

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



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

Avant-Propos

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des Transports du Québec pour la confiance et le financement accordés en vue de la réalisation de cette étude. Il importe de souligner la contribution financière importante du Programme d'adaptation aux impacts des changements climatiques (anciennement le Fonds d'Action pour le changement climatique) de Ressources Naturelles Canada ainsi que celle, équivalente, du Consortium Ouranos.

Outre les auteurs, les personnes suivantes ont contribué à la présente étude :

- Catherine Savard
- Isabelle Beaulac
- Cynthia Marchildon
- Dominique St-Hilaire-Gravel
- Emmanuel L'Hérault
- Cyrielle Laurent
- Johnny Alaku (Salluit)

Nous sommes redevables à l'Administration Régionale Kativik, en particulier à M. Jack Pappak, pour avoir facilité les travaux de différentes façon, par exemple pour l'accès à des données dans des tours d'aéroports, l'utilisation des garages et, parfois, des logements de fonction dans les aéroports par des membres de notre personnel. Finalement, on ne peut passer sous silence l'accueil amical que notre équipe a reçu dans toutes les communautés du Nunavik.

Table des matières

Avant-Propos.....	i
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	xi
Introduction.....	1
Le changement climatique en cours et appréhendé au Nunavik.....	3
Méthodologie de l'étude.....	10
Mesures thermiques et climatiques.....	10
Documentation.....	10
Travaux de terrain.....	10
Été 2004.....	10
Hiver 2005.....	11
Été 2005.....	11
Hiver 2006.....	11
Été 2006.....	11
Automne 2006 et hiver 2007.....	11
Sondages et relevés géophysiques.....	11
Caractérisation des sites aéroportuaires du Nunavik.....	13
UMIUJAJQ.....	14
1- Contexte.....	14
Le Village.....	14
L'aéroport :.....	14
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route).....	14
3- Caractéristiques du terrain.....	14
a- Géologie de surface :.....	14
b- Hydrographie et drainage :.....	14
c- Le pergélisol :.....	15
d- Facteurs climatiques :.....	15
e- Remarque historique :.....	15
4- Diagnostic.....	16
INUKJUAK.....	19
1- Contexte.....	19
Le Village :.....	19
L'aéroport :.....	19
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route).....	19
3- Caractéristiques du terrain.....	19
a- Géologie de surface :.....	19
b- Hydrographie et drainage :.....	20
c- Le pergélisol :.....	20
d- Facteurs climatiques :.....	20
4- Diagnostic.....	21
PUVIRNITUQ.....	34
1- Contexte.....	34
Le Village :.....	34
L'aéroport :.....	34
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route).....	34

3- Caractéristiques du terrain	34
a- Géologie de surface :	34
b- Hydrographie et drainage :	35
c- Le pergélisol :	36
d- Facteurs climatiques :	36
4- Diagnostic.....	36
AKULIVIK	45
1- Contexte	45
Le Village :	45
L'aéroport :	45
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	45
3- Caractéristiques du terrain	45
a- Géologie de surface :	45
b- Hydrographie et drainage :	46
c- Le pergélisol :	46
d- Facteurs climatiques :	46
4- Diagnostic.....	48
IVUJIVIK	61
1- Contexte	61
Le Village :	61
L'aéroport :	61
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	61
3- Caractéristiques du terrain	61
a- Géologie de surface :	61
b- Hydrographie et drainage :	62
c- Le pergélisol :	62
d- Facteurs climatiques :	62
4- Diagnostic.....	62
SALLUIT	67
1- Contexte	67
Le Village :	67
L'aéroport :	67
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	67
3- Caractéristiques du terrain	68
a- Géologie de surface :	68
b- Hydrographie et drainage :	68
c- Le pergélisol :	68
d- Facteurs climatiques :	68
4- Diagnostic.....	70
KANGIQSUJJUAQ	84
1- Contexte	84
Le Village :	84
L'aéroport :	84
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	84
3- Caractéristiques du terrain	84
a- Géologie de surface :	84
b- Hydrographie et drainage :	84
c- Le pergélisol :	84
d- Facteurs climatiques :	85
4- Diagnostic.....	85
QUAQTAQ.....	89

1- Contexte	89
Le Village :	89
L'aéroport :	89
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	89
3- Caractéristiques du milieu	89
a- Géologie de surface :	89
b- Hydrographie et drainage :	91
c- Le pergélisol :	91
d- Facteurs climatiques :	92
4- Diagnostic.....	94
KANGIRSUK	104
1- Contexte.....	104
Le village :	104
L'aéroport :	104
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	104
3- Caractéristiques du milieu	104
a- Géologie de surface :	104
Stratigraphie :	105
Secteur en déblai :	105
Observation géophysiques.....	106
b- Hydrographie et drainage :	107
c- Le pergélisol :	107
d- Facteurs climatiques :	107
4- Diagnostic.....	108
AUPALUK.....	122
1- Contexte	122
Le Village :	122
L'aéroport :	122
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	122
3- Caractéristiques du terrain	122
a- Géologie de surface :	122
b- Hydrographie et drainage :	123
c- Le pergélisol :	124
d- Facteurs climatiques :	124
4- Diagnostic.....	126
TASIUJAQ	138
1- Contexte	138
Le village :	138
L'aéroport :	138
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	138
3- Caractéristiques du milieu	140
a- Géologie de surface :	140
b- Hydrographie et drainage :	152
c- Le pergélisol :	152
d- Climat et régime thermique du pergélisol :	152
Régime thermique :	152
Enneigement :	157
4- Diagnostic.....	162
a- rôle de la salinité du diamicton :	162
b- Impact double du réchauffement climatique et de l'enneigement :	165
KANGIQSUALUJJUAQ	167
1- Contexte	167

Le Village :	167
L'aéroport :	167
2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)	167
3- Caractéristiques du terrain	167
a- Géologie de surface :	167
b- Hydrographie et drainage :	168
c- Le pergélisol :	168
d- Facteurs climatiques :	168
4- Diagnostic.....	168
Tableau 15 : synthèse des aéroports	173
Conclusion	181

Liste des figures

Figure 1	Le réseau des communautés du Nunavik	1
Figure 2	Évolution des températures au Nunavik et à Iqaluit au Nunavut.....	4
Figure 3	Tendances climatiques à Kuujuaq, de 1948 à 2006.....	4
Figure 4	Évolution des températures dans le roc à Kangiqsualujuaq.....	5
Figure 5	Évolution des températures dans le sable à Tasiujaq.....	6
Figure 6	Différents modèles et scénarios de changement climatique (température et précipitations) dans l'Arctique québécois pour le 21e siècle.	7
Figure 7	Prévisions des températures moyennes annuelle en surface du sol dans le nord-est canadien pour la période 2041-2070 (i.e. différences entre la simulation SM_CRCM2 (2041-2071) et la simulation SM_CRCM1 (1961-1990). b) taux modélisés de changements de la température moyenne annuelle de surface selon les deux sorties de modèles couvrant les mêmes périodes.	8
Figure 8	Réchauffement climatique simulé jusqu'en 2100 à Kuujuaq selon trois scénarios du Modèle de Circulation Global Canadien. Les deux étoiles correspondent aux valeurs observées en 2005 et 2006.	9
Figure 9	Affaissements importants accompagnés de processus de thermokarst sur la route d'accès 16	
Figure 10	Carte des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Umiujaq.....	17
Figure 11	1 ^{er} emplacement proposé et emplacement actuel de la piste d'Umiujaq.	18
Figure 12	Tassement en bordure sud de la piste d'Inukjuak.....	22
Figure 13	Incisions dues au ruissellement dans le talus côtés nord de la piste d'Inukjuak.....	22
Figure 14	Multiplés fissures de tension sur la bordure sud de la piste d'Inukjuak.....	23
Figure 15	Dégradation sur les promontoires des balises en bout de piste.....	24
Figure 16	Carte des dépôts de surface de l'aéroport d'Inukjuak.....	25
Figure 17	Profil au géoradar de la piste d'Inukjuak.....	26
Figure 18	Mare baignant le pied du talus, à l'extrémité ouest de la piste d'Inukjuak.....	27
Figure 19	Zone humide et grande mare à proximité de la bordure nord de la piste.....	28
Figure 20	Zone à thufurs, à proximité de l'extrémité ouest de la piste d'Inukjuak.....	29
Figure 21	Butte de pergélisol à proximité de la bordure nord de la piste.....	29
Figure 22	Mare et fossé de drainage saturé en eau en bordure sud de la piste.....	30
Figure 23	Fossé contenant de l'eau en bordure nord de la piste.....	30
Figure 24	Ruisseau s'écoulant à proximité de l'extrémité est de la piste d'Inukjuak.....	31
Figure 25	Fente de gel dans une terrasse sableuse sur la terrasse au sud de la piste.....	31
Figure 26	Processus thermokarstique associé à un affaissement du talus en bordure nord de la piste.....	32
Figure 27	Végétation arbustive sur le talus du côté sud de la piste, indice d'un couvert neigeux important durant l'hiver.	32
Figure 28	Photographie de la piste d'Inukjuak prise à la troisième semaine de juillet 2006.....	33
Figure 29	Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Puvirnituk.....	38
Figure 30	Échantillons récoltés dans la petite vallée.....	39
Figure 31	Coupe transversale du remblai au chaînage 6+670 m.....	40
Figure 32	Températures du sol et atmosphérique dans la vallée proche de la piste de Puvirnituk.....	41
Figure 33	Températures du sol dans la piste de Puvirnituk(PUV177) à 6+270 m.....	42
Figure 34	Températures du sol dans la piste de Puvirnituk(PUV296) à 6+270 m.....	43
Figure 35	Températures du sol dans la piste de Puvirnituk(PUV297) à 6+270 m.....	44
Figure 36	Affaissement sur l'accotement nord de la piste d'atterrissage d'Akulivik.....	49
Figure 37	Déchirures dans le couvert tourbeux superficiel, signe de dégradation.....	50
Figure 38	Carte des dépôts de surface de l'aéroport d'Akulivik.....	51
Figure 39	Profil au géoradar.....	52
Figure 40	Fossé de drainage de la section est, côté nord, de la piste d'Akulivik.....	53
Figure 41	Sillon de coin de glace avec processus thermokarst.....	54
Figure 42	Mares environnant la piste d'atterrissage d'Akulivik.....	55

Figure 43	Coin de glace se propageant sous le remblai de la piste d'Akulivik et incisant la base du tallus.....	56
Figure 44	Température du sol pour le câble Aku162 de 1990 à 2005 (site de référence hors piste) ...	57
Figure 45	Température du sol pour le câble Aku183 de 1990 à 2005 (piste)	57
Figure 46	Température du sol pour les câbles Aku232 (hors piste dans les sables) de 1990 à 2005..	58
Figure 47	Températures du sol et atmosphérique pour le câble Aku162 (hors piste) de juin 2004 à juin 2005.....	58
Figure 48	Température du sol pour le câble Aku183 (dans piste) de juin 2004 à juin 2005	59
Figure 49	Températures du sol et atmosphérique pour le câble Aku162 (hors piste) pour le printemps (avril-mai) de 2005.....	59
Figure 50	Température du sol pour le câble Aku183 (sous piste) pour le printemps (avril-mai) de 2005	60
Figure 51	Carte des dépôts de surface de l'aéroport et du village d'Ivujivik	63
Figure 52	Village et piste d'atterrissage d'Ivujivik	64
Figure 53	Terrain rocheux de l'aéroport d'Ivujivik.....	65
Figure 54	Secteur du lac drainé à proximité de la piste d'Ivujivik.....	66
Figure 55	Affaissement près de la voie de circulation de la piste de Salluit.....	71
Figure 56	Affaissement sur la bordure est de la piste, près des ponceaux.....	71
Figure 57	Mare à proximité d'une dépression sur la bordure est de la piste.....	72
Figure 58	Ponceaux affaissés et inopérants au chaînage 2+040 m du côté est de la piste	72
Figure 59	Tronçon de la route de l'aéroport sujet au tassement en hiver 2006	73
Figure 60	Remplissage des dépressions par ajout de gravier par-dessus l'asphalte (juillet 2006).....	73
Figure 61	Glissement de terrain (fin août 2006) près de la côte à l'entrée du village	74
Figure 62	Cartes des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Salluit, avec la localisation des câbles à thermistances	75
Figure 63	Clôture expulsée par le soulèvement au gel non loin de la piste de Salluit	76
Figure 64	Température du sol pour le câble Sal-155 de 1987 à 2005 (hors piste)	77
Figure 65	Température du sol pour le câble Sal-172 de 1987 à 2005 (dans piste)	77
Figure 66	Température du sol pour le câble Sal-160 de 1987 à 2005 (hors piste)	78
Figure 67	Température du sol pour le câble Sal-179 de 1987 à 2005 (dans piste)	78
Figure 68	Direction préférentielle et vitesse moyenne du vent pour l'aéroport de Salluit	79
Figure 69	Colmatage du talus et du ponceau de la voie de circulation de la piste de Salluit.....	80
Figure 70	Inondation du secteur nord de la voie de circulation de la piste de Salluit.....	80
Figure 71	Exutoire bouché du lac proche du côté est de la piste de Salluit	81
Figure 72	Combe à neige en bordure est de la piste de Salluit.....	81
Figure 73	Trou d'infiltration d'eau sur la bordure est de la piste de Salluit.....	82
Figure 74	Synthèse de problèmes rencontrés sur la piste de Salluit	83
Figure 75	Couche de MG-20b et affaissement sur les talus du remblai de la piste de Kangiqsujuaq .	86
Figure 76	Carte des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Kangiqsujuaq	87
Figure 77	Température du sol pour l'aéroport de Kangiqsujuaq (dans le roc)	88
Figure 78	Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Quaqtaq	95
Figure 79	Échantillon de sol prélevé à l'aéroport de Quaqtaq.....	96
Figure 80	Profil de géoradar de la piste de Quaqtaq à 50 MhZ	97
Figure 81	Image de résistivité électrique de la piste de Quaqtaq.....	98
Figure 82	Exemple de problèmes liés au drainage et à l'hydrographie.....	99
Figure 83	Température du sol pour le câble Qua156 de 1988 à 2005 (site de référence hors piste).	100
Figure 84	Température du sol pour le câble Qua175 de 1988 à 2005 (piste).....	100
Figure 85	Température du sol pour les câbles Qua156 (hors piste) et Qua175 (piste) de 1988 à 2005.....	101
Figure 86	Température du sol pour le câble Qua178 (dans piste) de 1988 à 2005.....	101
Figure 87	Température du sol pour le câble Qua156 (hors piste) de juillet 2004 à juin 2005.....	102
Figure 88	Température du sol pour le câble Qua178 (dans piste) de juillet 2004 à juin 2005	102
Figure 89	Température du sol pour les câbles Qua156 (hors piste) et Qua178 (dans piste) de mai 2005.....	103

Figure 90	Fissures de tension dans la zone construite en déblai de la piste d'atterrissage de Kangirsuk	109
Figure 91	Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Kangirsuk	110
Figure 92	Stratigraphie des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Kangirsuk (présenté du sud vers le nord)	111
Figure 93	Unité stratifiée de sables grossiers et de graviers, pauvre en glace (faciès de plage)	112
Figure 94	Till à matrice limono-sableuse riche en glace (sédiment de couleur grise).....	113
Figure 95	Excavation faite dans la piste de Kangirsuk le 19 juin 2005	114
Figure 96	Stratigraphie du remblai et terrain naturel sus-jacent tel qu'observé lors de l'excavation du 19 juin 2005	115
Figure 97	Profil de géoradar de la piste de Kangirsuk à 50 Mhz	116
Figure 98	Image de résistivité électrique de la piste de Kangirsuk	117
Figure 99	Image de résistivité électrique du terrain naturel à proximité de la zone en déblai de la piste de Kangirsuk.....	118
Figure 100	Profil de géoradar en mode réflexion de 200 MHz du milieu naturel de Kangirsuk (till)	118
Figure 101	Ostioles sur la butte de till à l'est de la piste.....	119
Figure 102	Température de la piste dans la zone en déblai de juin à octobre 2005.....	120
Figure 103	Figure de synthèse sur la condition environnementale de la piste de Kangirsuk	121
Figure 104	Carte des dépôts de surface de l'aéroport d'Aupaluk	127
Figure 105	Coin de glace passant sous la piste d'atterrissage d'Aupaluk	128
Figure 106	Profil de géoradar de la piste d'Aupaluk à 50 Mhz.....	129
Figure 107	Image de résistivité électrique de la piste d'Aupaluk.....	130
Figure 108	Image de résistivité électrique du milieu naturel d'Aupaluk.....	131
Figure 109	Profil de géoradar en mode réflexion de 200 MHz du milieu naturel d'Aupaluk	131
Figure 110	Drainage dans le secteur sud-ouest de la piste d'atterrissage d'Aupaluk.....	132
Figure 111	Température du sol pour le câble Aup299 de 1990 à 2005 (site de référence hors piste).	133
Figure 112	Température du sol pour le câble Aup294 de 1990 à 2005 (piste).	133
Figure 113	Température du sol pour le câble Aup299 (hors piste) de juin 2004 à juin 2005.....	134
Figure 114	Température du sol pour le câble Aup294 (dans piste) de juin 2004 à juin 2005.....	134
Figure 115	Température du sol pour le câble Aup299 (hors piste) pour les printemps (avril-mai-juin) de 2004 et 2005.....	135
Figure 116	Température du sol pour le câble Aup299 (hors piste) pour les printemps (avril-mai-juin) de 1995, 1998, 1999, 2000, 2004 et 2005.....	135
Figure 117	Température du sol pour le câble Aup294 (piste) pour le printemps 2005 (avril-mai-juin)	136
Figure 118	diagramme synthèse de la situation de la piste d'Aupaluk.....	137
Figure 119	Diverses formes de dégradation sur la piste de Tasiujaq	139
Figure 120	Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Tasiujaq.....	141
Figure 121	Coupe stratigraphique de la terrasse de l'aéroport de Tasiujaq.....	142
Figure 122	Les différentes unités sédimentaires de la terrasse de l'aéroport de Tasiujaq	144
Figure 123	Profil au géoradar de la piste de Tasiujaq à 50 Mhz	146
Figure 124	Image de résistivité électrique de la ligne de levé T-L3 au centre de la piste d'atterrissage de Tasiujaq	148
Figure 125	Image de résistivité électrique de la ligne de levé T-L2 en bordure est de la piste d'atterrissage de Tasiujaq.....	149
Figure 126	Image de résistivité électrique de la ligne de levé T-L4 en bordure ouest de la piste atterrissage de Tasiujaq	150
Figure 127	Image de résistivité électrique des lignes de levé T-M6 et T-M7 du milieu naturel à proximité de la piste d'atterrissage de Tasiujaq	151
Figure 128	Température du sol pour le câble Tas304 de 1993 à 2005 (site de référence hors piste).. ..	154
Figure 129	Température du sol pour le câble Tas180 de 1989 à 2005 (piste, ancienne butte, 5+090)	154
Figure 130	Température du sol pour le câble Tas181 de 1989 à 2005 (piste, 5+300)	155
Figure 131	Température du sol pour le câble Tas304 en 2004-2005 (hors piste)	155
Figure 132	Température du sol pour le câble Tas180 en 2004-2005 (piste, ancienne butte, 5+090). . ..	156
Figure 133	Température du sol pour le câble Tas181 en 2004-2005 (piste, 5+300)	156

Figure 134	Température du sol pour le câble Tas181 des mois d'avril et mai de 2000 à 2005 (piste, 5+300).....	158
Figure 135	Accumulation de neige sur les bordures de la piste de Tasiujaq	159
Figure 136	Enneigement des talus de la piste d'atterrissage de Tasiujaq	160
Figure 137	Température moyenne annuelle Hobos Vs. Épaisseur du couvert neigeux	163
Figure 138	Enneigement de la piste de Tasiujaq et direction des vents	164
Figure 139	Comparaison des situations thermiques et géotechniques de la piste de Tasiujaq lors de sa construction et en 2006	166
Figure 140	Piste d'atterrissage de Kangiqsualujjuaq.....	169
Figure 141	Carte des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Kangiqsualujjuaq.....	170
Figure 142	Température du sol dans le champs proche de la piste de Kangiqsualujjuaq (câble HT-300)	171
Figure 143	Température du sol sous la piste de Kangiqsualujjuaq (câble HT-182).....	172

Liste des tableaux

Tableau 1	Prévisions d'augmentation des températures moyennes saisonnières et des précipitations sur le Nunavik. Les prévisions sont présentées avec des écarts selon différents modèles et scénarios et elles sont relatives (ΔT et ΔP_{cpn}) au climat des années 1980.	8
Tableau 2	Température moyenne atmosphérique annuelle dans le secteur de l'aéroport d'Umiujaq. ...	15
Tableau 3	Température minimale et maximale atteinte dans le roc proche de l'aéroport d'Umiujaq. ...	15
Tableau 4	Profondeur du mollisol dans le roc proche de l'aéroport d'Umiujaq.	15
Tableau 5	Épaisseurs de neige le 6 mars 2006 le long de la piste d'Inukjuak.	21
Tableau 6	Granulométrie des sols de la vallée d'après 2 forages fait en juin 2005.	35
Tableau 7	Températures atmosphériques mensuelles moyennes pour Akulivik de juillet 2004 à mai 2005.	47
Tableau 8	Épaisseurs de neige le 7 mars 2006 sur les bordures de la piste de Salluit.	70
Tableau 9	Températures atmosphériques mensuelles moyennes pour Quaqtac de juillet 2004 à mai 2005.	93
Tableau 10	Profondeurs de dégel atteintes aux mois de juillet 2005 et juin 2006 pour les différentes excavations.	107
Tableau 11	Températures atmosphériques mensuelles moyennes pour Aupaluk de juillet 2004 à mai 2005.	125
Tableau 12	Températures moyennes mensuelles de l'air pour Tasiujaq de juillet 2002 à septembre 2005.	153
Tableau 13	Positionnement et températures moyennes des enregistreurs thermiques.	161
Tableau 14	Températures de dégel et épaisseurs de mollisol potentielle maximales et moyennes en fonction de l'abaissement du seuil de congélation dû à la salinité pour les câbles Tas180, Tas181 et Tas304.	165
Tableau 15	Synthèse des aéroports.	174

Introduction

Très éloignées et inaccessibles par la route, les quatorze communautés côtières du Nunavik sont reliées entre elles et avec le reste du monde par voie aérienne et par voie maritime (Figure 1). La desserte maritime est assurée à quelques reprises en été par des cargos venant du Sud et qui apportent les matériaux, les équipements industriels, les marchandises lourdes, les véhicules ainsi que les produits pétroliers. Mais pour quiconque voyage dans la région, il devient vite évident que le transport aérien joue un rôle crucial et stratégique. Le trafic régulier de passagers, de marchandises et la poste s'effectuent sept jours par semaine. Les aliments et les denrées périssables sont livrés régulièrement par avions cargo. L'administration publique et scolaire, les affaires commerciales, les voyages des spécialistes en services techniques de tout genre, le déplacement des professionnels de la santé et des malades, le déplacement de la cour de justice, les interventions de sécurité publique, toutes ces activités exploitent abondamment le réseau aérien. Sans le trafic aérien, les communautés seraient dans l'isolement, ce qui est tout simplement impensable au 21^e siècle. Dans ce contexte, les aéroports et les routes qui les relient à leurs communautés respectives sont des infrastructures stratégiques qui doivent absolument être maintenues en bon état d'opération.



Figure 1 Le réseau des communautés du Nunavik

Au moment de la signature de la Convention de la Baie James et du Nord québécois en 1975, dans laquelle il était convenu d'entreprendre « aussitôt que possible... des études concernant l'aménagement de pistes d'atterrissage » (art 29.0.36), et dans les années qui ont suivi, les connaissances sur le pergélisol en général et au Québec nordique en particulier n'étaient que très

fragmentaires. De plus, les changements climatiques n'étaient pas une préoccupation. Toutefois, la situation a changé à l'échelle planétaire et régionale. Dans les régions arctiques, la fonte des glaciers, de la banquise et du pergélisol a même commencé à se manifester. Par exemple, l'évaluation récente de « l'Arctic Climate Impact Assessment » (2004) fait le constat que la dégradation du pergélisol met à risque les infrastructures municipales, industrielles et de transport. Au Nunavik, les autorités gouvernementales, l'Administration régionale Kativik, le personnel sur place et les chercheurs de la présente étude ont eu l'occasion de constater au début des années 2000 que des impacts sur la stabilité de ces infrastructures commençaient à apparaître. Grâce à des données partielles sur la température du pergélisol obtenues à l'aide d'instruments qu'une prévoyance éclairée avait permis de mettre en place lors de la construction des pistes, on a pu détecter dès lors un réchauffement effectif du pergélisol.

L'objectif principal de la présente étude est de produire une description technique la plus détaillée et la plus claire possible sur la façon dont les processus liés au réchauffement climatique et à la déstabilisation du régime thermique du pergélisol affectent les pistes d'atterrissage et les routes du Nunavik. L'atteinte de cet objectif passe par une caractérisation plus poussée de la nature du terrain, de la stratigraphie et des propriétés du pergélisol que ce qui était disponible suite aux études antérieures. Finalement, pour chaque aéroport, un diagnostic est posé relativement à la façon spécifique dont il est affecté en fonction des caractéristiques locales du pergélisol, du régime climatique et de l'évolution des températures du pergélisol. En effet, la nature des sols étant très variable dans les régions côtières du Nunavik, la sensibilité à la dégradation du pergélisol varie d'un endroit à l'autre. Dépendant du contexte topographique des pistes et du climat local, notamment des conditions de vent et d'enneigement, les impacts sont susceptibles de prendre des formes différentes d'un endroit à l'autre. Les stratégies d'adaptation et les travaux de réfection requis pourront ainsi être planifiés en fonction de chaque cas de façon à bien définir les mesures nécessaires, pour choisir les concepts d'ingénierie les plus appropriés et pour contenir les coûts de ces mesures d'adaptation.

Le changement climatique en cours et appréhendé au Nunavik.

L'histoire des aéroports des communautés du Nunavik est liée à celle de l'évolution rapide des concepts relatifs au changement climatique et à l'observation de leurs impacts. Durant le programme de construction des aéroports, de 1984 à 1992, il était dans la norme en génie civil et en géophysique de considérer que le climat était relativement stable, tout en étant sujet à des écarts, même si on commençait à parler de l'impact des gaz à effet de serre sur le réchauffement possible de la planète. Les modèles climatiques globaux alors à leur balbutiement n'avaient pas encore fait une réelle percée dans la communication publique. De nombreux spécialistes avaient documenté des changements passés du climat par des méthodes indirectes (pollens, analyse de carottes dans les glaciers, dendrochronologie, analyses historiques) mais la vaste majorité des gens vivaient avec la perception que de tels changements sont d'une échelle temporelle à long terme et que nous ne vivrions pas assez longtemps pour en voir les effets réels. Le pergélisol est en premier lieu un phénomène climatique. Même si des facteurs de surface comme le couvert végétal, les horizons organiques, l'humidité et le couvert de neige entrent en jeu de façon complexe dans les transferts de chaleur entre le sol et l'atmosphère, sa température est ultimement dépendante de celle de l'atmosphère. À un climat stable (ou contenu à l'intérieur de limites de fluctuations statistiquement déterminées) correspondait donc l'idée d'un pergélisol stable. D'ailleurs, aucune des études avant construction dans le programme d'implantation des aéroports du Nunavik ne se questionne sur les variations possibles du climat et du régime thermique du pergélisol.

