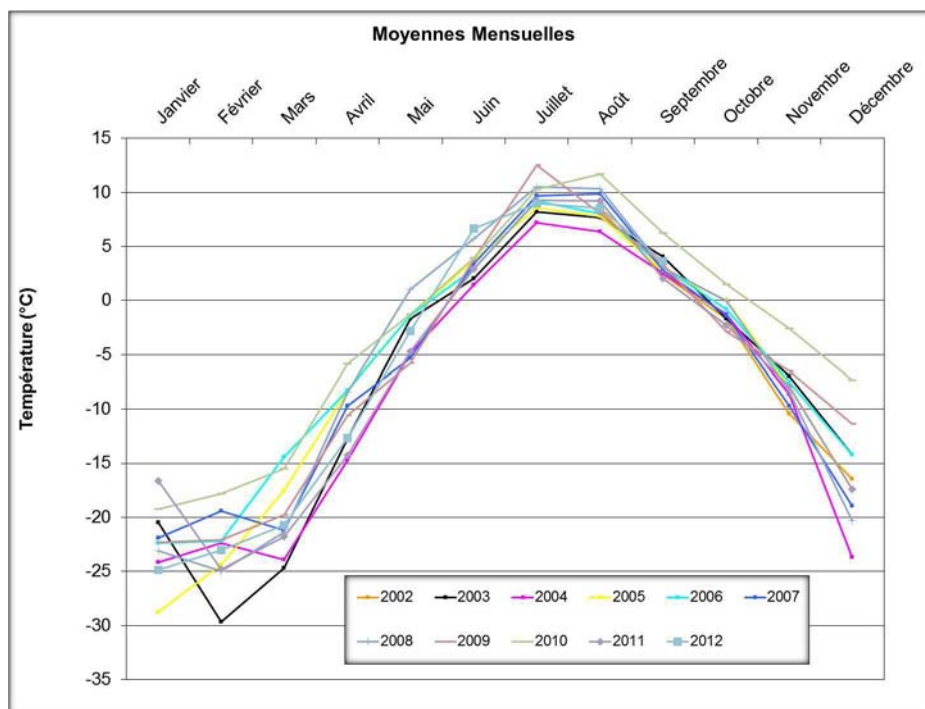


Figure 60 Graphique des températures moyennes mensuelles pour Salluit.

3.4.3.2 Moyennes saisonnières

Le tableau 14 présente les moyennes saisonnières pour Salluit depuis 2002. Le printemps 2009 affiche une moyenne de -6,25°C ce qui le catégorise dans les printemps tardifs tout comme 2004, 2007. Les moyennes pour l'hiver 2007 et le printemps 2008

présentent un hiatus dans la banque de données. Pour l'hiver 2007, ce manquement est important avec 28 moyennes quotidiennes manquantes pour ce calcul. Le calcul pour la moyenne saisonnière à l'hiver 2008 se faisait en l'absence de 11 valeurs moyennes. De plus, ce sont parmi les premières journées de la saison, soit les valeurs les plus basses (froides). La figure 61 montre que depuis 2004, les étés sont de plus en plus chauds.

Table 14 Tableau des moyennes saisonnières pour Salluit.

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Printemps		-5.18	-7.34	-3.54	-2.91	-5.56	-1.60	-6.25	-4.88	-8.52	-5.81
Été		8.03	7.01	7.87	8.25	7.70	8.48	8.40	8.99	7.40	7.79
Automne	-6.21	-4.05	-6.81	-4.57	-3.86	-7.69	-6.90	-6.49	-3.08	-6.73	
Hiver	-23.36	-22.20	-23.45	-18.84	-21.30	-23.11	-22.42	-17.29	-21.24	-23.27	

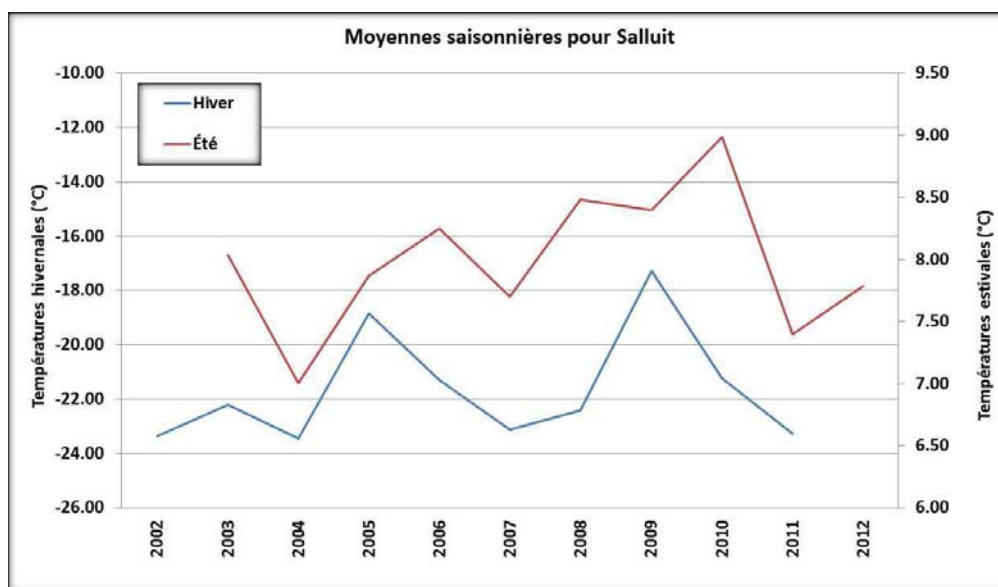


Figure 61 Moyennes saisonnières pour Salluit.

3.4.3.3 Moyennes quotidiennes

La figure 62 présente les températures quotidiennes moyennes de l'air. En prenant les données maximales et minimales horaires, les tendances semblent similaires. En effet, il y a une faible variabilité des températures maximales, minimales et moyennes. Très peu de différences sont perceptibles entre les valeurs moyennes enregistrées et les extrêmes. L'emplacement de la station est sans doute en cause et expliquerait la faible amplitude des valeurs extrêmes enregistrées. La station est située à l'aéroport sur les

hauts plateaux entourant Salluit. Le vent y souffle de façon constante et de manière soutenue. Les données provenant du village sont, quant à elles, davantage contrastées. Le hiatus de données a été comblé par les données provenant de la station située dans Salluit 2 plus près du village dans le fond de la vallée.

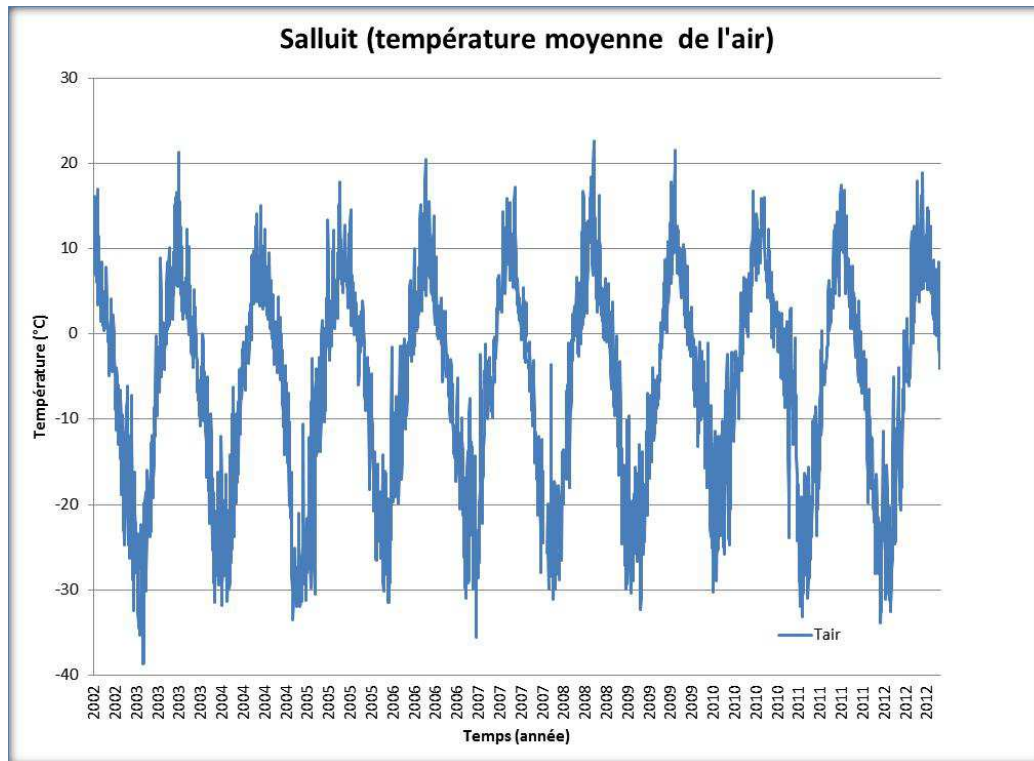


Figure 62 Température moyenne de l'air pour Salluit

3.4.3.4 Seuils

Le tableau 15 affiche le nombre de journées où la température est demeurée sous -20 °C ou bien supérieure à 15 °C. On aperçoit qu'il y a une certaine variabilité à l'hiver avec un décompte de jours où la température atteint -20 °C qui fluctue entre 63 jours pour 2007 et 104 jours en 2008. L'hiver 2010 a donc présenté beaucoup moins de journées où la température est demeurée sous -30 °C. Une tendance s'observe depuis le début des enregistrements soit qu'il y a une diminution du nombre de journées où la température atteint -30°C. Pour les températures positives, il y a également une augmentation du nombre de journées présentant une moyenne au-dessus des 15°C et 20°C. Un total de 18 journées a été recensé pour avoir atteint le cap des 20°C en 2008.

Table 15 Cumul des journées en fonction de seuils pour Salluit.

	<-30°C	< -20 °C	> 15 °C	> 20 °C
2002			10	3
2003	33	93	19	8
2004	30	94	13	4
2005	36	97	20	5
2006	4	70	21	7
2007	21	63	17	2
2008	18	104	38	18
2009	14	96	26	12
2010	4	65	34	7
2011	25	82	31	7
2012	27	104	24	6

3.4.3.5 Degrés-jours (gel-dégel)

Le décompte des degrés-jours de gel et des degrés-jours de dégel est rapporté annuellement sous forme de tableau. L'année 2008 présente la plus grosse somme de degrés-jours de dégel avec 997 suivi de près par 2010 avec 920 et 2009 avec 870 (tableau 16). L'hiver 2002-2003 est celui ayant cumulé le plus de degrés-jours de gel avec un total de 3606 suivi de 2004-2005 avec 3537 et 2003-2004 avec 3482 degrés-jours de gel. Les hivers 2007-2008 et 2009-2010 sont ceux ayant cumulé le plus faible nombre de degrés-jours de gel avec 2497 et 2478 respectivement. L'année 2010 a enregistré un cumul de plus de 1104 degrés-jours de dégel ce qui représente plus de 500 degrés-jours de dégel de plus qu'en 2004.

Table 16 Tableau du cumul des degrés-jours.

	Gel	Dégel
2003	3606	743
2004	3482	589
2005	3537	805
2006	2905	780
2007	3225	676
2008	2497	996
2009	3340	870
2010	2478	1104
2011	2792	866
2012	3419	871 en date

Si on place les données sous forme de graphique, il est possible de suivre l'évolution du cumul des degrés-jours de gel (figure 63). L'évolution temporelle du cumul met en lumière les fluctuations sur une base saisonnière. Le début et le cœur de l'hiver 2004-2005 ont été particulièrement froids avec une forte croissance des degrés-jours de gel. La courbe en vert sur le graphique montre bien l'écart en cours de saison. L'hiver 2002-2003 présente une courbe différente où la croissance accrue du cumul s'est principalement produite à partir de février (figure 63). Le retard de 2010-2011 est perceptible dès le mois de novembre et s'amplifie au gré de la saison.

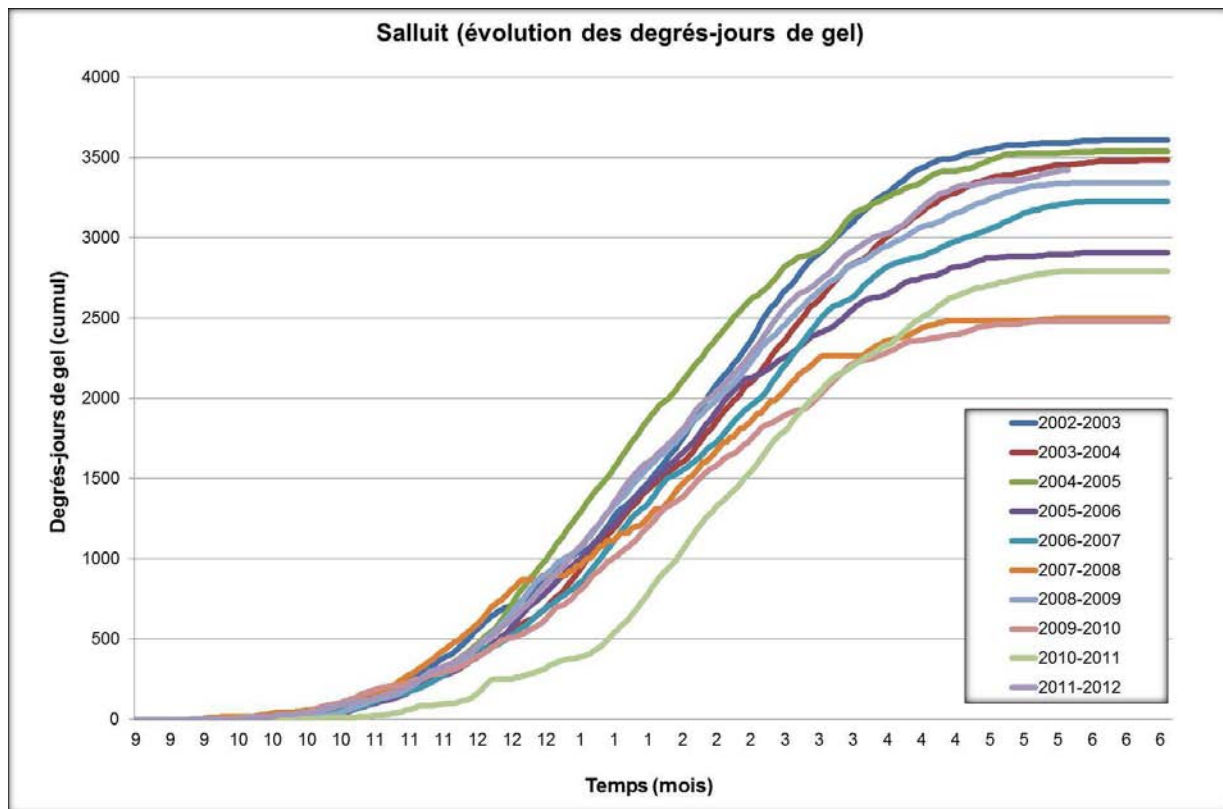


Figure 63 Évolution des degrés-jours de gel pour Salluit.

La somme des degrés-jours de dégel se rapporte sur une saison plus courte où la variabilité est plus importante en début de saison (figure 64). L'amorce printanière, c'est-à-dire le moment où les températures positives commencent à s'accumuler, est très différente d'une année à l'autre. Les printemps 2003, 2005, 2006, 2008 et 2010 ont été hâtifs avec un début de cumul situé entre le 15 et le 20 mai. Les années 2004, 2007, 2009 et 2011 ont enregistré un cumul des degrés-jours de dégel débutant le 8 et le 13

juin soit plus de trois (3) semaines de différence. L'année 2010 se démarque bien des autres avec un cumul bien au-dessus des années précédentes à cause de vagues de chaleur en juillet et en août.

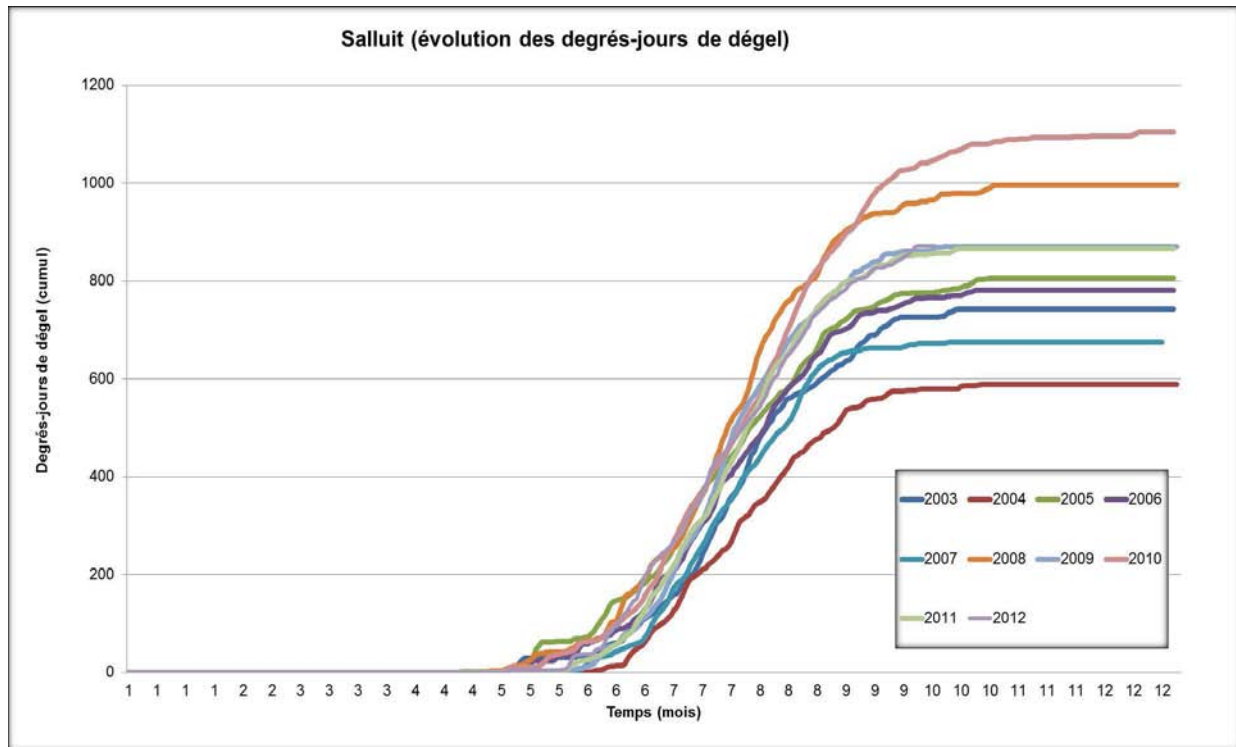


Figure 64 Évolution des degrés-jours de dégel pour Salluit.

3.4.4 Températures du sol

3.4.4.1 Données totales

Les figures 65 à 68 présentent les données totales pour les câbles à thermistances situés près de la piste à Salluit.

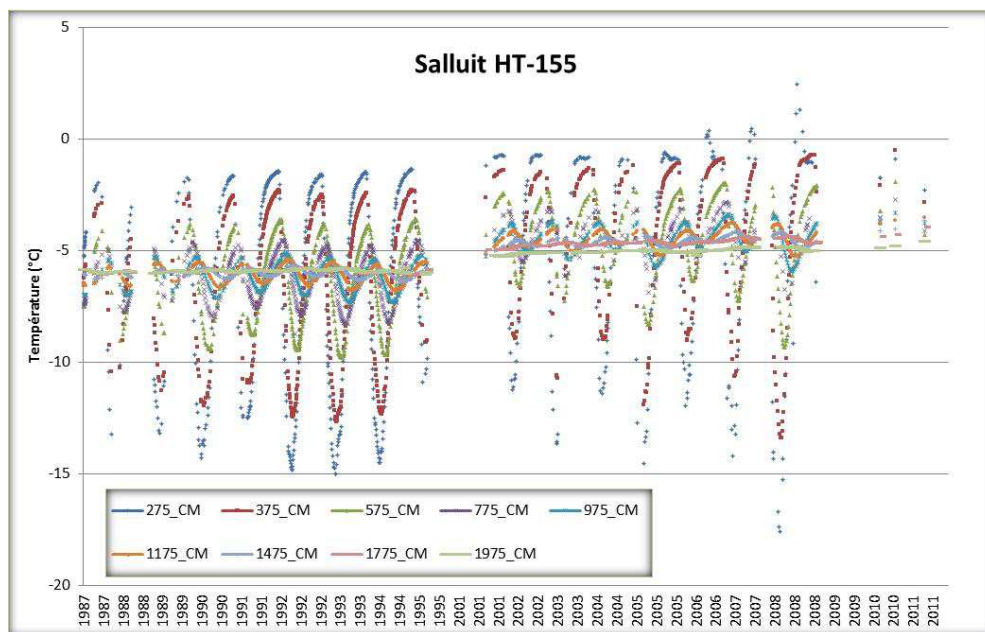


Figure 65 Températures à Salluit pour HT-155

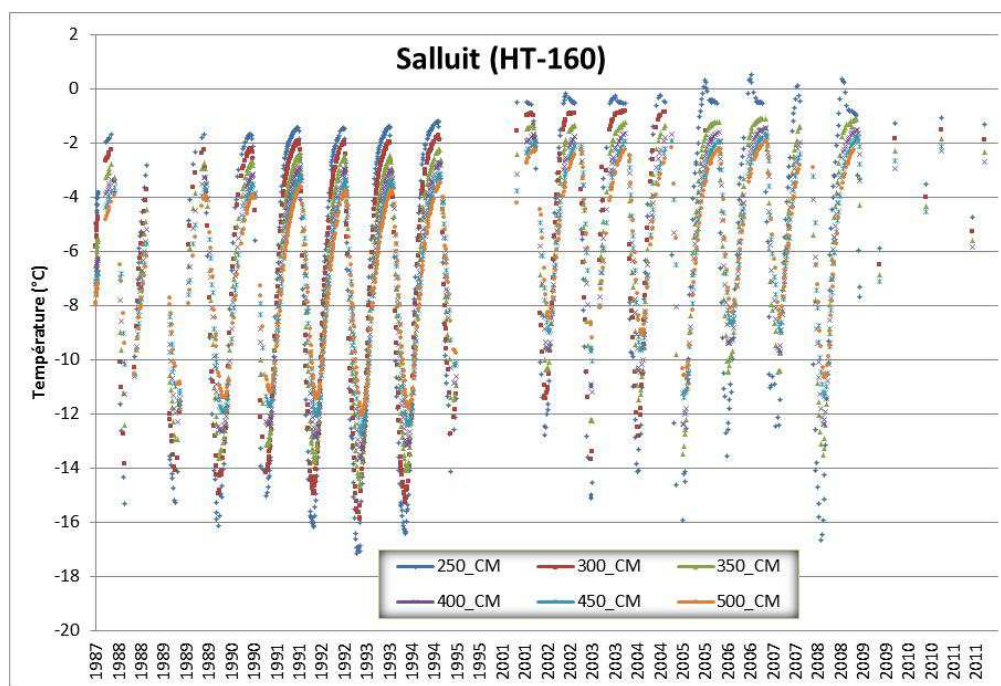


Figure 66 Températures à Salluit pour HT-160

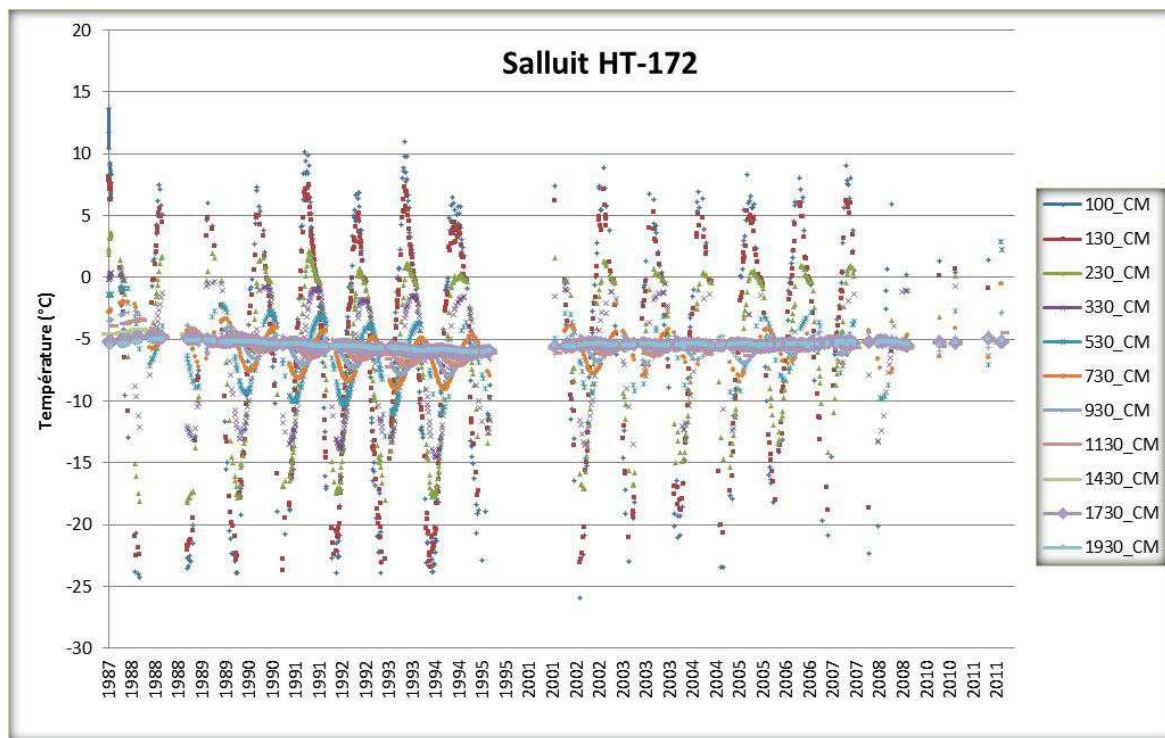


Figure 67 Températures à Salluit pour HT-172

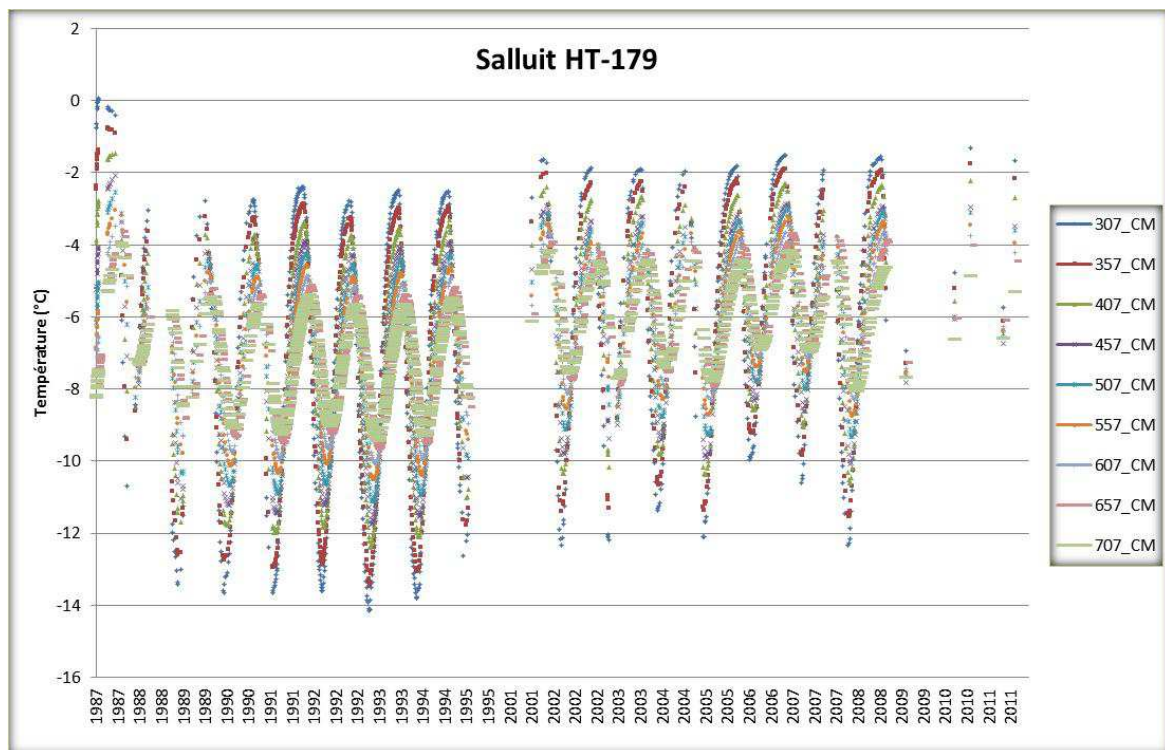


Figure 68 Températures à Salluit pour HT-179

3.4.4.2 Printemps

3.4.4.3 Couche active

L'augmentation de la couche active s'est poursuivie en 2008 après un léger ralentissement en 2007. La tendance demeure la même, peu importe le site (HT-155 et HT-160) (figures 69 et 70). Dans la piste, la profondeur de la couche active semble relativement stable. En milieu naturel par contre, l'approfondissement de la couche active (mollisol) est important. Pour les deux sites instrumentés, la profondeur de dégel a augmenté d'un mètre (figure 70). La profondeur de dégel est passée d'environ 150 cm à 250 cm en un peu plus d'une décennie. Présentement, il y a un mètre de sol de plus qui dégèle comparativement au début des années 1990. Le mollisol atteint une profondeur de 250 cm et plus pour les deux sites en milieu naturel. Les nouveaux seuils atteints en 2007 et 2008 se distinguent parfaitement aux figures 69 et 70. Dans la piste, le remblai est relativement épais près du câble HT172 soit plus de 5,3 mètres. Le dégel n'atteint donc pas la surface naturelle du sol.