Dépendant de la nature du matériau géologique de surface qui régit la granulométrie, la teneur en eau et la perméabilité, le pergélisol contient de plus ou moins grandes quantités de glace. C'est en fait un matériau géologique à l'intérieur duquel la glace est le principal minéral de liaison entre les particules minérales. Très résistant mécaniquement, sa capacité de support est très grande. En construisant les pistes et les routes en remblai, les concepteurs s'attendaient à ce que le plafond du pergélisol remonte sous les ouvrages, voire même à ce qu'il remonte à l'intérieur des remblais eux-mêmes, assurant le gel permanent et la stabilité. Quelques erreurs ont certes été commises ici et là, comme le montrent les chapitres suivants de ce rapport, et quelques sections en déblais ont été creusées pour s'adapter à la topographie malgré des études préliminaires qui n'avaient pas caractérisé le terrain de façon à connaître adéquatement la sensibilité du pergélisol affecté. Néanmoins, le principe général a été respecté dans la vaste majorité des cas.

Non seulement les figures 2 et 3 montrent-elles que le climat des trois décennies précédant la construction des pistes ne se réchauffait pas, elles révèlent en fait que les températures moyennes annuelles connaissent, malgré des fluctuations pluri-annuelles, une légère tendance au refroidissement. Par exemple, cette tendance fut de l'ordre de $-0.028\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ à Kuujuaq de 1948 à 1992. À partir de cette année particulièrement froide, le climat s'est mis à se réchauffer, passant au-dessus de la moyenne à long terme aux alentours de 1995 et atteignant des valeurs élevées dans les années 2000. Depuis le début du XXI^e siècle, les températures se maintiennent à des valeurs plus élevées. Ainsi, l'année 2006 a été une des plus chaudes depuis 1948 au Nunavik, avec des températures moyennes annuelles de $-2.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ à Kuujuaq, $-1.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ à Kuujuarapik et de $-3.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ à Inukjuak, selon les données d'Environnement Canada (2007); il s'agit de valeurs de 3 à 4 degrés plus chaudes que ce que ces stations enregistraient au début des années 1990.

**Évolution des températures moyennes annuelles,1948-2006
Nunavik et Iqaluit**

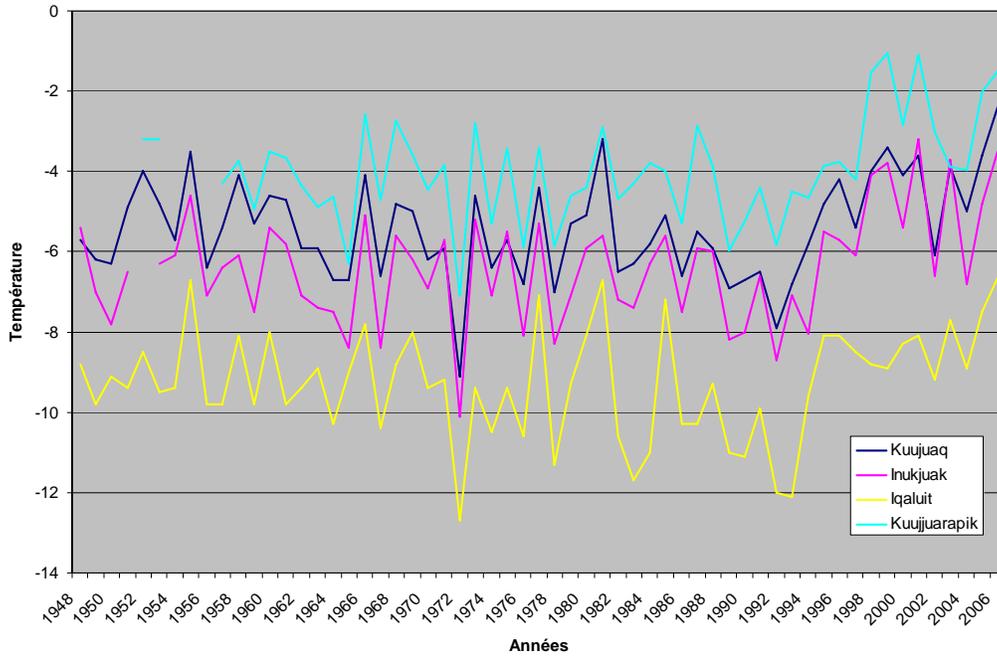


Figure 2 Évolution des températures au Nunavik et à Iqaluit au Nunavut

Tendances à Kuujuaq

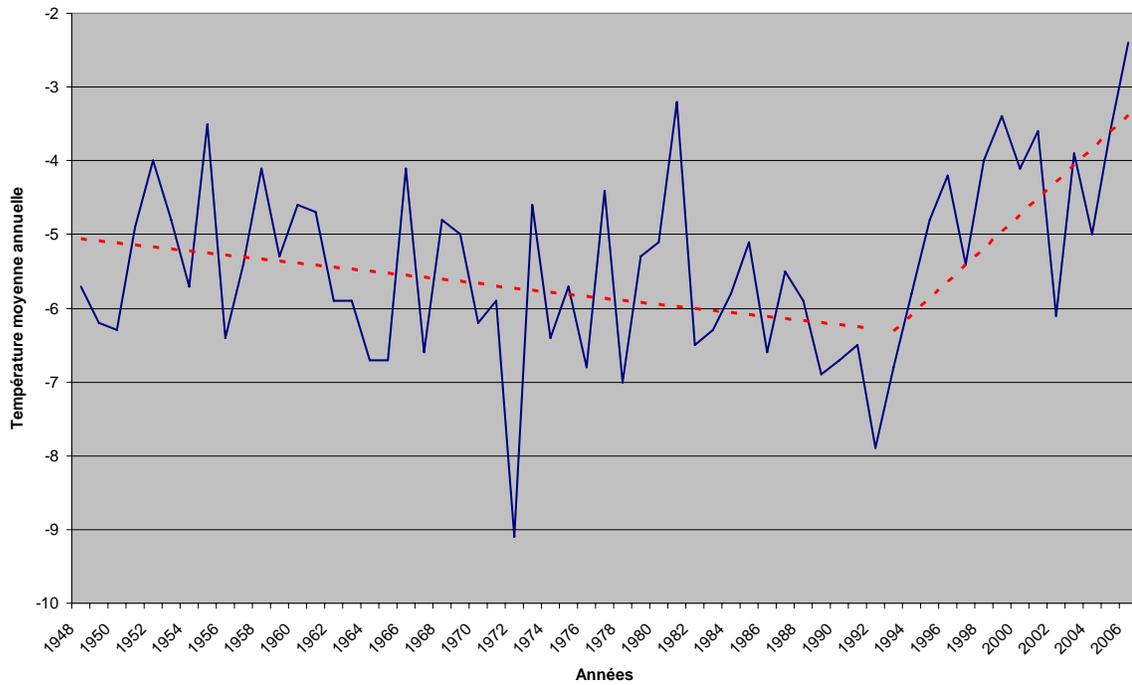


Figure 3 Tendances climatiques à Kuujuaq, de 1948 à 2006

Ce réchauffement des températures atmosphériques s’est répercuté dans le pergélisol. Une des meilleures séries de données disponibles, dans un gneiss à Kangiqsualujuaq, laisse aisément voir

comment le pergélisol s'est réchauffé en harmonie avec le climat au fil de ces années (figure 4). Ce graphique illustre également comment le pergélisol répond au climat. Les températures atmosphériques quotidiennes varient rapidement, mais ces oscillations, ainsi que les variations hebdomadaires, sont progressivement intégrées et harmonisées au-delà de quelques mètres de profondeur, les couches de terrain agissant comme un filtre. En profondeur, les fluctuations sont plus lisses; on ne détecte plus que les oscillations saisonnières. De plus, en raison des lois de transmission de chaleur, l'amplitude des oscillations saisonnières est réduite avec la profondeur alors que ces oscillations sont aussi décalées dans le temps. Par exemple, à 6 mètres de profondeur, une amplitude en surface d'une quarantaine de degrés est réduite à environ cinq degrés alors que les vagues de chaleur et de froid des saisons précédentes sont décalées d'environ six mois. À ce site témoin de Kangiqsualujjuaq, la profondeur maximale atteinte par l'isotherme de 0 °C (la profondeur de dégel) est passée de 4,4 mètres à 10,9 mètres de 1989 à 2006. À 20 m de profondeur, la température moyenne est passée de - 2.2 à -1.1 °C. Cette figure montre aussi l'évolution des températures moyennes annuelles à Kuujjuaq de 1989 à 2006, la station d'Environnement Canada la plus rapprochée du site de Kangiqsualujjuaq et, comme lui, située sur la limite des arbres au sud de la baie d'Ungava. Les courbes de tendance exponentielles tracées sur les deux graphiques (air à Kuujjuaq et roc à 6 m à Kangiqsualujjuaq) ont exactement la même forme et reproduisent la même évolution.

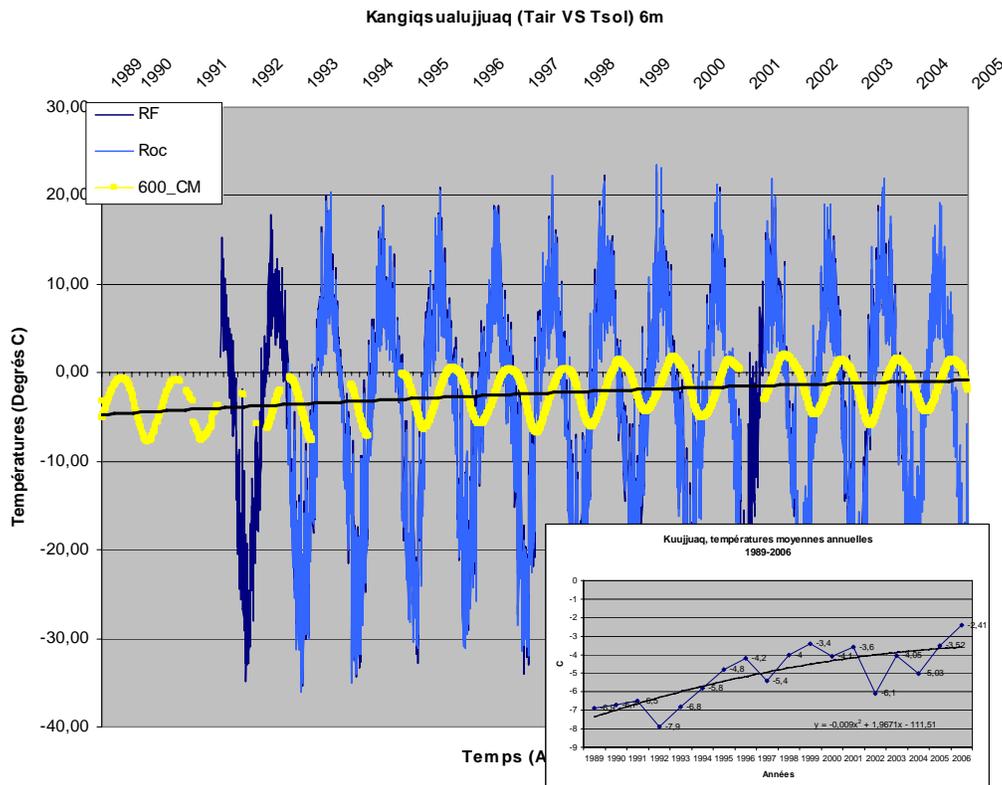


Figure 4. Évolution des températures dans le roc à Kangiqsualujjuaq.
En mortaise, l'évolution des températures moyennes annuelles de l'air à Kuujjuaq

Dans un sable à Tasiujaq, la profondeur de dégel est passée de 1,5 m à 2 m de 1994 à 2006 alors que la température à 11 m passait de -5,2 à -2,8 °C (figure 5). Comme les mesures climatiques et thermiques présentées dans ce rapport en lien avec chacun des aéroports le montreront, les tendances illustrées par ces deux exemples sont répandues à travers tout le Nunavik. Globalement, le roc et les sols à la grandeur du Nunavik se sont réchauffés d'environ 2 degrés depuis 1992.

TASIUJQA 1993-2006 Profondeurs sélectionnées

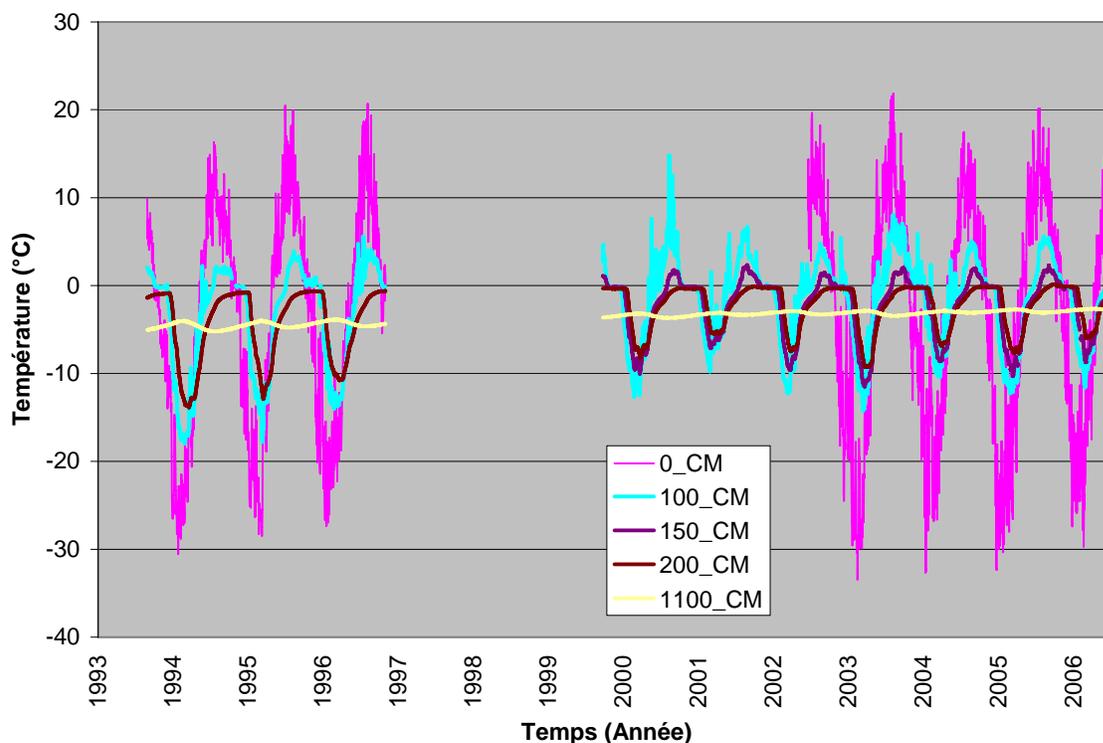


Figure 5 Évolution des températures dans le sable à Tasiujaq

Dans le contexte d'adaptation au réchauffement climatique et en ce qui concerne la stabilité et l'entretien des pistes d'atterrissage et des routes, la vitesse et l'ampleur du réchauffement climatique dans les années à venir sont des données importantes. En effet, une planification correcte des travaux d'entretien et des rénovations et la prise de décisions (ex. paver ou non; appliquer ou non des solutions d'ingénierie et lesquelles) découlent de la vitesse à laquelle les changements surviendront. Le rythme des investissements requis en dépend aussi. Le consortium Ouranos a produit des projections, certaines basées sur le modèle régional canadien du climat, d'autres à partir de sorties de différents modèles climatiques globaux et suivant des scénarios différents d'émission de gaz à effet de serre. Bien que cette approche permette d'envisager des marges d'erreur pour le réchauffement futur et offre le moyen de proposer des options pour les décisions à venir, ces scénarios ne fournissent en bout de ligne qu'une appréciation générale

Ainsi, il est évident à la figure 6 et au tableau 1 qu'à la fois les températures atmosphériques et les précipitations vont augmenter au Nunavik. Selon plusieurs modèles, sur l'horizon de 2020, les plus fortes augmentations de températures prévues sont pour les mois d'hiver, de printemps et d'automne. Il en est de même des précipitations qui sont appelées à jouer un rôle important dans la problématique du pergélisol, car le couvert de neige exerce un rôle isolant qui accentue le réchauffement du sol. Toutes les projections de modèles indiquent qu'autour de 2050, les températures hivernales seront supérieures de plus de 4 °C aux températures actuelles alors que les températures estivales seront plus chaudes d'environ 3 °C. Une simulation avec le modèle régional canadien du climat en vue de prévoir l'évolution du pergélisol au Nunavik a permis de calculer que durant la période 2041-2071, les températures moyennes annuelles à la surface du sol, qui commandent directement la température du pergélisol, seront plus chaudes d'environ 3 °C au moins pour l'ensemble du Nunavik, voire de 4 °C pour la côte de la baie

d'Hudson et du détroit d'Hudson (figure 6) (Sushama et al., 2006). La température du pergélisol dans les sites les plus froids du Nunavik, par exemple dans le village de Salluit, se situant déjà dans les $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, il en découle que le point de congélation sera dépassé vers la moitié du XXI^e siècle dans les couches supérieures du pergélisol, même à l'extrême nord du Québec. Considérant que la même simulation prévoit que le taux de réchauffement sera encore plus élevé dans la seconde moitié du siècle que maintenant, soit de plus de $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{an}$ (figure 7), il semble bien que le pergélisol risque de disparaître près de la surface du sol au Nunavik avant la fin du siècle, advenant la justesse du modèle. En effet, de masses gelées en profondeur pourront alors persister à cause des faibles flux de chaleur et de la chaleur latente; ces masses sans lien avec l'atmosphère constitueront alors ce qu'on appelle du pergélisol relique.

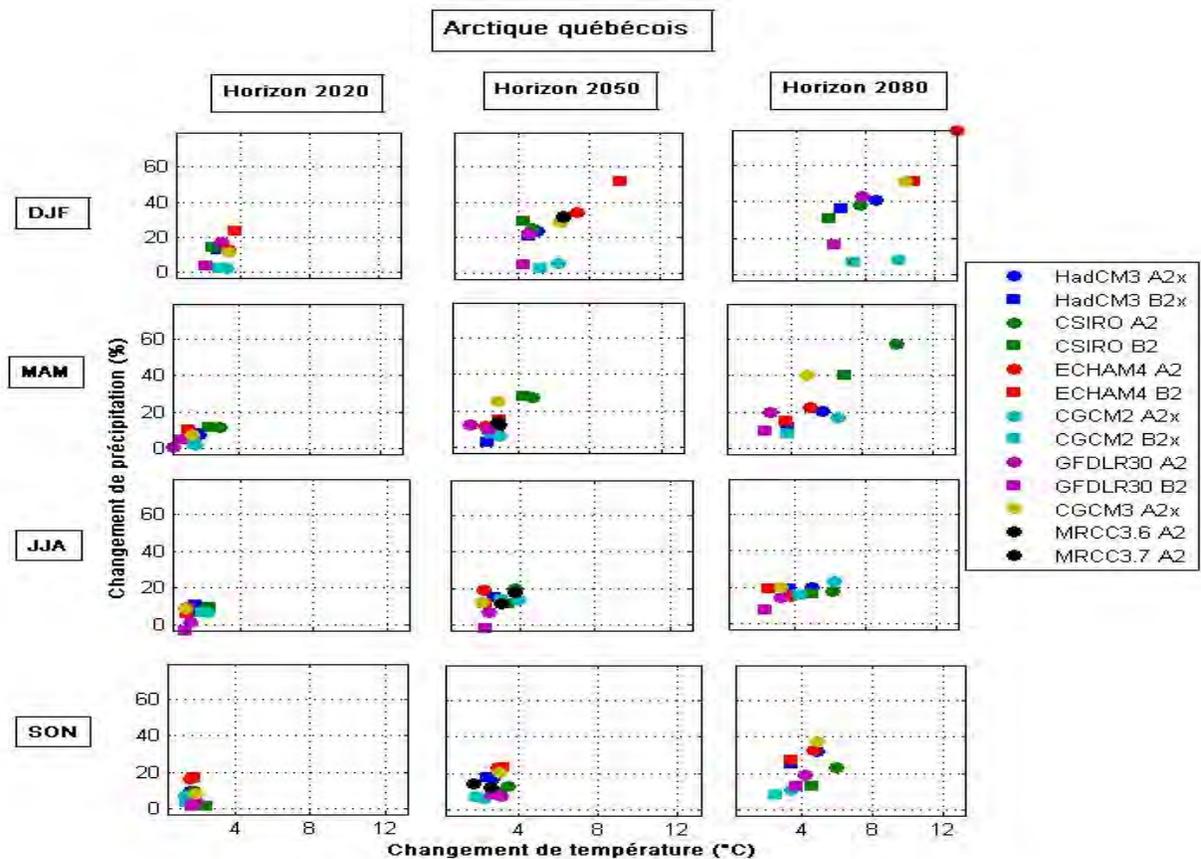


Figure 6 Différents modèles et scénarios de changement climatique (température et précipitations) dans l'Arctique québécois pour le 21^e siècle.

Mois	Climat 1980s	Delta 2020s	Delta 2050s	Delta 2080s
Hiver	-21 à -25C 60-160mm	ΔT : +2 à +4C ΔP_{cpn} : +0 à +25%	ΔT : +4 à +10C ΔP_{cpn} : +0 à +50%	ΔT : +5,5 à +10C ΔP_{cpn} : -0 à +45%
Print.	-7 à -17C 75-125mm	ΔT : +0 à +3C ΔP_{cpn} : 0 à +15%	ΔT : +1 à +5C ΔP_{cpn} : +0 à +30%	ΔT : +2 à +10C ΔP_{cpn} : +5 à +60%
Été	+6 à +10C 150-230mm	ΔT : +0,5 à +2C ΔP_{cpn} : -5 à +15%	ΔT : +2 à +4C ΔP_{cpn} : -5 à +20%	ΔT : +2 à +6C ΔP_{cpn} : +5 à +25%
Aut.	+1 à +4 150-240mm	ΔT : +1 à +2,5C ΔP_{cpn} : +0 à +20%	ΔT : +1,5 à +4C ΔP_{cpn} : +5 à +25%	ΔT : +2 à +6C ΔP_{cpn} : +5 à +40%

Tableau 1 Prévisions d'augmentation des températures moyennes saisonnières et des précipitations sur le Nunavik. Les prévisions sont présentées avec des écarts selon différents modèles et scénarios et elles sont relatives (ΔT et ΔP_{cpn}) au climat des années 1980.

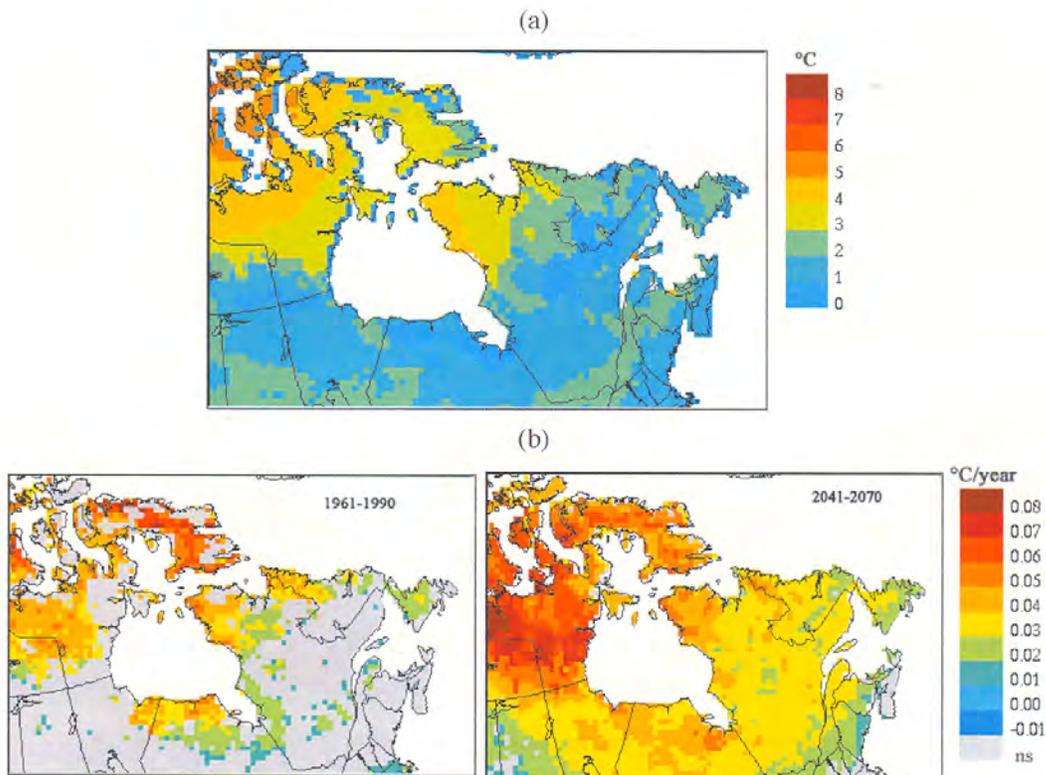


Figure 7 Prévisions des températures moyennes annuelle en surface du sol dans le nord-est canadien pour la période 2041-2070 (i.e. différences entre la simulation SM_CRCM2 (2041-2071) et la simulation SM_CRCM1 (1961-1990)). b) taux modélisés de changements de la température moyenne annuelle de surface selon les deux sorties de modèles couvrant les mêmes périodes.

Finalement, les simulations obtenues avec le modèle global du climat canadien (CGCM3) selon trois scénarios différents montrent une progression générale des températures pour Kuujuaq, avec leur marge de variabilité simulée (Figure 8). Le scénario B1-1 +3 (°C) a aussi été utilisé à rebours de façon à

reconstituer le climat des derniers 50 ans et assurer la continuité dans la série, en parallèle avec les températures moyennes observées. Il appert que déjà, avec des températures moyennes annuelles de -3.6 °C en 2005 et de -2.4 °C en 2006, Kuujuaq connaît des conditions à la marge supérieure de ce que le modèle prévoit pour les années 2020, conditions qui apparaissent comme moyennes pour les environs de 2050. Cette situation découle du fait que la hausse que nous avons connue récemment a été très forte et subite, ne se produisant que sur quelques années et non pas de façon progressive comme anticipé par le modèle.