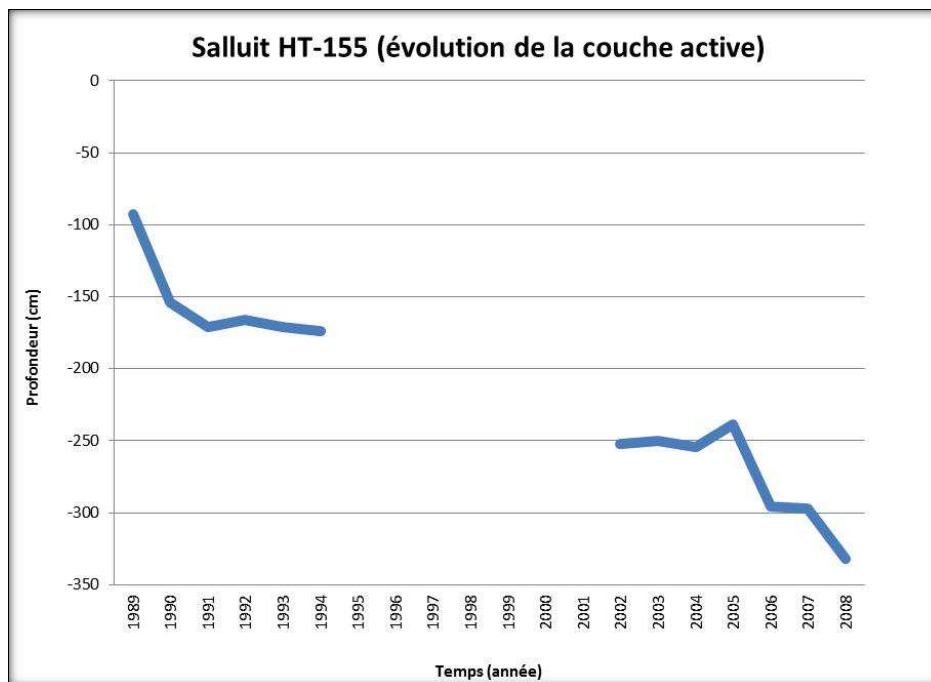


Figure 69 Évolution de la couche active pour HT-155 à Salluit.

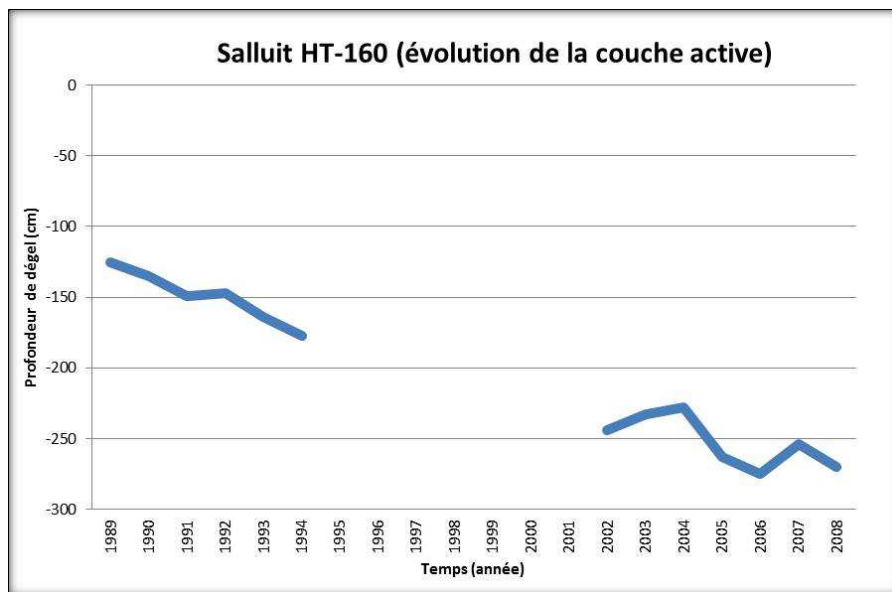


Figure 70 Évolution de la couche active pour HT-160 à Salluit.

3.4.4.4 Profondeurs ciblées

Une série de lectures manuelles provenant des nouveaux forages est présentée dans les graphiques suivants (figure 71 à 75). La localisation des points de forage est donnée à la figure 59. L'épaisseur de sol qui dégèle annuellement (mollisol) varie de 80 cm à 150 cm selon la nature des dépôts de surface. Au-delà de 600 cm (6 mètres) de profondeur, la température est inférieure à -3°C ce qui correspond aux valeurs obtenues par les câbles existants.

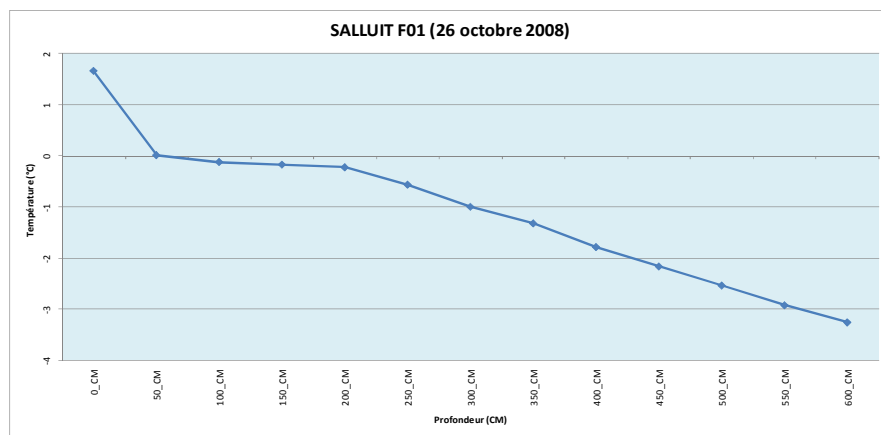


Figure 71 Profil thermique pour F01 à Salluit.

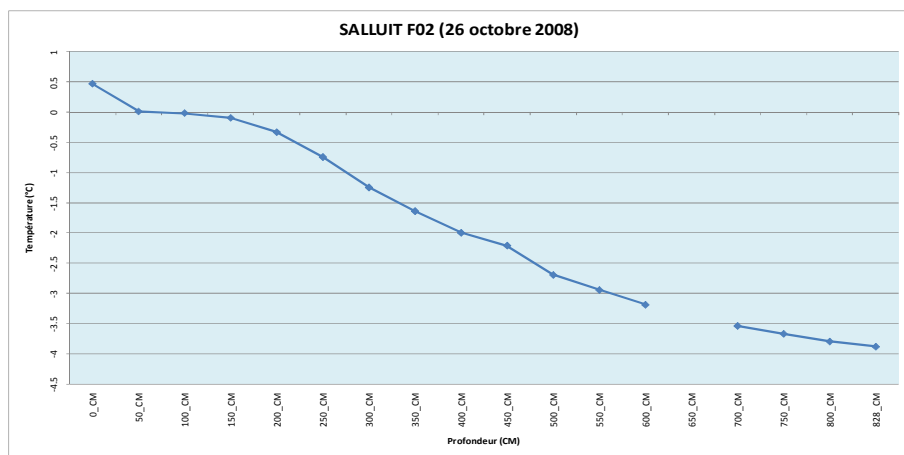


Figure 72 Profil thermique pour F02 à Salluit.

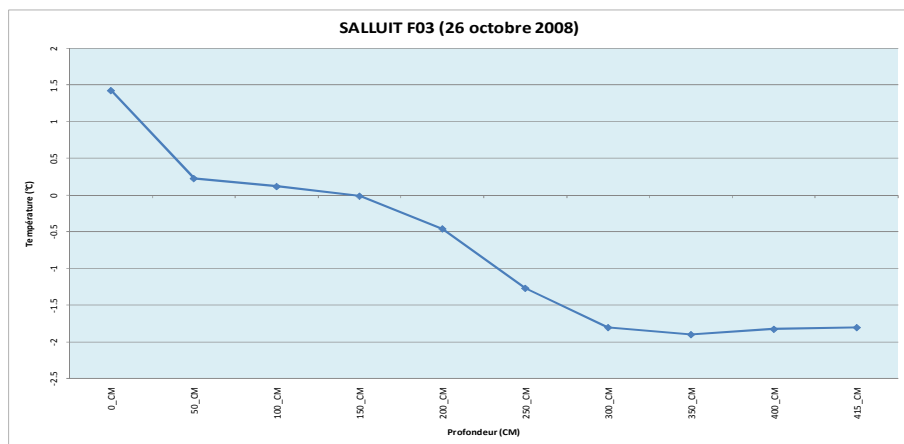


Figure 73 Profil thermique pour F03 à Salluit.

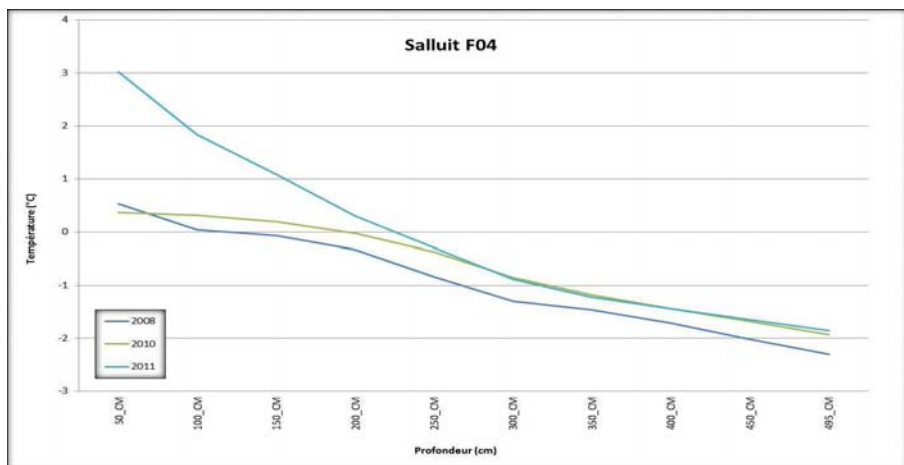


Figure 74 Profil thermique pour F04 à Salluit.

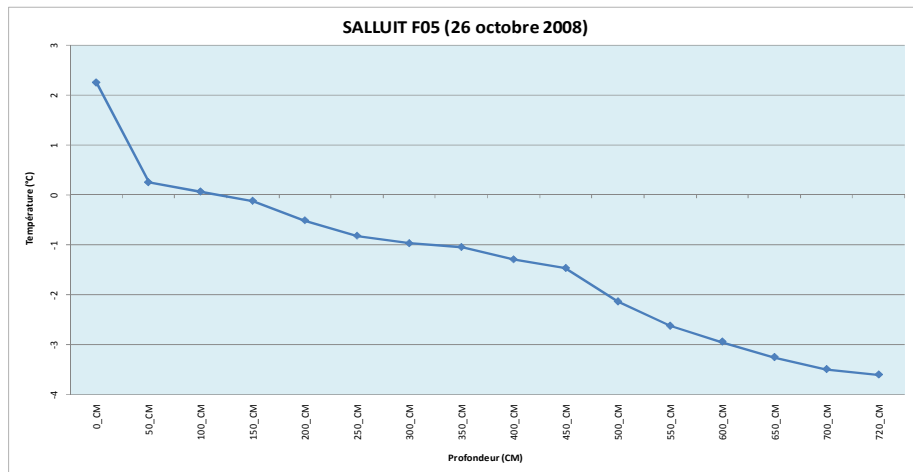


Figure 75 Profil thermique pour F05 à Salluit.

3.5 QUAQTAQ

3.5.1 Description

Quatre câbles à thermistances ont été installés à Quaqtaq (figure 79 et 80). Trois d'entre eux atteignent des profondeurs d'environ 20 m.

3.5.2 Localisation

Le premier est dans le roc (HT158) (figure 78), le second dans les sables et graviers 80 m à l'est de la piste (HT156) (figure 77); le troisième commence dans le remblai à 20 m du bord de la piste et se prolonge dans les sables et graviers en dessous (HT175) (figure 76). Le quatrième câble (HT178) est au chaînage 1+290, dans la piste, à une vingtaine de mètres de l'accotement; la première thermistance était originellement à 50 cm sous la surface de la piste (les opérations de nivellement peuvent avoir enlevé une tranche de matériel de 7 à 8 cm à la surface originale). De là, le câble perce le remblai et le géotextile pour se prolonger jusqu'à une profondeur de 5 m dans le sable silteux en dessous (probablement un till).

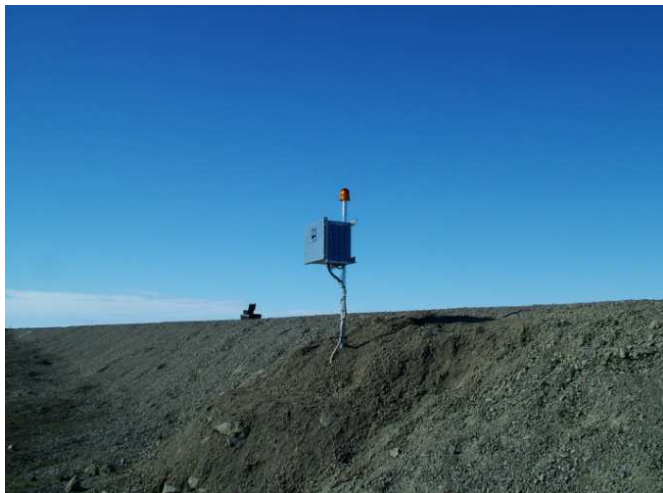


Figure 76 Station sur le remblai à Quaqlaq.



Figure 77 Station dans le milieu naturel à Quaqlaq.



Figure 78 Câble à lecture manuelle à Quaqlaq.

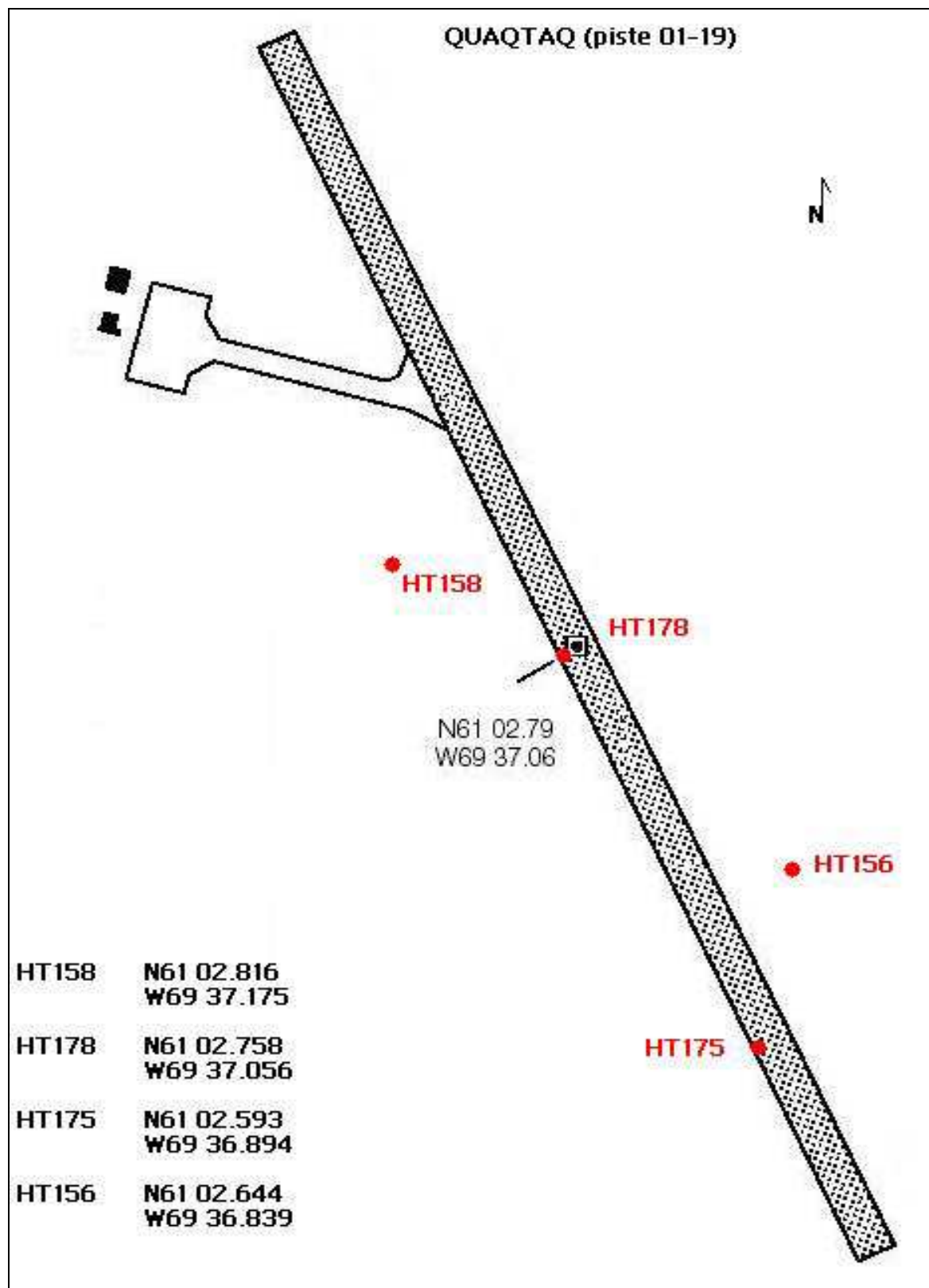


Figure 79 Schéma de localisation des stations à Quaqtac



Figure 80 Carte de localisation des sites instrumentés à Quaqtuaq.

3.5.3 Températures de l'air

3.5.3.1 Moyennes mensuelles

Portées sous forme de tableau, les moyennes mensuelles pour l'année 2010 contrastent avec celles des autres années (tableau 17). La moyenne annuelle s'établit à -2,45°C pour 2010 et -5,75°C pour 2009 et -5,98°C pour 2011. La moyenne annuelle pour 2007 a été de -5,79 °C tandis qu'en 2006, elle était de -3,98 °C et -5,48 °C en 2005. En 2008, la moyenne annuelle pour Quaqtac était à -6,44°C. L'année 2010 présente 7 mois (février, avril, août à décembre) dont les moyennes sont les plus élevées depuis l'automatisation.

Moy. Mensuelles	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janvier		-26.20	-19.34	-17.28	-23.08	-19.97	-16.57	-13.72	-19.76
Février		-20.98	-18.77	-15.72	-23.95	-19.42	-12.89	-22.78	-19.01
Mars		-15.41	-12.63	-18.49	-19.83	-17.28	-14.62	-19.47	-18.17
Avril		-6.19	-6.52	-9.00	-7.95	-10.04	-6.12	-12.89	-9.17
Mai		-0.81	-0.53	-4.45	-0.25	-4.95	-1.26	-4.11	-1.31
Juin		3.66	3.39	2.93	3.28	2.29	3.20	2.62	5.25
Juillet	6.82	5.98	8.92	7.71	8.06	8.00	7.86	8.11	7.48
Août	6.85	8.01	7.30	7.59	7.70	5.53	9.36	6.04	8.39
Septembre	3.51	4.10	4.54	2.96	3.22	3.25	5.48	3.47	4.52
Octobre	0.57	0.82	0.78	-0.76	-0.05	-1.76	2.12	-0.41	1.10
Novembre	-5.08	-5.05	-4.87	-7.06	-6.33	-5.11	-1.32	-5.18	
Décembre	-19.07	-13.64	-10.05	-17.90	-18.06	-9.52	-4.59	-13.47	
Annuelle		-5.48	-3.98	-5.79	-6.44	-5.75	-2.45	-5.98	

Table 17 Moyennes mensuelles pour Quaqtac

Les moyennes mensuelles de la température de l'air sont présentées dans la figure 81 de 2004 à 2010 soit l'étendue des données depuis leur automatisation. Le graphique illustre bien qu'il y a peu de variabilité dans l'amplitude des moyennes mensuelles d'avril à novembre. Seuls les mois de mai 2007 et 2009 se démarquent du groupe avec une moyenne mensuelle inférieure aux autres. La variabilité de l'amplitude des températures de l'air pour Quaqtac se produit de décembre à mars. Quaqtac présente un profil différent comparativement aux sites sur le versant est de la mer d'Hudson. L'été 2008 et 2009 ont été similaires aux précédents tandis qu'on enregistrait de grandes amplitudes estivales du côté de la baie d'Hudson. C'est l'automne 2010 qui se distingue vraiment des autres courbes (bleu clair).

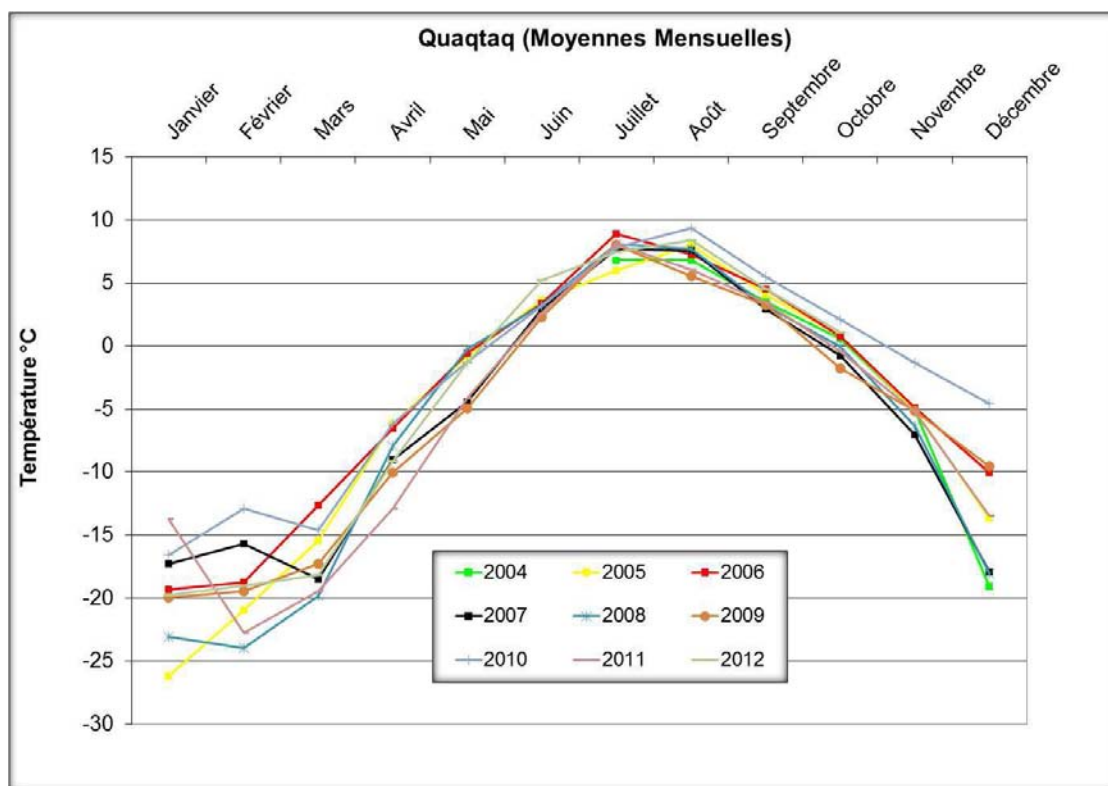


Figure 81 Moyennes mensuelles pour Quaqtaq

3.5.3.2 Moyennes saisonnières

Les moyennes saisonnières sont présentées au tableau 18. Le printemps 2009 a été tardif affichant la moyenne la plus basse depuis 2004. L'été 2010 est la saison qui présente la moyenne la plus élevée avec une moyenne de plus de 7,62°C suivie de 2006 avec 7,20°C et de 2012 avec 6,98°C.

Table 18 Moyennes saisonnières pour Quaqtaq.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Printemps		-4.05	-3.46	-5.38	-3.96	-6.39	-3.82	-6.71	-3.97
Été		6.35	7.20	6.32	6.59	5.88	7.62	6.01	6.98
Automne	-4.75	-3.34	-3.03	-6.10	-5.33	-4.07	-0.33	-4.18	
Hiver	-21.38	-17.52	-17.07	-22.79	-19.80	-14.24	-17.65	-19.23	

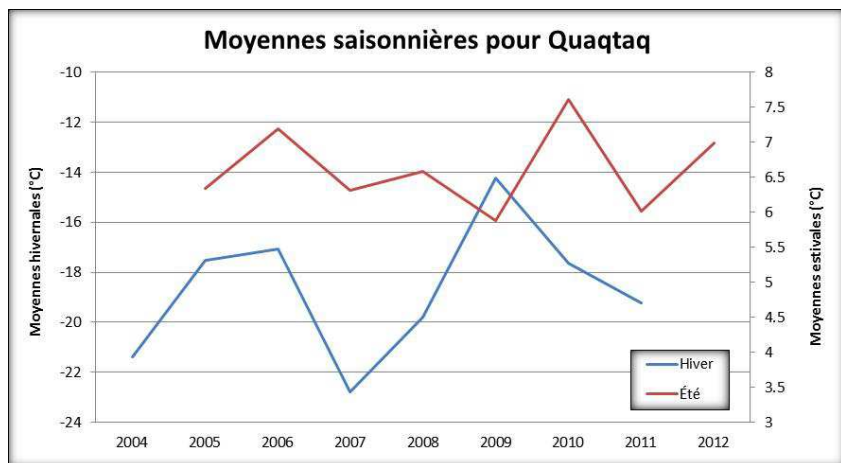


Figure 82 Moyennes saisonnières pour Quaqtq.

3.5.3.3 Moyennes quotidiennes

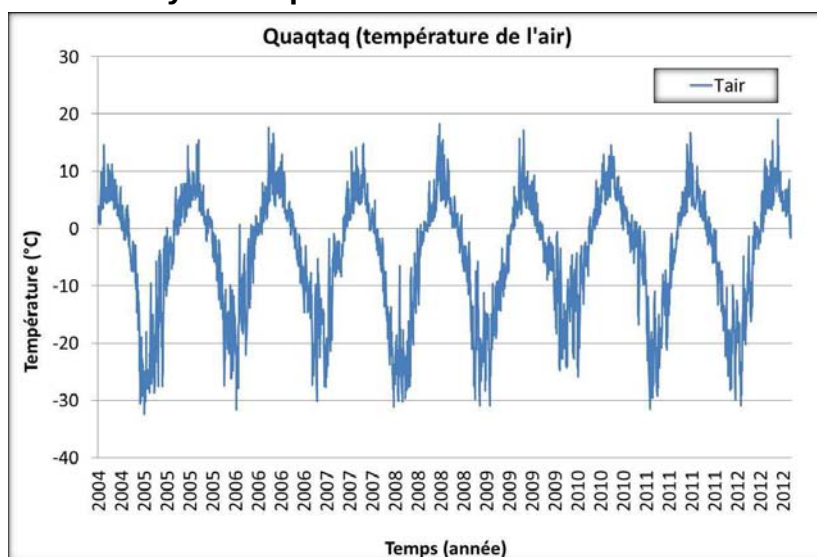


Figure 83 Température de l'air pour Quaqtq

3.5.3.4 Seuils

Le tableau 19 présente le cumul des jours où la température a atteint certains seuils (-30 °C, -20 °C, +15 °C et +20 °C). L'hiver 2010 est celui qui présente le plus petit nombre de jours où la température a atteint -20 °C tandis que l'année 2008 est celle qui en présente le plus. C'est en 2008 que la température a atteint -30 °C le plus grand nombre de fois suivi de près par 2005. Le seuil de -30 °C a été atteint pas moins d'une vingtaine de jours (21). Le minimum horaire enregistré a été de -36 °C le 10 février 2008. Cette journée est suivie de près par le 4 janvier 2008 avec -35,3 °C.

Ce sont d'ailleurs les températures les plus froides enregistrées depuis le début de l'automatisation en juin 2004.