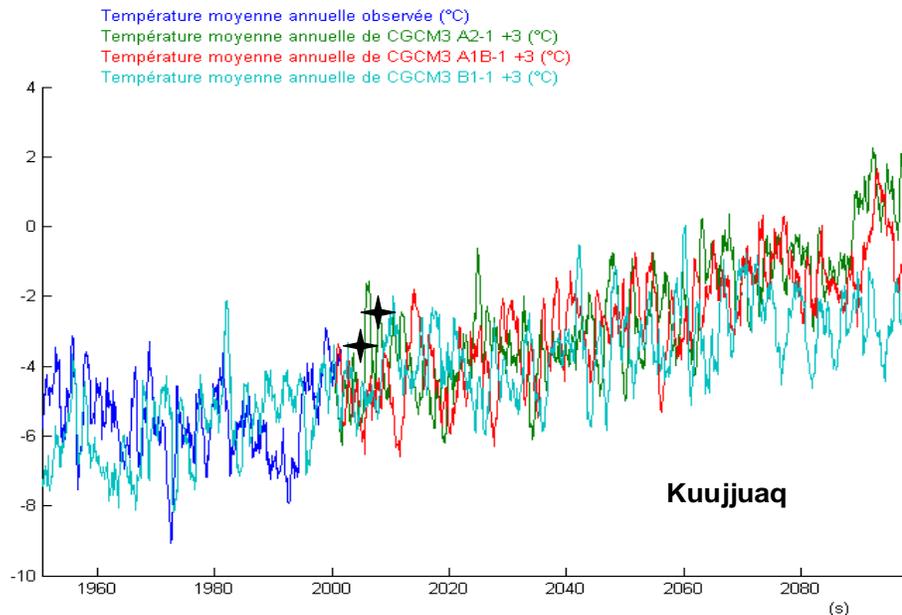


Figure 8 Réchauffement climatique simulé jusqu'en 2100 à Kuujuaq selon trois scénarios du Modèle de Circulation Global Canadien. Les deux étoiles correspondent aux valeurs observées en 2005 et 2006.

L'avenir est donc connu : réchauffement et dégradation du pergélisol. Le rythme semble discutable : linéaire et plus ou moins rapide selon le fonctionnement actuel des modèles ou par phases plus ou moins abruptes comme cela s'est produit depuis 15 ans. Sur ce point, il est à noter que la croissance actuelle très rapide des températures survient en parallèle avec une diminution toute aussi rapide du couvert de glace sur l'océan Arctique. Or les travaux récents de Holland et al. (2006) suggèrent fortement que la banquise va disparaître par une série de périodes de fonte rapide revenant de façon récurrente au cours des prochaines décennies. Le climat semble donc fort susceptible de réchauffer par phases dans les années à venir dans la continuité de ce qui se passe actuellement.

En bout ligne, la prudence et la bonne gestion forcent à prévoir l'entretien des aéroports et des routes du Nunavik en considérant le pire scénario, à savoir celui qui conduit à la dégradation rapide du pergélisol.

Méthodologie de l'étude

Mesures thermiques et climatiques

Cette étude a débuté à l'été 2004. Toutefois, en plus de découler de travaux de recherche et d'observations sur le terrain, elle bénéficie d'informations obtenues au moyen de câbles à thermistances implantés au cours de la construction des aéroports. Dans plusieurs cas, les lectures de ces câbles, qui étaient faites manuellement par des particuliers, avaient été interrompues dans le courant des années 1990 faute de financement. Grâce à un contrat distinct du présent projet, plusieurs sites ont été automatisés par le personnel du Centre d'études nordiques depuis 2004 et quelques autres postes de mesure ont été installés à des sites où il n'y en avait pas. Ces données thermiques récentes et plus anciennes permettent d'évaluer les changements survenus dans les températures et dans les profondeurs de dégel sous les ouvrages et dans le terrain naturel avoisinant au cours des récentes années.

Documentation

Parmi les documents consultés relativement aux aéroports du Nunavik figurent les plans des pistes et des routes telles que construites ainsi que les plans originaux utilisés durant la construction et dont les auteurs avaient gardé copie. Ces plans ont surtout servi à préciser l'épaisseur des remblais et des routes par dessus le terrain naturel et à identifier les zones en déblais qui sont particulièrement sensible à la pénétration du dégel. En effet, le déblaiement lors de la construction décape les horizons organiques relativement isolants et expose le pergélisol riche en glace alors que le remblai mince qui est remis par-dessus ensuite laisse pénétrer la chaleur dans le sous-sol. Les chaînages qui servent de références spatiales dans le texte sont ceux des plans tels que construits. Les études de caractérisation avant-projet effectuées dans les années 1980 par les consultants ont été relues, de même que les rapports produits par le Centre d'études nordiques durant le programme de construction, notamment le rapport synthèse d'Allard et al. (1994). Les articles scientifiques et les comptes-rendus dans des actes de conférences portant sur les aéroports ont été recensés. Finalement le rapport récent de Beaulac et Doré (2005) sur le bilan de la condition des pistes et routes d'accès a servi aussi de référence, surtout pour compléter nos observations sur l'état des pistes. En effet, il est souvent arrivé que des travaux d'entretien survenus entre les visites effectuées par les différents chercheurs soient venus modifier les surfaces des pistes durant la période de l'étude.

Travaux de terrain

Été 2004

Compte tenu des coûts de logistique très élevés pour les travaux de terrain, ceux-ci n'ont pu être aussi exhaustifs que ce qui aurait été souhaitable. De plus ce projet a été mené de front avec une autre étude sur l'impact du changement climatique et l'adaptation des villages du Nunavik, afin de partager les frais de terrain car elle était aussi sous-financée. Il en a découlé qu'en 2004 les travaux ont porté en priorité sur les aéroports et les communautés de la côte ouest de la baie d'Ungava parce que les connaissances préalables sur les pistes identifiaient déjà des problèmes à Tasiujaq, à Kangirsuk et à Quaqaq et, aussi, parce que les connaissances sur la géologie de surface dans ces communautés, surtout à Tasiujaq et à Kangirsuk, étaient très fragmentaires alors que des édifices portaient visiblement des signes d'instabilité. Grâce à un autre contrat de Transports Québec, cette année-là le personnel du Centre d'études nordiques a commencé à procéder à l'automatisation de la lecture des câbles à thermistances au Nunavik. De plus, un des membres de l'équipe a participé à une tournée des aéroports en vol nolisé avec le personnel de Transports Québec tout en documentant et photographiant les problèmes ailleurs au Nunavik.

Hiver 2005

Alors que les travaux de terrain de 2004 à Tasiujaq donnaient à penser que l'enneigement, tel que révélé par la structure des nouvelles populations arbustives le long de la piste, pouvait être un facteur contribuant à la fonte du pergélisol, des enregistreurs de température (micro-dataloggers) avaient été installés en juillet à surface du sol le long de la piste pour mesurer le régime thermique sous-nival. Un membre de l'équipe visita donc Tasiujaq au début d'avril 2005 pour effectuer des mesures d'épaisseur de neige au droit des instruments afin de pouvoir établir par la suite une corrélation entre l'épaisseur de neige et le régime thermique superficiel. Par l'occasion, une carte de l'enneigement le long de la piste fut dressée.

Été 2005

Cet été là, deux nouveaux sites jugés sensibles par l'équipe du CEN et celle de Transports Québec ont été équipés de câbles à thermistances. Ce travail a nécessité des forages de quelques mètres de profondeur qui ont aussi été révélateurs de la nature du sol, notamment sous la piste de Kangirsuk et dans une zone de sol sensible à Puvirmituq. Cette même saison, durant trois semaines en août, deux membres de l'équipe ont effectué une visite, avec observations, sondages, prises de photos et rencontre des opérateurs locaux dans toutes les communautés du Nunavik non visitées en 2004. Au passage, les données thermiques ont été relues partout, dans toutes les communautés. Pour une période d'une semaine en août, un membre de l'équipe a participé à une nouvelle tournée de toutes les pistes dans un vol nolisé avec l'équipe de Transports Québec.

Hiver 2006

Une tournée en vol nolisé avec l'équipe technique de Transports Québec a permis en avril de jeter un coup d'œil rapide sur l'enneigement des bordures de pistes et des fossés de 10 pistes.

Été 2006

Tous les câbles à thermistances et les systèmes d'acquisition de données ont été visités en deux étapes durant l'été et les données récupérées. Le chercheur principal a, quant à lui, procédé à un examen détaillé des processus affectant les pistes de Salluit et d'Inukjuak, pour lesquelles subsistaient encore des incompréhensions.

Automne 2006 et hiver 2007

Cette période a été consacrée à la mise en graphique finale des données et à la rédaction.

Sondages et relevés géophysiques

L'équipe a réalisé des forages et des carottages peu profonds (jusqu'à environ 3.2 m) dans les sols en bordure des pistes afin de mieux caractériser le pergélisol. Lorsque les sols étaient trop pierreux et avaient un contenu trop pauvre en glace pour obtenir de bonnes conditions de carottage avec la foreuse portative du CEN (Calmels et al., 2005), des pelles mécaniques ont été louées dans quelques communautés pour dégager des coupes. Ce fut le cas notamment à Tasiujaq et à Kangirsuk. Mené en parallèle, le projet de caractérisation du pergélisol dans les communautés a conduit à l'inclusion des sites aéroportuaires sur les cartes de dépôt de surface des communautés. En retour, l'analyse géomorphologique et stratigraphique propre à chaque site a bénéficié des connaissances du contexte régional découlant de ces relevés.

Deux méthodes géophysiques ont été utilisées pour caractériser certaines pistes : le profilage en résistivité électrique (OHM-mapper) et le profilage au géoradar. La première méthode permet de produire des coupes (profils bidimensionnels) représentant la distribution de la résistivité électrique dans les terrains. La résistivité électrique est une propriété qui dépend de trois facteurs : la granulométrie des matériaux, la température et la teneur en glace (ou en eau). C'est donc un outil qui aide au diagnostic de la stratigraphie et des propriétés du pergélisol. Le géoradar, quant à lui, permet de produire des profils bidimensionnels qui sont en fait des images en coupe sur lesquelles on peut interpréter le front de dégel et la présence de masses de glace dans le sol. On peut aussi définir de façon générale la stratigraphie et la nature du sol. Ces deux méthodes connaissent chacune leurs limitations, par exemple quant à la résolution (niveau de détail observable) et aux profondeurs limite de détection. Complémentaires entre

elles, elles offrent toutefois l'avantage de visualiser la continuité latérale d'observations de surface (exemple le prolongement du toit du roc sous la surface des dépôts entre les affleurements rocheux). Les deux méthodes ont été appliquées par l'équipe du CEN à Tasiujaq, Aupaluk, Kangirsuk et Quaqtaq. Des explications détaillées de leur application se trouvent dans Savard (2006). De plus, des profils au géoradar réalisés par la compagnie Inspection Radar Inc. pour le compte de Transports Québec en août 2005 ont été mis à notre disposition. Deux d'entre eux servent à décrire le pergélisol sous les pistes, à Inukjuak et à Akulivik.

Caractérisation des sites aéroportuaires du Nunavik

Les sites aéroportuaires sont présentés suivant une séquence géographique en effectuant le tour de la péninsule du Nunavik, en commençant par Umiujaq sur la Baie d'Hudson et en terminant par Kangiqsualujuaq sur la baie d'Ungava. L'aéroport de Kuujuarapik a été exclu de l'étude parce qu'il n'y a pas de pergélisol dans cette localité. L'aéroport de Kuujuaq ne fait pas partie de la présente étude, étant sous la juridiction de Transports Canada. Cet aéroport fait présentement l'objet d'une étude indépendante suite à une entente de coopération avec ce ministère fédéral.

1- Contexte

Le Village

Umiujaq (56° 32' 21"; 73° 21' 12") est situé sur la côte est de la baie d'Hudson à environ 160 km au nord de Kuujjuarapik, en face des îles Nastapoka. Il s'agit d'une communauté de 377 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord) qui s'est développée dans la zone de pergélisol discontinu. Ce village a été construit à neuf dans les années 1980 et a été officiellement inauguré en 1986.

L'aéroport :

L'aéroport de Umiujaq ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1991 (d'après les plans « tel que construit »). La piste d'atterrissage, d'une longueur de 1070 mètres, du chaînage 5+000 au 6+070 m (longueur totale de la surface profilée : 1190 m, du chaînage 4+940 à 6+130 m) et 44 m de largeur (30 m pour la bande de roulement), est orientée selon un axe sud-sud-ouest nord-nord-est (027-207°), à une altitude moyenne de 75,6 m (76,2 m à son extrémité NNE et 75 m à son extrémité SS0).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

D'après Beulac et Doré (2005), le relevé d'un profil longitudinal d'épaisseur de MG-20b, effectué dans l'axe central de la piste, a mis en évidence que l'épaisseur actuelle de granulats dépassait l'épaisseur initiale de 150 mm. En 2000, une réfection de la piste a en effet donné lieu à un rechargement de 200 mm de MG-20b. Mais de longues ondulations avaient pu être observées sur la piste à l'été 2004. Le service d'entretien du MTQ a également observé une surabondance de granulats, pouvant atteindre 220 mm, et que la piste, s'étant aplanie, n'avait plus sa forme en couronne inversée. En conséquence, certains de feux de balisage seraient à relever. De petites dépressions observées sont attribuées à un mauvais entretien. Un peu au nord de la voie de circulation, une dépression a été répertoriée du côté de l'aérogare. Elle a été attribuée à une dégradation du pergélisol.

Cependant, la comparaison entre l'état initial et actuel de la piste réalisée à l'aide de photographies aériennes n'a pas permis de mettre en évidence des problèmes importants de dégradation du pergélisol ou de la piste.

Sur la route d'accès, des affaissements importants accompagnés de processus thermokarstiques sont produits et rendent la route chaotique (Figure 9). Deux plaques de tassement devaient être installées pour mesurer l'évolution des tassements.

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

La piste d'Umiujaq a été majoritairement bâtie en remblai sur de la roche basaltique (Figure 10). Seule une petite section d'une longueur approximative de 160 m située au nord de la voie de circulation dans l'axe central de la piste fut construite en déblai, mais dans le roc. Certaines sections reposent sur des dépôts sableux, quelques fois humide, comme dans les secteurs centraux de la piste. Entre les chaînages 5+874 et 6+033, le remblai est édifié sur un champ de blocs grossiers. C'est dans ce secteur que l'on trouve la plus grande épaisseur de remblai, soit 5 m. Dans certains endroits, comme au chaînage 5+675 m, le remblai traverse des dépôts sableux de 2 à 3 mètres d'épaisseur.

b- Hydrographie et drainage :

De par sa configuration topographique et géomorphologique, le réseau hydrographique à proximité de la piste est faiblement développé. Pour l'essentiel, il consiste en un ruisseau s'écoulant à proximité de l'extrémité sud de la piste, sur des dépôts fluviaux, en direction du sud sud-ouest, suivant

ainsi l'inclinaison naturelle du terrain. On ne note aucune interaction entre ce ruisseau et la piste. Pour le reste, le drainage du terrain se fait d'est en ouest soit sur le roc, soit à travers des dépôts sableux.

c- Le pergélisol :

Le pergélisol des terrains sous-jacent à la piste d'atterrissage d'Umiujaq consiste pour l'essentiel en du roc, des champs de blocs et des dépôts sableux d'épaisseur n'excédant pas quelques mètres. Il n'est pas impossible que des sédiments silteux se retrouvent en poches isolées sous les dépôts sableux dans de petites dépressions de la topographie rocheuse, comme celles que traverse la route. Comme les déformations de la route et celle de la piste en font foi, le pergélisol dans les dépressions meubles humides est sujet au tassement en situation de dégel. Les seuls phénomènes périglaciaires observés à proximité de la piste sont des ostioles situés en contrebas dans des dépôts sableux.

d- Facteurs climatiques :

Une station climatologique du Centre d'études nordiques située tout près de l'aéroport indique des températures moyennes annuelles de -1,72 °C à -4,87 °C depuis 1998 (Tableau 2).

Année	1998	2002	2004	2005
Température moyenne atmosphérique annuelle	-1,72 °C	-4,52 °C	-4,87 °C	-2,28 °C

Tableau 2. Température moyenne atmosphérique annuelle dans le secteur de l'aéroport d'Umiujaq.

Un câble à thermistances de 20,5 m de profondeur installé dans l'affleurement près de l'extrémité ouest de la piste à l'époque de la construction de la piste indique que la température dans le roc oscille entre +14,4 et -18,27 °C (Tableau 3).

Année	1998		2005	
	1 m	20 m	1 m	20 m
Température maximale	14,4 °C	-1,14 °C	14 °C	-0,25 °C
Température minimale	-17 °C	-1,35 °C	-18,27 °C	-0,48 °C

Tableau 3. Température minimale et maximale atteinte dans le roc proche de l'aéroport d'Umiujaq.

Le mollisol dans le basalte peut atteindre une profondeur de 18 m (Tableau 4). Toutefois, le roc et les dépôts blocailleux sous-jacents à la piste n'étant pas gélifs, l'approfondissement du mollisol en cas de réchauffement climatique ne devrait causer aucun problème.

Année	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Profondeur du mollisol	10 m	12 m	12 m	>15 m	18 m	>15 m	15 m	14 m	15 m

Tableau 4. Profondeur du mollisol dans le roc proche de l'aéroport d'Umiujaq.

Une mesure d'épaisseur de neige a été faite à l'hiver 2006 dans le champ, à proximité de la voie de circulation, à 10 mètres du court secteur de la piste apparemment affecté par un tassement. Les épaisseurs relevées s'échelonnaient entre 85 et 95 cm, ce qui est suffisant pour empêcher la reprise en gel du sol durant l'hiver dans cette région (Ménard et al., 1998) et donc provoquer un réchauffement du pergélisol dans ce secteur. Ceci pourrait être un facteur ayant favorisé le tassement.

e- Remarque historique :

Les plans initiaux prévoyaient que l'aéroport devait être construit sur les terrasses marines plus près de la mer. Mais une visite de terrain en avril 1989 avait mis en évidence que la piste était pour être construite sur des terrains humides sujets à des suintements hivernaux et à la formation de dômes de glaçage et de buttes saisonnières à noyau de glace. Cette observation conduisit alors le MTQ à déplacer le projet à son emplacement actuel, en quasi-totalité sur le roc. La photo aérienne d'époque avec

l'emplacement alors prévu apparaît à la figure 11. Si on compare avec la carte des dépôts meubles de la région d'Umiujaq, il ressort clairement que les tronçons de la route affectés par des tassements sont situés sur des terrains comparables à ceux qui étaient originalement prévus pour l'emplacement de la piste. On peut en conclure que la piste serait vraisemblablement devenue inutilisable à toute fin pratique si on avait maintenu son premier emplacement.

4- Diagnostic

La piste d'Umiujaq ne semble pas présenter de signe de dégradation majeure. La dépression observée au nord de la voie de circulation, côté aérogare, est mineure. Elle s'est produite dans des dépôts sableux probablement peu épais mais présentant un contenu en glace lié à la présence d'une fraction silteuse dans le profil stratigraphique. L'accumulation de neige dans ce secteur, en cuvette à proximité du remblai, a certainement causé un réchauffement du pergélisol dans le secteur, ce qui a accentué le problème. Néanmoins, il est raisonnable de penser que le phénomène ne devrait pas s'amplifier dans les années à venir et que les mesures habituelles de resurfacement devraient suffire à le compenser. Les seuls problèmes rencontrés sur la piste sont mineurs et semblent attribuables aux procédures d'entretien de la piste.

La route traverse un champ de dunes sensible à la déflation. Un appel à précaution a déjà été fait sur ce sujet afin de préserver la couverture végétale naturelle et de prévenir l'érosion éolienne en ne permettant aucune circulation en dehors de la route. Ses ondulations dues à des tassements vont nécessiter un entretien important, mais la sécurité d'accès à la communauté n'est pas en danger.



Figure 9 Affaissements importants accompagnés de processus de thermokarst sur la route d'accès

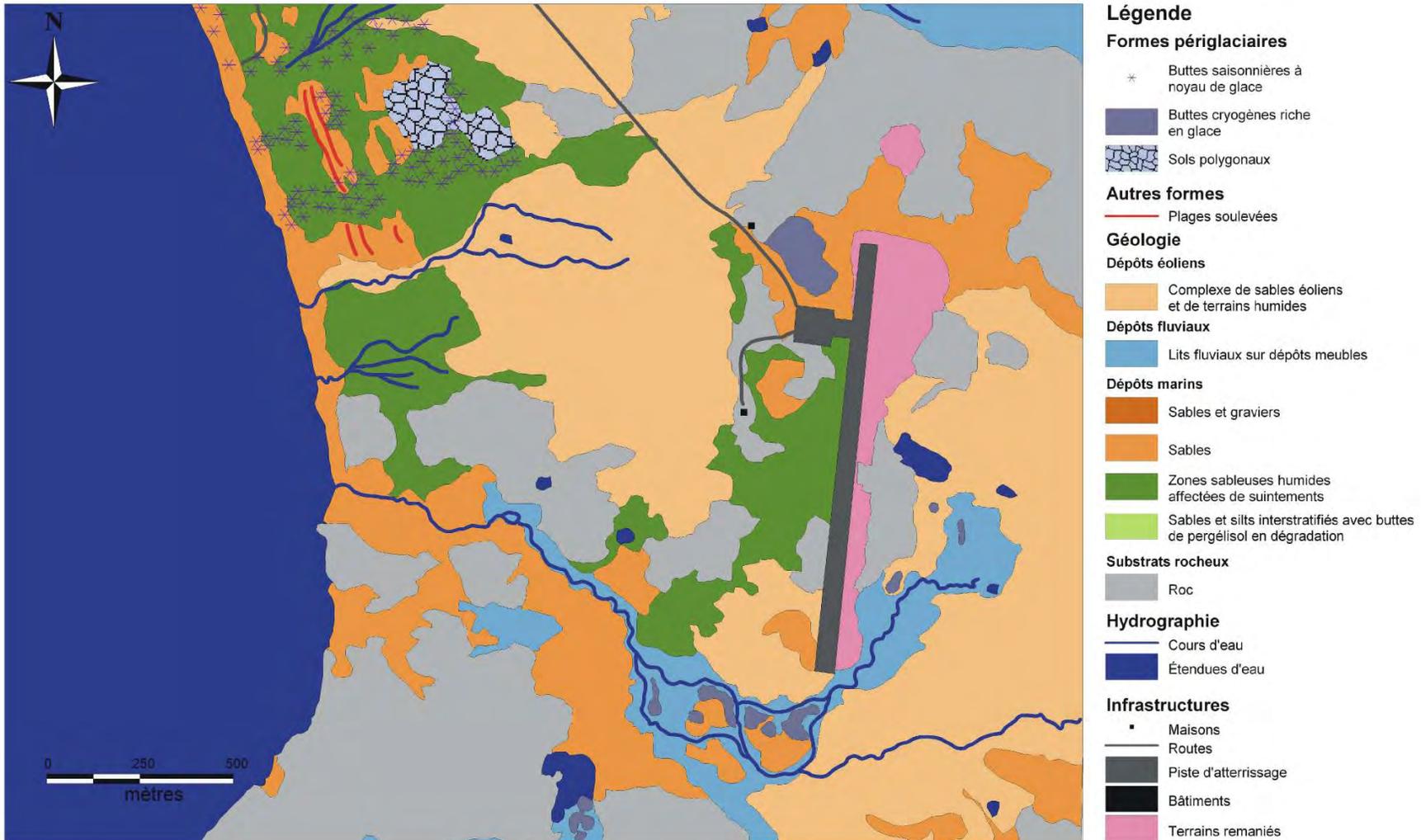


Figure 10 Carte des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Umiujaq

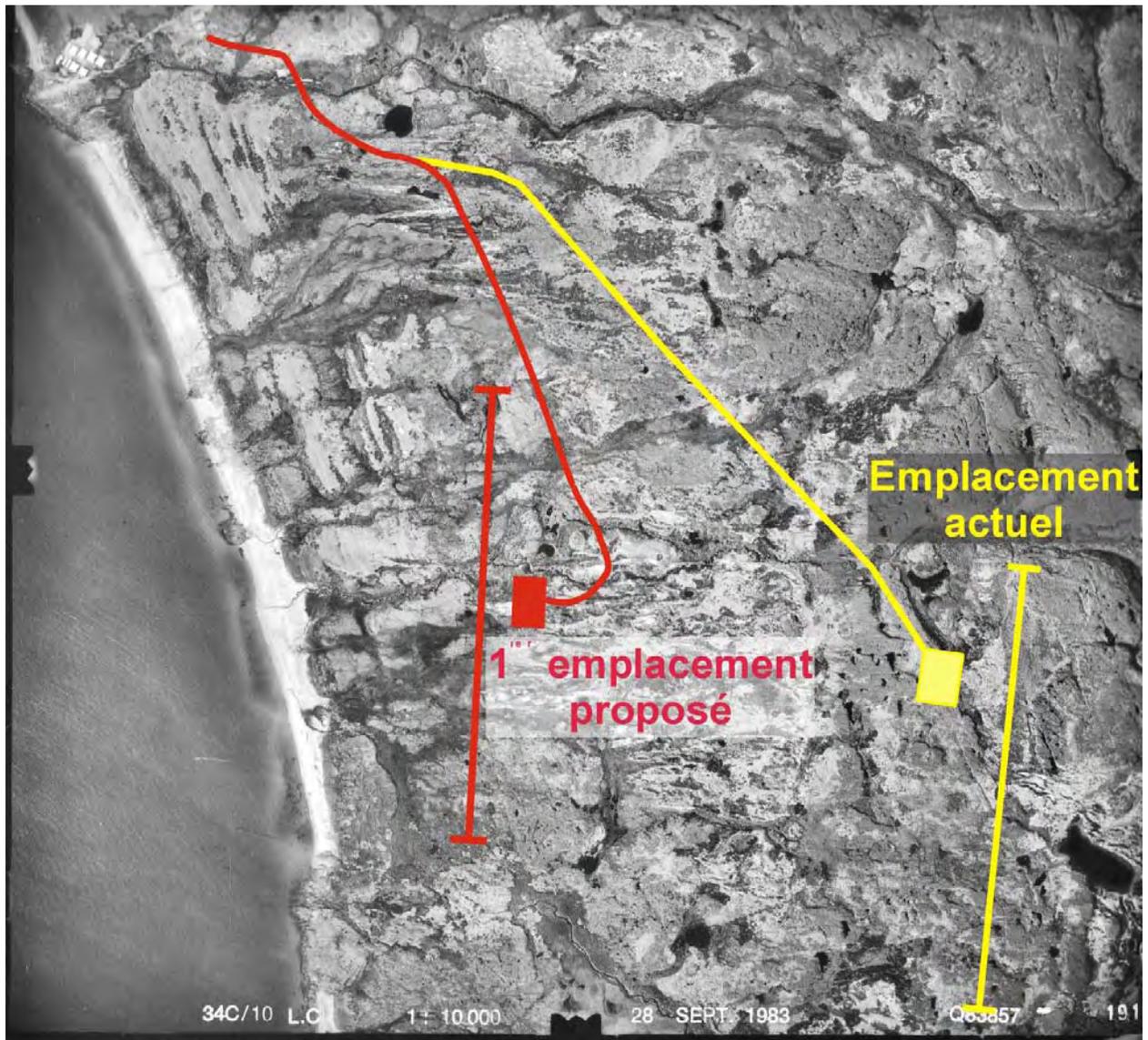


Figure 11. 1^{er} emplacement proposé et emplacement actuel de la piste d'Umiujaq.

1- Contexte

Le Village :

Inukjuak (58° 28' 09" ; 78° 04' 48") est une communauté de 1262 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord) située sur la côte de la Baie d'Hudson. Le village s'est développé sur la rive nord de la rivière Innuksuak, en face des îles Hopewell. Localisée dans la zone de pergélisol continu, la communauté d'Inukjuak été légalement constituée en municipalité en 1980.

L'aéroport :

L'aéroport d'Inukjuak ainsi que ses infrastructures ont été achevés avant 1987. La piste d'atterrissage mesure 1070 m de longueur, du chaînage 5+000 au chaînage 6+070 m et 44 m de largeur (30 m pour la bande de roulement). Elle est orientée selon un axe nord-est sud-ouest (043-223° N), à une altitude moyenne de 29 m (22 m à son extrémité SO et 36 m à son extrémité NE).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

D'après Beaulac et Doré, en 2005, la piste ne possédait plus sa forme de couronne inversée et le profil longitudinal était houleux aux points d'impacts lors des atterrissages. De plus, le profil longitudinal d'épaisseur de MG-20b au centre de la piste montrait un déficit généralisé, avec une moyenne de 6 cm d'épaisseur au lieu de 15 cm, cette perte pouvant être attribuable à l'usage prolongé de la piste au cours des 20 ans suivant sa construction. Plusieurs affaissements, de part et d'autre de la piste, étaient observés à son extrémité sud-ouest (près de l'aérogare). D'autres affaissements furent observés dans la section nord-est, notamment à son extrémité. Le drainage semblait empêché par la présence de granulats dans les fossés. Ces défauts ont été corrigés, la piste ayant été resurfacée au début de juillet 2006.

En Juin 2005, nous avons pu observer diverses formes de dégradation sur la piste. D'une part, il y avait des affaissements (Figure 12), aussi bien sur les bordures nord que sud, mais également des incisions faites par le ruissellement dans le talus sur le flanc nord (Figure 13). De multiples fissures de tension ont été observées sur la bordure sud (Figure 14). Enfin, les promontoires en bout de piste, sur lesquels sont installées les balises lumineuses, semblaient également être sujets à des déplacements (Figure 15).

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

Le terrain sur lequel est bâti l'aéroport est constitué de dépôt sableux littoraux marins et de roc (Figure 16). Les dépôts sableux se présentent souvent sous la forme de plates-formes ou de terrasses. Il s'agit d'anciennes plages laissées suite au relèvement isostatique. La présence d'affleurements rocheux laisse présumer que ces dépôts ne sont probablement pas très épais. Tout laisse donc croire qu'il s'agit d'un sol peu sensible au gel.

Néanmoins, il est à remarquer qu'il existe à proximité de la piste plusieurs zones de dépôts sableux qui sont mal drainées. La présence de ces zones mal drainées peut avoir plusieurs causes. D'une part, il peut y avoir sous les sables la présence de cuvettes, dans le roc, où l'eau s'accumule. D'autre part, il peut y avoir un colmatage des sables par de la matière organique, ou encore la présence plus en profondeur d'un dépôt plus fin.

Lors d'une visite sur le terrain effectuée en août 2005, des échantillons ont été prélevés à la pelle et à la tarière dans le premier mètre du profil, là où il apparaissait y avoir la résurgence de matériel plus fin. Ces endroits étaient pour la plupart proches de zones humides, situés dans la partie ouest de la piste,

aussi bien en bordure nord que sud. Les analyses granulométriques pratiquées sur ses échantillons ont révélé qu'ils contenaient des quantités significatives de silt et argile, comprises entre 55 et 73 %.

Il n'est donc pas à exclure que sous les sables littoraux se trouve un dépôt de texture fine et donc beaucoup plus sensible au gel.

Le profil au géoradar produit par Inspection Radar Inc. (Figure 17) suggère que le front de dégel saisonnier sous la piste se propage jusque dans le terrain naturel. Le profil suggère également que les dépôts sont exclusivement sableux sous plusieurs mètres de profondeur.

b- Hydrographie et drainage :

Le mauvais drainage semble être un facteur important de la problématique de la piste d'Inukjuak. En effet, l'eau se retrouve partout et les dispositifs de drainage actuels sont inopérants.

L'extrémité ouest de la piste, à l'endroit où le talus a une épaisseur excédant les six mètres, baigne dans une vaste mare (Figure 18) et le terrain est détrempé en permanence dans le secteur (Figure 19). Cette zone humide recèle des buttes de pergélisol (Figures 20 et 21). Des mares d'eau s'étendent par endroits au pied de tassements le long de la piste (Figure 22). Les fossés semblent inopérants sur une bonne longueur de part et d'autre de la piste et ils sont partiellement remplis d'eau durant tout l'été. (Figure 23). Un ruisseau s'écoule à proximité de l'extrémité est de la piste sans vraiment capter le drainage superficiel (Figure 24).

c- Le pergélisol :

De nombreux indices permettent de penser que le pergélisol dans les dépôts meubles est sensible au dégel, malgré le fait que la géologie de surface locale soit encore très mal documentée.

Des nombreux thufurs et des buttes de pergélisol apparaissent à la faveur d'un terrain plus organique dans une zone humide située au pied de l'extrémité ouest de la piste (Figure 20). Ces formes encore peu déstabilisées ne semblent pas mettre en péril l'intégrité de la piste pour l'instant. D'autres buttes de pergélisol existent un peu plus au nord, dans le champ, à distance de la piste (Figure 21). Sans forage, on ne peut préciser la nature du dépôt et le contenu en glace de ces buttes, mais d'ordinaire, la présence de telles formes est généralement associée à un substrat de granulométrie fine. Si ce substrat existe bel et bien plus en profondeur, celui-ci est susceptible de contenir de la glace en quantité suffisante pour générer des phénomènes de thermokarst lors de son dégel.

Par ailleurs, des fentes de gel sillonnent la surface du terrain un peu partout dans le secteur, dans les dépôts sableux (Figure 25). Celles-ci laissent planer deux incertitudes. D'une part, il est impossible de préciser pour l'instant s'il se trouve des coins de glace sous ces fentes, sachant que s'il s'en trouve, les dimensions en sont inconnues. D'autre part, on ne sait pas si des coins de glace passent sous la piste, dans lequel cas ils représenteraient un risque de dégradation advenant un dégel dû au réchauffement climatique.

La photographie de la figure 26 présente un affaissement dans le remblai, du côté nord de la piste. Cet affaissement est directement associé à une mare qui semble d'origine thermokarstique.

d- Facteurs climatiques :

Très peu de choses sont connues concernant les facteurs climatiques. Aucun câble à thermistances susceptible de nous renseigner sur le régime thermique du sol n'est installé. En revanche, une visite hivernale du site en avril 2006 a permis d'acquérir quelques données sur l'enneigement. D'une manière générale, les épaisseurs de neige à proximité de la piste (à 11 m des balises lumineuses, donc au-dessus et en marge des fossés) étaient comprises entre 1,2 et 1,62 m (Tableau 5); ces épaisseurs sont certainement suffisantes pour assurer l'isolation de la surface du sol en hiver au point d'assurer un bilan thermique positif. En conséquence, le pergélisol en bordure de la piste ne pourra que continuer à se dégrader.

Localisation (à 11 m des lumières vers le champ)	Côté de la piste	Épaisseur de neige
Extrémité ouest	Nord	160 cm
Face à l'aérogare	Nord	145 cm
Chaînage 4+420 m	Nord	120 cm
Chaînage 4+440 m	Sud	155 cm
Chaînage 5+900 m	Nord	150 cm
Chaînage 5+900 m	Sud	162 cm

Tableau 5. Épaisseurs de neige le 6 mars 2006 le long de la piste d'Inukjuak.

Aux endroits où le couvert de neige est le plus épais, la végétation arbustive a même commencé à coloniser le talus du remblai et accentue l'effet de rétention de la neige (Figure 27). Cela n'améliore en rien le bilan thermique du pergélisol qui se retrouve ainsi isolé pendant l'hiver.

4- Diagnostic

La piste d'Inukjuak a entamé un processus de dégradation dont il est impossible d'établir l'ampleur et les conséquences à venir. Il manque des informations concernant la stratigraphie ainsi que le régime thermique de la piste et du terrain naturel. Ceux-ci pourraient fournir un éclairage sur les processus en cours. En 2005, les deux côtés de la piste étaient affectés par la dégradation. En ce qui concerne le côté nord, le mauvais drainage peut clairement être mis en cause. Pour ce qui est du côté sud, l'enneigement du talus pourrait être mis de l'avant comme cause principale des dégradations. Cependant les deux processus sont reliés car le fond des fossés et des dépressions enneigés a des températures annuelles moyennes positives, ce qui entraîne des tassements; le résultat est que l'eau stagne en été dans les fossés surbaissés. Captant le rayonnement solaire, la température de cette eau en été peut atteindre des valeurs élevées et contribuer davantage aux tassements. Pour que de tels processus aient lieu, cela implique la probabilité d'un dépôt sensible au dégel en dessous des sables. La figure 28 montre une photographie de la piste prise à la troisième semaine de juillet 2006, environ une semaine après son resurfaçage. On y voit clairement que l'eau stagne dans les fossés. Il est à prévoir que les bords du remblai vont recommencer à s'affaisser dans les prochaines années.

En résumé, la piste d'Inukjuak est à surveiller attentivement. Des études supplémentaires doivent être menées pour caractériser le sol. Les protocoles de déneigement sont peut-être à revoir. Enfin, des travaux d'urgence pourraient être entrepris pour ce qui a trait au drainage, soit en réaménageant les fossés, soit en les comblant complètement pour ne pas laisser l'eau y stagner et en re-profilant les côtés de la piste pour favoriser le dégagement naturel de la neige par le vent.



Figure 12 Tassement en bordure sud de la piste d'Inukjuak

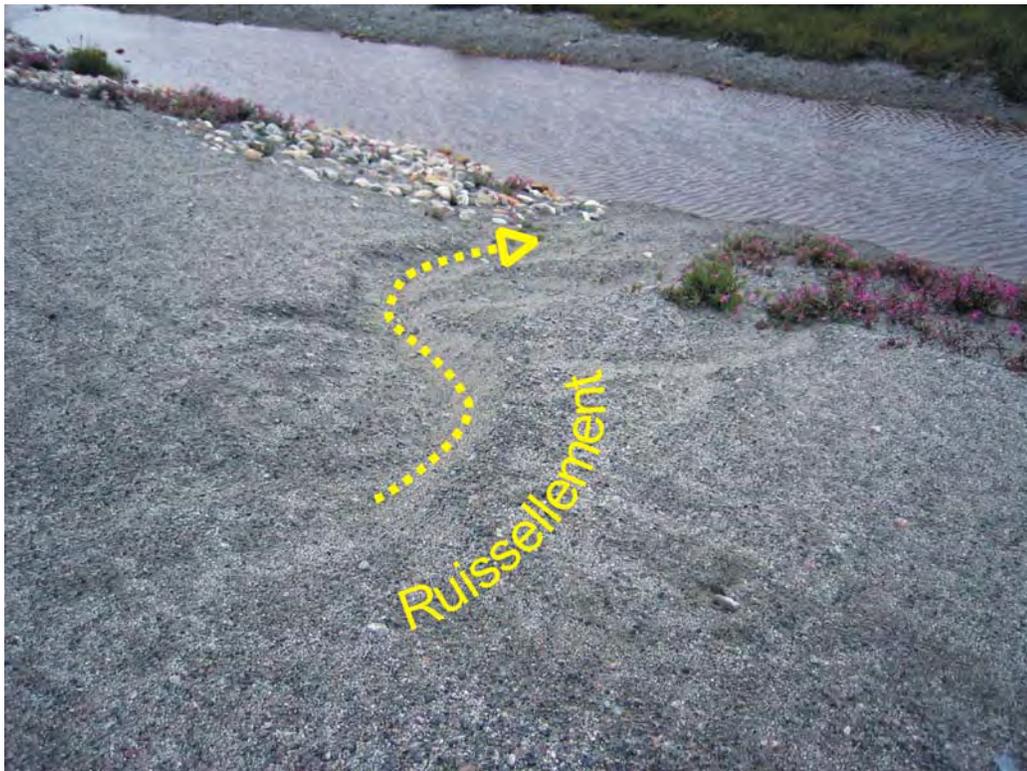


Figure 13 Incisions dues au ruissellement dans les talus côtés nord de la piste d'Inukjuak

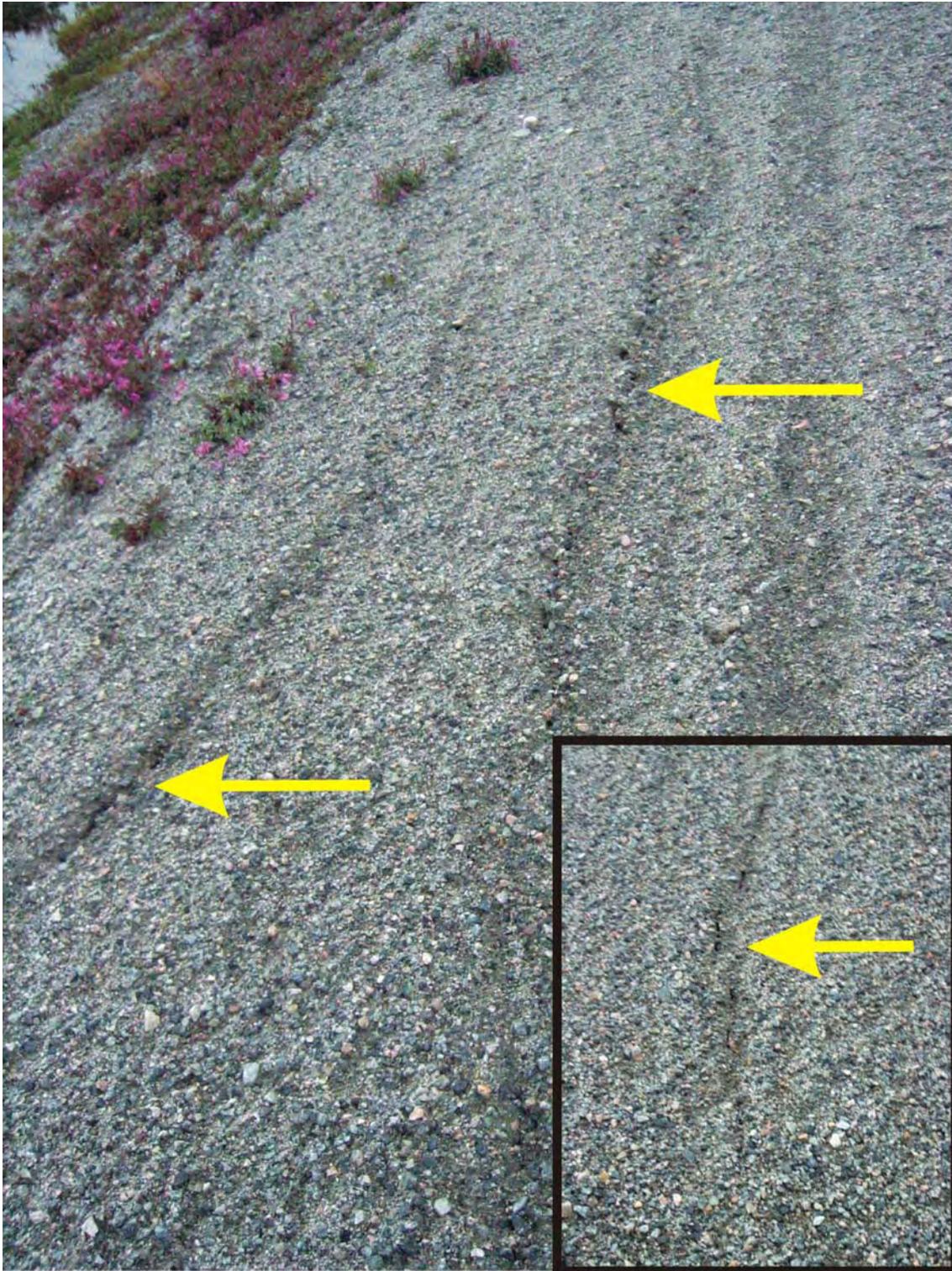


Figure 14 Multiples fissures de tension sur la bordure sud de la piste d’Inukjuak

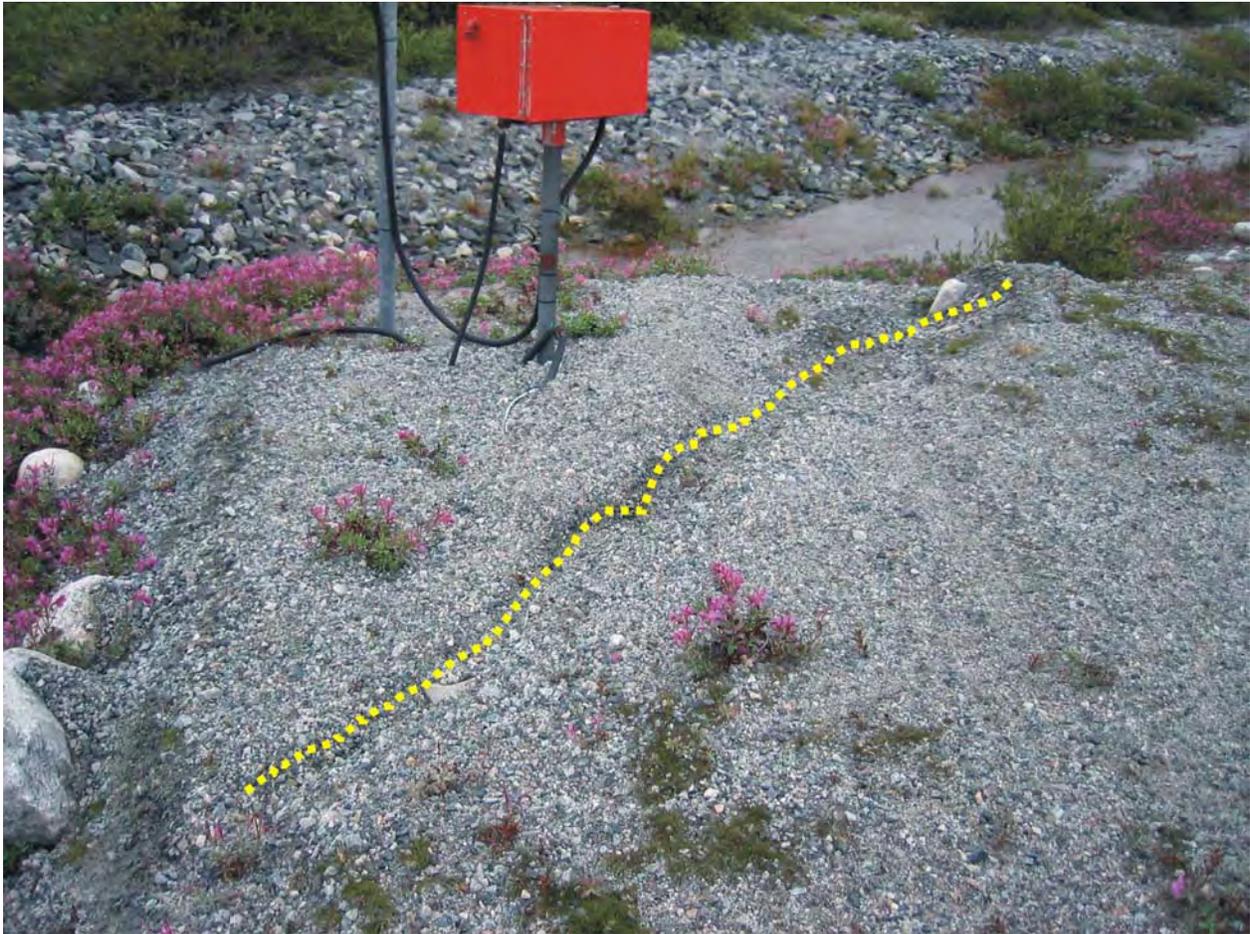


Figure 15 Dégradation sur les promontoires des balises en bout de piste.

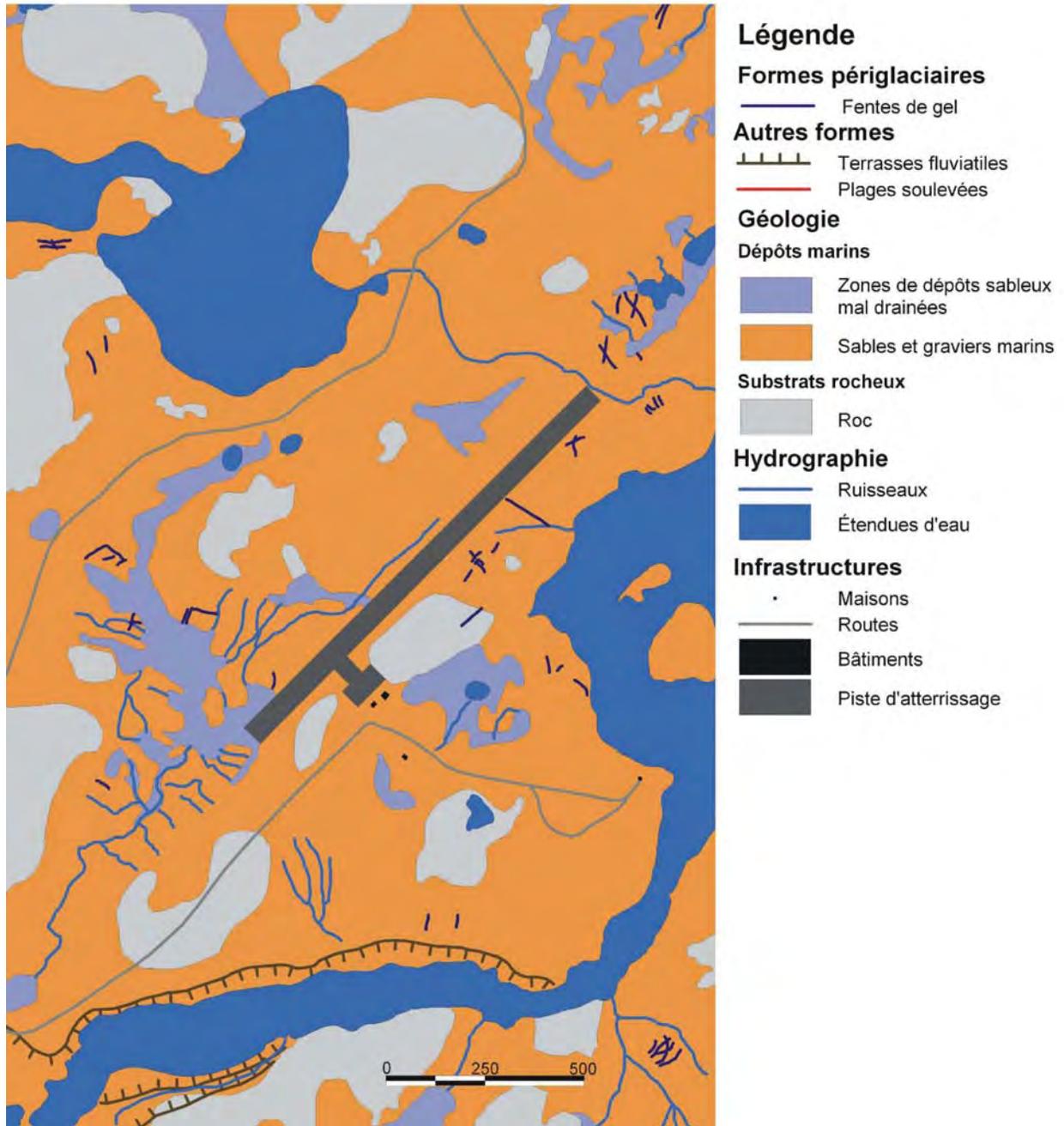


Figure 16 Carte des dépôts de surface de l'aéroport d'Inukjuak

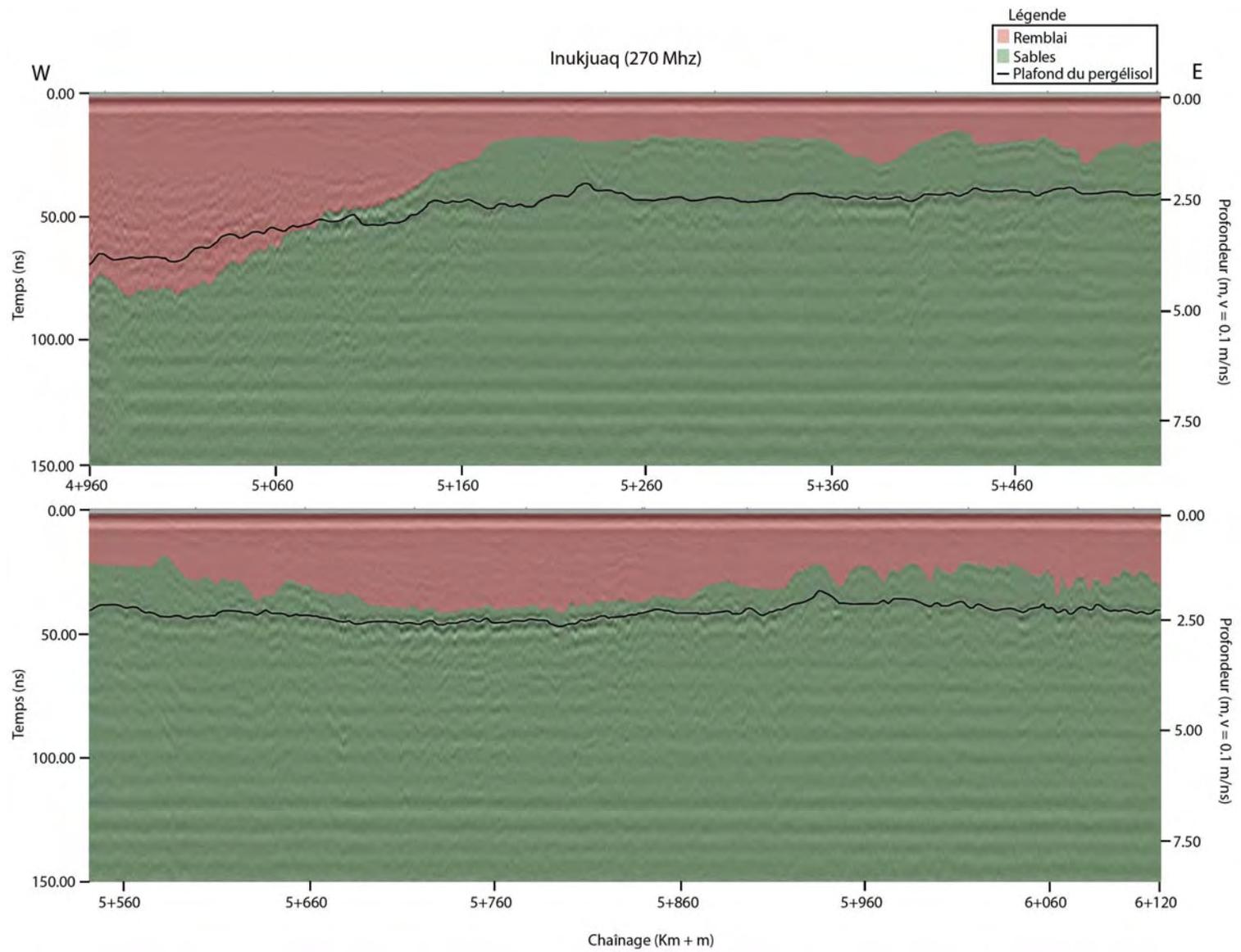


Figure 17 Profil au géoradar de la piste d'Inukjuaq



Figure 18 Mare baignant le pied du talus, à l'extrémité ouest de la piste d'Inukjuak