Le nombre de jours où le seuil des 15 °C est atteint a été en croissance constante de 2004 à 2008. De six (6) journées en 2004, le nombre augmente à onze (11) en 2005 et douze (12) en 2006 et 2007. Pour l'année 2008, il y a eu 18 journées où la température a dépassé 15 °C. Cette donnée est sous-représentée lors du calcul des moyennes mensuelles. Il y a eu un total de six (6) journées où la température maximale horaire a atteint et dépassé 20 °C. Le maximum atteint en 2008 est de 24,2 °C le 23 juillet tandis qu'en 2009, ce même maximum (24,2°C) est atteint le 27 juillet. Cette valeur se rapproche du maximum du 5 juillet 2006 qui a été de 24,7 °C. L'année 2009 a vu le nombre de journées au-dessus de 15° diminuer radicalement pour n'atteindre que 8 journées. Il y a également eu moins de journées à l'hiver 2009 où la température franchissait le cap des -20°C. L'année 2009 est donc caractérisée par une plus faible amplitude des températures de l'air. En 2010, les températures n'ont atteint le -30°C qu'une seule fois soit le 23 mars 2010. Toujours en 2010, les températures n'ont pas excédé 20°C. C'est en 2012, que la température excède 15°C un plus grand nombre de jours avec un total de 23. Le 13 août 2012, la température maximale est atteinte avec 26,28°C.

Table 19 Tableau du nombre de jours selon des seuils établis.

	<-30°C	< -20 °C	> 15°C	> 20°C
2004			6	1
2005	20	87	11	4
2006	8	65	12	3
2007	6	53	12	1
2008	21	101	18	6
2009	12	72	8	3
2010	1	38	15	0
2011	17	65	9	1
2012	16	75	23	5

3.5.3.5 Degrés-jours (gel-dégel)

Les basses températures enregistrées en 2008 se traduisent par une augmentation de la somme des degrés-jours de gel. Le total atteint en 2008 est de 3090 degrés-jours de gel ce qui surpasse tous les hivers (tableau 20). L'année 2009 exhibe le deuxième total avec 2930 degrés-jours de gel. Pour le total de degrés-jours de dégel,

2010 affiche un total de 890. En 2009, il n'y a eu que 594 degrés-jours de dégel ce qui est nettement contrasté avec 2010. L'année 2010 affiche donc le plus faible cumul de degrés-jours de gel et le nombre le plus élevé de degrés-jours de dégel.

Table 20 Tableau des degrés-jours pour Quaqtq.

	Gel	Dégel
2004		
2005	2887	743
2006	2327	794
2007	2430	676
2008	3090	717
2009	2930	594
2010	2080	890
2011	2377	645
2012	2649	807 en date

Lorsque les données sont rapportées graphiquement, une évolution des degrés-jours durant la saison est perceptible (figure 84 et 85). La courbe du cumul des degrés-jours de gel en 2008 se distance dès le départ des autres courbes. La courbe débute en octobre 2007 et se termine en mai 2008. Cette période comprend la totalité des journées où un cumul des températures négatives est possible. C'est en novembre et au début du mois de décembre que ce gain est appréciable. La température moyenne mensuelle de l'air pour le mois de novembre 2007 est d'ailleurs -2 °C plus basse que les années précédentes (2004-2005 et 2006). L'hiver 2009-2010 présente la courbe (orange) la plus basse. Le plus haut cumul des degrés-jours de dégel est en 2010. La croissance des degrés-jours de dégel fait toutefois paraître le printemps hâtif de 2005. L'année 2009 est caractérisée par un printemps tardif avec un retard dans le cumul des degrés-jours de dégel et un faible cumul total du nombre de degrés-jours de dégel (figure 85).

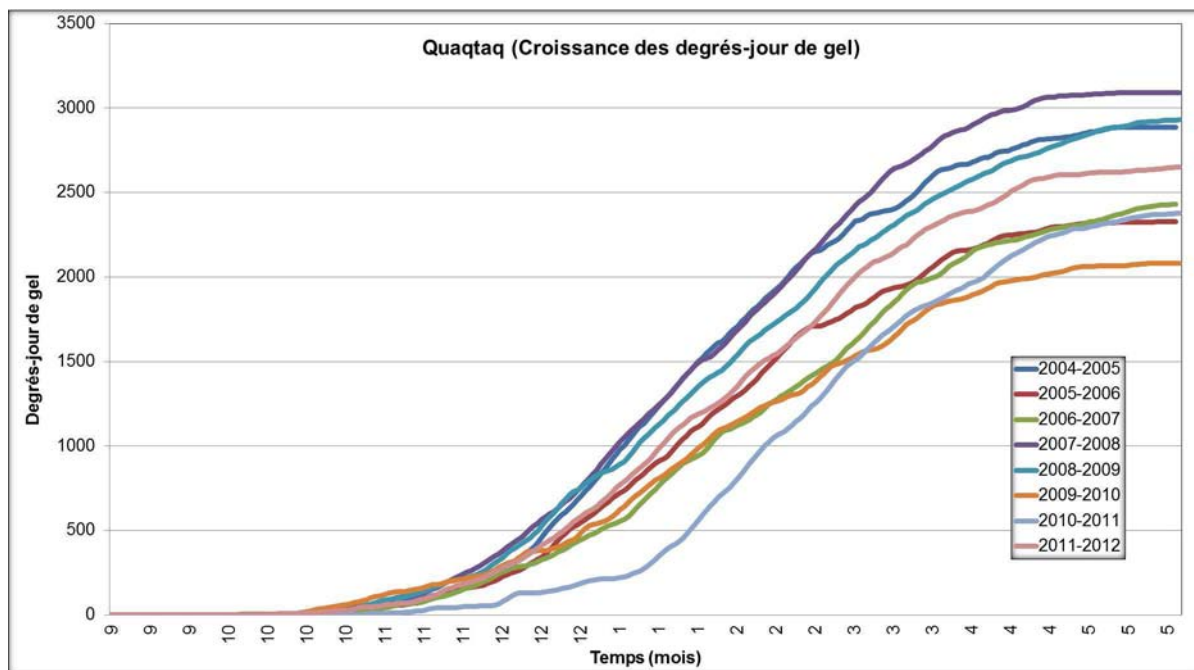


Figure 84 Évolution des degrés-jours de gel pour Quaqtaq.

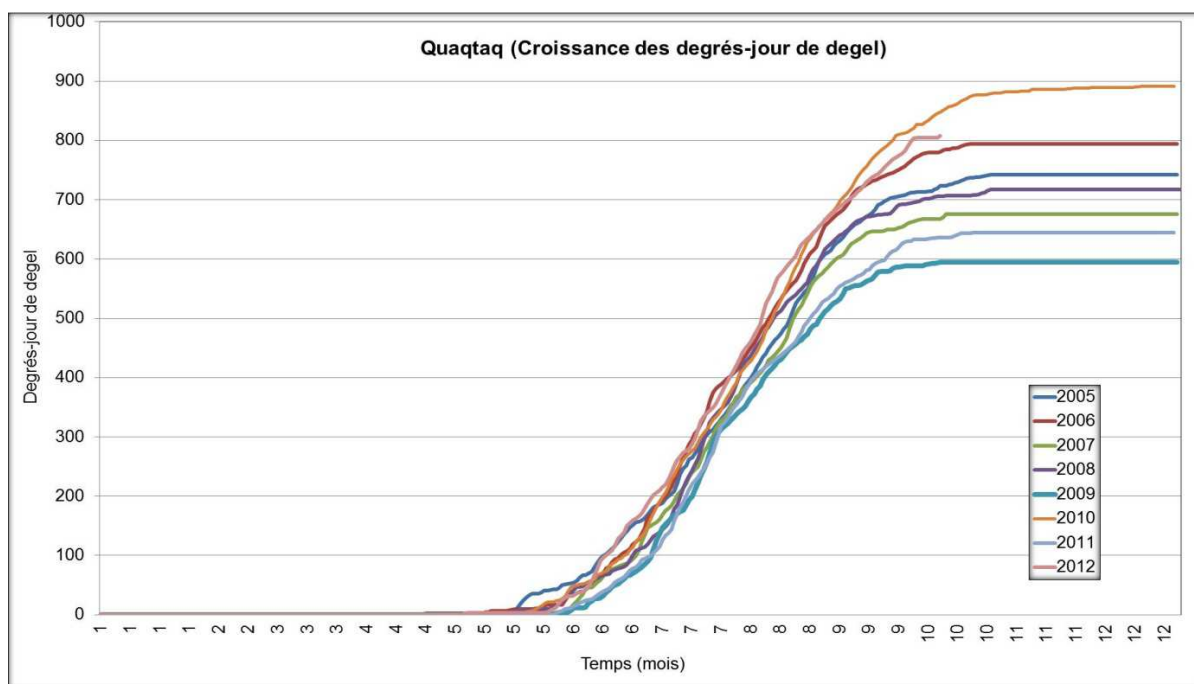


Figure 85 Évolution des degrés-jours de dégel pour Quaqtaq.

3.5.4 Températures du sol

3.5.4.1 Données totales

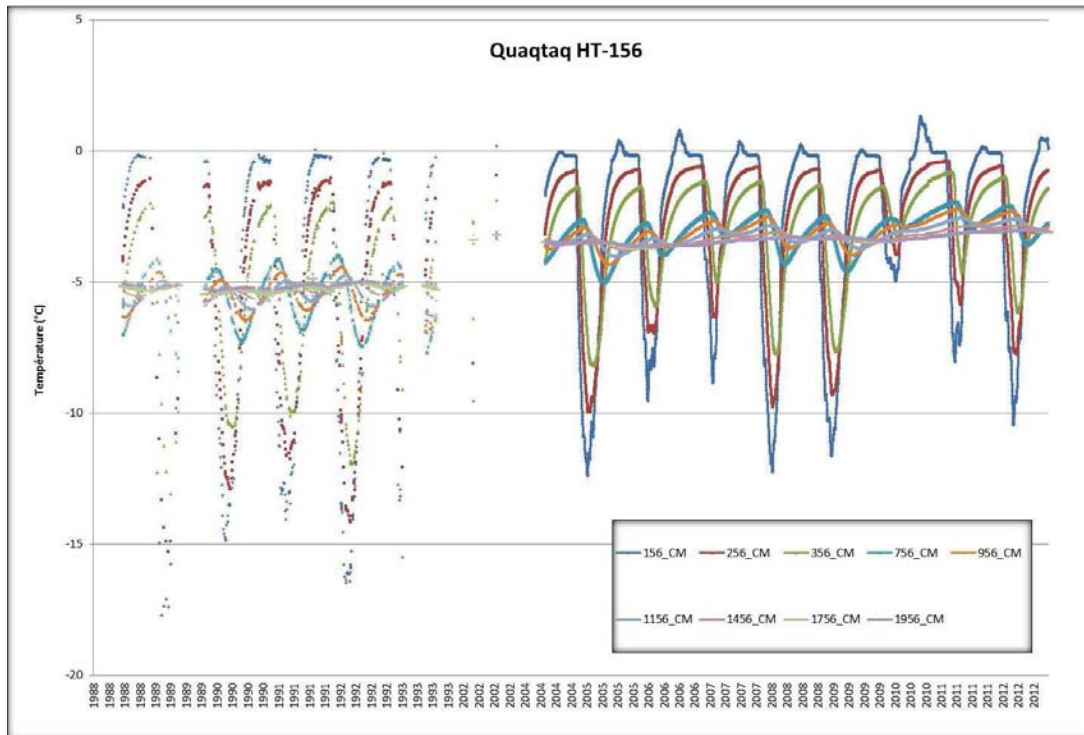


Figure 86 Données du câble HT-156 en milieu naturel à Quaqtaq.

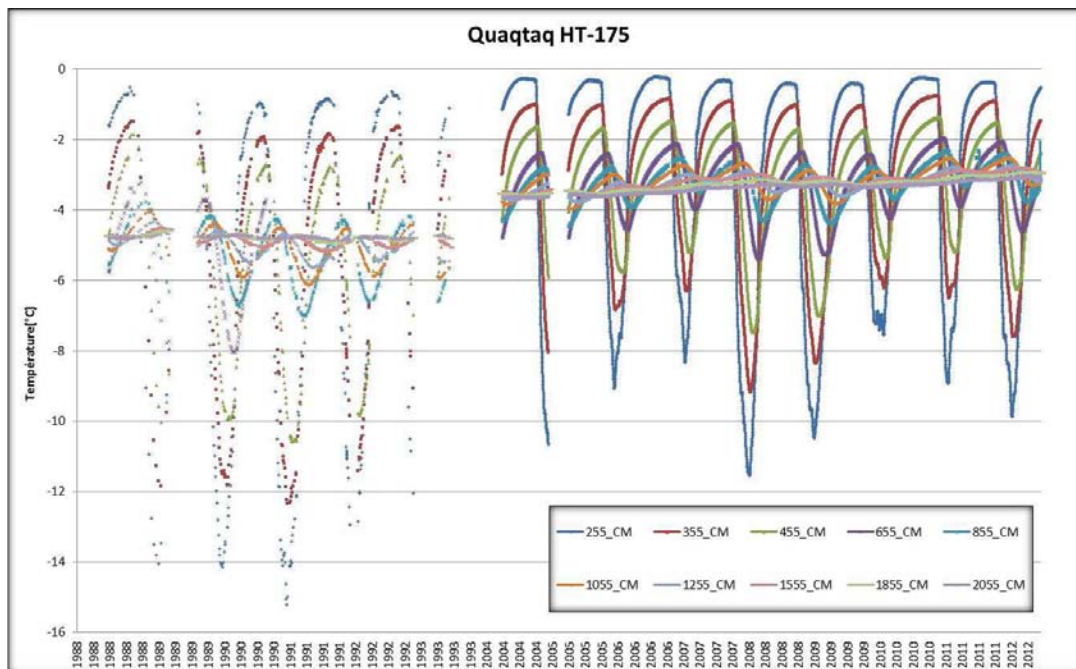


Figure 87 Donnée du câble HT-175 sous la piste à Quaqtaq.

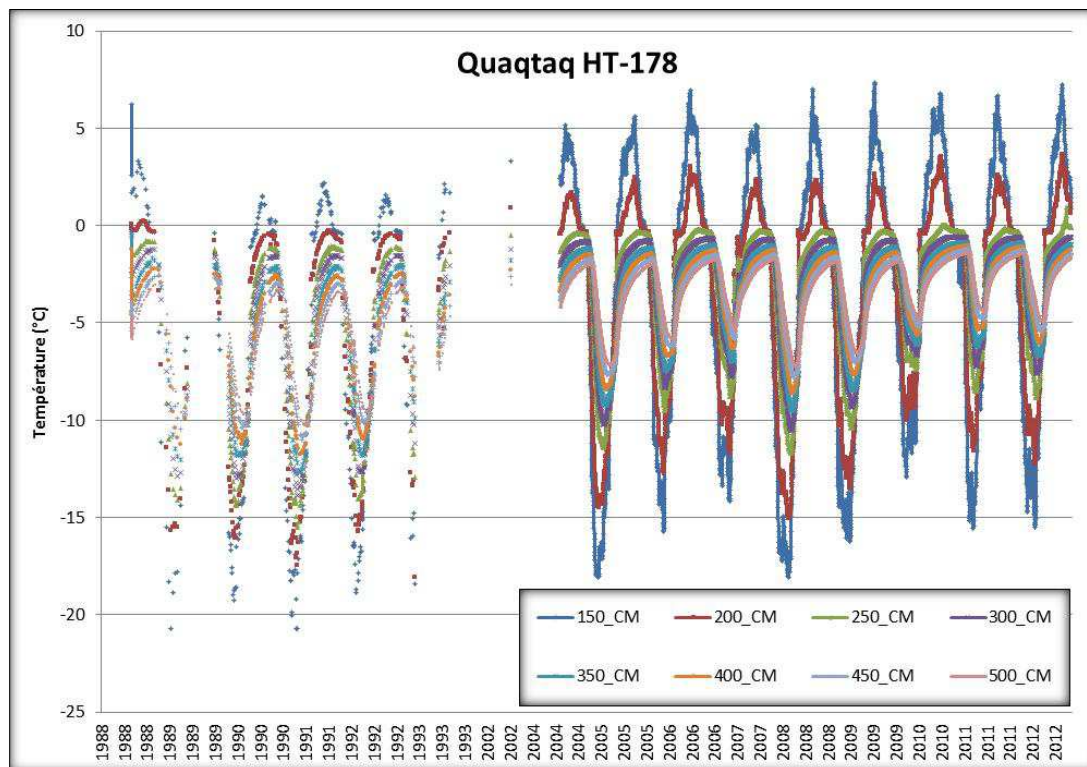


Figure 88 Données du câble HT-178 sous la piste à Quaqtaq.

3.5.4.2 Printemps

La figure 89 met bien en évidence le printemps 2005 où une pointe est visible pour la température maximale de l'air. L'épaisseur du couvert nival joue un rôle important lors de la période de fonte, car cela modifie directement le régime thermique du sol. L'arrivée massive d'eau de fonte dans le système produit un rehaussement des températures dans le sol avec un effet se faisant sentir jusqu'à plusieurs mètres en profondeur. Le printemps 2009 a été tardif, mais ce phénomène a aussi été documenté cette année-là. Une photo prise le 3 juin 2009 sur le rebord de la piste à Quaqtaq illustre bien l'ampleur (figure 89). En rapportant cette date sur le graphique des températures de surface enregistrées à la station HT-156, ce moment correspond bien à la période de remontée drastique des températures. Le graphique montre bien que cette remontée s'est amorcée le 29 mai 2009. Ce phénomène se répète annuellement (figure 90) bien qu'un déphasage temporel est notable. Le phénomène est plus intense lors de printemps hâtifs comme en 2005 et en 2008, et selon l'ampleur du couvert nival. Le printemps

2008 a été hâtif au point que le profil de la température à 56 cm de profondeur fait un saut de plus de 5 °C en quelques jours. Le profil pour 2010 laisse voir un printemps hâtif, mais sans contraste. En 2011(courbe en bleu clair) la hausse fut graduelle, due apparemment à la seule conduction thermique. C'est fort probablement en raison du déblaiement préventif de la neige glacée dans les fossés avant la fonte, comme cela avait été recommandé. Le dégel à la surface du sol s'est effectué tôt en saison et graduellement (courbe orange sur figure 90).

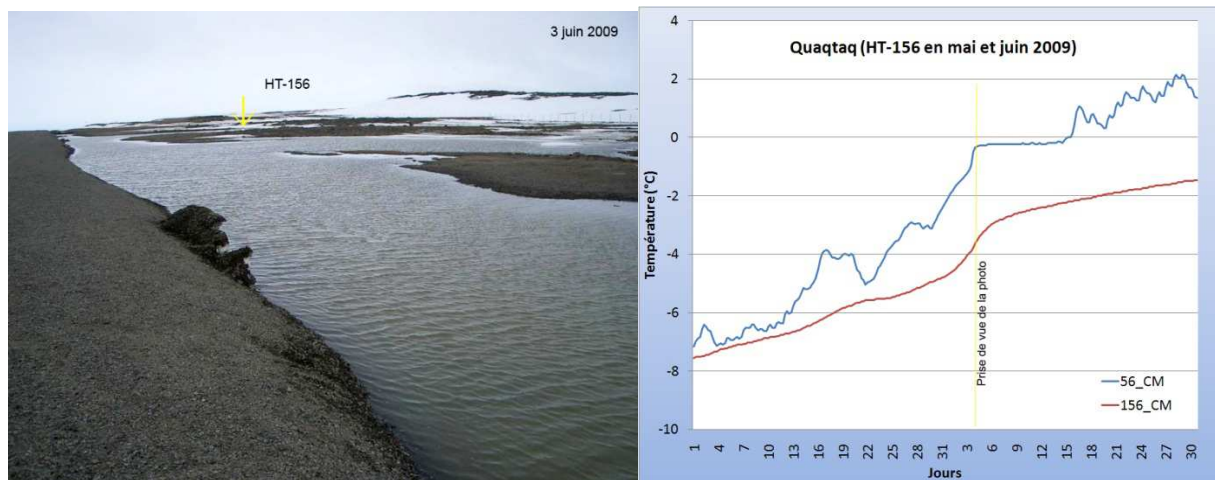


Figure 89 Présence d'eau en marge de la piste et effets sur les températures du sol.

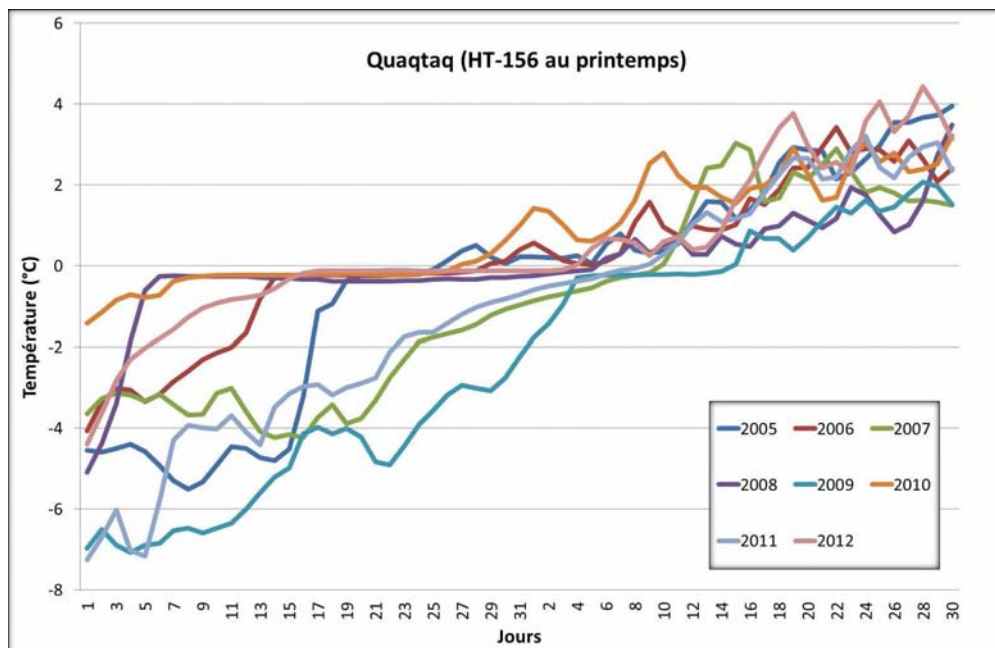


Figure 90 Épisode de remontée des températures dans le sol en mai et juin à Quaqtac.

3.5.4.3 Couche active

L'évolution de la couche active à Quaqtq est représentative des données enregistrées par la température de l'air. Le site présenté à la figure 91 est situé dans le milieu naturel à proximité de la piste. Le sol naturel près de la piste de Quaqtq a dégelé sur une épaisseur de 2 m en 2010. Avec moins de 600 degrés-jours de dégel en 2009, il fallait prévoir une remontée du plafond du pergélisol pour Quaqtq.

Le sol n'a pas dégelé sur une plus grande épaisseur en 2008 même s'il y a eu davantage de journées où la température a excédé 20 °C. En effet, le cumul des degrés-jours au fil de l'été révèle un été relativement frais pendant lequel la progression du front de dégel n'a pas été accélérée en raison de moyennes quotidiennes en général plutôt basses.

Sous la piste (HT-175 et HT-178) en 2010, le mollisol a également pris de l'ampleur. Les courbes sur la figure 92 montrent bien un approfondissement de plus de 10 cm aux deux câbles.

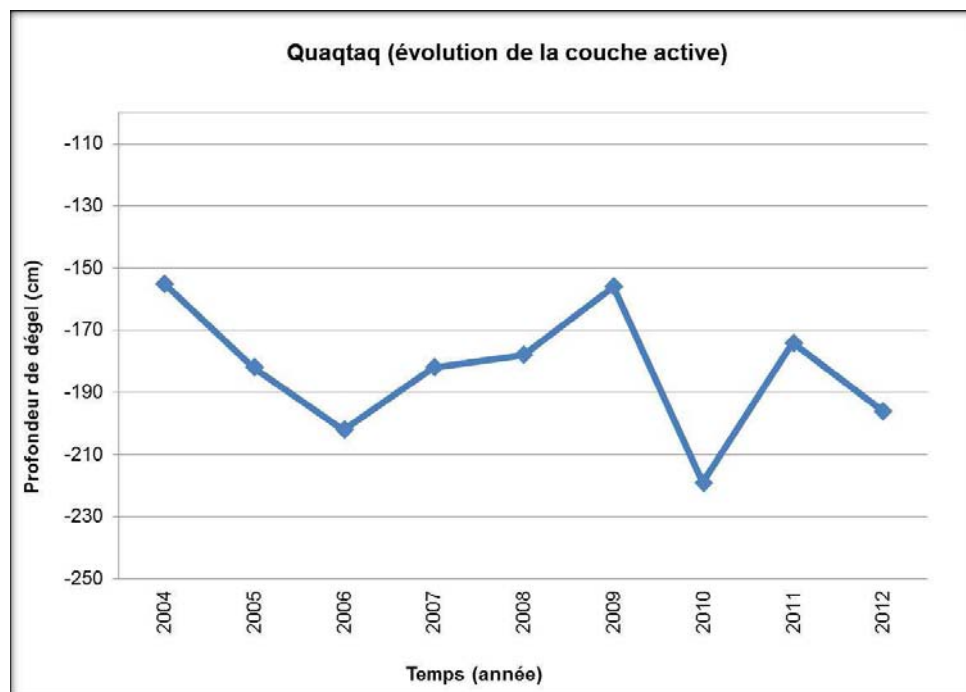


Figure 91 Évolution de la couche active au câble HT-156 à Quaqtq.

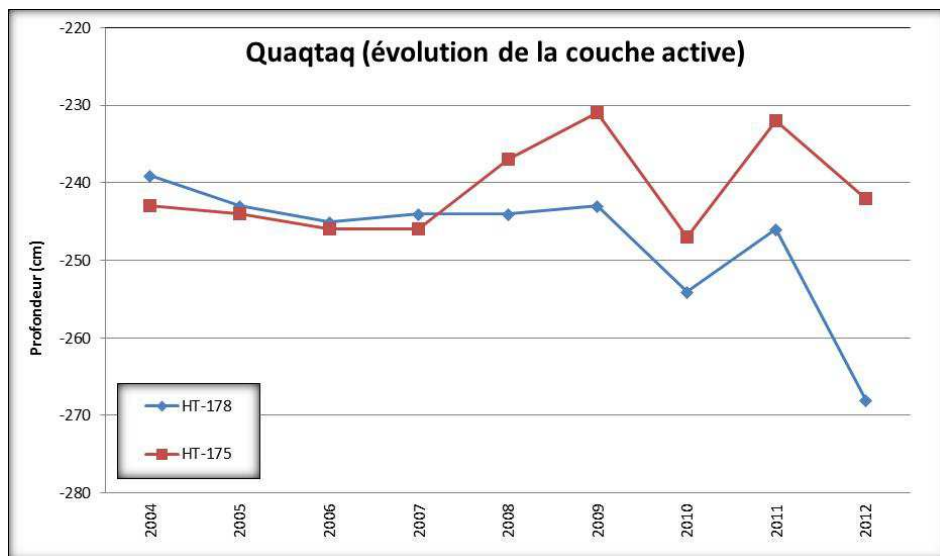


Figure 92 Profondeur de dégel pour HT-175 et HT-178 à Quaqtaq.

3.5.4.4 Profondeurs ciblées

Le pergélisol en milieu naturel près de la piste de Quaqtaq s'est réchauffé sensiblement depuis les vingt dernières années. En effet, la température moyenne du sol entre 15 et 20 mètres de profondeur s'est légèrement accrue d'environ 2°C. Au début des années 1990, le pergélisol affichait une température moyenne d'environ -5,2°C tandis qu'il se situe à -3,2°C pour la période récente d'enregistrement (figure 93).