Figure 19 Zone humide et grande mare à proximité de la bordure nord de la piste

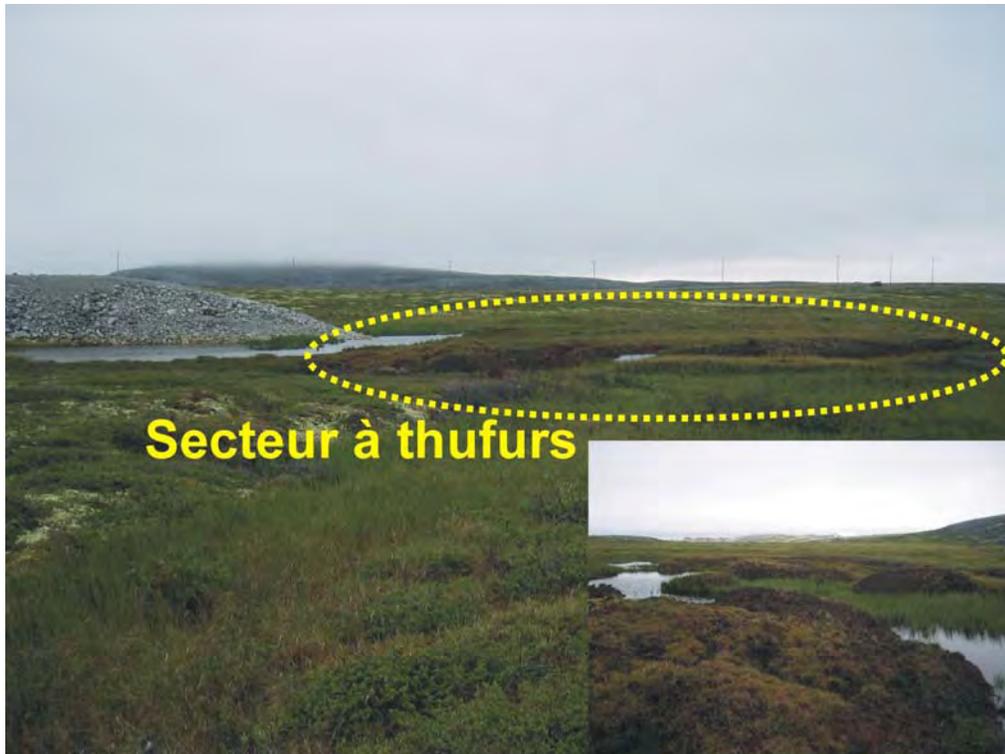


Figure 20 Zone à thufurs, à proximité de l'extrémité ouest de la piste d'Inuajuak



Figure 21 Butte de pergélisol à proximité de la bordure nord de la piste



Figure 22 Mare et fossé de drainage saturé en eau en bordure sud de la piste



Figure 23 Fossé contenant de l'eau en bordure nord de la piste



Figure 24 Ruisseau s'écoulant à proximité de l'extrémité est de la piste d'Inukjuak

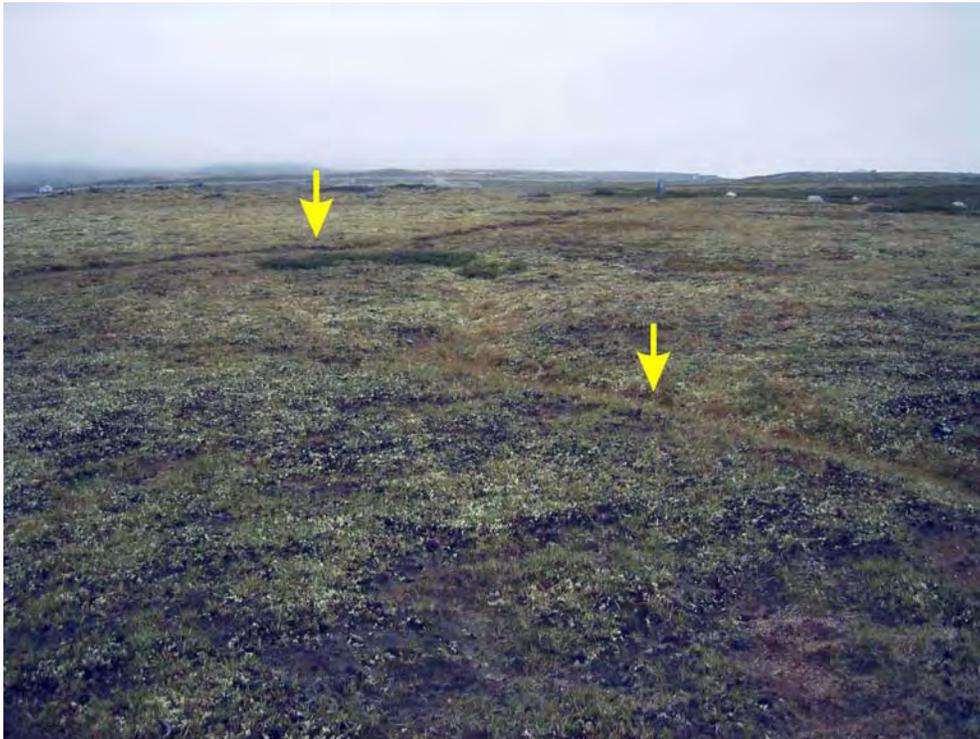


Figure 25 Fente de gel dans une terrasse sableuse sur la terrasse au sud de la piste



Figure 26 Processus thermokarstique associé à un affaissement du talus en bordure nord de la piste



Figure 27 Végétation arbustive sur le talus du côté sud de la piste, indice d'un couvert neigeux important durant l'hiver.



Figure 28 Photographie de la piste d’Inukjuak prise à la troisième semaine de juillet 2006

PUVIRNITUQ

1- Contexte

Le Village :

Puvirnituaq est situé sur la côte est de la baie d'Hudson à 540 km au nord de Kuujjuarapik (60,05 °N ; 77,32 O). Il s'agit d'une communauté de 1410 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord). Le village s'est développé à 4 km de la baie de Puvirnituaq, sur la rive nord de la grande rivière du même nom, dans la zone de pergélisol continu. Puvirnituaq est, avec Kuujjuaq, un des deux centres administratifs du Nunavik. À ce titre, il héberge un des deux centres de santé de la région.

L'aéroport :

L'aéroport de Puvirnituaq ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1990 (d'après les plans « tel que construit »). La piste d'atterrissage, d'une longueur de 1524 mètres, du chaînage 5+000 au 6+524 m (longueur totale de la surface profilée : 1660 m, du chaînage 4+940 à 6+600 m) et 150 m de largeur (90 m pour la bande de roulement), est orientée selon un axe nord-nord-ouest sud-sud-est (011-191° N), à une altitude moyenne de 25,6 m.

Cette piste, qui est plus longue et plus large que les autres pistes du Nunavik, revêt un intérêt stratégique particulier, puisque celle-ci permet l'atterrissage de plus gros porteurs, notamment le jet Challenger servant aux évacuations médicales. De plus, Puvirnituaq étant le carrefour de la côte de l'Hudson, l'aéroport du village constitue une porte d'accès aux communautés plus éloignées. Un vol direct le relie deux fois par semaine à Kuujjuaq.

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

D'après Beaulac et Doré (2005), le relevé d'un profil longitudinal d'épaisseur de MG-20b, effectué dans l'axe central de la piste, a mis en évidence que l'épaisseur de granulats est inférieure à l'épaisseur initiale de 150 mm. Sur le terrain, le profil apparaît houleux et déficient aux points de contact au sol des avions sur la piste. Par ailleurs, le profil transversal semble aller en s'aplanissant. Il s'agit de l'usure communément observée sur la plupart des pistes depuis leur construction.

Un affaissement qualifié de majeur (200 à 300 mm d'amplitude) a été observé de chaque côté de la piste à l'endroit où celle-ci traverse une petite vallée, près de l'extrémité nord de la piste. Le remblai atteint une hauteur de 8 m dans ce secteur et un tassement de 350 mm a été mesuré à partir d'une dépression observée sur la piste. Un sondage réalisé plus en bordure dans le même secteur a permis de mesurer une épaisseur de 350 mm de MG-20b, ce qui suggère qu'un affaissement de l'ordre de 200 mm a pu localement y être comblé au fil du temps.

La comparaison entre l'état initial et actuel de la piste réalisée à l'aide de photographies aériennes n'a pas permis de mettre en évidence des problèmes évidents de dégradation du pergélisol ou de la piste.

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

La piste a été presque entièrement construite sur des affleurements rocheux. Néanmoins, entre les chaînages 6+215 et 6+350 m, la piste enjambe une petite vallée transversale colmatée par des dépôts meubles (Figure 29). À cet endroit, l'épaisseur du remblai varie de 4,6 à 8 m, tandis que sur le roc elle varie de 0,5 m à 4 m. Tel que révélé par des sondages et un levé géophysique effectué avant la construction de cette section, le fond de cette vallée est comblé de dépôts marins silteux recouverts en surface de quelques décimètres de sable et d'un horizon organique.

En juin 2005, une station climatique automatisée a été placée dans la petite vallée perpendiculaire à la piste. Un câble à thermistance devant y être installé, on a procédé à deux forages (PUV1 et PUV2) à cet endroit, ce qui fut l'occasion d'examiner la stratigraphie du terrain.

Le forage PUV1 a été effectué dans la vallée à une centaine de mètres de l'accotement est de la piste sur un petit plateau surélevé d'une trentaine de centimètres par rapport aux terrains humides avoisinants. À cet endroit, la présence en surface d'ostioles indiquait la présence de sédiments sous-jacents de granulométrie fine. Des blocs, peu nombreux, affleuraient également en surface.

Lors du forage, le front de dégel atteignait 43 cm de profondeur, mais une autre mesure effectuée plus près du remblai révéla une profondeur de dégel de 64 cm. Le premier horizon superficiel est composé de sable moyen à grossier avec présence de cailloux pouvant atteindre 70 cm d'épaisseur. Par la suite, le sable faisait place à un sédiment grisâtre beaucoup plus fin. Lors de la récupération des échantillons, des lentilles de glace de ségrégation étaient visibles (Figure 30A), le pourcentage de glace estimé pour ces échantillons, situés au plafond du pergélisol, dépassait 30% (Figure 30B) jusqu'à 1,5 m. La profondeur maximale atteinte par ce forage a été de 3,75 m. La récupération d'échantillons s'est effectuée sur 2,80 m, au-delà de ce seuil, les échantillons ne demeuraient pas gelés et perdaient toute consistance, le contenu en glace étant devenu trop faible. Les analyses granulométriques effectuées indiquent que sous la couche sableuse de surface, au-delà d'environ 88 cm de profondeur, le sol contient une fraction importante de silt et d'argile (fines) et est donc gélif (tableau 1). Le forage PUV2 à peu de distance de là et ayant atteint 216 cm de profondeur a donné des résultats comparables (tableau 6).

Numéro de forage-profondeur (cm)	Graviers (%)	Sables (%)	Fines (%)
PUV1-56	58,60	39,94	1,46
PUV1-86	3,00	19,43	77,57
PUV1-109	13,38	32,77	53,85
PUV1-123	32,16	18,20	49,63
PUV1-143	18,58	13,05	68,37
PUV1-169	2,00	19,49	78,51
PUV1-194	3,08	32,27	64,65
PUV1-225	4,56	36,57	58,87
PUV1-255	5,69	45,88	48,43
PUV1-289	11,67	46,19	42,14
PUV2-82	29,17	31,58	39,25
PUV2-91	0,00	57,42	42,58
PUV2-115a	0,25	45,76	53,99
PUV2-115b	33,27	48,90	17,83
PUV2-143	0,00	13,29	86,71
PUV2-168	0	7,70	92,30
PUV2-196	3,46	11,45	85,08
PUV2-216	5,45	6,85	87,70

Tableau 6 Granulométrie des sols de la vallée d'après 2 forages fait en juin 2005

b- Hydrographie et drainage :

De par sa configuration topographique, le réseau hydrographique à proximité de la piste est peu menaçant pour l'ouvrage. Les mares et autres lacs qui se trouvent à proximité ne sont pas dus au thermokarst, mais attribuables seulement à la topographie. Ils ne prendront donc pas d'expansion advenant le dégel du pergélisol suite au réchauffement du climat. Le drainage est assuré par l'écoulement le long des pentes de part est d'autre de la piste, qui en éloigne l'humidité à l'exception d'un endroit : là où la piste traverse la vallée. En effet, en ce lieu, la configuration topographique du terrain est telle que de l'eau peu très bien s'écouler sous le remblai, d'ouest en est en suivant la ligne de pente induite par la vallée. Les terrains situés dans la vallée du côté est de la piste sont d'ailleurs humides, et un ruisseau y serpente en provenance de la piste.

c- Le pergélisol :

Le pergélisol sous-jacent à la piste d'atterrissage de Puvirnituk consiste pour l'essentiel en roc gelé et en quelques minces débris rocheux, à l'exception de courtes sections, dont la vallée enjambée par la piste. Les terrains rocheux sont stables au dégel et resteront inaltérés en cas de réchauffement du climat.

Pour ce qui concerne la vallée, les sédiments qu'elle contient ont des contenus en silt et argile pouvant dépasser 90 % dans les horizons plus profonds. Ils sont donc fortement susceptibles au gel. Ces matériaux sont susceptibles de s'affaisser et de fluer en cas de dégel du sol. Cependant, le forage a démontré que seule une faible épaisseur de sédiment, comprise entre 70 et 150 cm de profondeur, présente des contenus en glace suffisamment importants pour provoquer un tassement au dégel. Avec une teneur en glace avoisinant 35%, cela représente néanmoins un potentiel de tassement de l'ordre de 25-30 cm, sans compter le fluage.

Les seuls phénomènes périglaciaires observés à proximité de la piste sont des ostioles situés en contrebas dans des dépôts sableux de la vallée. Plus à l'est, des sols polygonaux et des fentes de gel sont observables, mais bien trop loin pour pouvoir affecter la piste en quelque manière que ce soit.

d- Facteurs climatiques :

Lors de la construction de la piste, trois câbles à thermistances (PUV177 PUV296 et PUV297) furent installés selon un alignement transversal à travers le remblai au chaînage 6+670 m, là où son épaisseur était la plus importante. La figure 31 présente un schéma en coupe transversale du remblai à cet endroit et le positionnement des câbles. Ces câbles ne furent automatisés qu'en 2005 ; jusqu'alors les données étaient collectées manuellement et étaient très fragmentaires.

Les données issues d'un câble de 5 m installé dans les dépôts marins dans le fond de la vallée à quelque 100 m de la piste lors de la construction indiquaient que la couche active atteignait une épaisseur de 90 cm au début des années 1990. D'après le câble de référence installé en 2005, le sommet du pergélisol se trouve maintenant à 100 cm en 2005 et 127 cm en 2006 (Figure 32).

L'étude des données issues des câbles situés dans la piste met en évidence que le front de dégel ne se rend pas actuellement jusqu'au terrain naturel. En effet pour le câble PUV177, le dégel atteint 5,9 m sous le remblai ; or à cet endroit l'épaisseur du remblai est proche de 6,5 m (Figure 31 et 33). De plus, le patron des courbes de température ne démontre pas qu'une arrivée d'eau se produit sous la piste à cet endroit lors du dégel printanier. En ce qui concerne les câbles PUV196 et PUV197 (Figures 34 et 35 respectivement), l'analyse des données démontre que consécutivement à la construction de la piste, le plafond du pergélisol est progressivement remonté à travers le remblai. Maintenant, le dégel n'atteint pas 4 m de profondeur dans le cas de PUV296 et moins de 5,25 m dans le cas de PUV297.

Si le terrain naturel sous la piste sur le côté est semble demeurer encore gelé, en revanche il est fort probable que le terrain soit dégelé de façon saisonnière du côté ouest, étant donné que le remblai à une épaisseur moindre, de l'ordre de 3 m approximativement. C'est d'ailleurs de ce côté que fut détecté le tassement dans la piste. Dans ce contexte des tassements pourrait encore s'y produire. À cet endroit, plus élevé dans la vallée, l'épaisseur des dépôts gélifs pourrait être moindre que dans le fond de la vallée, ce qui limiterait le tassement, mais cela reste à confirmer. En effet, les sédiments fins ont tendance à se retrouver davantage dans les creux topographiques.

Pour ce qui a trait au couvert nival, aucune mesure d'épaisseur n'est disponible. Beaulac et Doré (2005) rapportent que des observations sommaires sur le terrain montrent un enneigement important dans la vallée.

4- Diagnostic

La piste de Puvirnituk semble montrer des signes de dégradation sur son côté ouest, au passage de la vallée. Néanmoins, si on se rapporte aux épaisseurs de MG-20b, le tassement survenu à date serait de 20 cm. Il s'agit d'un secteur circonscrit. Aucun autre indice, tel que des fissures de tension, n'a été observé ou signalé.

S'il y a une possibilité pour qu'un tassement dû au dégel se soit produit sur le côté ouest, en revanche, l'hypothèse d'un tassement généralisé de la piste dans ce secteur paraît peu probable, puisque le dégel ne dépasse pas l'épaisseur du remblai pour le côté est. Toutefois, l'écoulement d'eau sous la piste est susceptible de constituer un apport de chaleur responsable du tassement local observé.

Il est à remarquer que dans le secteur de la piste qui chevauche la vallée, et à cet endroit exactement, la pente longitudinale de la piste change pour passer de 0,20 à 0,80 % en direction du nord. Ceci peut biaiser la perception d'un observateur relativement à la présence d'une dépression généralisée dans cet endroit. D'autre part, ce secteur, situé non loin de la fin de piste, est celui où les avions touchent le sol lors de l'atterrissage. Cet endroit étant celui où le remblai est le plus épais, il y aurait lieu d'évaluer aussi ce facteur comme cause partielle de la détérioration observée.

Au final, l'hypothèse d'un affaissement généralisé ayant lieu présentement dans ce secteur est fort peu probable.

Néanmoins, il est possible qu'un tassement ait commencé en partant du côté ouest. Il est possible que celui-ci puisse continuer et se propager du bord vers le centre de la piste. Des études complémentaires sont nécessaires sur cet aspect. Pour ces raisons, la piste doit être surveillée adéquatement.

La route d'accès à partir du village est construite principalement sur le socle rocheux à l'exception d'une petite section près de l'aéroport entre les chaînages 0+670 et 0+820 où le remblai de 1,2 à 2,5 m d'épaisseur recouvre des dépôts glacio-marins sablo-caillouteux. A environ un mètre de profondeur, ces dépôts deviennent argileux. Un approfondissement du mollisol consécutif au pavage ou au réchauffement climatique finira un jour par affecter une section de route d'environ 150 m de long.

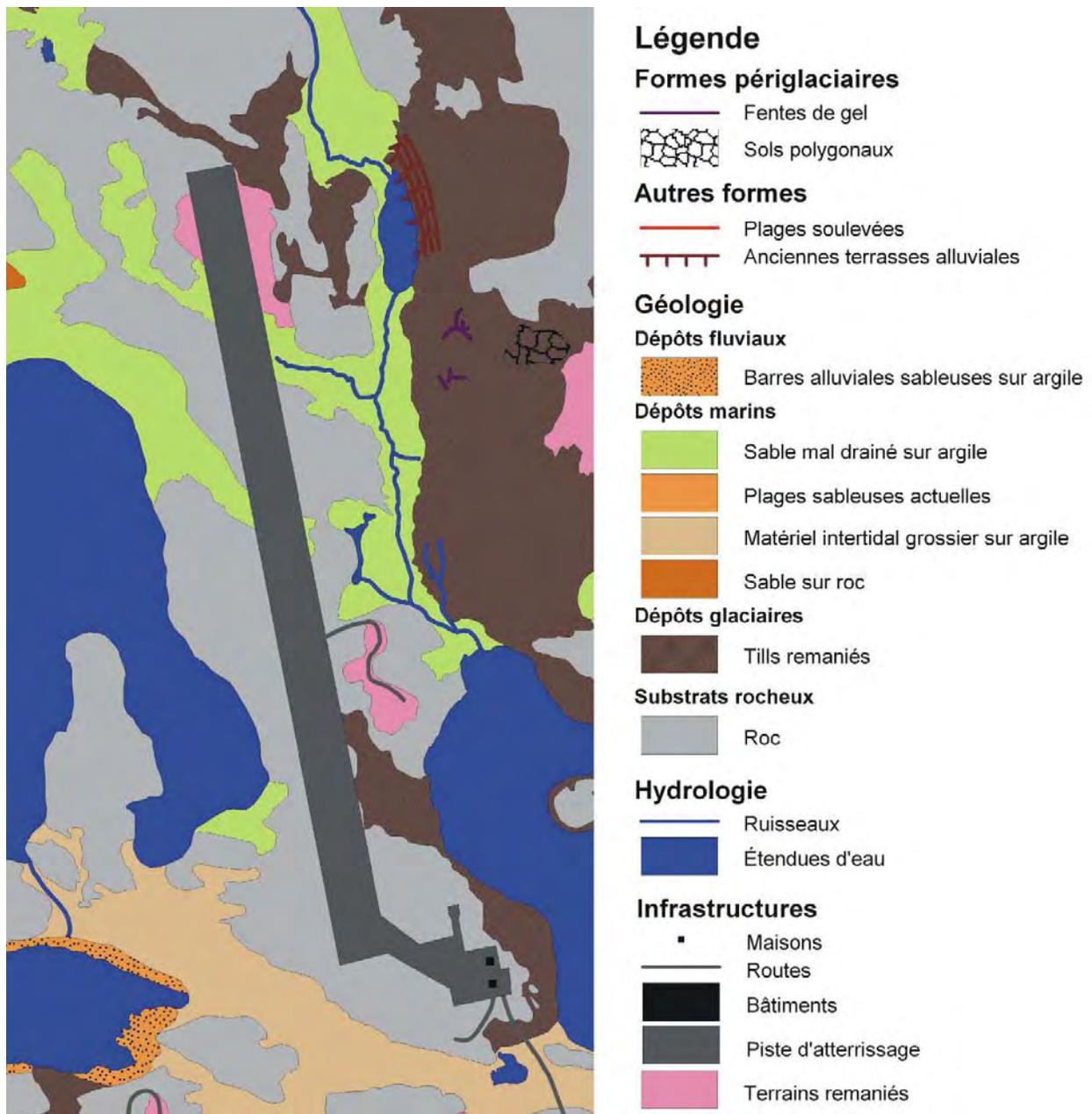


Figure 29 Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Puvirnituk

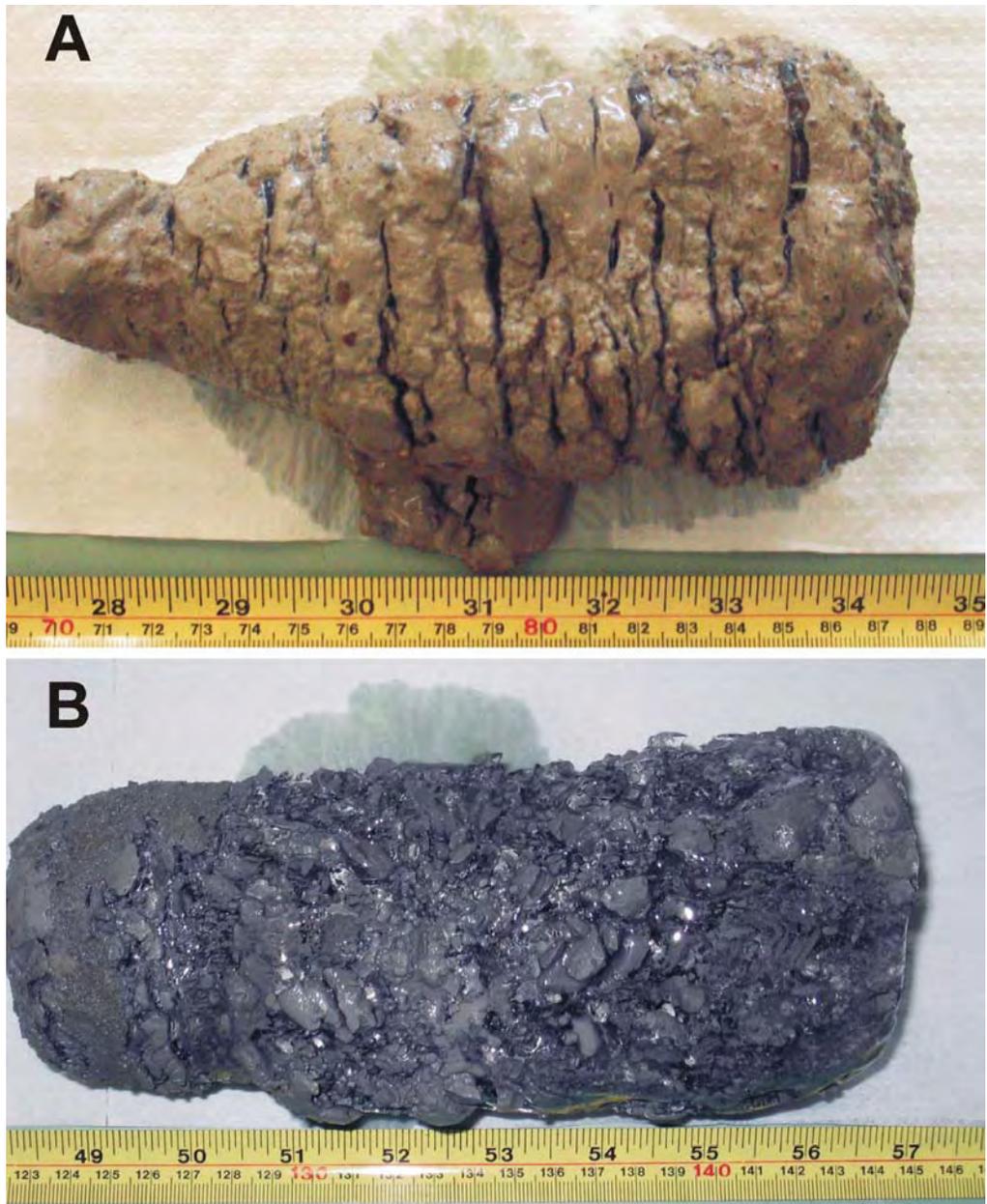


Figure 30 Échantillons récolté dans la petite vallée

A- entre 69 et 88 cm de profondeur ;
B- entre 122 et 145 cm de profondeur.