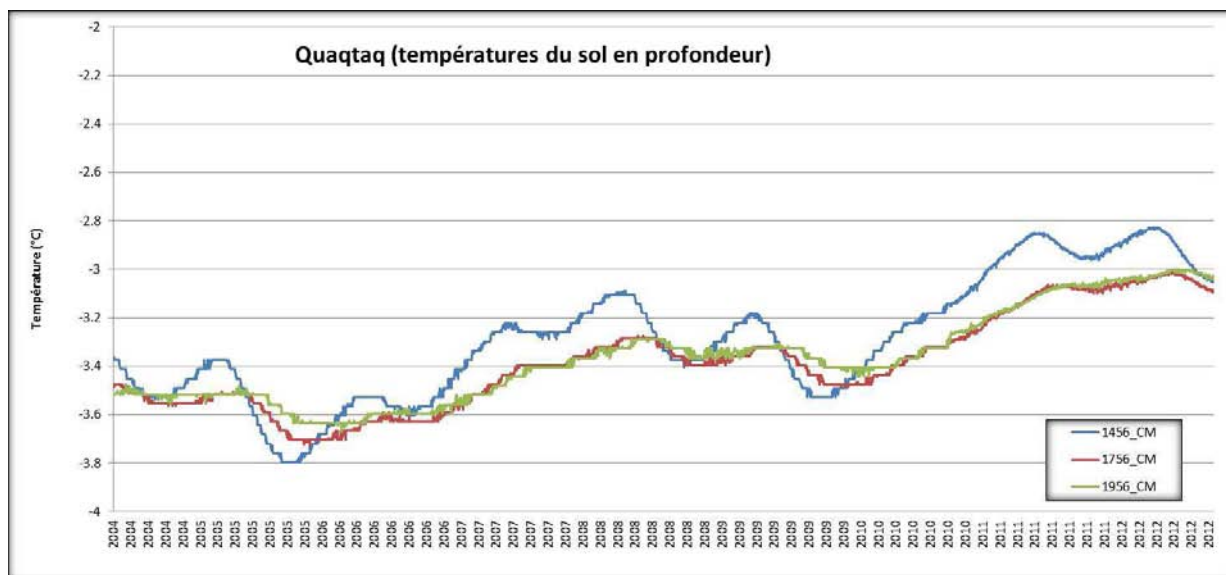


Figure 93 Températures du sol en milieu naturel à Quaqtaq.

3.6 KANGIRSUK

3.6.1 Description

À l'été 2005, la piste a été dotée d'un câble à thermistances implanté au chaînage 0+850 m (figure 95). Il acquiert des mesures de température de la piste et du sol sous-jacent jusqu'à 3 m de profondeur. Le remblai de piste fait 140 cm à l'endroit du forage. Le câble à thermistances se prolonge donc dans le till sous le remblai de la piste. Un capteur pour la température de l'air a également été placé sur ce site comme référence atmosphérique (figure 94).

3.6.2 Localisation

La station réside du côté est de la piste en marge du remblai (figure 96). Il est à noter qu'une quantité importante de neige s'accumule de ce côté de la piste et que la station est parfois recouverte de neige.



Figure 94 Station automatisée sur le remblai de piste à Kangirsuk.

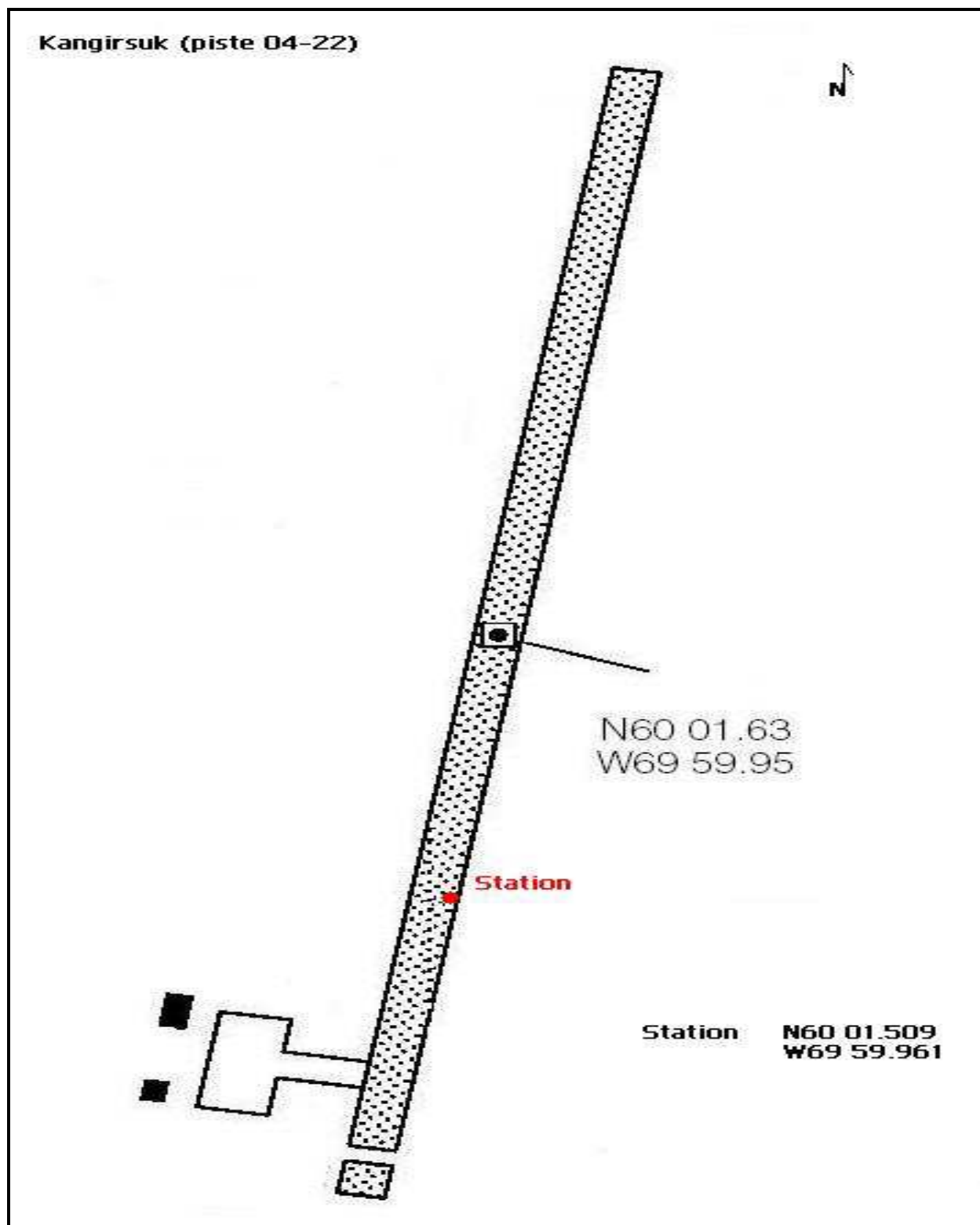


Figure 95 Carte de localisation de la station automatisée à Quaqtq.



Figure 96 Localisation de la station à Kangirsuk.

3.6.3 Températures de l'air

3.6.3.1 Moyennes mensuelles

Les moyennes mensuelles pour janvier (-26,5 °C) et février (-26,6 °C) en 2008 sont inférieures aux moyennes depuis l'automatisation en juin 2005 (tableau 21). Le minimum atteint à l'hiver 2007-2008 a été de -36 °C ce qui est comparable à l'hiver 2006-2007 (-36 °C). Pourtant, la moyenne de février 2008 est de 9°C inférieure à la moyenne de février 2007. La moyenne annuelle pour l'année 2009 est de -6,35°C comparativement à -6,84°C pour 2008, -6,53°C pour 2007 et -4,56°C pour 2006. Pour 2010, les moyennes mensuelles pour janvier, février, avril, août, septembre, octobre, novembre et décembre sont supérieures aux années précédentes. La moyenne annualisée pour 2010 s'établit donc à -2,79°C et -6,82°C pour 2011.

Table 21 Moyennes mensuelles pour Kangirsuk.

Moy. Mensuelles	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janvier		-23.43	-20.22	-26.49	-23.42	-19.79	-17.07	-24.14
Février		-21.09	-17.61	-26.55	-21.71	-13.67	-25.80	-22.18
Mars		-13.47	-20.39	-20.72	-19.74	-15.63	-21.66	-19.96
Avril		-6.73	-9.62	-8.24	-10.40	-5.96	-14.10	-9.95
Mai		0.74	-4.58	1.00	-4.76	-0.80	-4.13	-1.07
Juin		5.71	4.47	6.07	3.75	4.49	3.76	7.26
Juillet	9.08	11.16	10.27	10.97	9.70	9.58	10.48	9.46
Août	9.27	8.67	9.08	9.72	7.30	11.30	8.49	10.34
Septembre	4.78	5.07	3.29	3.78	3.86	5.75	4.41	5.37
Octobre	0.54	0.53	-1.36	-0.85	-2.57	1.51	-0.77	
Novembre	-7.23	-7.18	-9.36	-8.77	-6.80	-2.85	-8.07	
Décembre	-18.01	-14.67	-22.29	-22.00	-11.42	-7.46	-17.39	
Moyenne annuelle		-4.56	-6.53	-6.84	-6.35	-2.79	-6.82	

Les moyennes mensuelles de la température de l'air sont présentées dans un graphique à la figure 97. Il y a très peu de variabilité de l'amplitude des moyennes pour les mois de juin à novembre. La période de grande variabilité demeure pendant les mois hivernaux soit de décembre à mars. L'année 2008 présente des températures plus basses en janvier, février et mars contrairement à l'année 2010, où les moyennes mensuelles pour cette période sont plus élevées (figure 97). La courbe orange (2010) se détache véritablement des autres courbes à l'automne. Cette tendance est notamment marquée pour le mois de décembre avec une moyenne mensuelle de -7,46°C.

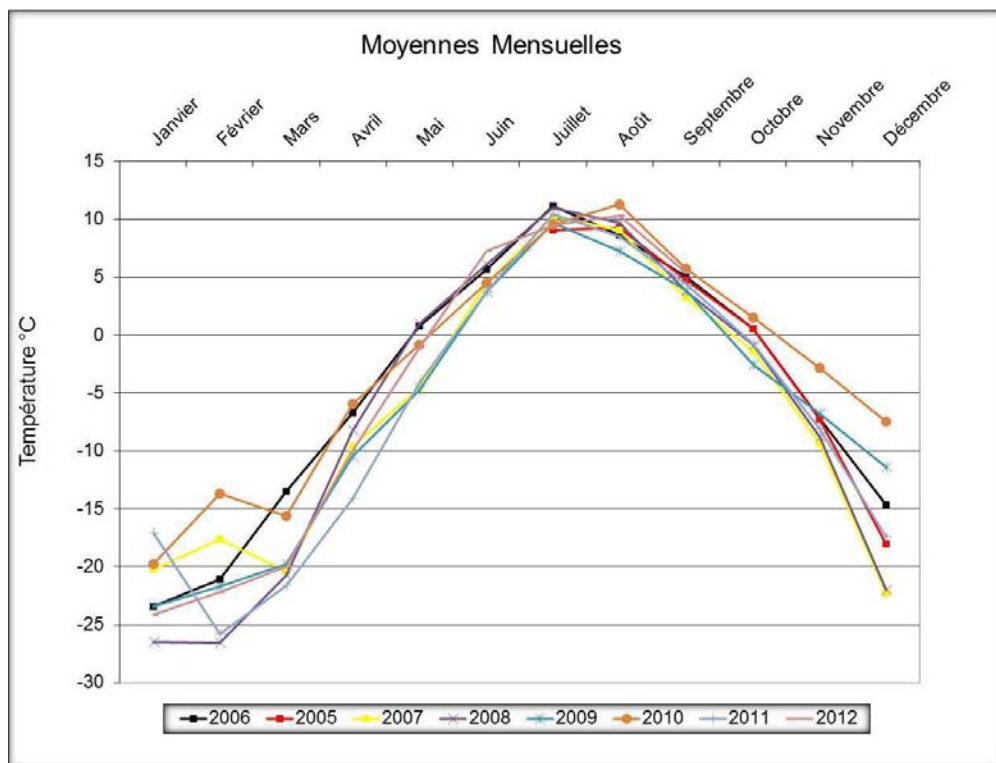


Figure 97 Moyennes mensuelles de la température de l'air pour Kangirsuk.

3.6.3.2 Moyennes saisonnières

Au tableau 22, les moyennes saisonnières sont présentées pour Kangirsuk. Le printemps 2011 est celui détenant la moyenne la plus basse avec -7,12°C suivi par 2009 avec -6,07°C. L'hiver 2007-2008 a enregistré la moyenne saisonnière la plus basse avec -25,5°C tandis que l'été le plus chaud est celui de 2009-2010.

Table 22 Moyennes saisonnières pour Kangirsuk.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Printemps		-2.36	-5.16	-2.88	-6.07	-3.50	-7.12	-3.88
Été		8.70	7.89	8.64	7.52	9.15	8.02	8.76
Automne	-5.34	-5.04	-8.22	-7.49	-5.41	-1.42	-5.92	
Hiver	-20.28	-19.83	-25.49	-22.88	-16.03	-21.00	-22.69	

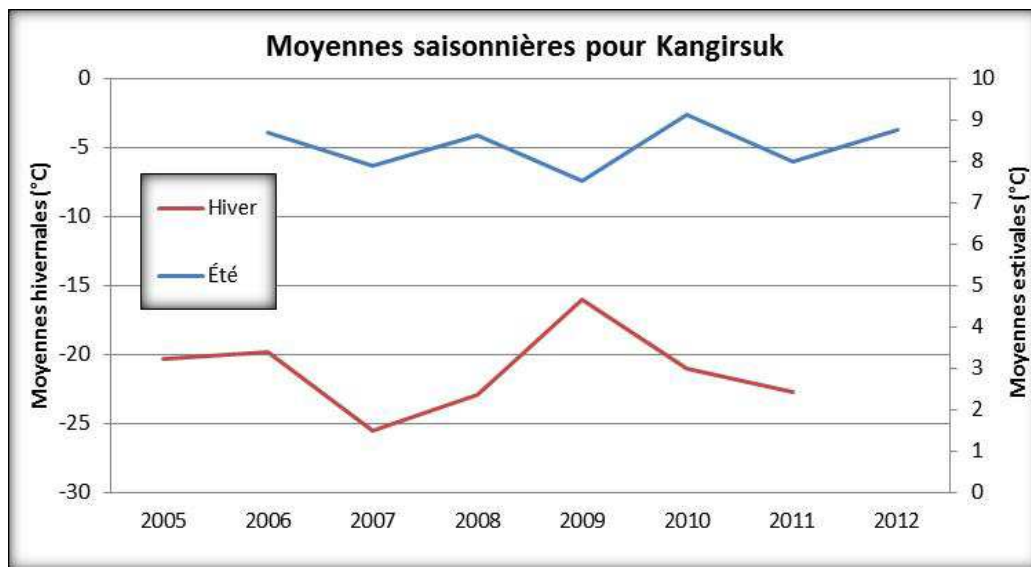


Figure 98 Moyennes saisonnières pour Kangirsuk.

3.6.3.3 Moyennes quotidiennes

La courbe des températures moyennes quotidiennes met en évidence l'hiver 2007-2008 comme étant le plus rigoureux des trois hivers. Un redoux hivernal est venu ponctuer la moyenne en janvier avec un maximum de $-1,6^{\circ}\text{C}$ le 31. Ce redoux a été observé sur la plupart des sites automatisés avec la même intensité. Les moyennes pour la température de l'air pendant l'été 2008 sont également plus élevées que les étés 2005 à 2007 et 2009 (figure 99). La moyenne quotidienne excède même 20°C les 23 et 24 juillet 2008. La température moyenne horaire de l'air a dépassé 27°C pendant plus de cinq (5) heures consécutives les 23 et 24 juillet 2008. C'est d'ailleurs pendant cette période que la température maximale a été atteinte à Kangirsuk, et ce, depuis 2005, soit $27,6^{\circ}\text{C}$. Pour 2009, le maximum atteint à l'été a été de 25°C le 26 juillet. Pour 2010, il n'y a pas eu de températures très élevées bien que la courbe surpasse le seuil de 10°C de façon plus continue que les années précédentes. Le 17 août 2010, il a fait 22°C tandis qu'en 2011, le maximum enregistré a été de 26°C un 28 juillet.

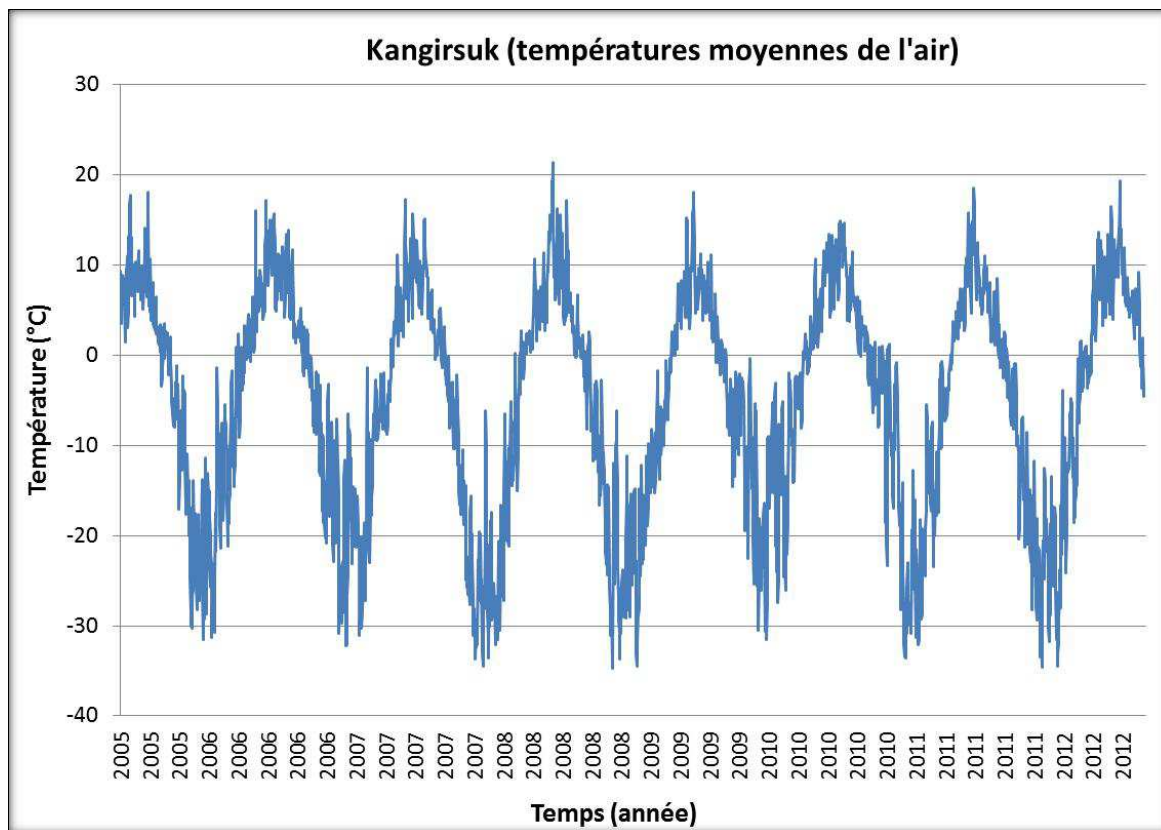


Figure 99 Moyennes quotidiennes de la température de l'air pour Kangirsuk.

3.6.3.4 Seuils

Si l'on tient compte de seuils choisis (-30°C , -20°C , $+15^{\circ}\text{C}$ et $+20^{\circ}\text{C}$), l'année 2008 sort du groupe lorsqu'on totalise le nombre de journées où la température a excédé 20°C . Il y a eu un total de 12 journées où la température a surpassé 20°C à Kangirsuk. Il y a aussi les températures hivernales qui ont marqué l'année 2008. Le seuil de -30°C a été atteint 45 fois en 2008 comparativement à 29 fois pour 2009, 21 fois pour 2006 et un total de 7 pour 2010. Il y a donc eu 45 journées en 2008 où la température est descendue sous -30°C . Le total des journées où la température est descendue sous -20°C (114 en 2007-2008) surpasse considérablement le total des deux hivers précédents (tableau 23). L'année 2009 n'a pas été marquée par un nombre important de journées au-dessus de 15°C . En effet, il n'y a eu que 14 journées où les températures ont excédé 15°C comparativement à 32 pour 2008 et 2010. C'est en 2012 que le seuil de 15°C est atteint le plus grand nombre de jour avec 41.

Table 23 Tableau du nombre de jours selon des seuils établis.

	<-30°C	< -20 °C	> 15 °C	> 20 °C
2005			14	7
2006	21	79	32	7
2007	19	77	23	4
2008	45	114	31	12
2009	29	96	14	6
2010	7	61	32	5
2011	34	89	21	9
2012	33	109	41	6

3.6.3.5 Degrés-jours (gel-dégel)

Les températures hivernales de 2007-2008 et 2008-2009 ont accentué l'écart entre les hivers précédents lors du cumul des degrés-jours de gel. Il y a eu un cumul de 3524 et 3401 degrés-jours de gel en 2008 et 2009 comparativement à 2875 pour 2007 et 2756 pour 2006 (tableau 24). L'année 2010 est celle qui en cumule le moins avec 2352 degrés-jours de gel. Cette différence provient essentiellement du cumul des jours additionnels où la température a atteint -20 °C en 2008 et 2009 (tableau 23). Bien que les températures ont excédé 20 °C un plus grand nombre de fois en 2008, l'année 2010 présente le plus grand cumul de degrés-jours de dégel suivie de près par 2006 et 2012.

Table 24 Tableau du cumul des degrés-jours pour Kangirsuk.

	Gel	Dégel
2006	2756	1024
2007	2875	861
2008	3524	994
2009	3401	766
2010	2352	1042
2011	2806	852
2012	3173	1019

La courbe qui met en évidence l'évolution des degrés-jours de gel montre bien la rigueur de l'hiver 2007-2008 (figure 100). La courbe prend de l'importance dès le début de l'hiver et demeure constante tout au long de la saison. L'hiver 2007-2008 se démarque bien des deux hivers précédents. L'hiver 2008-2009 arrive au second rang avec un cumul de près de 3401 degrés-jours de gel.

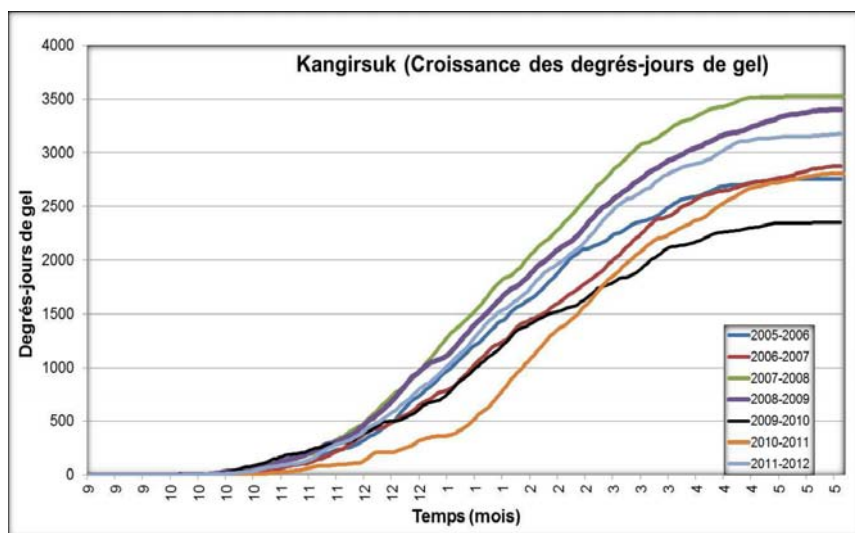


Figure 100 Évolution des degrés-jours de gel pour Kangirsuk.

La courbe illustrant l'évolution des degrés-jours de dégel met en évidence le printemps tardif de 2007 et de celui de 2009. Les degrés-jours de dégel s'accumulent avec un retard de quelques semaines en 2007, 2009 et 2011. Il y a un début de cumul des degrés-jours de dégel vers le 20 avril en 2006 et 2008 tandis que le cumul ne commence que le 29 mai en 2007 (figure 101). En 2009, le début du cumul des degrés-jours de dégel débute le 30 mai. C'est donc un mois de retard en 2007 et 2009 pour la date de début du cumul. Les totaux cumulés pour l'année 2007 (861) et 2009 (766) sont aussi très inférieurs au cumul de 2006 (1024), celui de 2008 (994) et 2010 (1042).

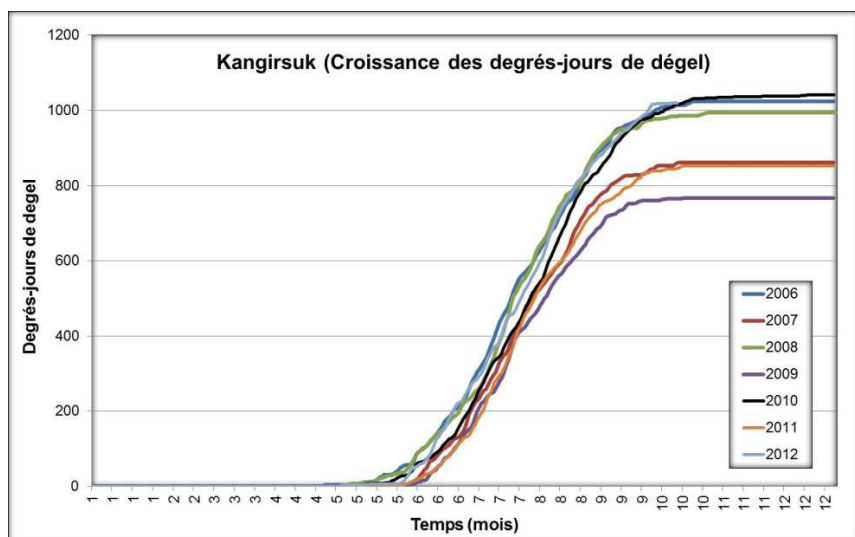


Figure 101 Évolution des degrés-jours de dégel pour Kangirsuk.

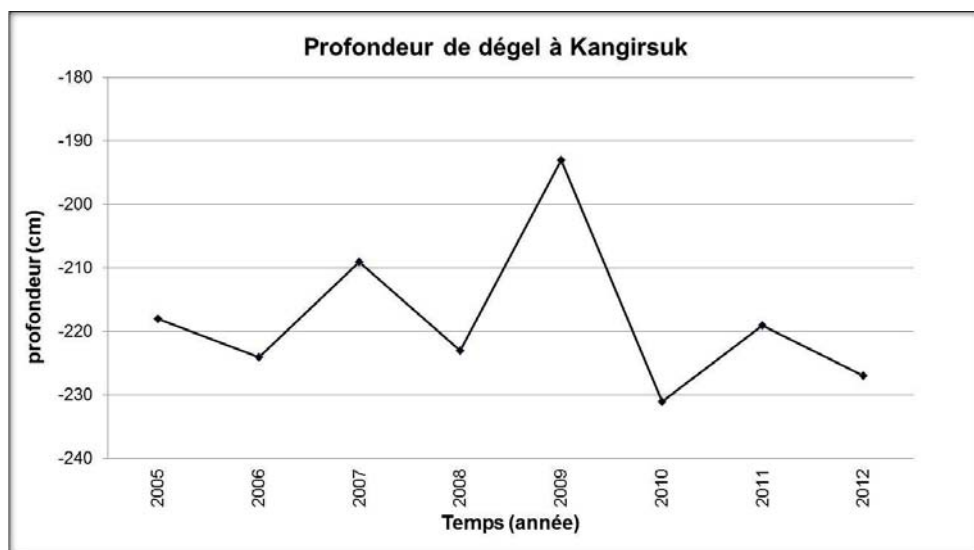


Figure 103 Évolution de la couche active à Kangirsuk.

3.6.4.4 Profondeurs ciblées

La courbe des températures à 200 cm de profondeur illustre bien la profondeur atteinte par la couche active annuellement (figure 104). Nous remarquons que la courbe n'atteint pas 0°C en 2009, mais le fait pour les années antérieures. Le mollisol n'atteint donc pas 200 cm de profondeur en 2009 mais l'atteint de nouveau en 2010 et 2011.

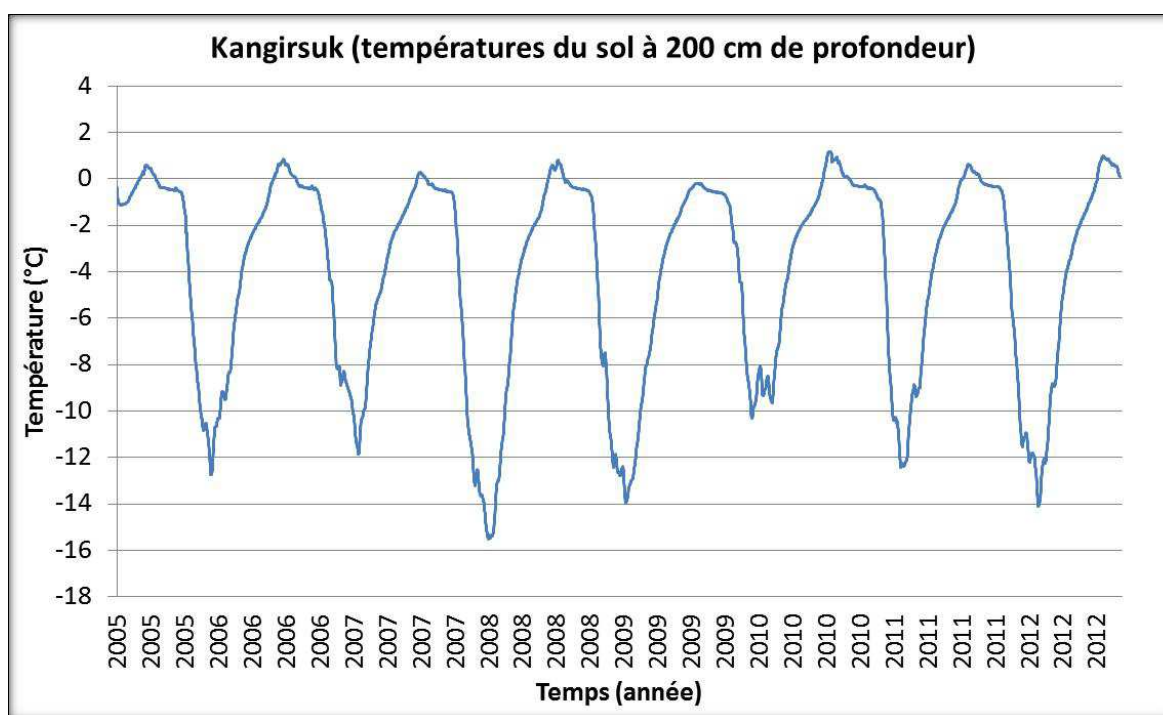


Figure 104 Températures du sol à Kangirsuk

3.7 AUPALUK

3.7.1 Description

Deux câbles à thermistances ont été installés et reliés à des systèmes d'acquisition automatique de données dans le secteur de l'aéroport d'Aupaluk (figure 107). Le câble HT-294 est situé dans la piste et permet de mesurer la température du sol jusqu'à 5 m de profondeur. À cet endroit, le remblai ne mesurant que 3,6 m d'épaisseur, le câble s'enfonce donc de 1,4 m dans le sol naturel sous la piste. Une seconde station située dans la toundra sert de station de référence en milieu naturel non perturbé, à proximité de la piste. Le câble mesure la température du sol jusqu'à une profondeur de 19,1 m, et un capteur thermique mesurant la température de l'air y est adjoint.

3.7.2 Localisation

Le premier câble (HT294) est situé dans la piste d'atterrissage, au chaînage 5+386 m, à une vingtaine de mètres de l'accotement ouest de la piste (figure 106). Le second câble (HT299) est situé dans la toundra à environ une quarantaine de mètres de l'accotement ouest du remblai de la piste, en vis-à-vis du chaînage 5+384 m (figure 105).



Figure 105 Station dans le milieu naturel à Aupaluk.

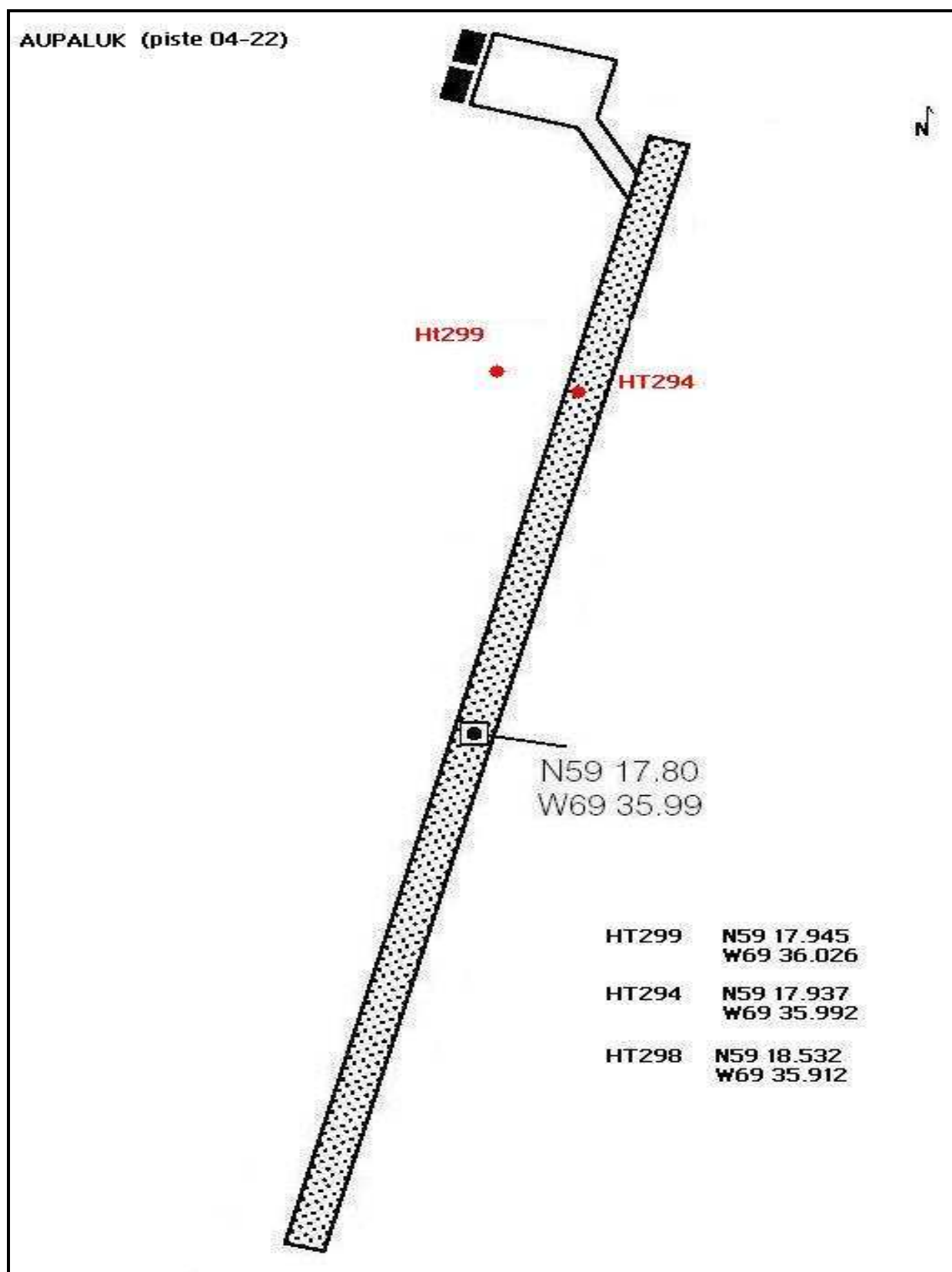


Figure 106 Schéma de localisation des stations à Aupaluk.



Figure 107 Carte de localisation des stations à Aupaluk.

3.7.3 Températures de l'air

3.7.3.1 Moyennes mensuelles

Les valeurs maximales (orange) ont été surlignées sur le tableau afin de repérer rapidement les valeurs extrêmes. Les températures moyennes mensuelles indiquent que la moyenne annuelle en 2008 a été de -6,31 °C tandis que la moyenne annuelle pour 2009 a été de -5,85 °C, de -5,75°C pour 2007, de -3,84 °C pour 2006, de -5,11 °C pour 2005 et -2,22°C pour 2010. Cette différence pour 2010 s'explique par un automne où les moyennes mensuelles étaient inférieures à celles pour le reste du groupe (tableau 25). Le tableau met bien en évidence les basses températures des premiers mois de 2008. Pour l'année 2009, c'est au printemps et à l'été que les températures moyennes mensuelles étaient inférieures à celles des années antérieures. En 2010, les températures de février, avril, août, septembre, octobre, novembre et décembre sont supérieures aux années précédentes. Au mois d'août, la moyenne mensuelle enregistrée est de 11,90 °C et -6,30°C pour un mois de décembre (tableau 25).

Table 25 Moyennes mensuelles pour la température de l'air à Aupaluk.

Moy. Mensuelles	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janvier		-27.44	-22.09	-19.33	-25.14	-22.56	-19.76	-16.58	-23.25
Février		-21.97	-21.13	-17.54	-25.40	-20.63	-13.13	-24.16	-21.29
Mars		-16.14	-12.68	-19.76	-19.91	-19.02	-14.50	-20.06	-18.63
Avril		-6.03	-5.69	-8.27	-7.36	-9.68	-5.01	-13.01	-9.45
Mai		0.76	1.83	-3.77	1.50	-3.93	-0.58	-2.88	-0.06
Juin	3.46	6.48	6.40	5.01	5.32	4.14	4.76	3.91	6.95
Juillet	9.38	9.66	11.07	10.95	9.77	7.62	9.50	10.86	9.94
Août	8.70	9.75	8.26	9.42	9.59	7.41	11.90	9.10	10.51
Septembre	4.87	5.29	5.96	3.89	4.98	4.76	6.25	5.60	6.26
Octobre	1.29	1.43	1.43	-0.35	0.17	-1.52	2.41	0.21	
Novembre	-6.33	-6.23	-6.01	-8.90	-8.08	-5.60	-2.15	-6.73	
Décembre	-21.66	-16.88	-13.39	-20.37	-21.12	-11.14	-6.30	-16.24	
Moy. Annuelle		-5.11	-3.84	-5.75	-6.31	-5.85	-2.22	-5.83	

Les températures moyennes mensuelles sont présentées sous forme graphique à la figure 108 et ce, depuis le début de l'automatisation en juin 2004. De prime abord, il y a peu de variabilité dans l'amplitude des moyennes pour les mois de juin à septembre (figure 108). Seul le mois de juillet 2009 et août 2010 font contradiction à cette tendance. La variabilité prend de l'importance de décembre à mars soit pendant la

période hivernale. Les mois de mai 2007, 2009 et 2011 sortent du groupe avec des moyennes bien inférieures aux autres années. Ceci caractérise des printemps tardifs. La moyenne élevée enregistrée en août 2010 est bien en évidence sur la figure 108 de même que tous les mois de l'automne 2010.

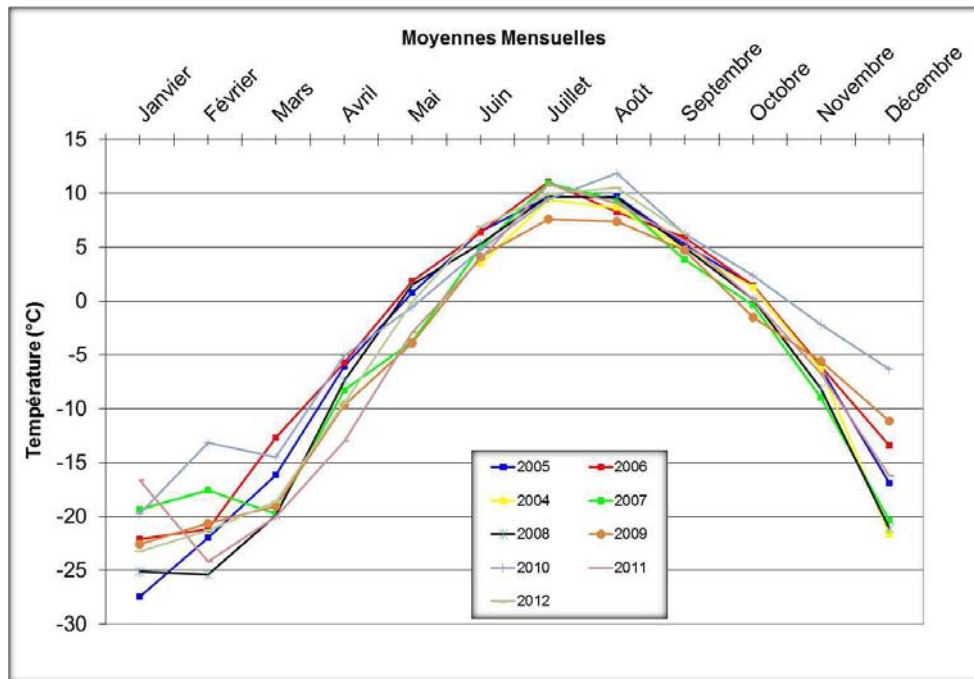


Figure 108 Moyennes mensuelles pour la température de l'air à Aupaluk.

3.7.3.2 Moyennes saisonnières

En rassemblant les données de températures de l'air pour Aupaluk sous forme saisonnière, on dénote bien les tendances en 2009. Un printemps tardif avec une moyenne de $-5,47^{\circ}\text{C}$ suivi de près par 2007 avec $-4,37^{\circ}\text{C}$. Un été avec des températures inférieures aux cinq précédents. L'été 2010 est plus chaud que les précédents. Les températures hivernales sont en hausse pour la période 2004-2010 (figure 109).

Table 26 Moyennes saisonnières pour Aupaluk.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Printemps		-2.85	-1.52	-4.37	-2.43	-5.47	-2.91	-6.09	-3.35
Été	7.59	8.79	8.88	8.32	8.31	7.01	9.35	8.57	9.12
Automne	-5.45	-4.00	-3.84	-7.03	-6.27	-4.39	-0.52	-4.75	
Hiver	-22.64	-19.91	-19.11	-24.32	-22.18	-15.55	-19.70	-21.63	

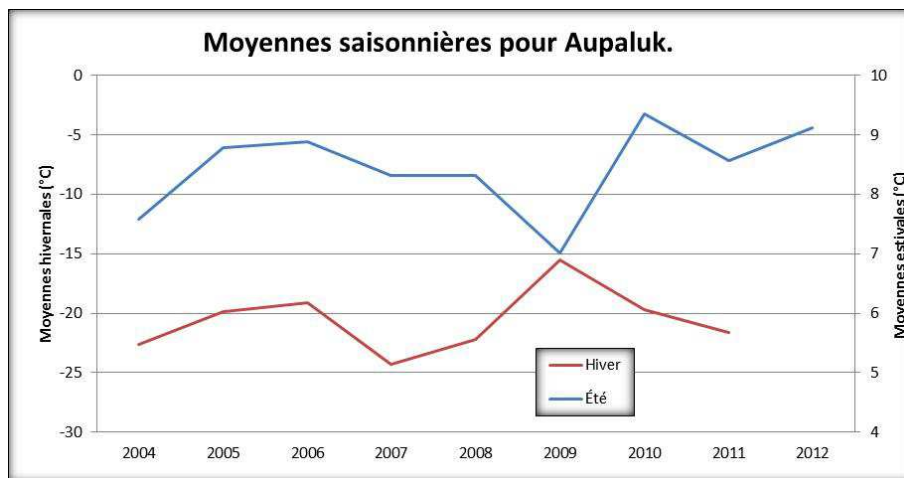


Figure 109 Moyennes saisonnières pour Aupaluk.

3.7.3.3 Moyennes quotidiennes

Le graphique à la figure 110 illustre la température moyenne quotidienne pour la période entière depuis le début de l'automatisation.

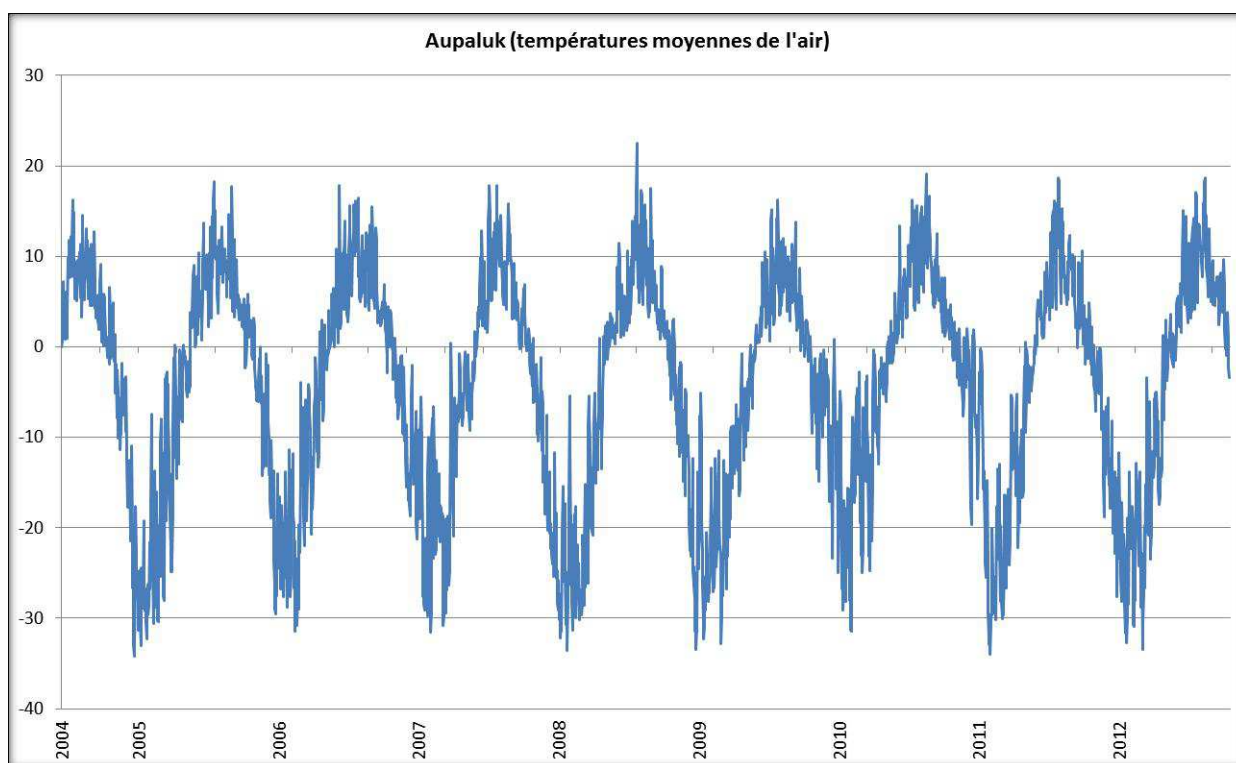


Figure 110 Températures moyennes quotidiennes de l'air pour Aupaluk.

3.7.3.4 Seuils

C'est à l'été 2006 qu'a été enregistrée la température la plus élevée avec 30,3 °C le 8 juin 2006. Le 23 juillet 2008, la température horaire maximale a atteint 29,1 °C et 28,1 °C le lendemain soit le 24 juillet. En 2008, la température minimale a été de -34,9 °C le 24 janvier bien que quelques jours plus tard soit le 31 janvier, la température a atteint -1,1 °C. Le maximum atteint à l'été 2009 a été de 24,26°C le 26 juillet et 27,6°C un 25 août 2010. La température quotidienne minimale en 2009 avec une température de -36,3 °C le 28 février et -32,8 °C les 1 et 2 février 2010. Pour 2011, un minimum thermique est enregistré le 28 janvier (-36°C) tandis qu'un maximum de 27°C est atteint le 28 juillet.

L'été 2008 a été comparable à celui de 2006 si l'on tient compte du décompte de jours en fonction de seuils établis (tableau 27). La température a dépassé le seuil des 20 °C plus de 14 fois en 2006, 2008 et 2010. L'hiver 2007-2008 est celui qui présente le plus grand cumul de jours où la température est descendue sous -20 °C avec un total de 109 jours. C'est 30 jours de plus que les deux hivers précédents (2005-2006 et 2006-2007) et 49 fois de plus qu'en 2010. Il y a aussi eu beaucoup plus de jours où la température est descendue sous -30 °C à l'hiver 2007-2008 avec 37 jours comparativement à 12 jours et 13 jours pour les deux hivers précédents. L'hiver 2004-2005 est celui qui en comptabilise le plus avec 41 journées où la température était inférieure à -30 °C. C'est en 2010 que ce cumul est le plus faible avec seulement 6 journées où la température a atteint les -30 °C.

L'été 2009 affiche un faible nombre de journées où la température a dépassé le seuil des 15°C. Il n'y a eu que 15 journées dont 8 ont dépassé les 20°C. L'année 2010 présente le nombre le plus élevé de journées ayant atteint 15 °C avec un total de 48 journées dont 18 de plus de 20 °C. Pour 2011, le seuil des 20°C est atteint à 11 reprises. C'est en 2012 que le seuil de 15°C est atteint le plus grand nombre de jour soit un total de 50.

Table 27 Tableau du nombre de jours selon des seuils établis.

	<-30°C	< -20°C	>15°C	>20°C
2004			23	5
2005	41	97	31	7
2006	13	74	35	14
2007	12	69	28	10
2008	37	109	32	14
2009	22	94	23	8
2010	7	67	48	18
2011	31	77	38	11
2012	26	98	50	14

3.7.3.5 Degrés-jours (gel-dégel)

Le décompte des degrés-jours indique que les hivers 2007-2008 et 2008-2009 ont cumulé le plus grand nombre de degrés-jours de gel. Ceci concorde assez bien avec les valeurs obtenues sur le cumul des journées sous -20 °C. Le nombre de degrés-jours de gel pour l'hiver 2007-2008 s'élève à 3302 et 997 jours de dégel pour l'été 2008. L'année 2010 demeure l'année ayant cumulé le plus de degrés-jours de dégel avec un total de 1110 (tableau 28) venant déloger 2006 qui affichait 1101 degrés-jours de dégel. Le nombre de degrés-jours de dégel s'élève à 758 pour 2009, ce qui représente le cumul le plus faible depuis l'automatisation continue en 2004. L'année 2010 présente un cumul de degrés-jours de dégel de 1110 et le plus bas cumul de degrés jours de gel avec 2203 à l'hiver. Le chiffre de 1085 pour 2012 est à titre indicatif puisque les données sont cumulés jusqu'en octobre, date de la dernière récupération des données.

Table 28 Tableau du cumul de degrés-jours pour Aupaluk.

	Gel	Dégel
2005	3065	1079
2006	2579	1101
2007	2680	935
2008	3302	997
2009	3212	759
2010	2203	1110
2011	2572	935
2012	2960	1085

L'évolution de la saison de gel est portée sous forme graphique à la figure 111. Les hivers 2007-2008, 2008-2009 et 2004-2005 sont les hivers présentant des courbes avec une pente plus forte et un cumulatif supérieur aux hivers 2005-2006 et 2006-2007 (figure 111). L'hiver 2007-2008 arrive au premier plan du cumul des degrés-jours de gel suivi de près par l'hiver 2008-2009. L'hiver 2009-2010 est représenté à l'aide d'une courbe orange sur la figure 111 et est nettement inférieur aux hivers précédents. Les trois profils présentant des cumuls supérieurs à 3000 degrés-jours de gel se démarquent dès le début de l'hiver au mois de décembre. La courbe de 2009-2010 perd de la vigueur à partir de février et se loge au dernier rang pour le cumul.

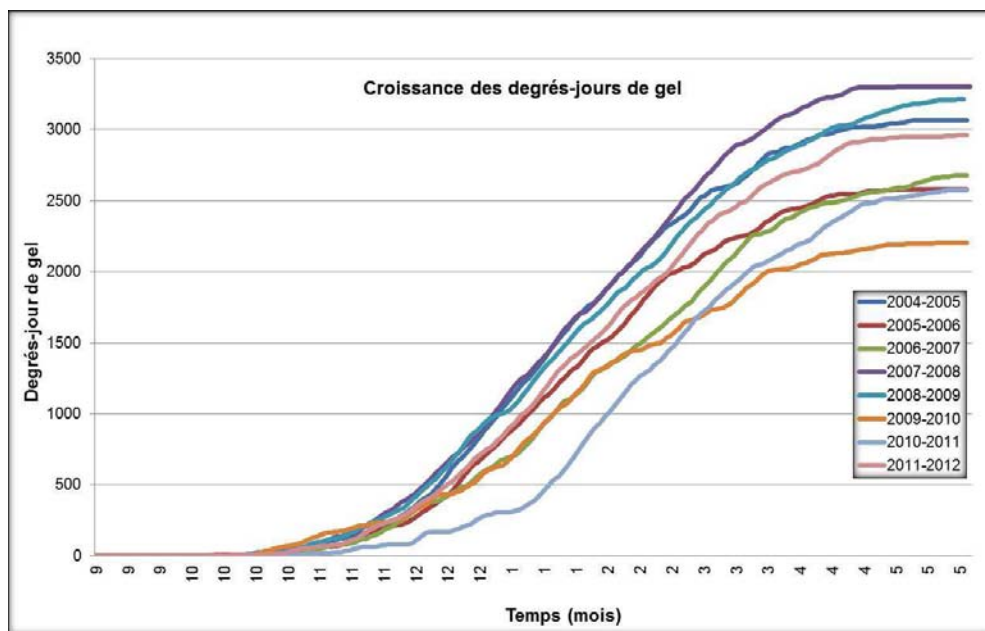


Figure 111 Évolution des degrés-jours de gel pour Aupaluk.

Les courbes cumulatives des degrés-jours de dégel montrent bien le retard du printemps en 2007 et plus particulièrement celui de 2009. Il y a plusieurs semaines de décalage entre le début du cumul des degrés-jours de dégel. Le début du cumul des degrés-jours de dégel s'est produit dans les derniers jours d'avril en 2005, 2006 et 2008. En 2007 et 2009, l'amorce du cumul des températures positives s'est effectuée vers les derniers jours de mai (figure 112). L'année 2009 aura donc cumulé le plus faible nombre de degrés-jours de dégel depuis l'automatisation. L'année 2010 se hisse au-devant 2005 et 2006 pour le plus haut cumul de degrés-jours de dégel.

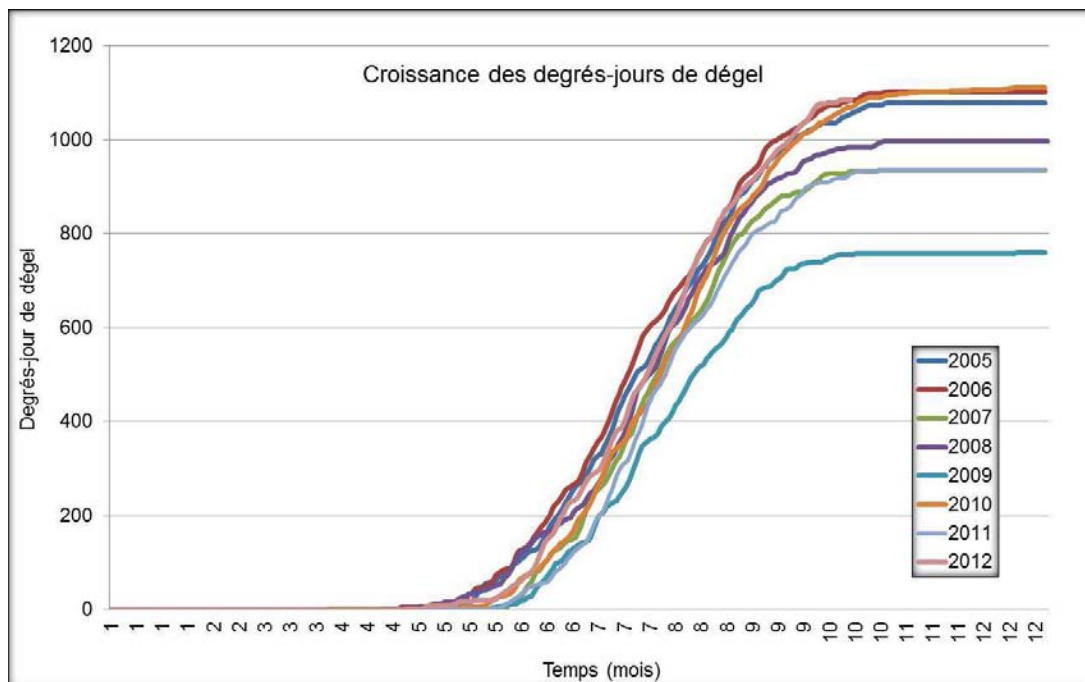


Figure 112 Évolution des degrés-jours de dégel pour Aupaluk.

3.7.4 Températures du sol

3.7.4.1 Données totales

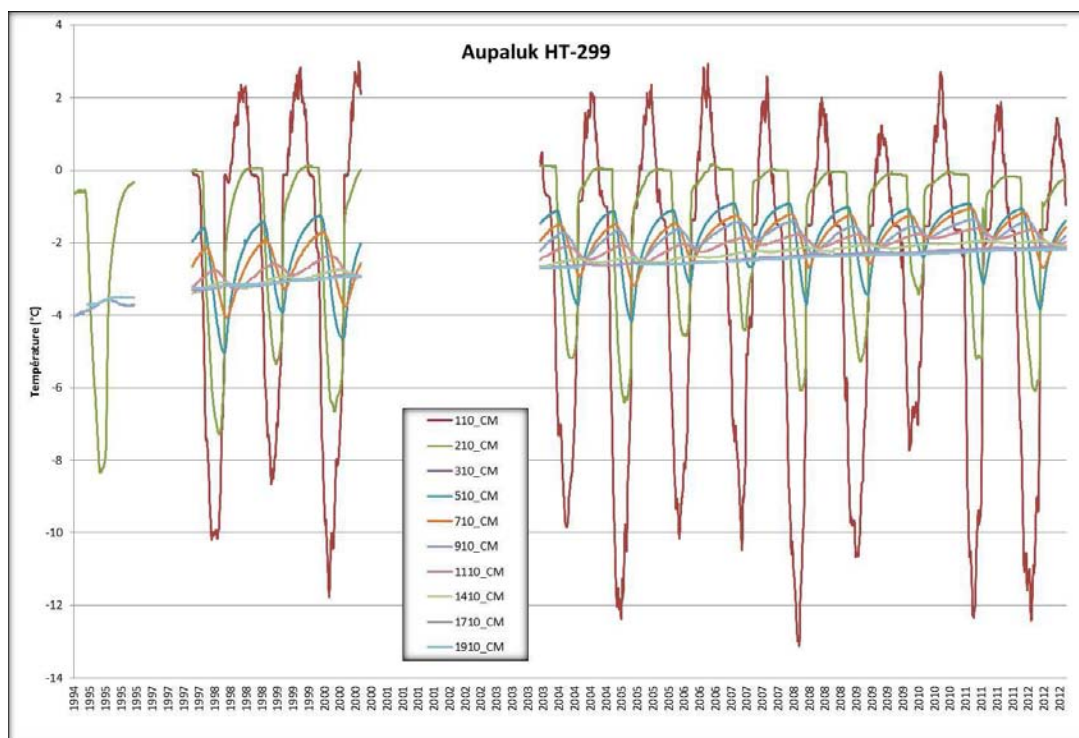


Figure 113 Données totales pour Aupaluk HT-299.