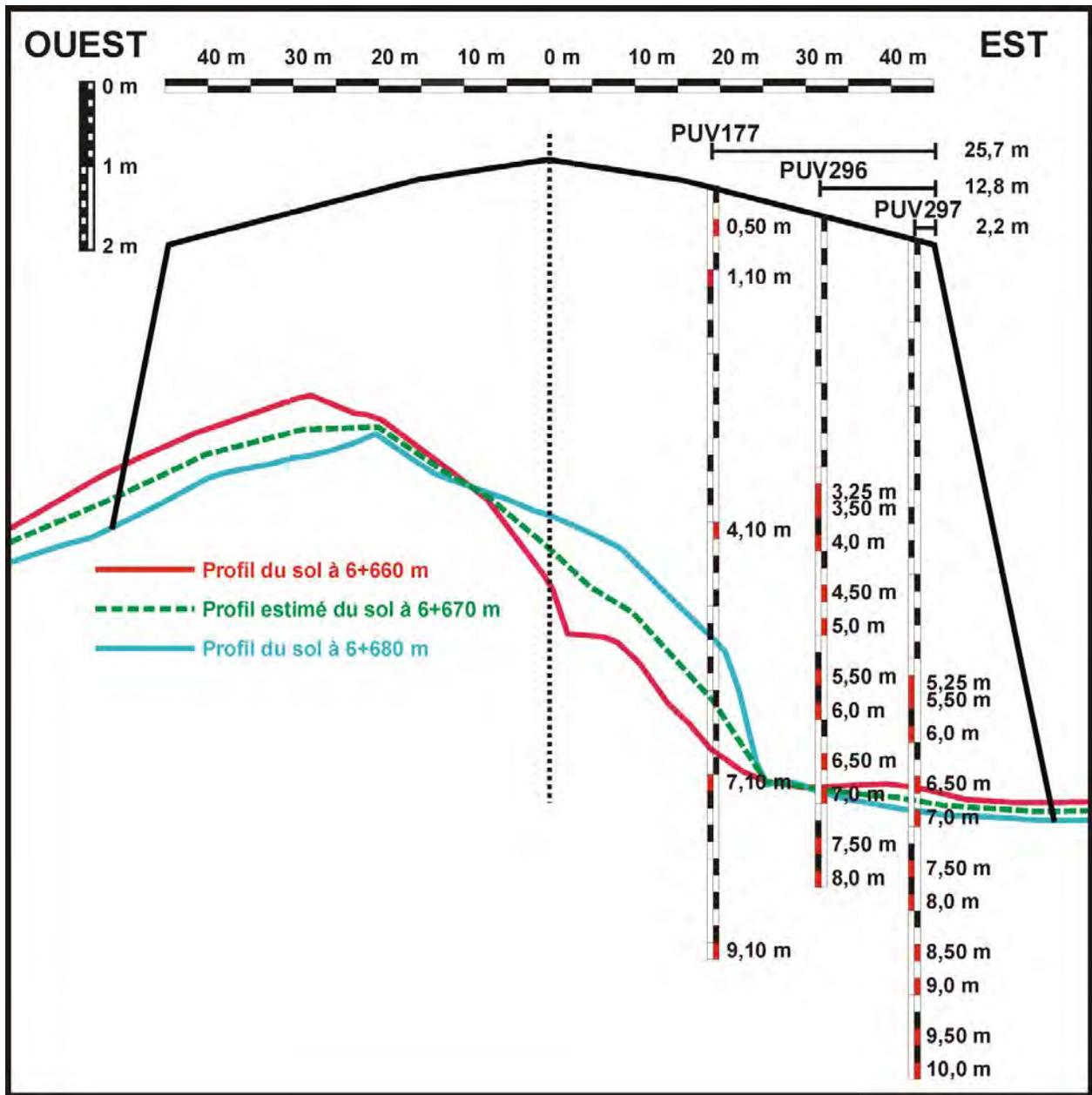


Figure 31 Coupe transversale du remblai au chaînage 6+670 m

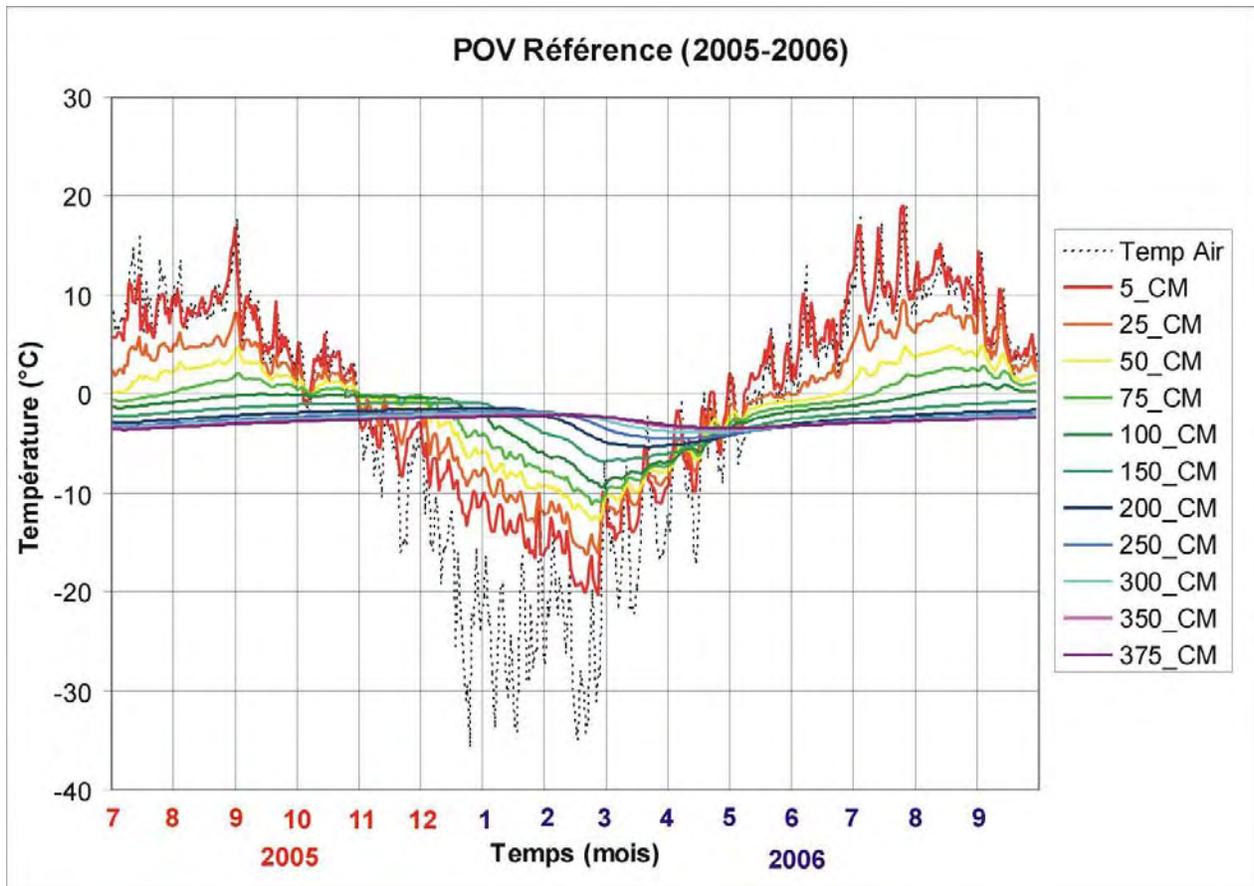


Figure 32 Températures du sol et atmosphérique dans la vallée proche de la piste de Purvirnituk

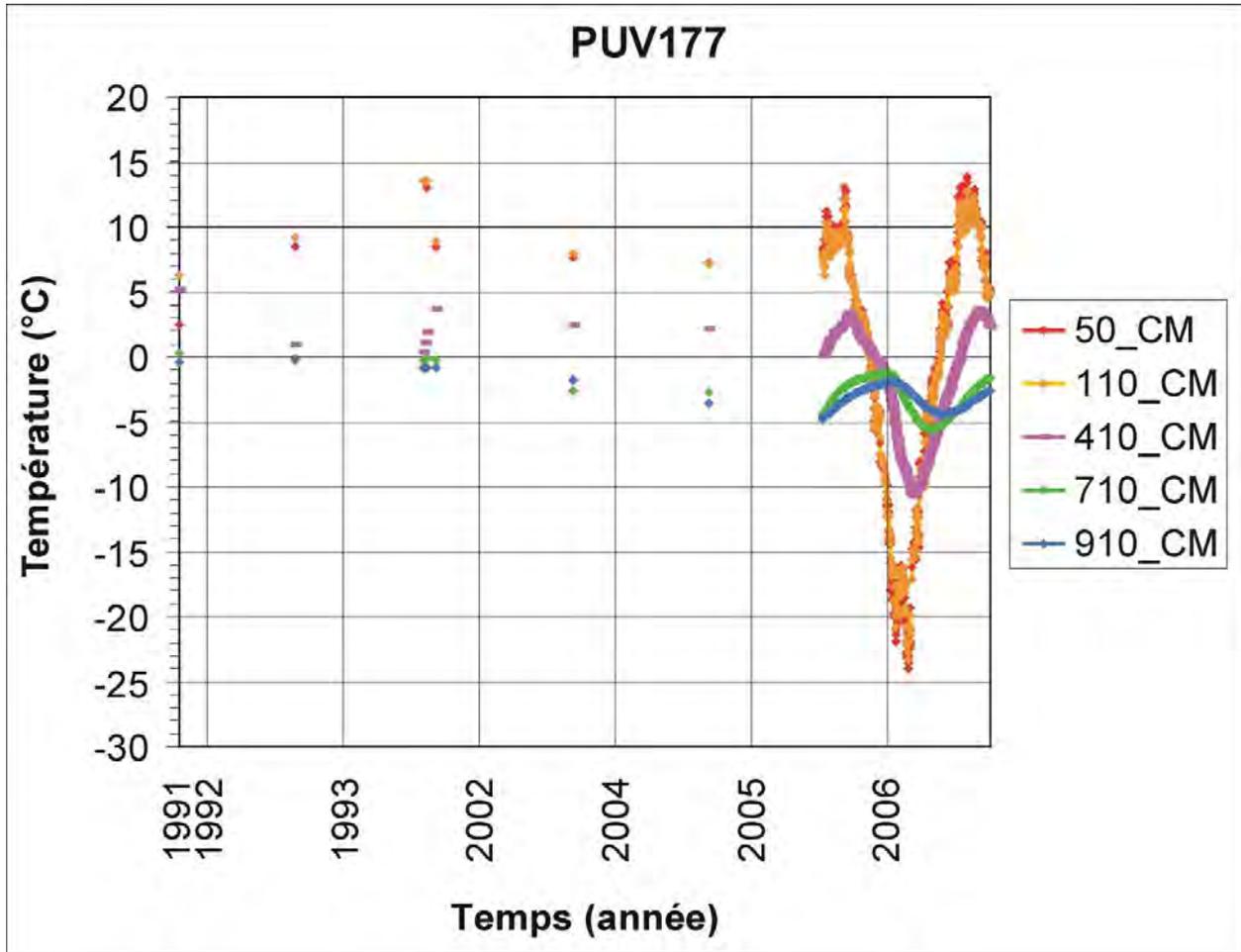


Figure 33 Températures du sol dans la piste de Purvirnitua(PUV177) à 6+270 m

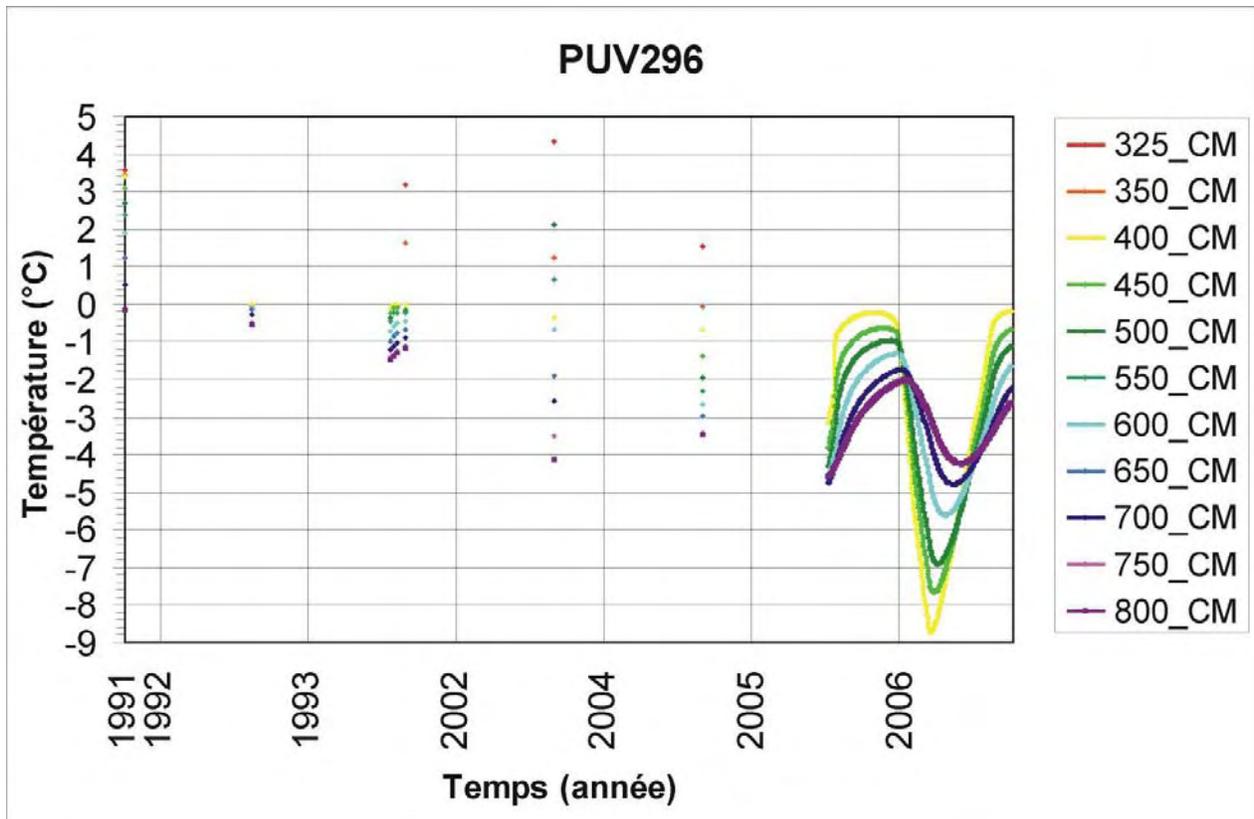


Figure 34 Températures du sol dans la piste de Purvirnituq(PUV296) à 6+270 m

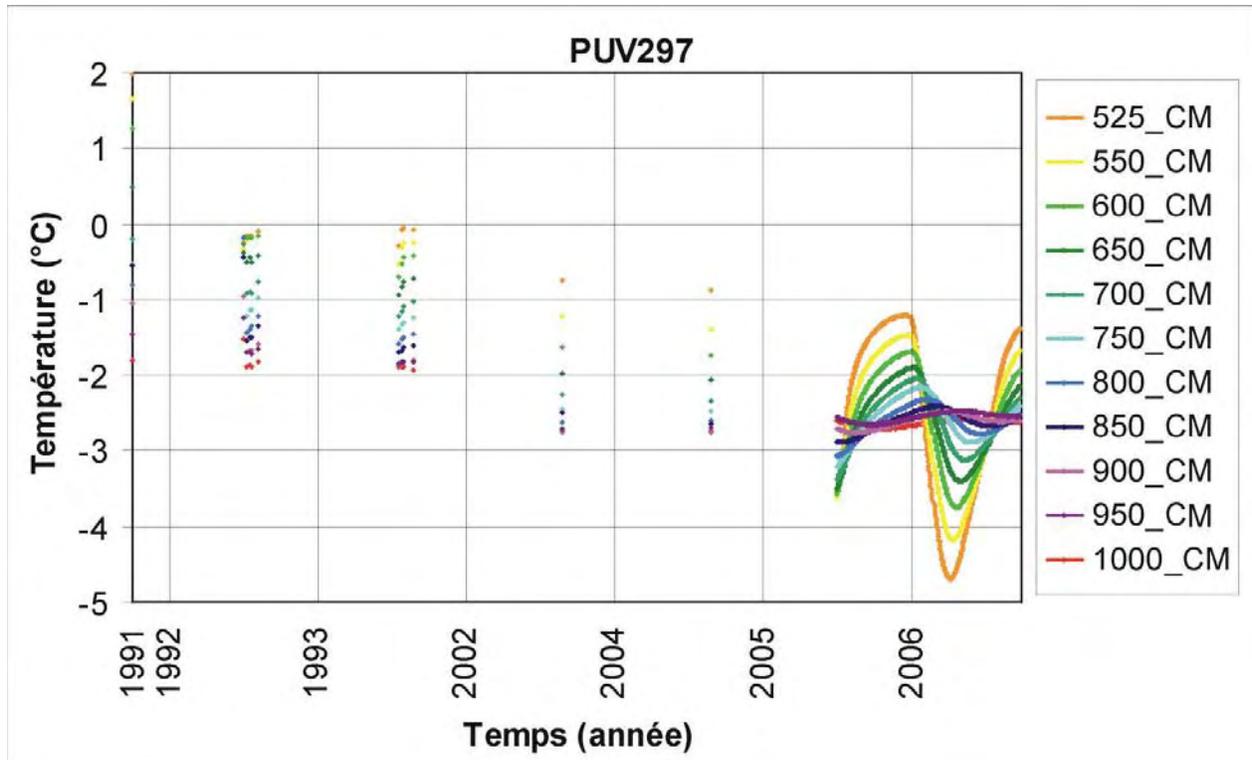


Figure 35 Températures du sol dans la piste de Purvirnituaq(PUV297) à 6+270 m

1- Contexte

Le Village :

La municipalité d'Akulivik est située sur la côté est de la baie d'Hudson, à 100 km au nord de Puvirnituq (61.04 °N ; 69.57 °O). Le village a été construit sur une presqu'île qui s'avance dans la baie en direction sud-ouest et qui fait face à l'île Smith. Il est bordé au sud par la rivière Illukotat. Akulivik est une communauté de 482 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord) et a légalement été constitué en municipalité en 1976. Le village est dans la zone de pergélisol continu.

L'aéroport :

L'aéroport d'Akulivik ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1991 (d'après les plans « tel que construit »). La piste d'atterrissage a une longueur effective de 1070 mètres (du chaînage 5+000 à 5+970 m), le remblai ayant une longueur totale de 1190 m (du chaînage 4+940 à 6+130 m), pour une largeur de 40 m. Son axe est orienté sud-ouest nord-est (084-264°), son altitude moyenne étant de 18 m (12,5 m à l'extrémité SO et 24 m à l'extrémité NW).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

D'après Beaulac et Doré (2006), la piste présente des épaisseurs de MG-20b qui par endroit peuvent être supérieures aux 15 cm originaux du revêtement superficiel. Jusqu'à 10 cm d'épaisseur de matériel granulaire excédentaire (25 cm d'épaisseur totale de MG-20b) ont été mesurés dans un secteur situé dans le premier tiers ouest de la piste. Les causes de ce tassement semblent difficilement explicables, puisque à cet endroit la piste est construite sur des sables marins normalement peu sensibles au dégel. D'autres tassements, plus généralisés cette fois, de l'ordre de 6 cm, ont été relevés dans la moitié est de la piste.

Autre problème notable, des affaissements assez importants ont été observés en bordure de la piste, côté nord (Figure 36), où des accumulations d'eau en pied de talus sont interprétées comme les indicateurs de processus thermokarstiques. Une dépression d'approximativement 10 m de large a été observée en pied de talus, toujours du côté nord, à peu près au centre de la piste. Cette dépression est interprétée comme un affaissement thermokarstique. Des déchirures dans le couvert tourbeux superficiel, ainsi que des affaissements attestent que des secteurs situés au nord-est de la piste sont sujets à la dégradation thermique (Figure 37).

Selon Beaulac et Doré, la comparaison entre l'état de la piste en 1994 et son état actuel en 2003 par l'entremise de photographies aériennes ne permet pas cependant de mettre en évidence la présence d'affaissements, de zones d'accumulation d'eau ou de thermokarsts aux alentours de la piste.

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

La piste d'atterrissage de l'aéroport d'Akulivik repose sur deux unités distinctes. À son extrémité sud-ouest, les premiers 610 m de la piste sont construits sur une plaine de sable marin très riche en coquillages (Figure 38). Un forage, effectué à l'époque de la construction non loin de la piste, a permis de déterminer que l'épaisseur de cette couche de sable était d'environ 15 m. Sous les sables marins, se retrouvent quelques mètres de silt, puis le roc.

La moitié nord-est de la piste présente une pente plus forte, celle-ci montant sur une petite colline constituée de till. Des affleurements rocheux témoignent de la proximité du socle. Dans la partie sableuse tout comme dans la partie en till, le sol est sillonné par de nombreuses fissures thermiques contenant des coins de glace. Ceux-ci ont été cartographiés de manière détaillée, incluant les

coins de glace qui ont été recouverts par le remblai lors de la construction de la piste d'atterrissage (Figures 38).

Le profil au géoradar produit par Inspection Radar Ltée (Figure 39) confirme les observations faites sur le terrain, ainsi que par photo-interprétation. Le contact avec le plafond du pergélisol peut être suivi. Pour un secteur de la piste (du chaînage 5+550 m au chaînage 5+880 m), l'épaisseur de la couche active ne dépasse pas l'épaisseur du remblai ce qui, pour un temps encore, la met à l'abri des tassements dus au dégel du pergélisol.

b- Hydrographie et drainage :

En 1994, Allard et al. avaient mentionné le fait qu'il était important de conserver l'intégrité des fossés aménagés autour de la voie de circulation et du tablier pour les années subséquentes à la construction, et plus particulièrement du côté nord de la piste près de son extrémité ouest afin de drainer les terrains humides de ce secteur. En effet, ces fossés recoupaient plusieurs coins de glace et toute modification ultérieure de ceux-ci n'en tenant pas compte risquait d'entraîner une érosion thermokarstique de coins de glace causée par l'écoulement d'eau dans leurs sillons.

Ce fossé est maintenant partiellement colmaté par du gravier MG-20b et colonisé par la végétation ; il ne remplit plus pleinement sa fonction de drainage (Figure 40). En effet, on peut noter que de l'eau reste accumulée à demeure dans cette section de la piste. Cela revêt une importance si on considère que des décrochements et des dégradations ont pu être observés sur le flanc de la colline longeant la piste. À cet endroit, se trouvent également des coins de glace qui se prolongent sous la piste et qui montrent des signes de dégradation (Figure 41). Le drainage de la piste pour sa section nord-est, côté nord, peut donc être considéré comme déficient.

À divers autres endroits, des accumulations d'eau ou des mares ont été observées (Figure 42 A et B). Une dépression, sans doute d'origine thermokarstique, est présente au pied du remblai, côté nord.

c- Le pergélisol :

La sensibilité au dégel du pergélisol sous la piste d'atterrissage est dépendante des terrains qu'elle traverse. En effet, pour moitié elle repose sur du sable marin et pour l'autre sur du till.

Dans sa partie sableuse, la couche active atteignait lors de la construction 1,1 m d'épaisseur. C'était donc à cette profondeur que se situait le sommet des coins de glace que l'on retrouve sous les sillons visibles en surface de ce dépôt. Il est important de noter que certains de ces coins de glace se retrouvent maintenant sous la piste dans le pergélisol. Du fait de sa granulométrie grossière, ce terrain sableux est peu sensible au dégel. En revanche, les coins de glace le sont.

Dans la zone de till, le pergélisol se caractérise par la présence d'ostioles en surface qui sont indicateurs de géliturbations dans la couche active. Des observations ont été faites sur du till en coupe dans une carrière voisine et dans des carottages lors de la construction. Ils ont montré que ce dépôt ne contient pas de volumes de glace excédentaire, même si quelques très fines lentilles de glace de ségrégation peuvent être présentes, notamment autour des pierres contenues dans le dépôt. Le till a une fraction silteuse importante, il devient donc boueux et peut fluer lorsqu'il dégèle. Ces terrains contiennent également des coins de glace, certains incisant même la base du talus du remblai (Figure 43).

Autres phénomènes périglaciaires rencontrés, des buttes cryogènes peuvent être observées de l'autre côté de la clôture dans une mare d'eau, au sud de la piste.

d- Facteurs climatiques :

Une instrumentation permanente avait été installée lors de la construction de l'aéroport d'Akulivik. Elle consistait en quatre câbles à thermistances. De ces quatre câbles, trois sont toujours opérationnels. Deux seulement sont automatisés et permettent d'enregistrer les données thermiques (Aku162 et Aku183), tandis que le troisième ne permet que des mesures manuelles à l'aide d'un multimètre (Aku 232). Un câble de 20 m de long fut installé dans le roc (Aku230), il ne fut opéré que durant les premières années suivant la construction avant d'être arraché par un caribou qui y a emmêlé son panache (*J. Alaku, verbatim*).

Le câble Aku162 est situé dans le till, dans les champs, à proximité du côté nord de la piste au chaînage 5+960 m ; 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 Aku183 est installé dans le remblai de la piste à 5,5 m de son côté sud, au chaînage 5+960 m. Il mesure des températures jusqu'à 5 m de profondeur, dans le till. Le câble Aku232 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 d'emmagasiner de données de manière sporadique.