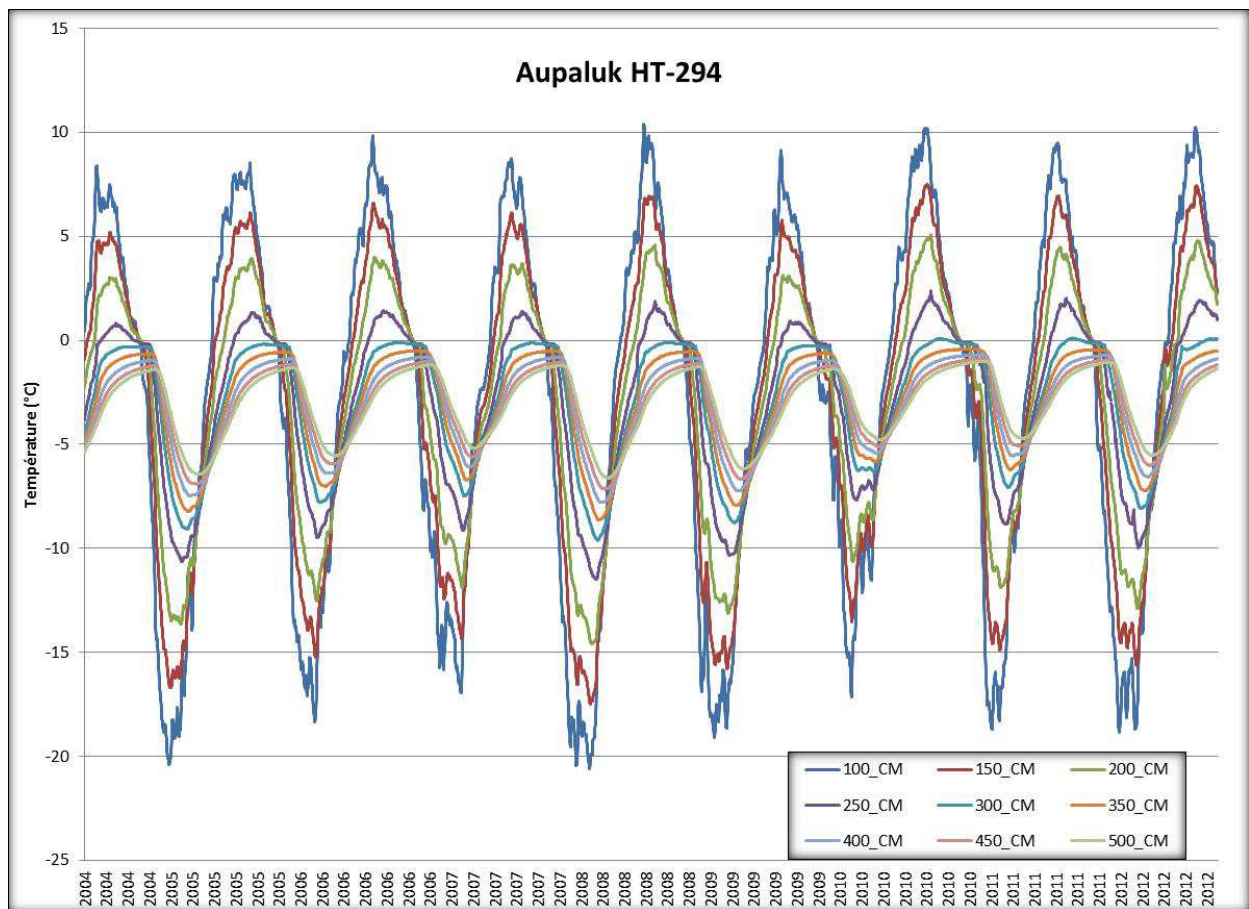


Figure 114 Donnée totales pour Aupaluk HT-294.

3.7.4.2 Printemps

Un graphique avec les températures du sol pour les mois d'avril à juin met en évidence la période associée à la fonte du couvert neigeux. La saison 1998 prend de l'importance avec des températures à la surface du sol excédant 15 °C. Le retard mesuré pour la température de l'air au printemps 2007 et 2009 se répercute en profondeur dans le sol. La remontée des températures est graduelle tant à la surface du sol qu'à 110 cm (figure 115). Au printemps 2010, les températures s'élèvent progressivement pour atteindre le seuil du 0 °C. Le printemps n'est pas hâtif et n'est pas caractérisé par une remontée brusque des températures en profondeur.

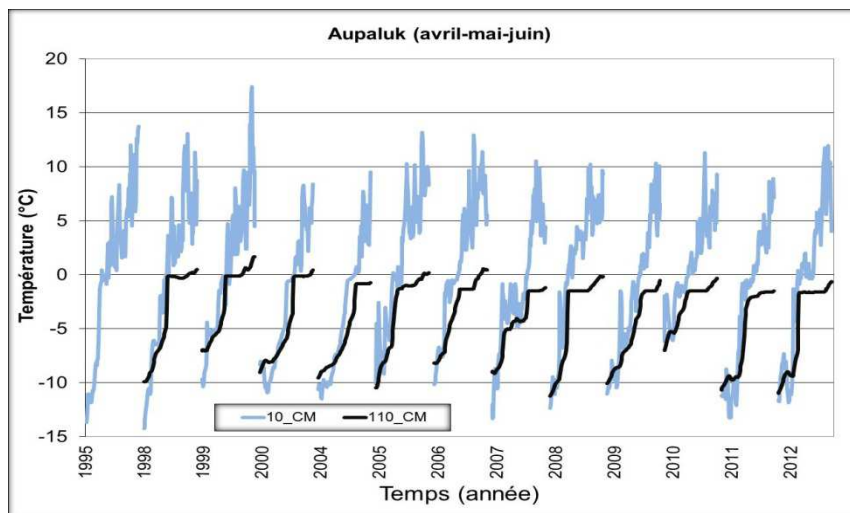


Figure 115 Profils thermiques au printemps pour Aupaluk.

3.7.4.3 Couche active

Le retard printanier en 2007 s'est traduit en fin de saison par une remontée du plafond du pergélisol dans la piste. Cette tendance s'est résorbée en 2008 avec une progression du front de dégel pour atteindre le niveau de 2006. Avec le printemps tardif de 2009 et un été ayant comptabilisé 758 degrés-jours de dégel, le plafond du pergélisol était voué à remonter. 2010 est caractérisé par approfondissement marqué de la couche active (20 cm) et ce niveau est maintenu pour 2011 et 2012. Le nombre de degrés-jours de dégel est équivalent à 2005 et 2006, mais 2010 présente le plus faible cumul de degrés-jours de gel, ce qui vient agir sur la profondeur de dégel. Le sol de la piste étant moins froid dégèle plus rapidement en profondeur. En milieu naturel, il y a aussi un approfondissement de la couche active mais pas aussi prononcé que dans la piste et un réajustement à la hausse est perceptible pour 2011 et 2012. Des mesures sont effectuées afin de noter s'il y a tassement du sol en surface et rehaussement du tubage, ce qui viendrait influencer sur la profondeur de dégel réelle.

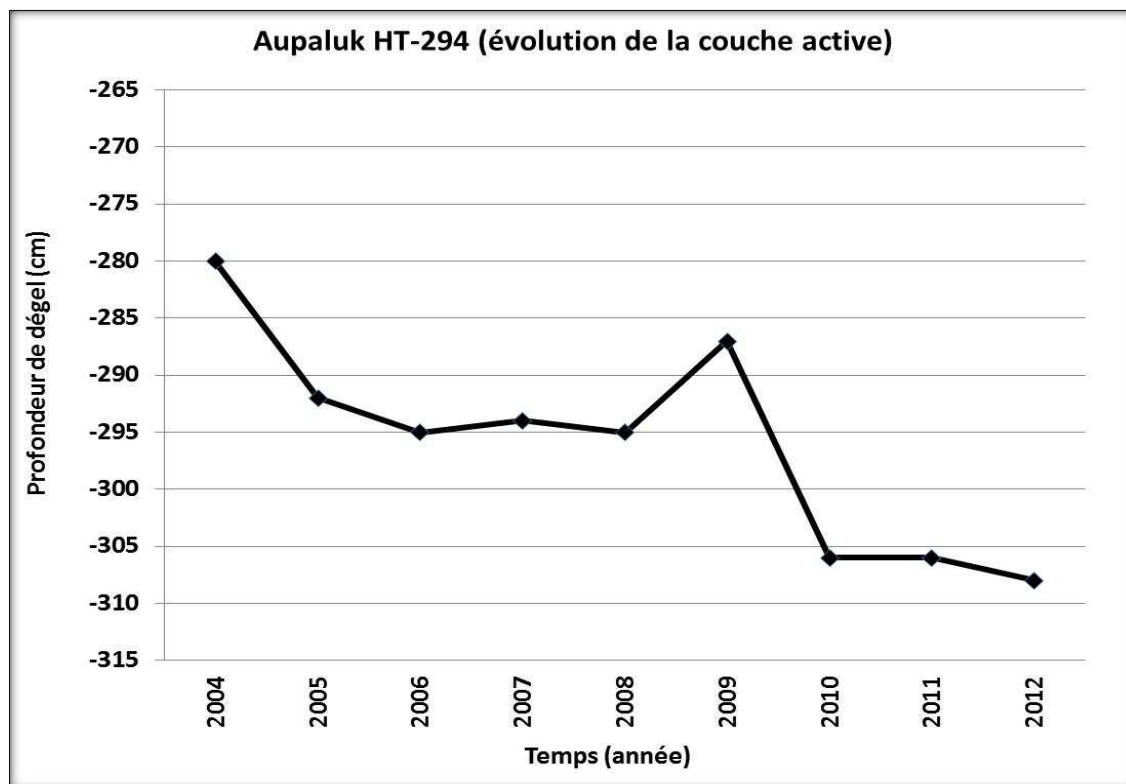


Figure 116 Évolution de la couche active dans la piste à Aupaluk.

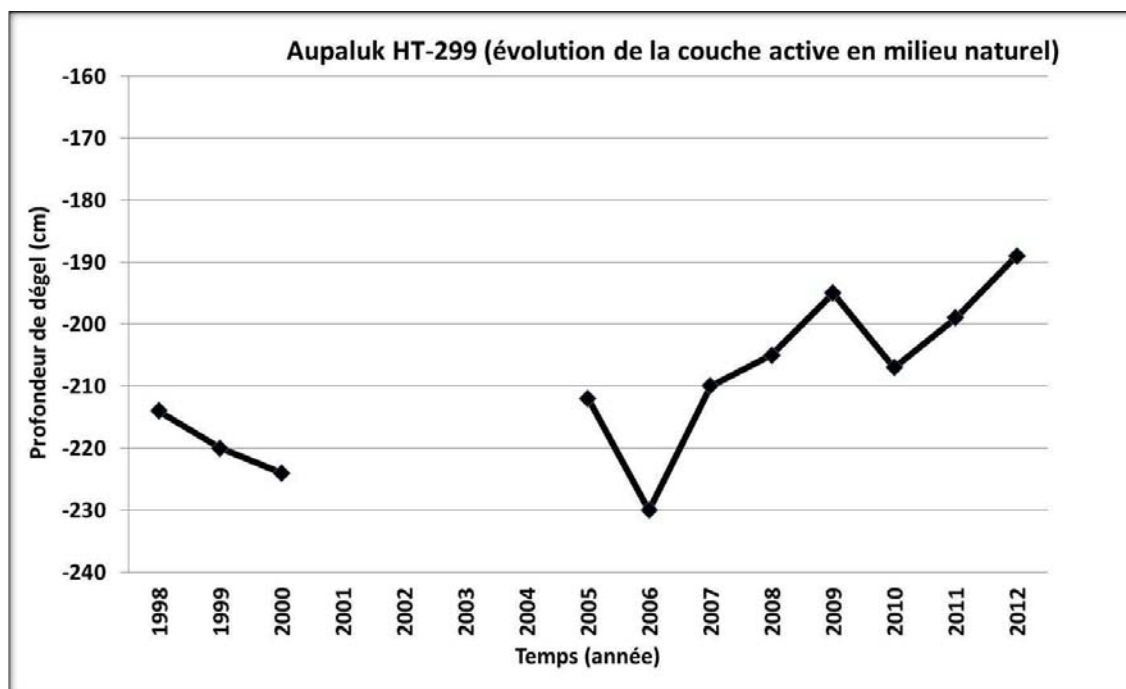


Figure 117 Évolution de la couche active en milieu naturel à Aupaluk.

3.7.4.4 Profondeurs ciblées

Le graphique des températures du sol à 17m et 19m de profondeur dans le milieu naturel en marge de la piste à Aupaluk montre une augmentation des températures au cours des 15 dernières années (figure 118). Les températures sont passées de -3,7°C en 1995 à -2,7 °C en 2004 à -2,3 °C en 2010. Ceci représente une augmentation des températures en profondeur dans le sol de plus de 1,4°C en 15 ans. L'augmentation des températures en profondeur paraît constante à 1 °C par décennie.

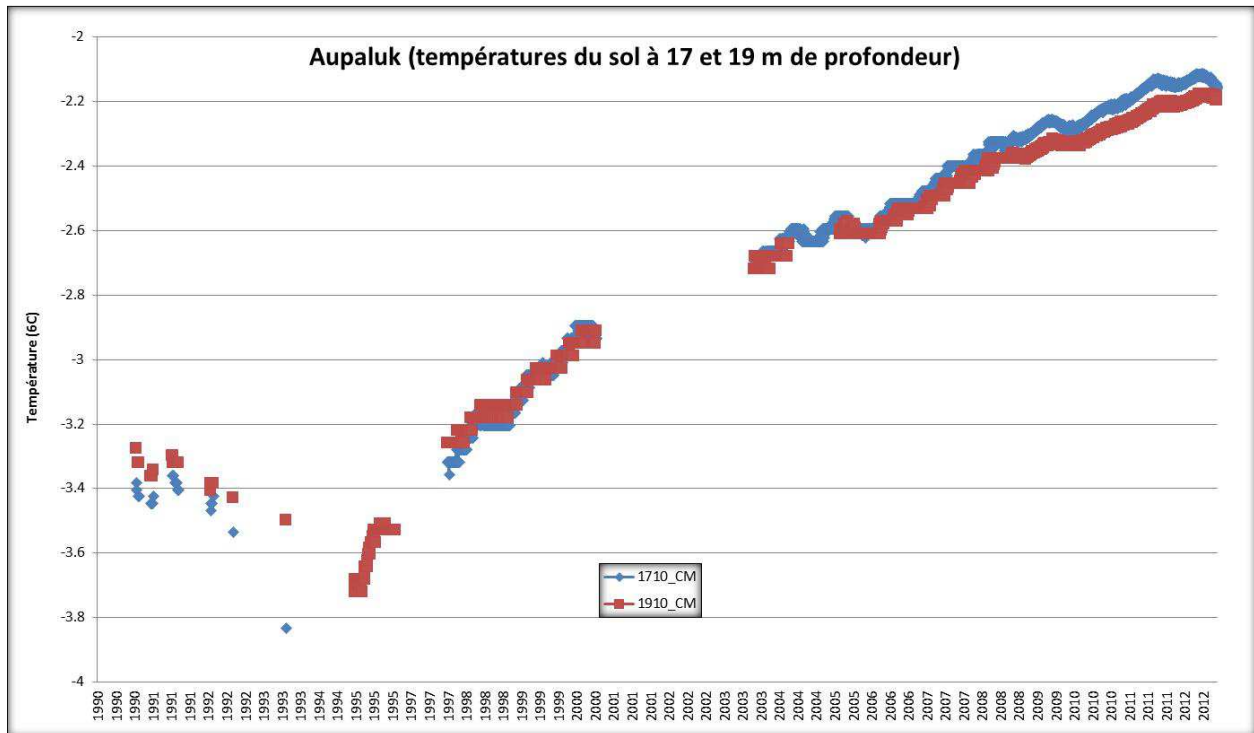


Figure 118 Températures du sol à 17 et 19 m de profondeur pour Aupaluk.

3.8 TASIUJAQ

3.8.1 Description

Quatre câbles à thermistances ont été installés à Tasiujaq lors de la construction de l'aéroport (figure 119 et 123). Le câble HT-157 est situé dans le plus proche affleurement rocheux. Le roc consistant à cet endroit en un schiste métamorphique. Les températures sont mesurées jusqu'à 20 m de profondeur. Une station de référence est installée dans la terrasse (HT304) (figure 121). Sa profondeur est limitée à 11 m. En effet, lors de l'installation, il n'a pas été possible de creuser plus profondément avec la foreuse utilisée puisque l'argile marine à partir de cette profondeur était trop molle. Néanmoins, ce forage confirme près de la piste la stratigraphie observée dans la coupe naturelle le long de la rivière. Un troisième câble (HT181) a une longueur de 5 m dans le remblai de la piste et est relié à une station (figure 122). Le quatrième et dernier câble (HT180), mesurant également 5 m, se trouve également dans la piste, à l'endroit d'une ancienne butte cryogène qui a été arasée lors de la construction. À cet endroit, une couche d'isolant rigide de 50 mm avait été placée au contact entre le remblai et le sol naturel. Le câble est également relié à une station d'acquisition automatique de données (figure 120). La température de l'air provient de capteurs installés sur la station HT-157 sur le roc et de HT-304 près de la piste.

3.8.2 Localisation

Le premier câble (HT157) est localisé à 800 mètres au nord-ouest de l'aérogare. Le second câble est situé à une quarantaine de mètres au sud-est de la piste. Le troisième (HT181) est situé dans le remblai de la piste au chaînage 5+300 m dont l'épaisseur à cet endroit est de 1,75 m ; la première thermistance a été placée originalement à 65 cm sous la surface de la piste. La quatrième station (HT-180) est située du côté nord de la piste tout comme la station HT-181, mais au chaînage 5+090 m (figure 112).

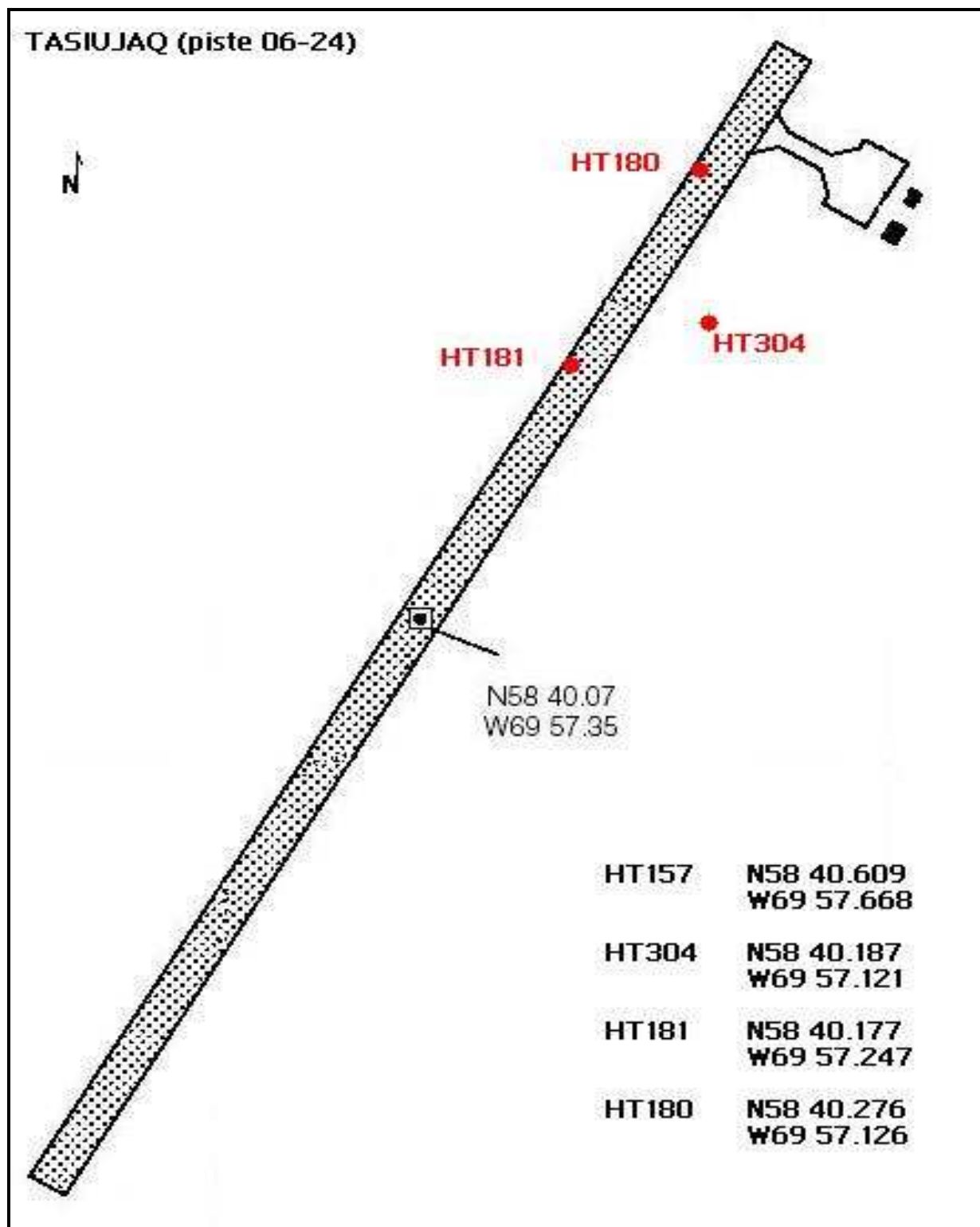


Figure 119 Schéma de localisation pour Tasiujaq.



Figure 120 Station près du remblai de la piste à Tasiujaq.



Figure 121 Station en milieu naturel à Tasiujaq.

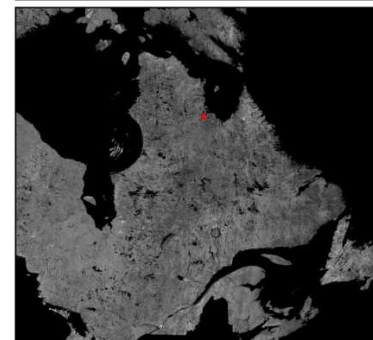


Figure 122 Station près du remblai de piste à Tasiujaq.



Tasiujaq

Plan de localisation des forages géotechniques
aéroport de Tasiujaq, Nunavik.



Légende

- ♦ Forages géotechniques instrumentés
avec un câble à thermistances
- Forages géotechniques avec
récupération



0 75 150 300
Mètres

Métadonnées:

Système de référence: NAD83
Projection: MTM zone 7
Données: Orthophotographies noir et blanc des villages
nordiques 1:10000, 2002-2003
Organisme: Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
du Québec

Réalisation:

Emmanuel L'Hérault
Centre d'études nordiques, Université Laval.
Novembre 2009

Figure 123 Carte de localisation des sites automatisés à Tasiujaq

3.8.3 Températures de l'air

3.8.3.1 Moyennes mensuelles

Les données moyennes mensuelles de la température de l'air à Tasiujaq sont présentées sous forme d'un tableau où la moyenne annuelle est comptabilisée au bas pour chaque année (tableau 29). Les données proviennent d'un site instrumenté du CEN sur l'affleurement rocheux à 800 mètres au nord-ouest de l'aérogare (HT-157). La moyenne annualisée figurant complètement au bas soit la deuxième rangée de moyennes annualisées provient quant à elle du site de l'aéroport (HT-304) instrumenté en 2004. Les valeurs maximales (orange) ont été surlignées sur le tableau afin de repérer rapidement les valeurs extrêmes. Si l'on examine de plus près les moyennes annuelles, les valeurs obtenues près de l'aéroport sont légèrement supérieures aux valeurs enregistrées sur le roc. La cause exacte n'est pas connue, mais remarquons que le site rocheux est légèrement plus élevé que l'aéroport et ouvert aux vents.

Le mois de janvier le plus froid est en 2005 avec $-27,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et c'est à l'hiver 2003 que les mois de février, mars et avril présentent les températures les plus basses. Une tendance se tramait pour juillet avant 2009, car la moyenne mensuelle était plus élevée lors des quatre étés précédents (2005-2006-2007 et 2008). Pour 2006, 2007 et 2008, la moyenne pour la température de l'air en juillet est d'environ 1°C supérieure aux moyennes obtenue lors des quatre étés précédents. Les mois de juillet et août 2009 sont enregistrés comme étant les plus froids avec des moyennes n'excédant pas $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'année 2010 affiche des températures moyennes mensuelles supérieures en février, avril, août, octobre, novembre et décembre. La moyenne mensuelle de février est de $-13,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ tandis que la normale calculée depuis la période d'automatisation du site est de $-21,46\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le mois de janvier 2011 est au-dessus des valeurs enregistrées précédemment bien que les mois suivants ne suivent pas cette tendance. Pour 2012, le mois de juin est celui qui présente la moyenne la plus élevée avec $9,47^{\circ}\text{C}$. La moyenne annuelle pour la température de l'air en 2011 est de $-5,07^{\circ}\text{C}$.

Table 29 Moyennes mensuelles pour la température de l'air à Tasiujaq.

Moy. Mensuelles	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Janvier		-19.98	-22.86	-27.25	-22.13	-20.04	-24.60	-23.10	-20.48	-17.51	-23.71
Février		-27.90	-22.09	-21.90	-21.43	-18.51	-25.74	-21.09	-13.05	-23.90	-21.88
Mars		-25.00	-19.39	-16.24	-12.20	-19.98	-19.97	-19.23	-14.21	-19.16	-17.87
Avril		-10.87	-10.80	-5.71	-4.94	-8.38	-7.01	-9.20	-4.64	-12.44	-9.16
Mai		2.55	-2.27	2.45	3.22	-3.90	2.57	-3.75	-0.53	-2.17	0.91
Juin		6.76	3.60	7.88	7.52	5.76	8.17	5.59	5.75	5.62	9.47
Juillet	10.66	11.26	10.71	11.75	12.36	12.78	12.40	9.86	11.60	12.22	11.88
Août	9.90	11.36	10.39	10.86	9.76	10.43	11.65	9.30	13.72	11.43	12.31
Septembre	5.99	9.32	5.42	6.20	6.33	4.46	5.69	5.53	6.90	6.48	7.40
Octobre	0.85	0.97	1.88	1.88	1.55	-0.25	0.54	-1.23	2.31	0.73	
Novembre	-9.74	-5.49	-6.25	-6.05	-6.08	-8.93	-8.54	-5.48	-2.17	-6.51	
Décembre	-15.13	-11.53	-21.72	-16.78	-13.74	-20.46	-21.16	-12.47	-6.40	-15.59	
Moyenne annuelle HT-157		-4.88	-6.12	-4.41	-3.32	-5.58	-5.50	-5.44	-1.77		
Moyenne annuelle HT-304				-4.29	-3.18	-5.43	-5.37	-5.25	-1.60	-5.07	

En portant en graphique les moyennes quotidiennes de la température de l'air, certains constats peuvent être établis. Le site de Tasiujaq est celui ayant fait l'objet du plus long suivi instrumenté puisque les données de la température de l'air reculent jusqu'en 2002. Malgré l'apparition de courbes additionnelles sur le graphique des moyennes mensuelles, les mois affichant une plus grande variabilité d'amplitude sont à l'hiver. Tout comme les autres sites du Nunavik, les mois de décembre à mars sont caractérisés par une plus grande variabilité des températures moyennes mensuelles d'une année à l'autre. Quelques variations apparaissent comme des printemps tardifs en 2004, 2007 et 2009 où la température moyenne en mai et juin était inférieure à la moyenne de l'ensemble du groupe (Figure 124). Le graphique met en évidence les mois de février et août 2010. Les températures sont nettement au-dessus des autres points pour ces mois ainsi que novembre et décembre 2010.

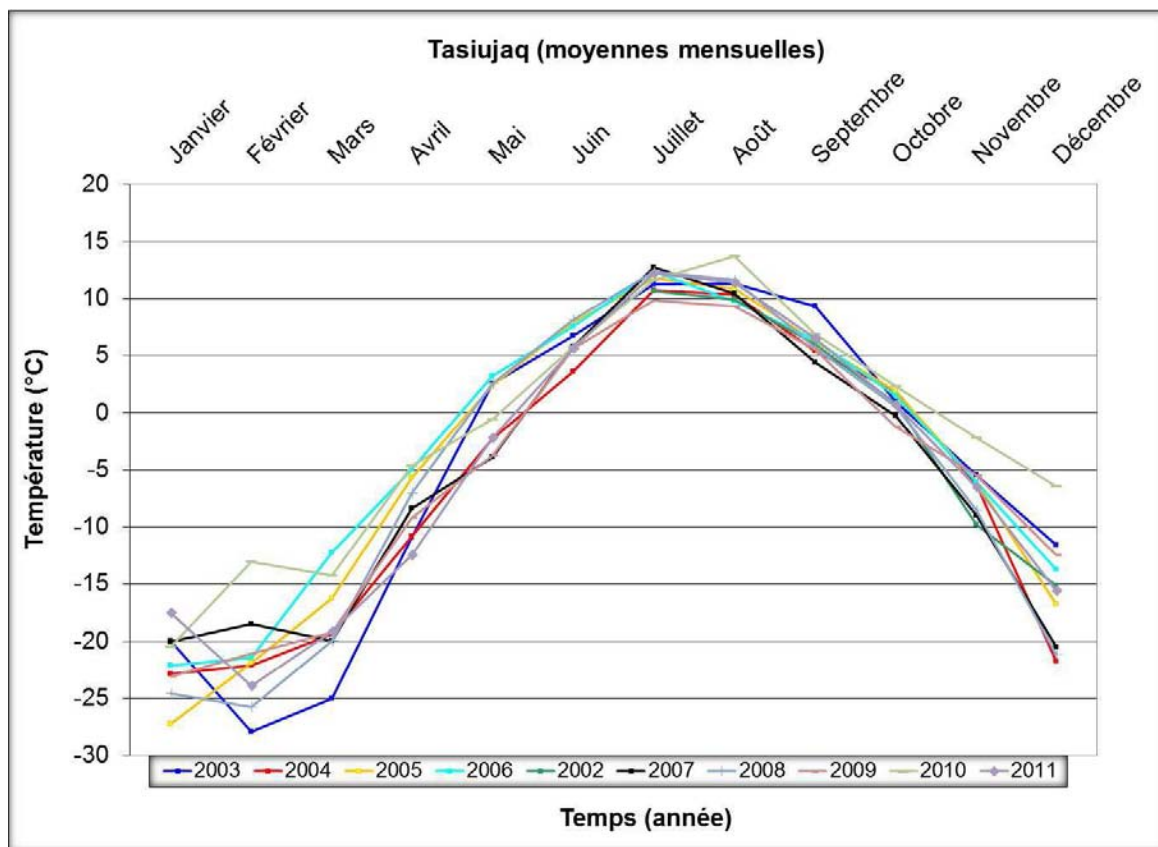


Figure 124 Moyennes mensuelles de la température de l'air pour Tasiujaq.

3.8.3.2 Moyennes saisonnières

Selon le tableau 30, l'été 2009 est celui étant le plus froid et celui de 2010 étant le plus chaud suivi de près par 2003 et 2012. Les étés oscillent entre 9°C et 11°C tandis que les hivers présentent davantage de variabilité (-15°C à -24°C). L'hiver le plus froid est celui de 2007 avec une moyenne de -24,25 °C. L'hiver 2009 a été particulièrement doux avec une moyenne saisonnière de -15,67 °C.

Table 30 Moyennes saisonnières pour Tasiujaq.

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Printemps		-3.92	-5.43	-1.71	-0.39	-4.29	-1.52	-5.01	-2.37	-5.77	-2.34
Été	9.14	10.95	8.93	10.18	10.01	9.56	10.37	8.85	10.99	10.3	10.92
Automne	-6.07	-2.77	-5.12	-3.71	-3.87	-6.94	-6.23	-4.66	-0.51	-4.35	
Hiver	-23.29	-21.44	-22.73	-19.97	-19.82	-24.25	-22.63	-15.67	-20.04	-21.7	

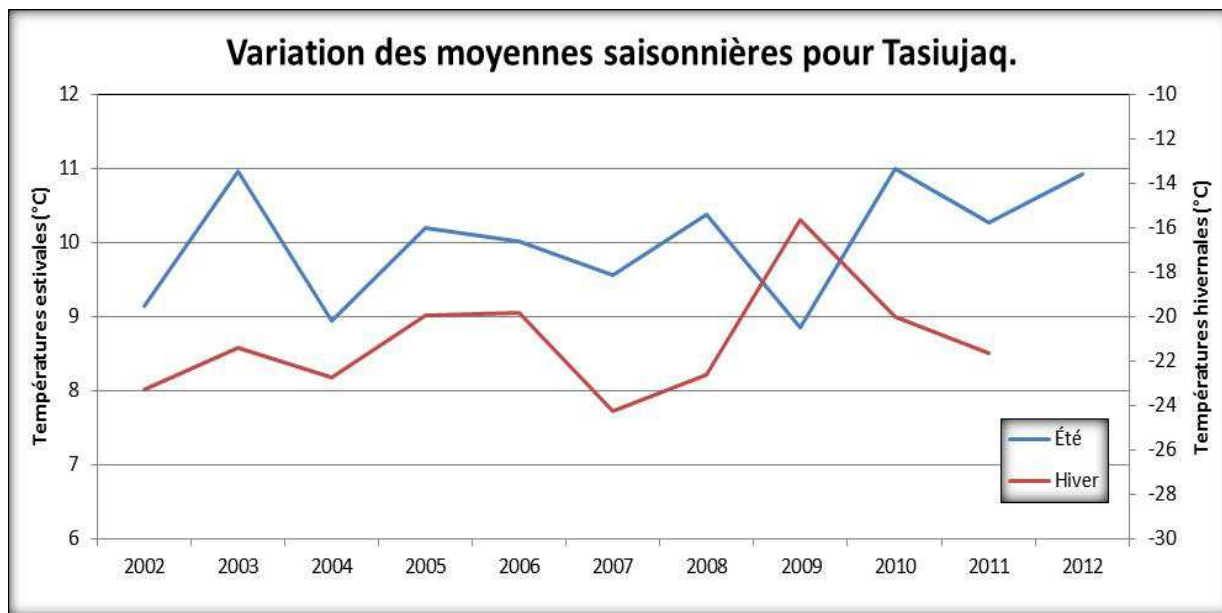


Figure 125 Moyennes saisonnières pour Tasiujaq.

3.8.3.3 Moyennes quotidiennes

On observe un redoux pendant l'hiver 2007-2008 et des maximums au-dessus de 20°C à l'été 2003, 2006 et 2008 (figure 126). C'est le 3 mars 2003 que la température minimale a été atteinte avec -39,7 °C. En 2008, la température minimale a été enregistrée le 6 janvier avec -35,2 °C. Pour 2009, la moyenne horaire la plus basse est de -35,8 °C tandis qu'en 2010 est atteint -33,93 °C. C'est le 24 juillet 2008 que la température maximale a été enregistrée avec 29,9 °C tout comme le 8 juin 2006. Ceci est une valeur moyenne pour l'heure d'enregistrement de la donnée. La température a donc excédé 30 °C le 24 juillet 2008, car le maximum absolu est toujours plus élevé que la valeur moyenne horaire. En 2009, le maximum atteint est de 23,8 °C en juillet bien qu'en août 2010, le maximum atteint 28,7°C.

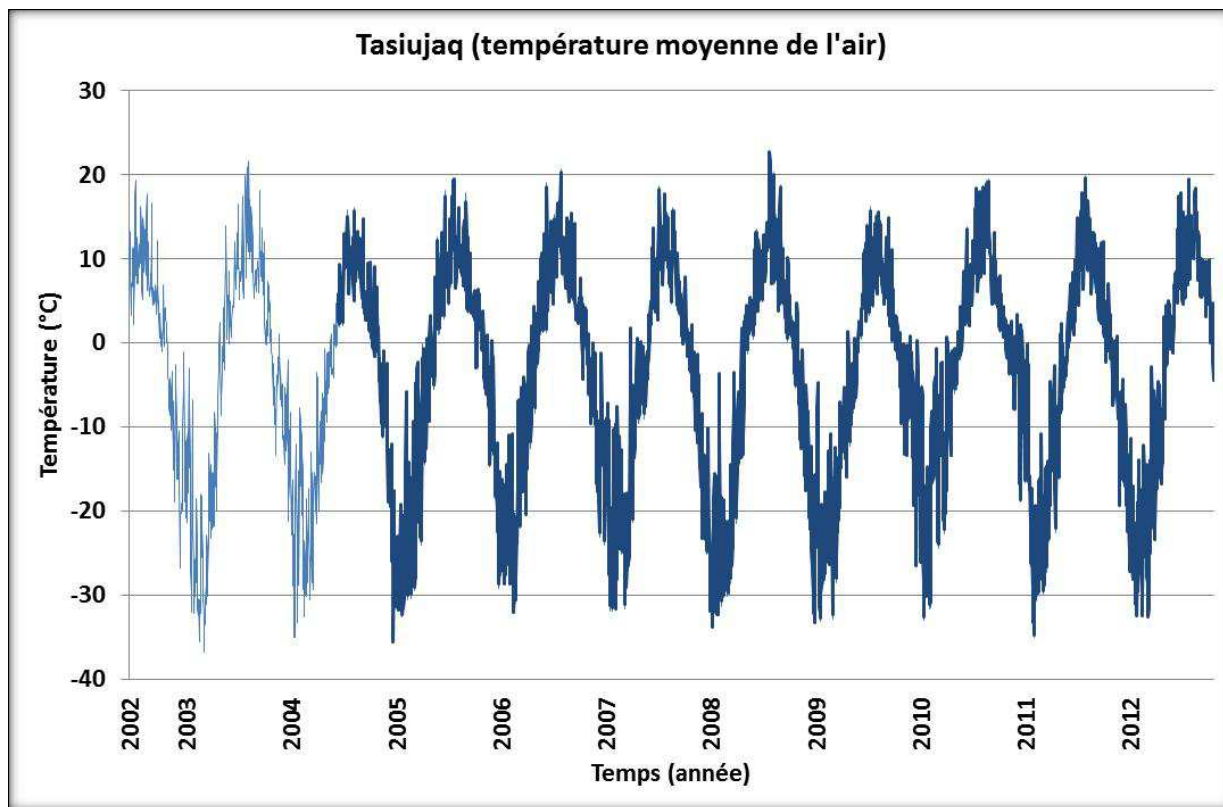


Figure 126 Températures moyennes de l'air à Tasiujaq.

3.8.3.4 Seuils

Le tableau 31 montre le nombre de jours annuellement atteints par des seuils établis. Les années 2003 et 2008 sont celles présentant la plus grande variabilité d'amplitude des températures. Les températures hivernales ont été plus basses tandis que les températures estivales ont été plus élevées. Durant ces années (2003 et 2008), le nombre de journées où la température a atteint -20°C dépasse une centaine (100) de journées. On observe que les hivers 2005-2006 et 2006-2007 affichent un faible total de journées ayant atteint les seuils négatifs (-20°C et -30°C). C'est en 2012 que le seuil de 15°C a été atteint le plus grand nombre de jours avec 64 dont 25 de ces journées affichaient une température supérieure à 20°C . En 2009, le seuil des 15°C est atteint à 31 reprises tandis qu'en 2010, c'est 48 jours de plus de 15°C , dont 18 supérieures à 20°C . L'hiver 2010 a été doux avec un cumul de 8 journées seulement où la température a atteint -30°C .

Table 31 Tableau du nombre de jours selon des seuils établis.

	<-30°C	<-20°C	>15°C	>20°C
2002			38	13
2003	42	107	48	26
2004	28	81	31	10
2005	36	98	44	14
2006	14	70	47	15
2007	15	73	39	11
2008	36	104	50	22
2009	18	97	31	14
2010	8	57	48	18
2011	28	77	38	15
2012	27	99	64	25

3.8.3.5 Degrés-jours

Le nombre de degrés-jours de gel a atteint 3294 à l'hiver 2007-2008; ce cumul est similaire à celui de 2003 où il avait atteint 3323 (tableau 32). Les hivers 2005-2006 et 2006-2007 ont cumulé 2548 et 2761 degrés-jours de gel respectivement. Avec 956 degrés-jours de dégel, l'année 2009 enregistre le plus faible cumul pour toute la période d'enregistrement. L'année 2010 présente le nombre de degrés-jours de gel le plus faible avec 2238. Pour 2012, c'est 2920 degrés-jours de gel qui sont cumulés et 1337 degrés-jours de dégel en date de la récupération des données.

Table 32 Tableau du cumul des degrés-jours pour Tasiujaq.

	Gel	Dégel
2003	3323	1358
2004	2906	1005
2005	3050	1317
2006	2548	1284
2007	2761	1068
2008	3294	1297
2009	3242	956
2010	2238	1289
2011	2587	1140
2012	2920	1337

Le début de la saison de cumul des degrés-jours de gel change très peu selon les années, et se situe à fin du mois d'octobre. Le mois d'octobre est un mois de transition où les températures fluctuent de part et d'autre du point de congélation. Deux classes peuvent être identifiées sur le graphique en fonction du seuil des 3000 degrés-jours de gel. D'un côté nous avons 3 hivers consécutifs sous ce seuil (2003-2004, 2004-2005 et 2005-2006) et de l'autre se trouvent les hivers 2002-2003, 2004-2005, 2007-2008 et 2008-2009. L'hiver 2009-2010 se situe nettement sous le seuil des 2500 degrés-jours de gel et semble être dans une classe à part des autres (figure 127). Même si 2010-2011 accuse un retard (courbe verte pâle) dès janvier, les basses températures en février, mars et avril viennent combler ce manque.

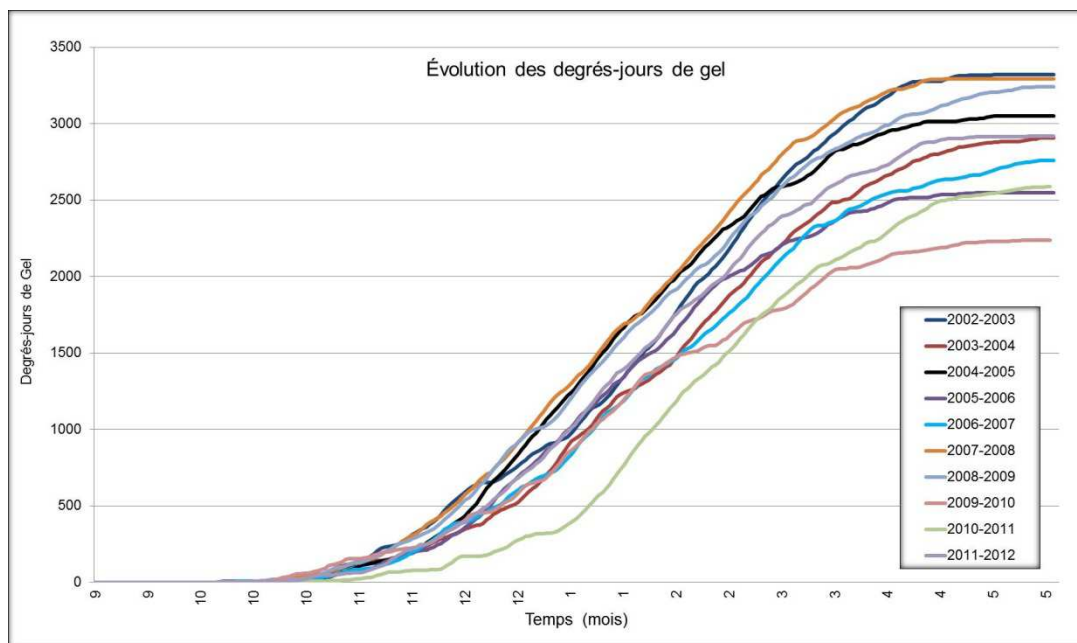


Figure 127 Évolution des degrés-jours de gel pour Tasiujaq.

Le graphique sur l'évolution de degrés-jours de dégel met également en évidence un seuil (1200 degrés-jours de dégel). Les années se classent en deux groupes distincts, un groupe où la saison débute au début mai (2003, 2005, 2006, et 2008) et un autre où le début du cumul se fait en juin (2002, 2004, 2007, 2009 et 2010) (figure 128). Le premier groupe totalise toujours un nombre plus élevé de degrés-jours de dégel, sauf 2010 qui a cumulé un grand nombre de degrés-jours de dégel en août.

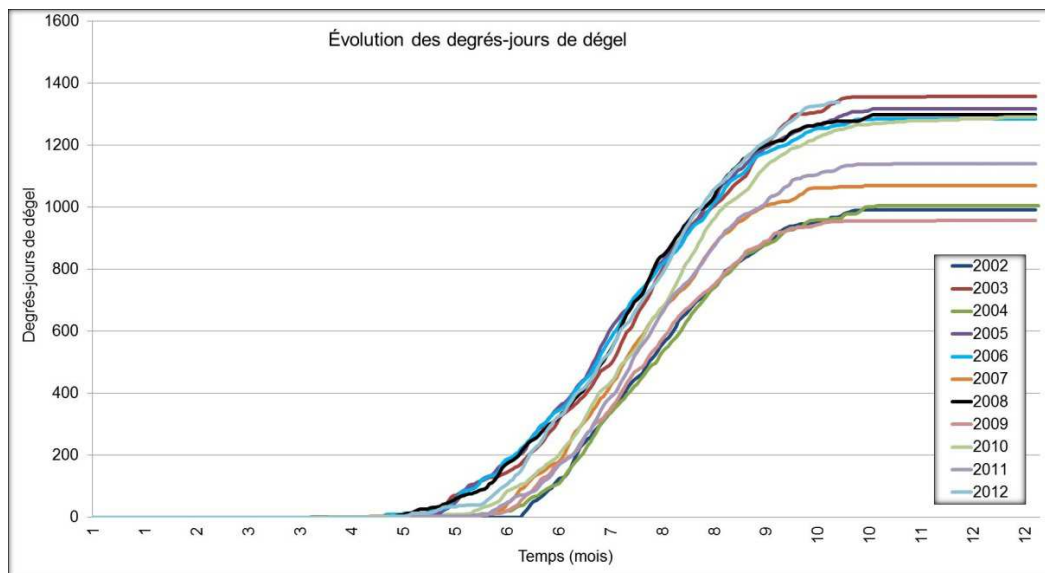


Figure 128 Évolution des degrés-jours de dégel pour Tasiujaq.

3.8.4 Températures du sol

3.8.4.1 Données totales

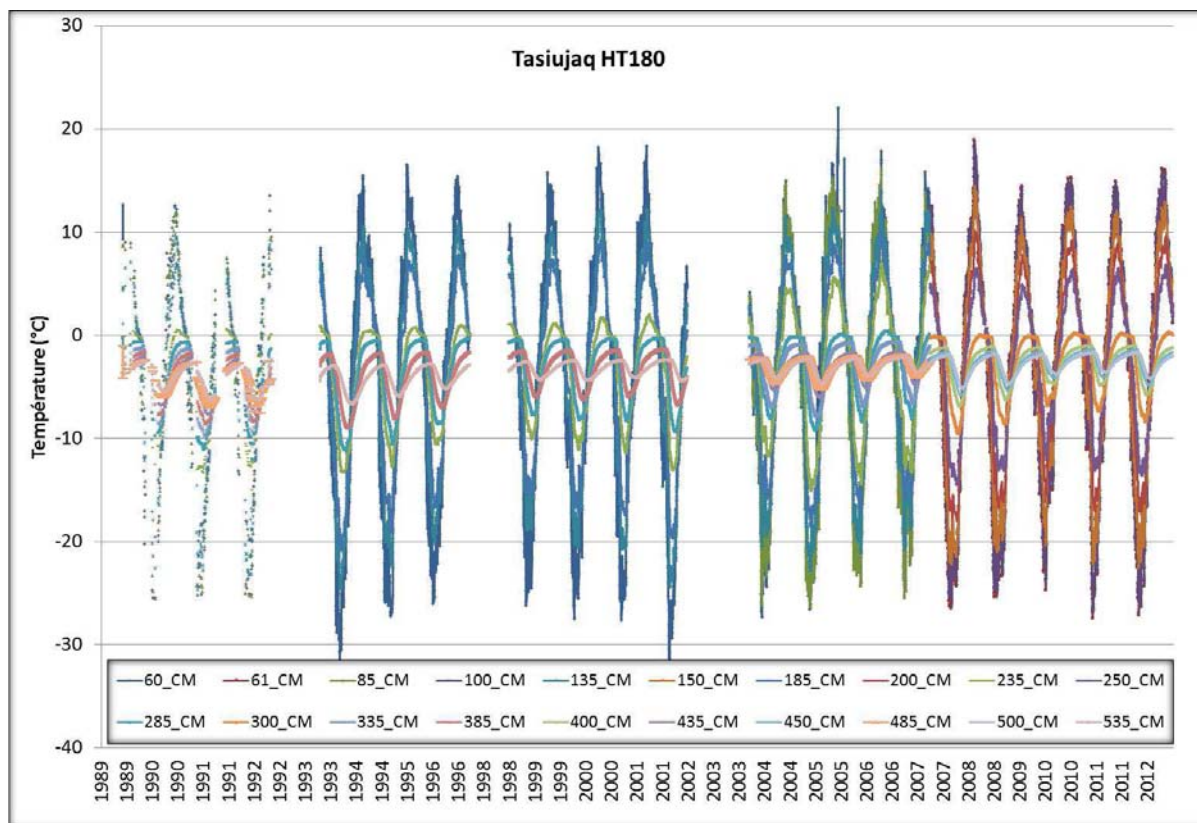


Figure 129 Températures du sol à HT-180.

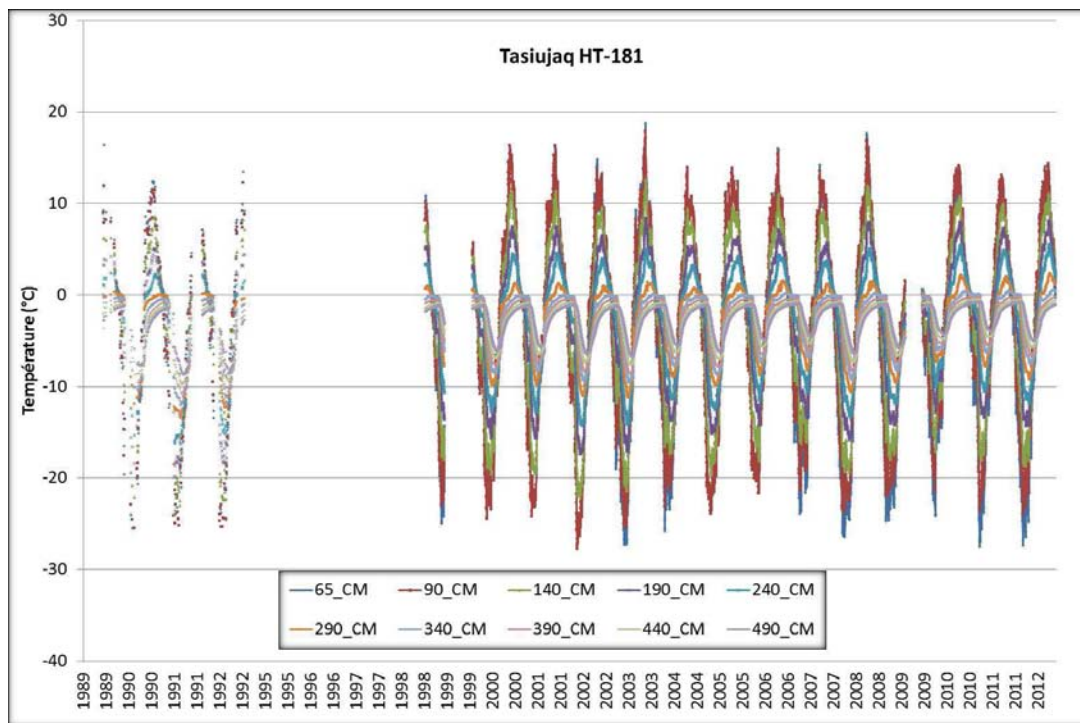


Figure 130 Températures du sol à HT-181.

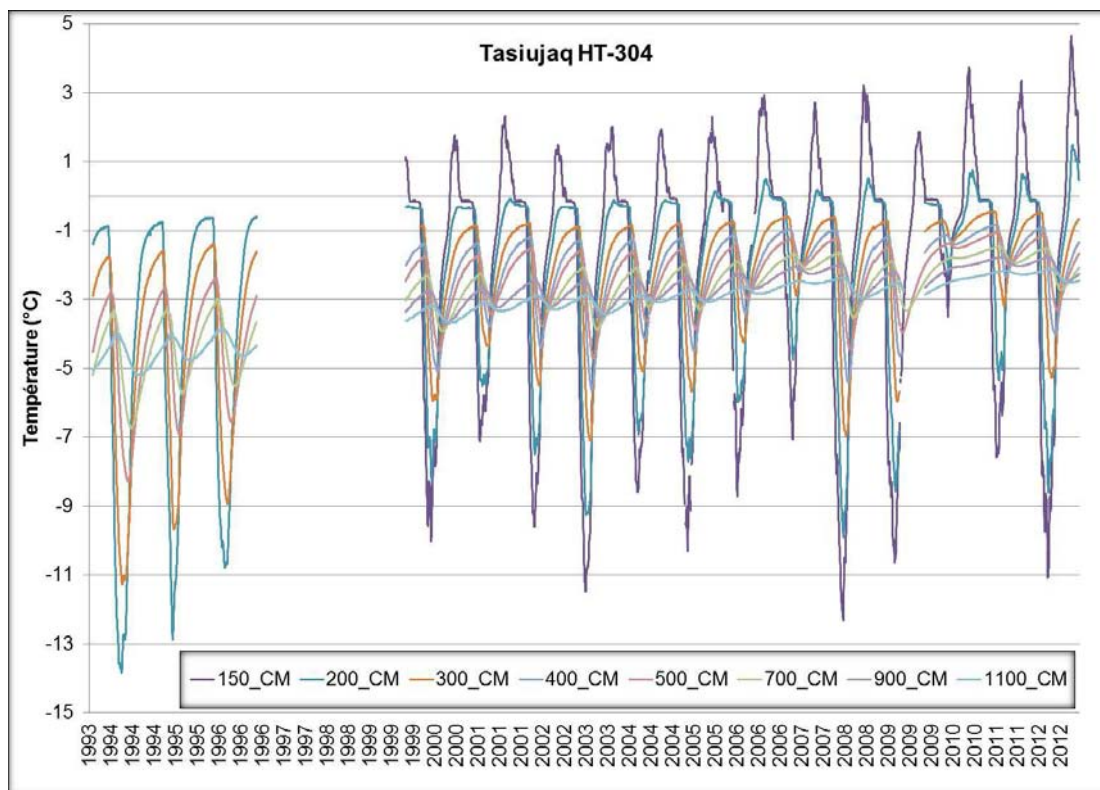


Figure 131 Températures du sol à HT-304.

3.8.4.2 Printemps

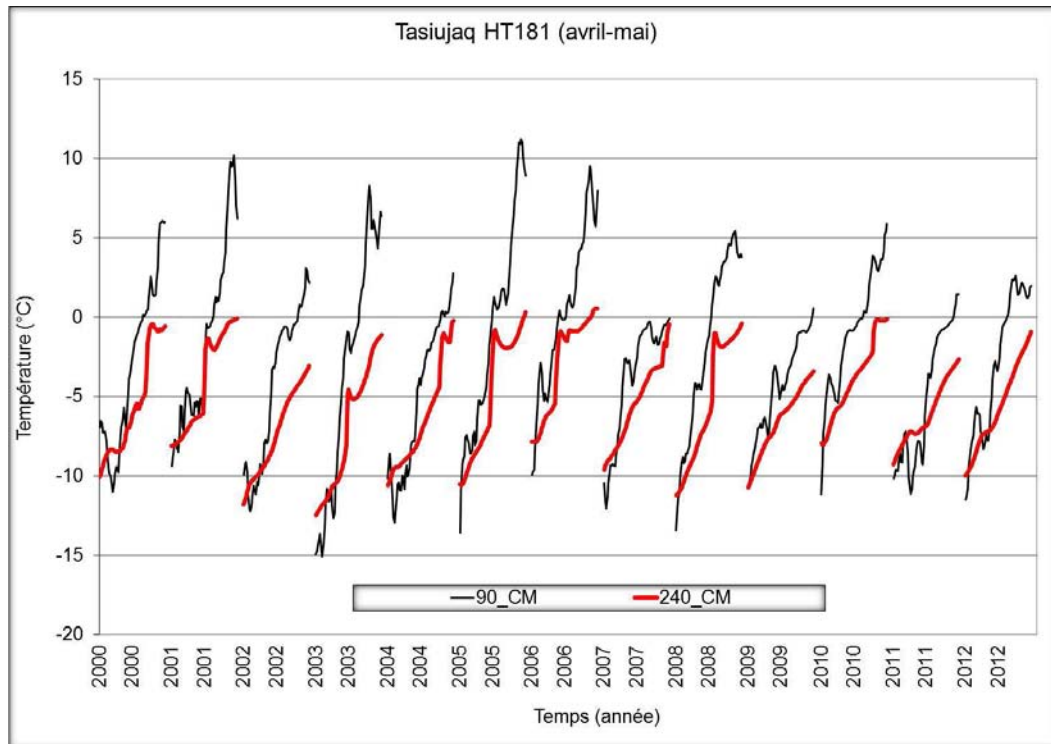


Figure 132 Températures au printemps dans la piste à Tasiujaq.