Le capteur thermique mesurant la température de l'air, adjoint au câble de référence Aku162, permet de déterminer que la température atmosphérique moyenne pour la période de juin 2004 à juin 2005 a été de - 6.5 °C. Les indices de gel et de dégel pour la même période ont été respectivement de – 3332 et 965 degrés-jours. Les températures atmosphériques mensuelles moyennes mesurées depuis l'installation en juin 2004 apparaissent au tableau 7.

MOIS	Température atmosphérique moyenne mensuelle (°C)
Juillet 2004	7,8
Août 2004	8,7
Septembre 2004	4,3
Octobre 2004	0,7
Novembre 2004	-6,6
Décembre 2004	-22,6
Janvier 2005	-28,3
Février 2005	-25,1
Mars 2005	-17,2
Avril 2005	-7,8
Mai 2005	1,1

Tableau 7 Températures atmosphériques mensuelles moyennes pour Akulivik de juillet 2004 à mai 2005

La figure 44 présente les températures du sol acquises sur une période de 15 ans par le câble Aku162 situé dans le till en terrain naturel non loin de la piste d'atterrissage. Il s'agit là d'un site en milieu naturel non perturbé par l'activité humaine et servant de référence. Malgré plusieurs trous dans la série de données, une augmentation des températures est clairement constatée à 5 m de profondeur : de - 7,9 à - 4,8 ° pour les 21 juin 1990 et 2004 respectivement. La profondeur du dégel saisonnier était estimée à 1,25 m sur ce site en 1993.

En comparaison, le graphique de la figure 45 présente les enregistrements thermiques acquis durant la même période (1990-2005) par le câble de 5 m situé sous la piste (Aku183). Peu de temps après la construction de la piste, le profil thermique dans le remblai montrait une pénétration du dégel de 1,84 m en 1990 et 1,64 m en 1993. Ceci traduisait la remontée du pergélisol à travers le remblai au cours des années qui ont suivi la construction.

Pour ce qui concernait le câble dans le roc (Aku230), la couche active atteignait une profondeur légèrement supérieure à trois mètres et à 20 m ; la température annuelle moyenne était de -5 °C. Les températures étaient comparables sous la plaine de sable, pour le câble Aku232, mais le dégel maximal n'atteignait qu'une profondeur de 1,1 à 1,2 m. La figure 46 montre les enregistrements thermiques pour ce câble. Bien que très discontinues, les valeurs en évidence un réchauffement du pergélisol de 1,2 °C (-5,0 et -3,8 °C à 17, 5 m de profondeur entre les 27 juin 1990 et 2005 respectivement).

La figure 47 présente un cycle annuel de température dans le champ à côté de la piste pour l'année 2004/2005. Dans ce secteur, le plafond du pergélisol se situe maintenant à 1,94 m de profondeur, soit un approfondissement de 0,69 m depuis 1993, ce qui corrobore le réchauffement du climat des quinze dernières années. Sous la piste (Aup294), d'après les températures mesurées au cours de l'année 2004/2005 (Figure 48), le plafond est situé à 1,72 m, soit un léger approfondissement de 8 cm depuis 1993. L'épaisseur moyenne du remblai sur cette zone de till est d'environ 2 m avec un minimum de 1,4 m

pour un endroit. Par conséquent, sur presque toute la longueur de la zone sur till, le dégel ne dépasse pas l'épaisseur du remblai sauf pour quelques exceptions ponctuelles où le remblai est plus mince. À ces endroits le dégel pénètre les premiers décimètres supérieurs du sol naturel sous-jacent à la piste. L'ancien plafond du pergélisol était donc remonté sous la piste et le dégel ne pénètre que dans l'ancienne couche active pauvre en glace, laquelle avait été comprimée et drainée lors de la construction à l'été 1990. Même si le réchauffement climatique continue, la stabilité de l'ouvrage devrait être assurée pour une période indéterminée. Si celui-ci n'est pas une menace immédiate pour la piste dans le secteur où est situé le câble, il peut en être autrement plus en bordure de piste ou dans le champ, ou un affaissement proche de la piste peu affecter son talus.

Le début de la saison de dégel se manifeste sensiblement de la même manière selon que l'on se situe dans le champ ou sous la piste. Dans le champ, en milieu naturel (Aku162), la saison de dégel en 2005 est arrivée avec une augmentation des températures les moins profondes dès le 24 avril (Figure 49). Cette hausse a été entraînée par l'augmentation des températures atmosphériques et semble s'être produite par conduction, sans apport en eau. On remarque que les courbes de température du sol les plus proches de la surface suivent parfaitement celle de la température atmosphérique avec un léger décalage imputable à la longueur du transfert thermique par conduction.

Sous la piste, à l'emplacement du câble Aku183, le patron thermique du début de la saison de dégel est semblable à celui observé dans le champ et suit lui aussi la température de l'air (Figure 50). On note cependant un décalage de quatre jours de retard sous la piste. Ceci peut-être dû à retard de transfert de chaleur du fait que les deux thermistances les plus proches de la surface se situent à 65 et 90 cm de profondeur dans le remblai, soit plus profondément que celles situées dans le champ (25 et 50 cm). Il semble donc que ce secteur de la piste ne soit pas sujet à un apport subit en eau et à une inondation de la piste.

4- Diagnostic

La piste d'atterrissage de l'aéroport d'Akulivik présente des signes de dégradation qui pour le moment ne semblent pas majeurs. Cependant, la situation requiert que cette piste soit surveillée au cours des années pour prévenir ou ralentir la fonte du pergélisol.

En effet, un plusieurs coins de glace avoisinent la piste et passent en dessous. Certains sont déjà en processus de dégradation et commencent à inciser la base du remblai de la piste. Ils constituent donc un facteur critique préoccupant pour sa stabilité future. L'écoulement ou l'accumulation d'eau sur les coins de glace peut entraîner leur fonte catastrophique par érosion thermique. Si le phénomène atteint les coins de glace situés sous la piste, ceci pourrait être la cause de multiples détériorations et affaissements. À ce titre, le drainage de la piste doit être revu et corrigé pour éviter la concentration d'eau en bordure de la piste imputable à la fonte des neiges. Ces accumulations sont susceptibles d'accélérer les processus de dégradation du pergélisol et les phénomènes thermokarstiques. Le secteur problématique est celui de la moitié nord-est, du côté nord, et est situé sur un dépôt de till fluant au dégel.

Le front de dégel est situé dans le remblai sur la majeure partie de la piste. Cependant, il faudra porter attention aux endroits où celui-ci est moins épais, où le front de dégel pénètre dans le sol naturel sous-jacent. Avec le réchauffement climatique qui se poursuit, le mollisol pénétrera dans le sol naturel, notamment là où sont situés les coins de glace ce qui pourrait les amener à fondre. Des tassements se produiront alors.



Figure 36 Affaissement sur l'accotement nord de la piste d'atterrissage d'Akulivik



Figure 37 Déchirures dans le couvert tourbeux superficiel, signe de dégradation.

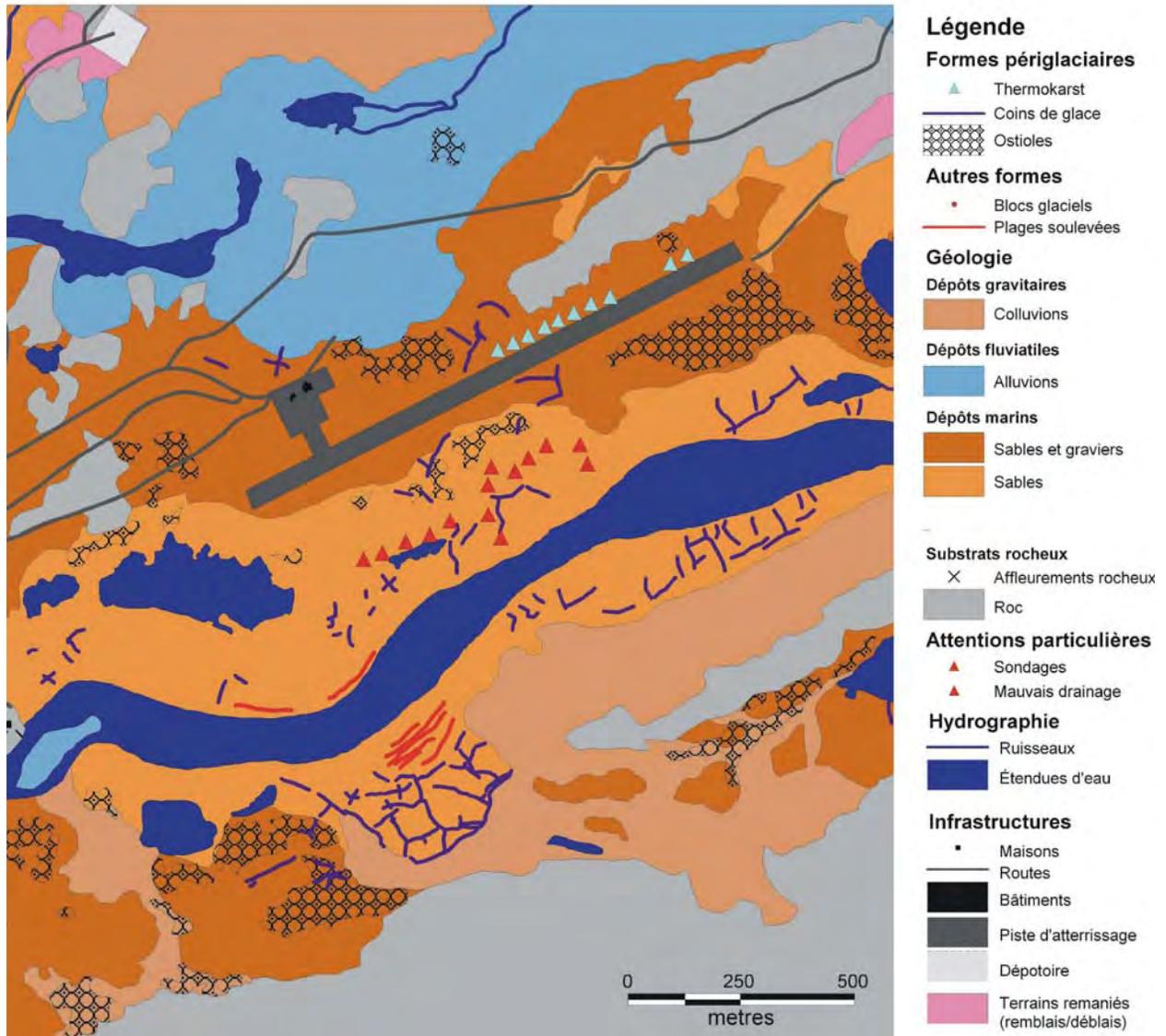


Figure 38 Carte des dépôts de surface de l'aéroport d'Akulivik

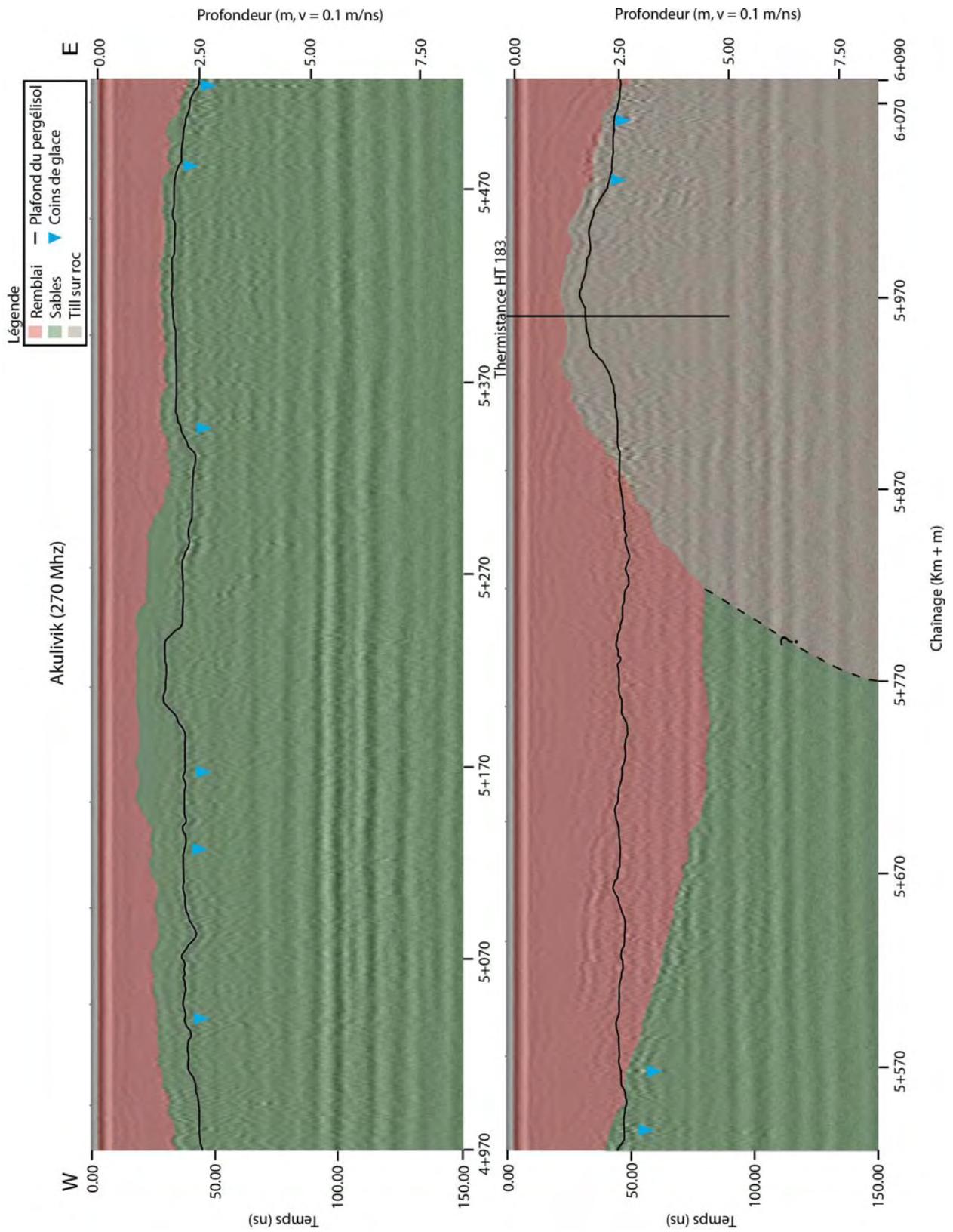


Figure 39 Profil au géoradar .



Figure 40 Fossé de drainage de la section est, côté nord, de la piste d'Akulivik

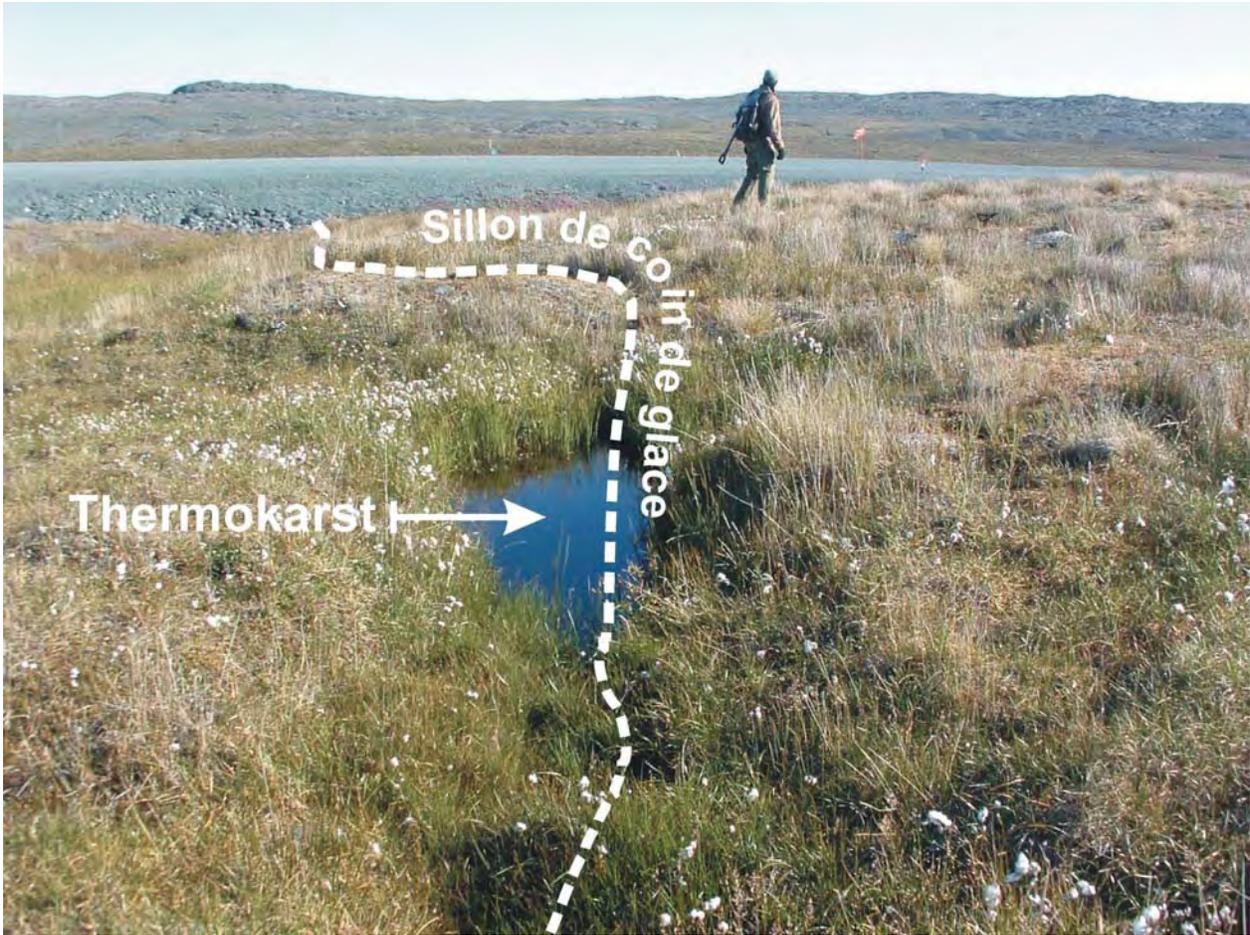


Figure 41 Sillon de coin de glace avec processus thermokarst



Figure 42 Mares environnant la piste d'atterrissage d'Akulivik



Figure 43 Coin de glace se propageant sous le remblai de la piste d'Akulivik et incisant la base du talus

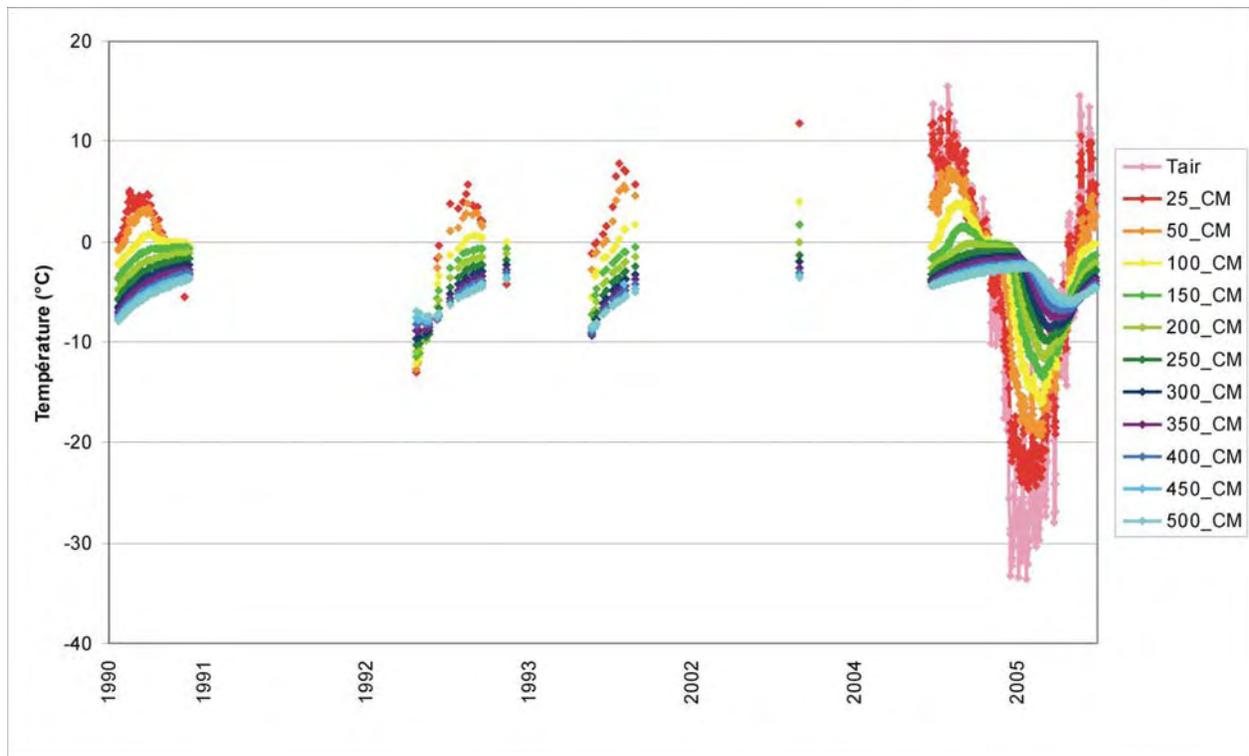


Figure 44 Température du sol pour le câble Aku162 de 1990 à 2005 (site de référence hors piste)

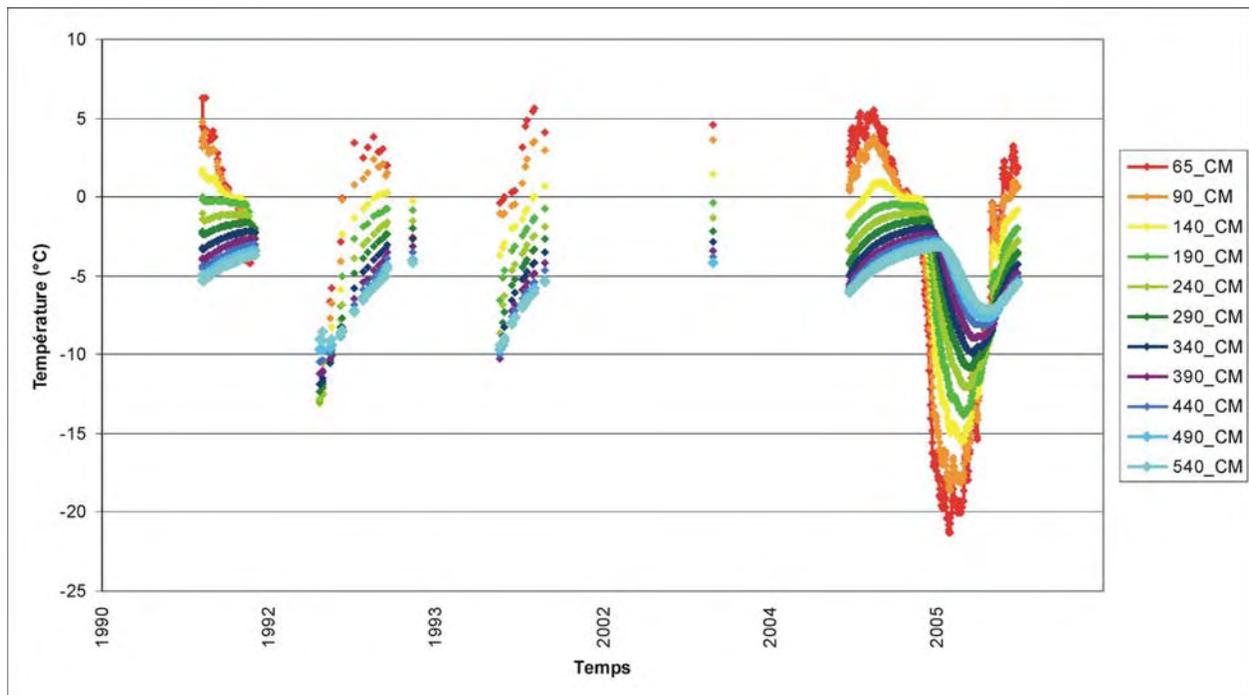


Figure 45 Température du sol pour le câble Aku183 de 1990 à 2005 (piste)

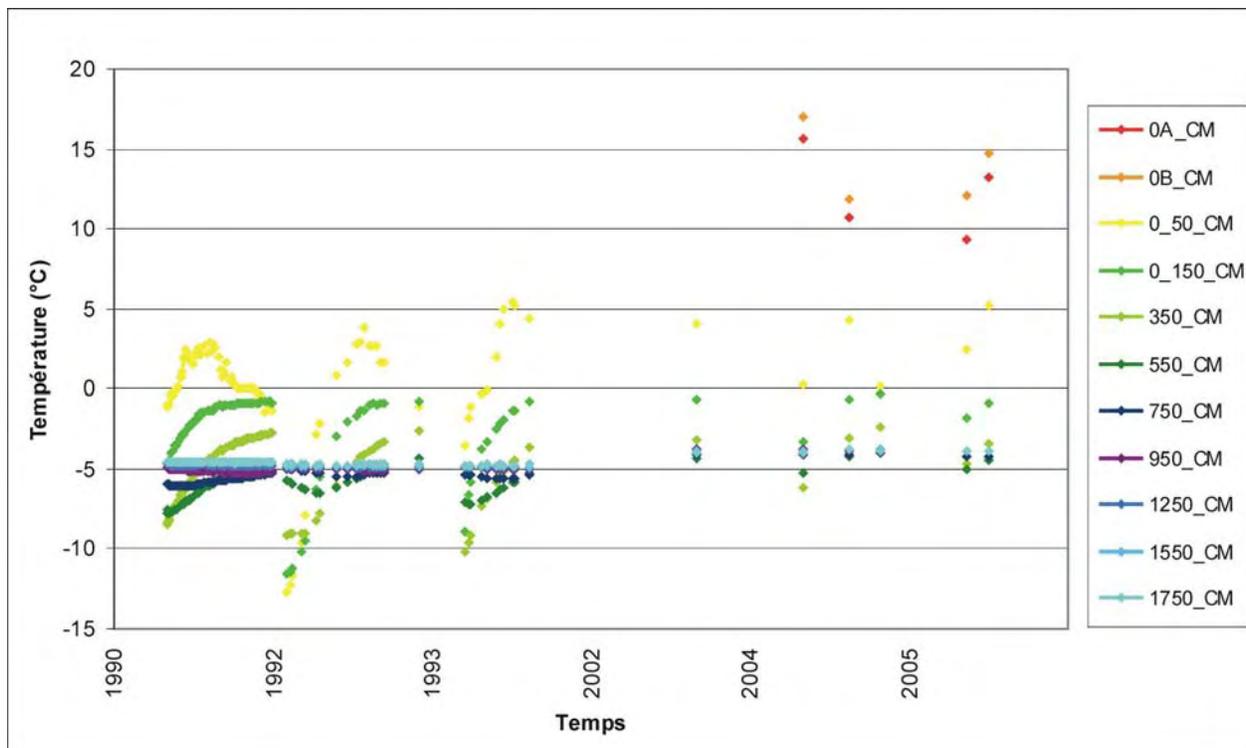


Figure 46 Température du sol pour les câbles Aku232 (hors piste dans les sables) de 1990 à 2005

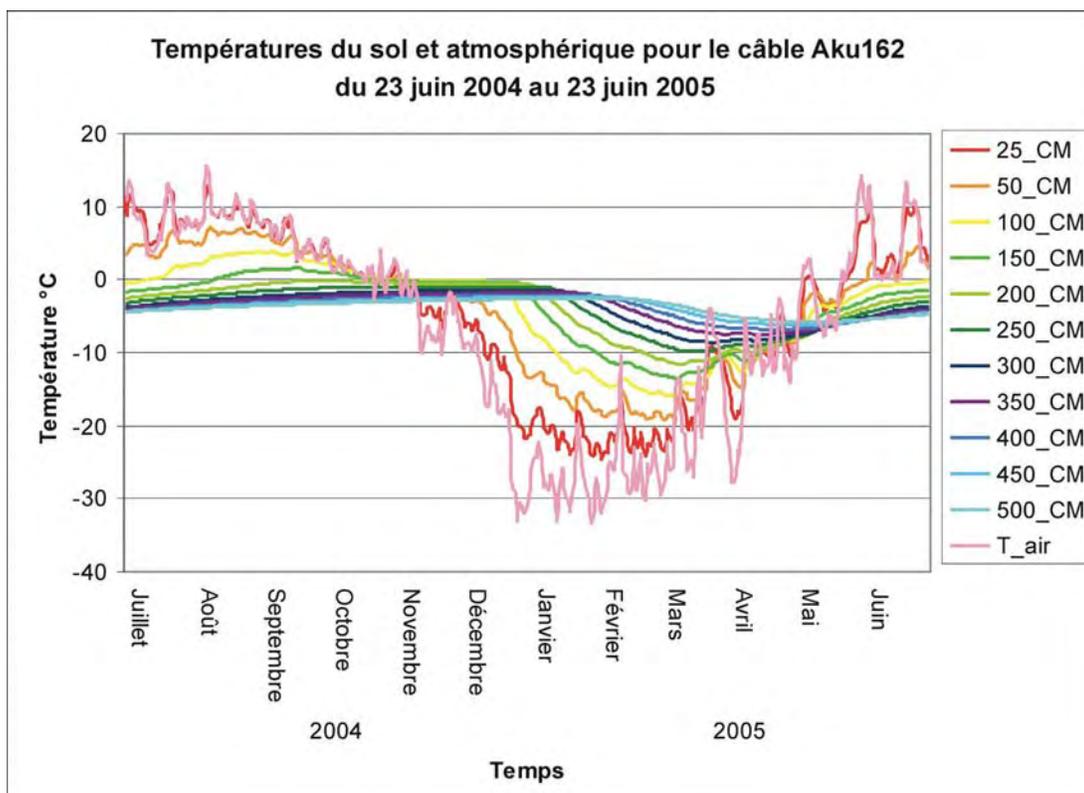


Figure 47 Températures du sol et atmosphérique pour le câble Aku162 (hors piste) de juin 2004 à juin 2005.