3.8.4.3 Couche active

L'épaisseur de sol qui dégèle annuellement (mollisol) fait état de ce retard printanier. En effet, l'épaisseur de la couche active est moindre lors de printemps tardifs (2002, 2004, 2007 et 2009). Le plafond du pergélisol remonte lors de ces années où l'amorce du cumul des degrés-jours de dégel est en juin. Il est possible que ce ne soit qu'un facteur parmi plusieurs puisque ces étés (2002, 2004, 2007 et 2009) présentent aussi de faibles valeurs maximales de température de l'air. Ce sont ces années où se cumulent aussi un nombre moindre (<40) de journées où la température excède 15 °C. Après un léger recul en 2007, le mollisol est revenu au niveau de 2006 pour l'année 2008 (figure 133, 134 et 135). Sur la figure 135, le plafond du pergélisol a remonté en 2009, ce qui est représentatif des conditions printanières et estivales ayant eu cours. Un hiatus dans les données à 200 et 300 cm de profondeur ne permettait pas de calculer avec certitude la profondeur maximale atteinte par le dégel en 2009 au câble HT-304.

Pour 2010, un hiver doux cumulé à une moyenne annuelle au-dessus des valeurs enregistrées précédemment se traduit par un approfondissement important de la couche active. Un léger recul de la profondeur est enregistré pour 2011 mais la tendance continue en 2012.

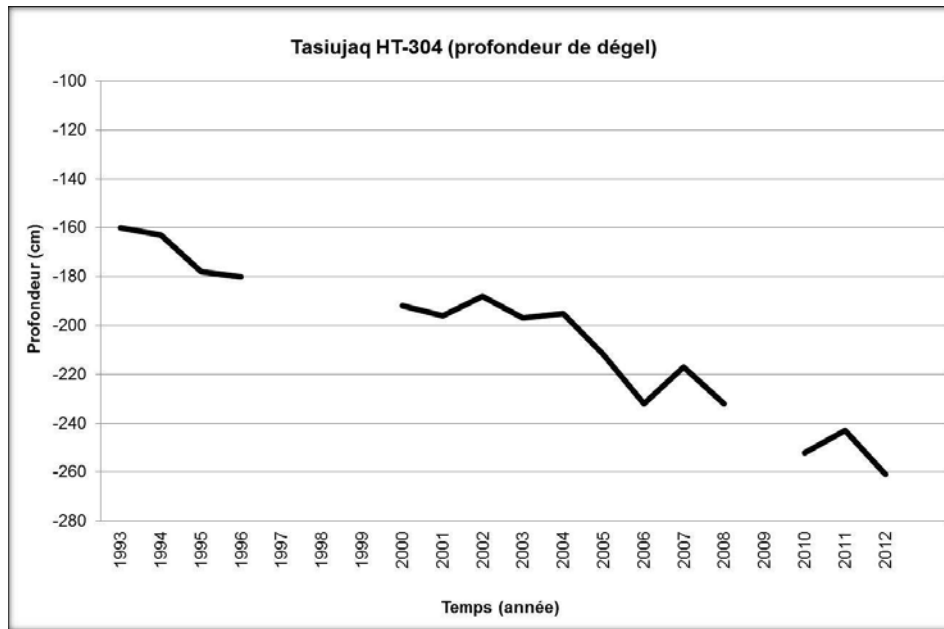


Figure 133 Évolution de la couche active pour HT-304 à Tasiujaq.

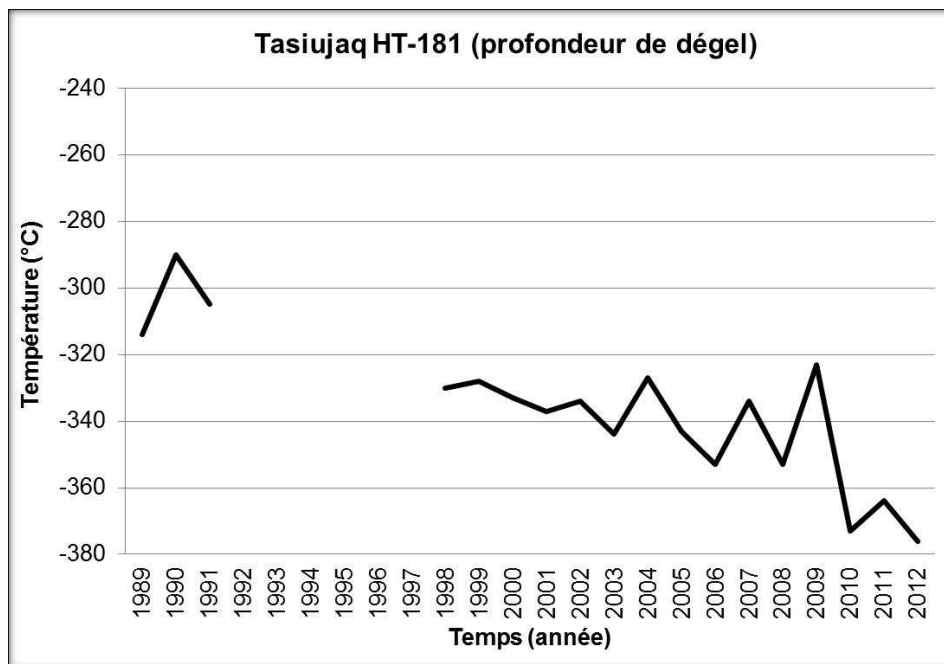


Figure 134 Évolution de la couche active pour HT-181 à Tasiujaq.

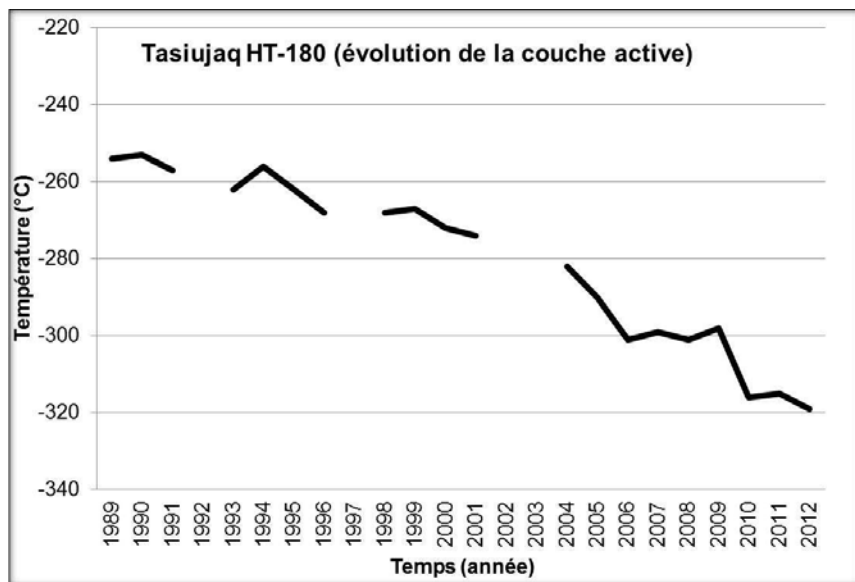


Figure 135 Évolution de la couche active pour HT-180 à Tasiujaq.

3.8.4.4 Profondeurs ciblées

En prenant la courbe totale des températures du sol à 11 m de profondeur en milieu naturel, la tendance est au réchauffement. Les hivers rigoureux ayant eu court en 2007-2009 ont influencé le profil thermique en profondeur, mais avec un certain déphasage (figure 136). La moyenne des températures à 11m de profondeur est passée de -4,7°C en 1994 à -2,7°C. Il y a donc eu une augmentation des températures en profondeur de 2°C en terrain naturel.

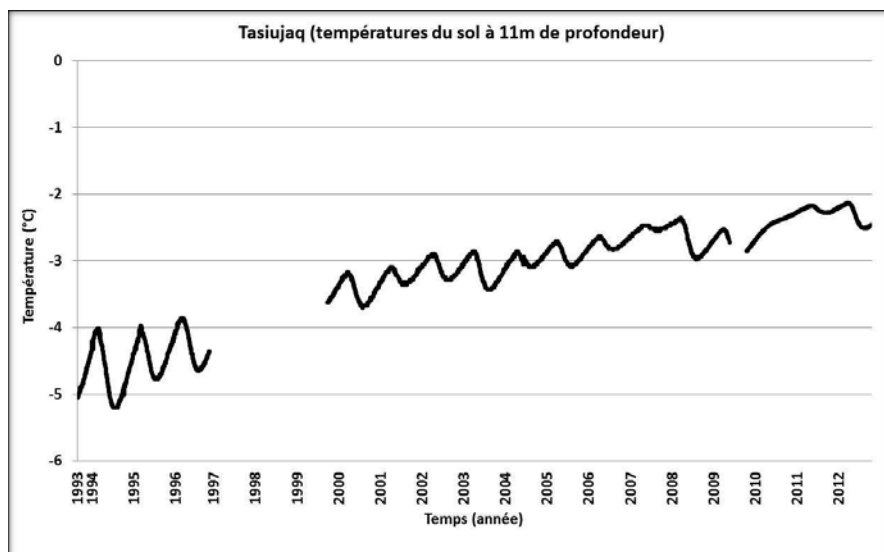


Figure 136 Températures du sol à 11m de profondeur pour Tasiujaq.

4.0 CONCLUSION

Un tableau cumulatif présente les grandes lignes et les faits saillants des observations suite à l'analyse des données récupérées en octobre 2012 (tableau 33). Au Nunavik, l'année 2008 a connu une période de canicule du 23 au 25 juillet avec des températures maximales de plus de 29 °C dans plusieurs localités. L'année 2008 comptabilise un grand nombre de journées où la température a excédé 20 °C comparativement aux années précédentes. Les mois de juin, juillet et août ont été particulièrement chauds. Il y a eu une période de redoux en janvier où les températures ont rejoint le point de congélation (Tasiujaq). Malgré le redoux, l'hiver 2007-2008 présente des moyennes mensuelles inférieures aux enregistrements des deux hivers précédents.

Table 33 Sommaire des sites instrumentés au Nunavik.

		Inukjuak	Puvirnitug	Akulivik	Salluit	Quaqtaq	Kangirsuk	Aupaluk	Tasiujaq
Moyenne Annuelle	2005	-4.86		-5.96	-6.91	-5.48		-5.11	-4.29
	2006	-3.51	-4.41	-4.44	-5.65	-3.98	-4.56	-3.84	-3.18
	2007	-6.29	-7.35	-7.24	-6.81	-5.79	-6.53	-5.75	-5.43
	2008	-4.96	-6.12	-6.18	-6.33	-6.44	-6.84	-6.31	-5.37
	2009	-5.37	-6.13	-5.81	-6.74	-5.75	-6.35	-5.85	-5.25
	2010	-2.43	-2.98	-3.00	-2.98	-2.45	-2.79	-2.22	-1.60
	2011	-5.48	-6.09	-6.32	-7.19	-5.98	-6.82	-5.83	-5.07
Degrés-Jours Gel	2005			3332	3537	2887		3065	3050
	2006		2853	2693	2905	2327	2756	2579	2548
	2007		3164	3019	3225	2430	2875	2680	2761
	2008		3666	3484	2497	3090	3524	3302	3294
	2009	3343	3613	3414	3340	2930	3401	3212	3242
	2010	2364	2641	2501	2478	2080	2352	2203	2238
	2011	2455	2859	2803	2792	2377	2806	2572	2587
	2012	2789	3321	3176	3419	2649	3173	2960	2920
Degrés-Jours Dégel	2005			977	805	743		1079	1317
	2006		1115	966	780	794	1024	1101	1284
	2007		944	803	676	676	861	935	1068
	2008		1383	1173	996	717	994	997	1297
	2009	1161	1118	1051	870	594	766	759	956
	2010	1283	1262	1112	1104	890	1042	1110	1289
	2011	1146	1065	895	866	645	852	935	1140
	2012	1186	1200	1029	871	807	1019	1085	1337
Mollisol	2005			205	263	182	218	212	290
	2006			226	275	202	224	230	301
	2007			218	254	182	209	210	299
	2008	575		239	270	178	223	205	301
	2009	569	434	236		156	193	195	298
	2010	575	382	286		219	231	207	316
	2011	571	368	257		174	219	199	315
	2012	550	382	269		196	227	189	319

En effet, à l'hiver 2007-2008, un nombre élevé de jours où la température a chuté sous -20 °C et -30 °C a été comptabilisé. L'année 2008 a été caractérisée par un hiver rigoureux et une période estivale au-dessus des moyennes saisonnières. Il y a donc eu une plus grande variabilité de l'amplitude des températures de l'air. L'année 2009 est caractérisée par un printemps tardif avec des moyennes mensuelles de mai inférieures aux valeurs enregistrées depuis l'automatisation. Les températures moyennes pour le mois de juin ont également été basses. Ceci s'est traduit par un recul de la profondeur maximale de dégel pour tous les sites en 2009. Le sol a dégelé moins profondément en 2009, peu importe le site. Seuls les sites en marge des pistes subissant beaucoup d'enneigement n'ont pas connu de fluctuations de l'épaisseur de la couche active. La couche active est vouée à un approfondissement pour ces sites qui connaissent un fort enneigement. L'enneigement important vient inhiber toute influence thermique à l'hiver. Au pied du remblai à Inukjuak par exemple, la profondeur maximale du dégel est de 575 cm. À 100 cm de profondeur, la température la plus froide a atteint -0,05°C et ce, pour une période d'environ 10 jours. Il est vraisemblable qu'à cette température, le matériau ne soit pas gelé et que cette masse de sol non gelée au pied du remblai de la piste d'Inukjuak corresponde à un talik. Un talik est une masse de sol non gelé au sein d'une zone à pergélisol.

En 2009, le cumul des degrés-jours de gel a été légèrement inférieur par rapport à 2008 pour l'ensemble des sites. Le recul du cumul des degrés-jours de dégel a été plus important pour les villages situés autour de la baie d'Ungava. Le recul des degrés-jours de dégel est responsable pour la remontée du plafond du pergélisol en 2009.

En 2010, la moyenne annuelle enregistrée à Inukjuak est près de 3 °C supérieure à la valeur de 2008 et 4,5 °C par rapport à la normale climatique (-7 °C). Pour le site de Kuujuaq, la moyenne annuelle pour 2010 est de -0,5 °C ce qui correspond à une variation positive de plus de 5 °C à la normale climatique. L'année 2010 enregistre le plus faible cumul de degrés-jours de gel pour tous les sites depuis l'automatisation et un niveau élevé de degrés-jours de dégel. Ceci a pour conséquence de favoriser un approfondissement de la couche active sur tous les sites.

À certains endroits, le sol a dégelé sur une épaisseur supplémentaire de 50 cm sauf à Puvirnituq où un recul a été observé. La remontée du pergélisol à Puvirnituq est attribuée à la mise en place d'une berme convective de protection de 2 mètres d'épaisseur (figure 16). Le pergélisol est remonté de 5,75 m en 2008 à 4,39 m en 2009, à 3,82 m en 2010 pour se situer à 3,68 m en septembre 2011. Notons toutefois que les profondeurs sont calculées sur la base du 0 °C et que la salinité du sédiment peut faire abaisser le point de congélation. Néanmoins l'effet thermique de la berme sur le pergélisol en dessous est réel et de bon augure pour la stabilité du bord de piste.

Pour 2011, la moyenne annuelle enregistrée à la station d'Inukjuak est de -5,48°C soit 3°C plus froide que l'année précédente (2010). Cette moyenne demeure toutefois en deçà de la normale climatique pour ce site (-7°C). Pour tous les sites suivis, il y a eu un léger recul dans la profondeur atteinte lors du dégel annuel comparativement à 2010. Bien que 2012 ait connu un hiver rigoureux, le cumul des degrés-jours de dégel a également été important.

Bien que certaines disparités existent entre les sites, des tendances peuvent être dégagées des analyses faites à partir des données enregistrées. Il y a eu un réchauffement notable au cours des dernières années à tous les sites suivis. On dénote des printemps doux et hâtifs en 2005, 2006 et 2008. Les printemps 2007, 2009, 2011, par contre, ont été très froids partout au Nunavik. Les hivers les plus doux c'est-à-dire ceux qui cumulent le moins de degrés-jours de gel sont les hivers 2006-2007 et 2009-2010. Les profondeurs de dégel ont diminué très légèrement en 2009, mais la tendance générale de tous les sites aéroportuaires du Nunavik demeure sans contredit une augmentation de l'épaisseur du sol qui dégèle chaque année sur la période d'observation. L'année 2010 le démontre très bien avec une augmentation marquée de la progression du dégel. Les données de l'analyse du régime thermique en profondeur indiquent aussi une augmentation des températures. L'abondance de l'enneigement en bordure des pistes provoque inexorablement une progression de l'épaisseur de la couche active. Le cumul des données dans le contexte du programme de monitoring génère des informations sur les tendances qui deviennent de plus en plus raffinées avec le temps et des nuances régionales commencent à ressortir du suivi. Il serait intéressant

de comparer ces résultats avec des observations sur les tassements mesurés récemment aux pistes.

Seuls les faits saillants du régime thermique et du climat relatifs à chaque site sont commentés dans le texte. La haute qualité des données permettra d'étalonner des calculs et des simulations numériques pour améliorer la prévision des impacts à venir et, aussi, pour estimer la performance des moyens d'adaptation mis en place dans le contexte de travaux de rénovation et pour valider des concepts d'ingénierie. La poursuite du suivi est nécessaire pour vraiment comprendre ce qui se passe sous les pistes et à leur marge. Éventuellement, il faudra réviser les simulations numériques de l'impact du changement climatique sur les pistes, notamment dans le contexte possible d'un réchauffement encore plus rapide que prévu. Les données seront alors fort utiles pour l'étalonnage de telles simulations.

5.0 RÉFÉRENCES

Allard, M. et Sarrazin, D. (2008) L'impact des changements climatiques sur la problématique de la fonte du pergélisol au village de Salluit. Volet #1 : Mise à jour des lectures et observations depuis 2004. Université Laval, Centre d'études nordiques, rapport interne pour le Ministère des Affaires Municipales du Québec. Québec, Québec. 41 p.

Allard, M. et Sarrazin, D. (2008) Évaluation des conditions du pergélisol sous la piste 07-25, Récupération et analyse des données. (contrat GF089951) Université laval, Centre d'études nordiques, rapport interne préparé pour Transport Canada. Québec, Québec. 31 p.

Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P. et Tarussov, A. (2007) L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes. Université laval, Centre d'études nordiques, Rapport à Ouranos, Ressources Naturelles Canada et Transport Québec, 192p.

Allard, M., Fortier, R. et Sarrazin, D. (2007) Évaluation des conditions du pergélisol sous la piste 07-25 de l'aéroport de Kuujuaq en prévision de l'impact du réchauffement climatique. (contrat GF086324), Université Laval, Centre d'études nordiques, rapport interne pour Transport Canada. Québec, Québec. 94p.

Sarrazin, D., Allard, M. et Fortier, R. (2006) Instrumentation de la piste 07-25 Aéroport de Kuujuaq, Nunavik. (contrat GF086324), Université Laval, Centre d'études nordiques, rapport préliminaire interne préparé pour Transport Canada. Québec, Québec. 65p.

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. Université Laval, Centre d'études nordiques, rapport interne pour Transport Québec, (contrat 5960-06-RZ01), Québec, Québec,

ID	Village	ID_forage	installations	coordonnees_UTM		Coordonnees_geographiques	
				mètres Nord	mètres West	Lat (°N)	Long (°W)
1	AKU	F1	thermistances_auto	378754.351029	6745579.675160	60.820474	78.140662
2	AKU	F2	Forage	378559.961950	6745552.729741	60.820269	78.144244
3	AKU	F3	Forage	378701.596833	6745653.425466	60.821146	78.141604
4	AKU	F4	thermistances_auto	377984.986929	6745208.626628	60.817287	78.154939
5	AKU	HT-162	thermistances_auto	378717.174955	6745553.254979	60.82023	78.14136
6	AKU	HT-183	thermistances_auto	378692.826334	6745593.022206	60.820589	78.14179
7	AKU	HT-232	thermistances_manue	378258.513169	6745406.339413	60.818999	78.149855
8	AUP	HT-294	thermistances_auto	356141.827481	6575674.372052	59.299073	69.598788
9	AUP	HT-299	thermistances_auto	356086.193142	6575692.660223	59.299238	69.599754
10	INU	F1	Forage	387564.389104	6483862.639940	58.470139	78.081386
11	INU	F2	thermistances_auto	387399.335245	6483714.396290	58.468853	78.084268
12	INU	F3	Forage	387917.153471	6484216.295526	58.473168	78.075357
13	INU	F4	Forage	388178.958669	6484390.726535	58.474684	78.070808
14	INU	F5	Forage	387598.596245	6483941.867019	58.470765	78.080915
15	INU	F6	Forage	387615.604667	6483956.909660	58.470886	78.080613
16	KANGIR	HT-1	thermistances_auto	332712.149313	6656314.403294	60.025110	69.999337
17	KANGIR	F1	Forage	332694.272208	6656197.169981	60.024109	69.999756
18	KANGIR	F2	Forage	332715.178069	6656327.503792	60.025275	69.999378
19	KANGIR	F3	Forage	332729.075554	6656417.963322	60.026085	69.999124
20	KANGIR	F4	Forage	332744.455202	6656519.624235	60.026985	69.998748
21	PUV	F1	Forage	260920.563787	6659766.687080	60.054738	77.287763
22	PUV	F2	thermistances_auto	260929.447938	6659727.396316	60.054367	-77.287571
23	PUV	F3	Forage	260821.842850	6660135.288043	60.058036	77.289614
24	PUV	F4	Forage	260786.210920	6660163.805044	60.058299	-77.290264
25	PUV	F5	thermistances_auto	260794.034869	6659820.260729	60.055216	-77.29005
26	PUV	HT-177	thermistances_auto	260898.485804	6659692.313407	60.054068	-77.288141
27	PUV	HT-296	thermistances_auto	260910.912287	6659694.866999	60.054093	-77.287931
28	PUV	HT-297	thermistances_auto	260921.484658	6659696.889475	60.05411	-77.287734
29	PUV	HT-303	thermistances_manue	260967.705087	6659983.993066	60.056693	-77.286964
30	PUV	REF ou F0 ou	thermistances_auto	261053.811697	6659669.895495	60.053882	-77.285349
31	QUA	F1	Forage	352464.47	6770260	61.045952	-69.617821
32	QUA	F2	Forage	352615.53	6769933	61.04303	-69.614983
33	QUA	HT-156	thermistances_auto	352669.789743	6770050.561883	61.044065	-69.613946
34	QUA	HT-158	thermistances_manue	352360.666089	6770366.192650	61.046936	-69.619594
35	QUA	HT-175	thermistances_auto	352638.575229	6769963.085272	61.043283	-69.614551
36	QUA	HT-178	thermistances_auto	352489.421741	6770267.852104	61.046038	-69.617233
37	SAL	F1	Forage	348182.689660	6896910.145661	62.182968	-75.666963
38	SAL	F2	Forage	348217.156785	6896612.266401	62.180291	-75.666375
39	SAL	F3	Forage	348167.183362	6896134.587046	62.176011	-75.667453
40	SAL	F4	Forage	348173.160562	6896290.929943	62.177413	-75.667299
41	SAL	F5	Forage	348085.091772	6896759.398589	62.181626	-75.668874
42	SAL	F6	Forage	349340.547955	6898217.694518	62.194564	-75.644401
43	SAL	FP1	thermistances_manue	349074.475876	6899304.882981	62.20434	-75.64924
44	SAL	FP2	thermistances_auto	349212.858828	6899424.975875	62.205402	-75.646539
45	SAL	FP4	thermistances_manue	349769.558118	6898251.464727	62.1948	-75.636148
46	SAL	FP26	thermistances_manue	349248.895896	6899469.744363	62.205805	-75.645846
47	SAL	HT-154	thermistances_auto	348082.335482	6896583.014902	62.180034	-75.668969
48	SAL	HT-155	thermistances_manue	348101.723084	6896763.443490	62.181649	-75.668551
49	SAL	HT-160	thermistances_manue	348269.721432	6896997.788392	62.183733	-75.665269
50	SAL	HT-172	thermistances_manue	348190.929537	6896758.614789	62.181597	-75.666841
51	SAL	HT-179	thermistances_manue	348234.353716	6896999.377477	62.183751	-75.665945
52	SAL	ST-1		349688.475512	6898132.611377	62.19375	-75.637739
53	SAL	ST-2		349498.710453	6898359.250866	62.195803	-75.641322
54	SAL	PAD-F1	thermistances_auto				
55	SAL	PAD-F2	thermistances_auto				
56	SAL	SILA	station_meteo	349786.127352	6897948.830216	62.192094	-75.635913
57	SAL	AERO	station_meteo	347979.375345	6896555.697940	62.179797	-75.670949
58	SAL	TIKI	station_meteo	347132.740577	6899232.419276	62.203914	-75.686558
59	TAS	F1	Forage	336155.046218	6504807.387362	58.664811	-69.959645
60	TAS	F2	Forage	336458.704231	6505343.298983	58.6696	-69.954337
61	TAS	F3	Forage	336631.761457	6505476.844902	58.670787	-69.951335
62	TAS	F4	Forage	336293.047518	6504931.755950	58.665918	-69.957249
63	TAS	HT-157	thermistances_auto				
64	TAS	HT-180	thermistances_auto	336601.900451	6505521.357579	58.671188	-69.951843
65	TAS	HT-181	thermistances_auto	336483.960520	6505336.338062	58.669536	-69.953904
66	TAS	HT-304	thermistances_auto	336599.113298	6505371.502860	58.669843	-69.951915

Annexe 1

État des équipements au 30 octobre 2012

Suite à la tournée annuelle de récupération des données et une validation approfondie, un constat est présenté afin de connaître l'état de santé des équipements. La majorité des équipements et des stations ont été déployées en 2004 et 2005 suite à des initiatives du MTQ. Certains câbles installés lors de la construction des pistes ont été automatisés lors de ces campagnes et font partie de ce bilan. Le but de cet exercice est de fournir des éléments de planification logistique et financière pour la saison 2013. Ce document guidera également les gestionnaires en vue des actions à prendre pour 2013.

Inukjuak

Le CR1000 (système d'acquisition) a été remplacé ainsi que le chargeur régulateur. Un problème d'alimentation électrique sporadique générerait des données erronées. Le rehaussement du capteur pour la température de l'air est à prévoir.

Puvirnituk

Les câbles (HT-177, HT-296, HT-297) ont été sectionnés ou écrasés par la machinerie lourde ce qui nécessite une excavation sommaire près de la station dans le remblai latéral de la piste. La vérification de l'intégrité et du bon fonctionnement du multiplexeur est également nécessaire. La batterie a été remplacée en 2012 mais le multiplexeur est à remplacer.

La batterie pour la station de référence a été remplacée en 2012.

Akulivik

2 batteries 12V ont été remplacées sur les stations HT-162 et HT-183 en 2012.

Salluit

Le câble F03 a été automatisé sur les abords de la piste. La batterie pour HT-154 a été remplacée.

Quaqtaq

Un câble à thermistances a été sectionné dans la piste et il faut le remplacer.

Les 3 batteries ont été remplacées sur les stations en 2012.

Kangirsuk

La batterie de la station a été remplacée en 2012.

Le déplacement du multiplexeur dans le boîtier est à prévoir (implique de rallonger le câble à thermistances) et/ou le remplacement de la boîte dans lequel est fixé le multiplexeur.

Aupaluk

Les 2 batteries ont été remplacées en 2012.

Tasiujaq

Les 3 batteries ont été remplacées en 2012.