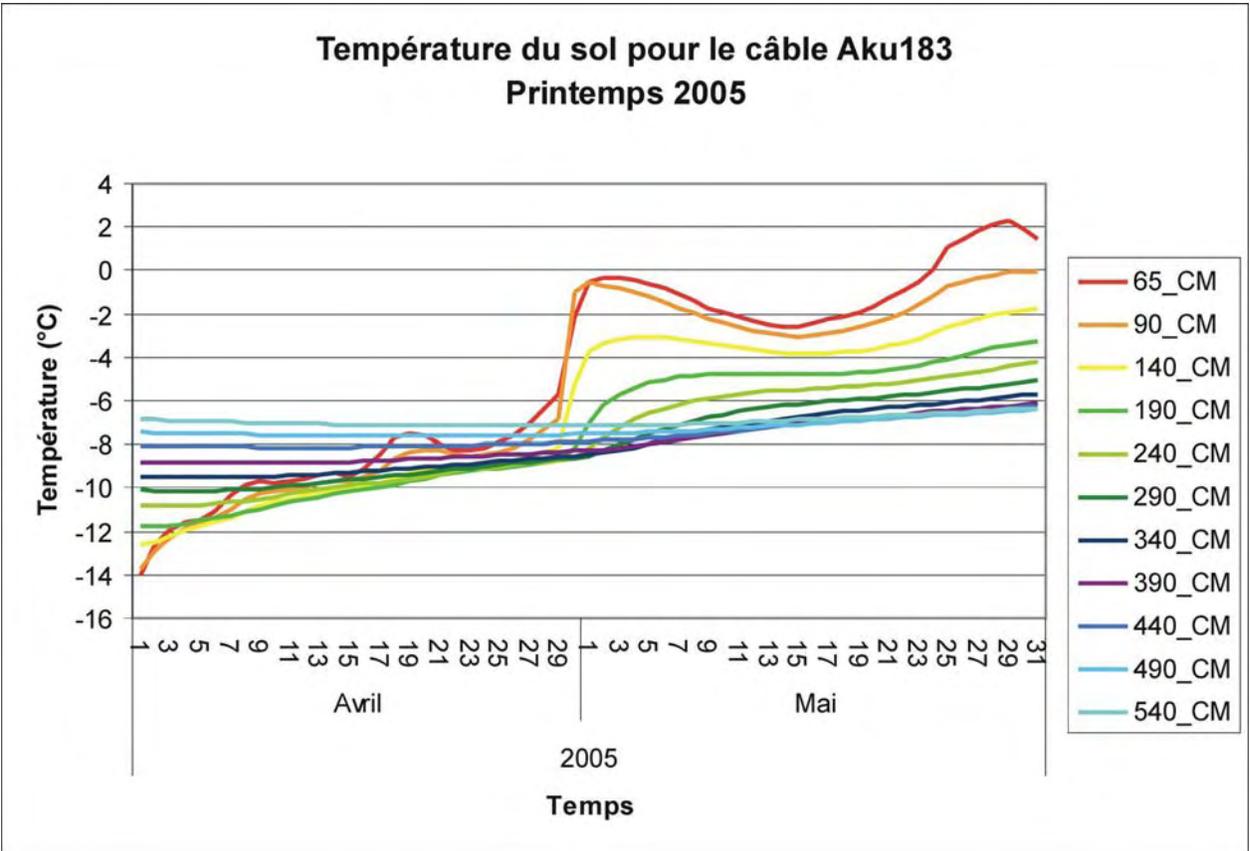


Figure 50 Température du sol pour le câble Aku183 (sous piste) pour le printemps (avril-mai) de 2005

1- Contexte

Le Village :

Localisé sur le littoral à la rencontre entre la Baie d'Hudson et le détroit d'Hudson, à la passe Digges, non loin des îles Nottingham et Salisbury, Ivujivik se trouve 180 km au nord d'Akulivik et à 120 km à l'ouest de Salluit, ce qui en fait le village le plus au nord du Nunavik (62.41 °N, 77.87 °O). La communauté compte 249 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord). Ivujivik est dans la zone de pergélisol continu.

L'aéroport :

L'aéroport d'Ivujivik ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1986 (d'après les plans « tel que construit »). La piste d'atterrissage, d'une longueur de 1070 mètres, du chaînage 4+830 à 5+900 m (longueur totale de 1190 m, du chaînage 4+770 à 5+960 m) et 54 m de largeur (30 m pour la bande de roulement), est orientée selon un axe nord-est sud-ouest (075-255 °N), à une altitude moyenne de 34 m (31 m à son extrémité SO et 37 m à son extrémité NE).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

D'après Beaulac et Doré (2005), la piste d'atterrissage a été construite entièrement sur du roc, ce qui la met à l'abri des problèmes reliés aux changements climatiques puisque le roc est un matériau non sensible au dégel. En réalité, une section d'environ 100 m de longueur repose en partie sur des dépôts meubles dont les caractéristiques sont encore mal connues. D'après le profil stratigraphique des sols issus des plans « tel que construit » (Ministère des transports, 1986), le refus observé lors d'un sondage effectué avant la construction n'avait pu clairement être identifié comme attribuable au roc. Pour cette piste, la couche de granulat MG-20b faisait à l'origine 160 mm d'épaisseur au lieu des 150 mm utilisés pour les autres pistes.

Une dépression de 70 mm a été remarquée au centre de la piste. Le profil longitudinal de relevé d'épaisseur n'étant pas orienté, et le chaînage indiqué (0+500 m) ne trouvant pas de correspondance dans les plans « tel que construit », nous avons estimé sa position entre les chaînages 5+330 et 5+400 m, soit légèrement à l'est de l'aérogare. Un mauvais entretien de la piste a été mis de l'avant pour expliquer cette dépression. De part et d'autre de celle-ci, l'épaisseur de MG-20b est inférieure à 160 mm. Un aplatissement du profil transversal a également été relevé.

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

La majeure partie du village est bâtie au fond d'une petite vallée d'orientation SSW-NNE, laquelle est encadrée par des affleurements rocheux et se termine en une petite anse rocheuse avec plage sableuse. Par endroits, on rencontre des placages de sables et graviers sur le terrain, mais la récurrence de plusieurs affleurements rocheux indique que ces dépôts sont minces (Figure 51).

La piste d'atterrissage et l'aérogare occupent un espace surélevé par rapport au village (Figure 52), essentiellement sur du roc, à l'exception d'une section dans la partie nord-est qui a été construite sur un placage de sables et graviers coquilliers traversés par des polygones à coins de glace (Figure 53) et dans laquelle une argile affleurante a été observée. Cette section se situe entre les chaînages 5+120 et 5+220m.

Un petit lac a été drainé avant la construction de la piste d'atterrissage. A cet endroit le remblai repose en partie sur les sables et graviers peu épais du lac drainé et en partie sur un affleurement

rocheux (Figure 54). Le lac a été drainé par l'homme par le biais d'une brèche dans l'une de ses berges qui était originalement une plage de sables grossiers et graviers avec coquilles.

b- Hydrographie et drainage :

La piste d'atterrissage ne semble pas démontrer de problème de drainage particulier. Celle-ci traverse l'ancien lac qui a été drainé mentionné précédemment et qui constitue encore une zone un peu humide. Aux alentours de la piste, il se rencontre ci et là quelques mares qui s'assèchent au courant de l'été.

Aucun cours d'eau ne se situe à proximité de la piste. Le drainage de tout le secteur semble assuré en direction de la mer par des dépressions dans le roc qui sont plus ou moins colmatés dans leur fond par des placages de matériel sablo-graveleux.

c- Le pergélisol :

Les caractéristiques du pergélisol dans le secteur de l'aéroport sont peu connues. Il consiste essentiellement en du roc gelé sur plusieurs centaines de mètres de profondeur.

Aucun processus de dégradation potentiellement lié à la dégradation du pergélisol n'a été rapporté lors des diverses inspections. Par conséquent, le pergélisol apparaît peu sensible au dégel et n'est pas affecté par le réchauffement climatique.

d- Facteurs climatiques :

Il n'existe aucun enregistrement de température du sol pour cet aéroport. Aucune observation sur l'enneigement et le déneigement de la piste n'existe non plus.

4- Diagnostic

La piste d'atterrissage de l'aéroport d'Ivujivik ne présente pas actuellement de signe de dégradation due à la fonte du pergélisol.

Les seuls problèmes rencontrés semblent attribuables à un entretien un peu déficient de la piste, et le seul secteur potentiellement problématique est celui du lac drainé dans le deuxième tiers nord-est de la piste. À cet endroit, les épaisseurs de dépôts sont mal connues. Il est fort probable que ceux-ci, qui sont de nature grossière, n'excèdent pas un à deux mètres d'épaisseur et ne présentent pas de contenu en glace significatif, bien que cela reste à confirmer.

Compte tenu du fait que le climat est très froid (on peut estimer la température moyenne annuelle actuelle entre -5.8 et -8 °C (comparables à celle de Salluit)), le dégel du sol meuble sous la section de piste entre 5+120 et 5+220 apparaît improbable pour quelques années encore. Une caractérisation de ce dépôt meuble serait à considérer pour s'assurer de sa non gélivité en préparation du réchauffement à venir.

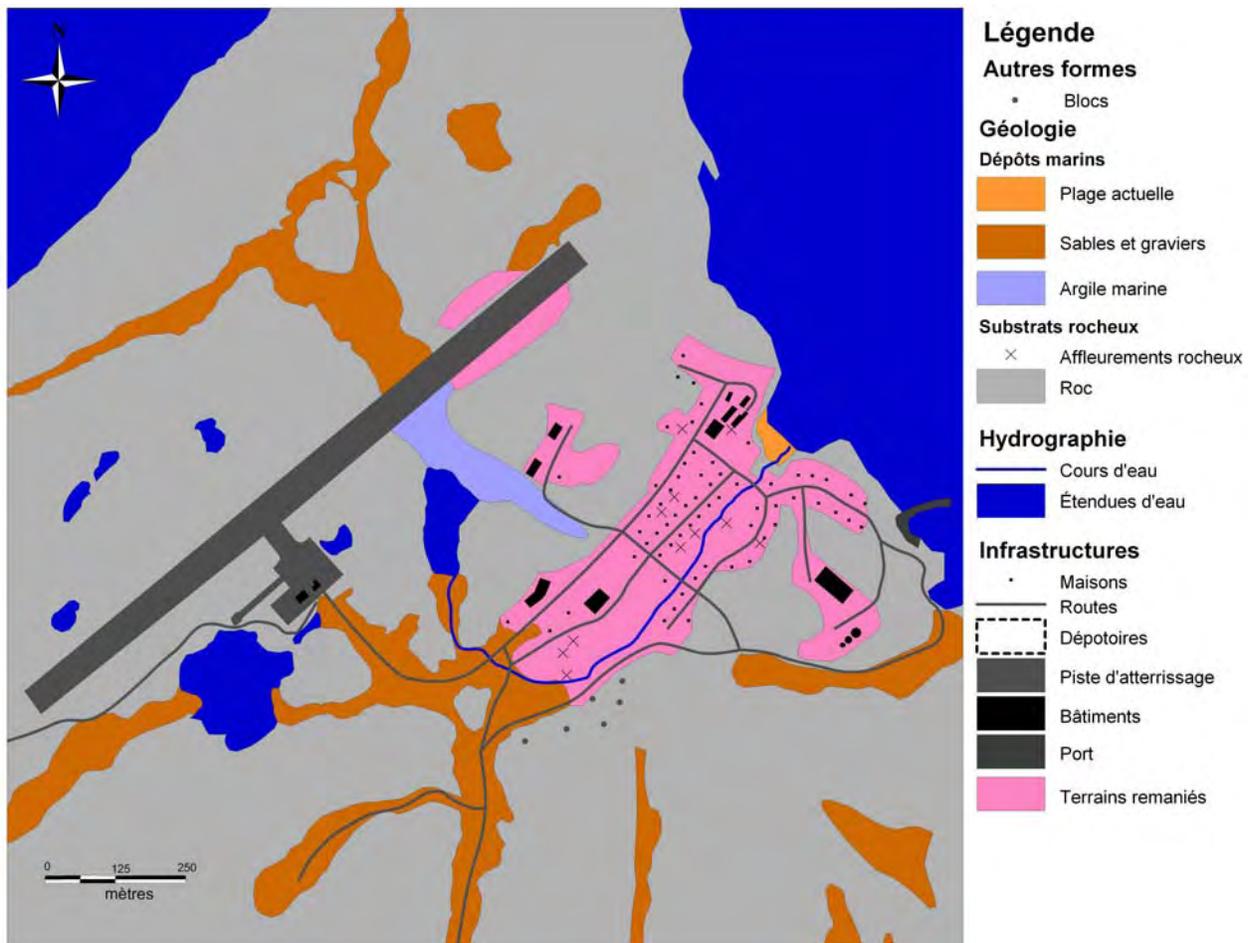


Figure 51 Carte des dépôts de surface de l'aéroport et du village d'Ivujivik



Figure 52 Village et piste d'atterrissage d'Ivujivik



Figure 53 Terrain rocheux de l'aéroport d'Ivujivik



Figure 54 Secteur du lac drainé à proximité de la piste d'Ivujivik

SALLUIT

1- Contexte

Le Village :

Salluit (62,21 °N et 75,63°O) est situé sur la rive sud du fjord de Sugluk, à 10 km du détroit d'Hudson. À vol d'oiseau, le village est à 270 km de Puvirnituq et à 120 km d'Ivujivik. Il s'agit d'une communauté de 1186 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord) qui s'est développée dans la zone de pergélisol continu.

L'aéroport :

L'aéroport de Salluit ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1988. La piste d'atterrissage, d'une longueur de 1070 mètres, du chaînage 1+870 au 2+940 m (longueur totale de la surface profilée : 1190 m, du chaînage 1+810 à 3+000 m) et d'une largeur de 44 m de largeur (30 m pour la bande de roulement), est orientée selon un axe sud-sud-ouest-nord-nord-est (034-214° N), à une altitude moyenne de 223,1 m (226,2 m à son extrémité NNE et 220,1 m à son extrémité SS0).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

D'après Beaulac et Doré (2005), le relevé d'un profil longitudinal d'épaisseur de MG-20b, effectué dans l'axe central de la piste a mis en évidence que l'épaisseur actuelle de granulats près de l'extrémité sud de piste était inférieure à 150 mm, tandis qu'à l'autre extrémité l'épaisseur de granulats était supérieure à 150 mm, se qui serait indicateur du comblement d'un certain tassement. D'autres parts, plusieurs détériorations imputables à des affaissements ont été observées. Celles-ci s'accompagnent le plus souvent d'accumulation d'eau en pied de remblai.

La première zone détériorée englobe le flanc nord de la voie de circulation et l'accotement ouest de la piste, au nord de la voie de circulation (Figure 55). À cet endroit, l'ouvrage repose sur du till, un matériau sensible au dégel. D'après les plans et selon notre observation de terrain, à cet endroit la moitié ouest de la piste, la moitié nord de la voie de circulation et une partie du tablier ont été construits en déblai, c'est-à-dire qu'on a décapé le till local d'une tranche atteignant jusqu'à un mètre d'épaisseur avant de déposer le remblai de 70 cm (notamment aux environs des chaînages 2+750 à 2+800). Les fossés ont été surcreusés dans le till. La dépression affecte près de 90 m de la piste et se propage jusqu'au centre de celle-ci.

D'autres dépressions ont été observées à divers endroits tout au long de la bordure est de la piste (figure 56). Celles-ci s'accompagnent quasi automatiquement de la présence de mares en pied de remblai (Figure 57). Un des affaissements les plus notables est situé au droit d'un petit lac qui jouxte la piste, et un autre au niveau des deux ponceaux superposés situés au chaînage 2+040 m. Ces derniers montrent également des signes de tassement, étant basculés vers l'intérieur de la piste ; ils n'accomplissent plus leur fonction (Figure 58).

La comparaison entre des photos aériennes prise en 1991 et en 2003 semble mettre en évidence une augmentation de la superficie des mares, qui serait attribuable aux processus de thermokarst. Toutefois cette comparaison est probablement rendue hasardeuse en fonction des dates de prises de vues des photos, des précipitations propres à ces deux années et de d'autres facteurs comme le blocage de la décharge d'un lac par un petit barrage de pierres poussées par les glaces flottantes.

Sur la route d'accès, des affaissements importants accompagnés de processus de thermokarst se sont produits. Pavée en 2004, cette route a depuis subi des déformations importantes dues au tassement différentiel du pergélisol. Certaines petites déformations sont survenues dans des secteurs sur till dans la grande côte en descendant de l'aéroport, mais c'est principalement le tronçon inférieur sur argile marine très riche en glace qui est affecté (Figure 59). Lors d'une visite au début de juillet 2006, les employés de la municipalité comblaient les dépressions dans la route en ajoutant du gravier par-dessus l'asphalte

(Figure 60). De plus, le pergélisol dans ces argiles marines est sujet aux glissements de terrain de type « rupture de mollisol ». Un tel glissement s'est produit le 22 août 2006 près de la côte à l'entrée du village. La cicatrice se rend jusqu'à 10-15 m de la route et son agrandissement très probable en 2007 et 2008 risque de l'affecter (Figure 61). L'équipe du professeur G. Doré mène actuellement des expériences de stabilisation sur cette route par l'usage de remblais à convexion, de drains de chaleur et de revêtements à albedo élevé, de couleur pâle.

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

La piste de Salluit, orientée presque nord-sud, a été construite sur un plateau rocheux à la surface ondulante et inégalement recouvert de till (Allard et al., 1994). Certaines sections de la piste sont construites sur le roc et d'autres sont sur le till (Figure 62). Le remblai passe d'épaisseurs faibles sur les buttes, généralement rocheuses mais parfois en till, à des épaisseurs de 9-10 m, dans les dépressions, en till.

Si les sections reposant sur le roc ne présentent pas de problème de stabilité, celles reposant sur le till peuvent être sujettes à des affaissements dus au dégel. Les épaisseurs de ces couches de till excèdent possiblement plus de 20 m par endroits le long du tracé de la piste selon un relevé au géoradar effectué par M. A. Tarussov d'Inspection Radar Inc.

b- Hydrographie et drainage :

De par la configuration topographique et géomorphologique du terrain, le réseau hydrographique à proximité de la piste est faiblement développé. Le drainage se fait selon la ligne de pente générale du terrain, c'est à dire d'est en ouest. Néanmoins, on note la présence de plusieurs mares et accumulations d'eau presque exclusivement localisées sur la bordure est de la piste, dans les dépressions du relief original barrées par le remblai. Un chenal parallèle à la piste s'est développé sur ce côté, qui ne semble se drainer nulle part et amène les surplus d'eau de fonte à s'infiltrer sous la piste entre les blocs. On note également la présence d'un lac au voisinage du chaînage 2+270 m. Existant avant la construction, celui-ci semble avoir augmenté en superficie avec le temps (Beaulac et Doré, 2005) et jouxte maintenant la bordure de la piste.

En comparaison, le secteur ouest ne présente un mauvais drainage qu'au nord de la voie de circulation. On note également la présence d'un petit lac au sud de celle-ci, mais il existait avant la construction. Pour le reste de ce côté de la piste, les terrains semblent bien drainés

c- Le pergélisol :

Le pergélisol des terrains sous-jacents à la piste d'atterrissage de Salluit consiste pour l'essentiel en du roc et till. De granulométrie hétérométrique, le till contient une fraction importante de fines qui est distribuée inégalement dans le milieu géologique. Les passées fines contiennent de fines lentilles de glace de ségrégation, de sorte que des tassements différentiels se produisent lors de la fonte du pergélisol.

Certains phénomènes périglaciaires peuvent être observés à proximité de la piste. Parmi ceux-là on remarque des ostioles, des sols striés et des phénomènes de gélifluxion. Ces processus sont symptomatiques d'un sol contenant une quantité non négligeable de fines favorables à la ségrégation de glace, tout du moins dans son horizon supérieur. Un indice de soulèvement gélocal important dans le mollisol sur till est offert par les poteaux de clôture en acier qui ont été soulevés de plusieurs décimètres dans un secteur humide (Figure 63).

d- Facteurs climatiques :

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 à côté. Un câble de 19,75 m, Sal-160, a été installé 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 Sal-172, de 19,30 m de long, a été installé 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 Sal-160 atteint 5 m de profondeur et est situé dans le champ, dans du till sur roc, tandis que Sal-179 atteint 7,07 m de profondeur sous la piste. 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. Finalement, le câble Sal 154 est en totalité dans le roc, à côté de la piste. Alors que les quatre premiers câbles ont fait l'objet de mesures manuelles depuis 1987 (avec une interruption de 1994 à 2001), le câble Sal 154 a été automatisé en 2002; ce câble sert de référence climatique régionale depuis 1987 et il illustre de façon générale le réchauffement du pergélisol consécutif à l'augmentation des températures atmosphériques (Lévesque et al. 1987 : Allard et al. 1995; Allard et al. 2004).

Depuis 2001, un opérateur inuit effectue la lecture des câbles non automatisés approximativement au 15 jours.

L'étude des données nous enseigne que dans le champ à 20 m (Sal-155), en une quinzaine d'année le pergélisol s'est réchauffé de un degré, passant de -6 à -5 °C (Figure 64). Le dégel saisonnier dans ce sol naturel frôle les 2,75 m de profondeur. Sous la piste (Sal-172), les valeurs oscillent toujours autour des mêmes températures, soit approximativement $-5,6$ °C (Figure 65). Le dégel saisonnier n'atteint pas la thermistance située à 3,3 m de profondeur et devrait se situer, par interpolation, autour de 2,75 m. Le remblai ayant 5,3 m à cet endroit, cela veut dire que le terrain naturel sous-jacent reste gelé à l'année longue à cet endroit, près du centre de la piste.

Les données recueillies par les câbles peu profonds à l'extrémité nord de la piste nous enseignent que dans le champ (Sal-160), l'épaisseur de la couche active s'est légèrement accrue, dépassant 2,5 m pour la première fois en 2005 (Figure 66). La thermistance la moins profonde, sous le remblai de la piste (Sal-179), située à 2,57 m, bien qu'ayant enregistré un réchauffement notable, ne dégèle pas encore pendant l'été (Figure 67). L'épaisseur du remblai étant de 2,3 m à cet endroit, le sol naturel reste gelé pendant toute l'année au centre de la piste.

On peut déduire que le secteur nord de la piste, à partir de la voie de circulation, a connu un tassement parce que le mollisol s'est légèrement approfondi sous la piste en déblai. Par contre, les problèmes de dégradation observés ailleurs en bordure de la piste ne se sont pas encore propagés vers l'intérieur de l'ouvrage. Cela laisse à penser que les dégradations observées ne sont pas toutes dues à l'impact direct du réchauffement du climat sur le régime thermique du pergélisol sous la piste, mais plutôt à des problèmes structurels tels que le drainage ou l'enneigement.

La rose des vents compilée à partir des mesures d'une girouette-anémomètre près de l'aéroport indique que, même si la piste est orientée directement dans l'axe des vents dominants du sud-sud-ouest, une fraction importante de vents forts (25 à 100 km/h) souffle entre 214° et 270° , soit obliquement par rapport à la piste. Cette composante du régime éolien est certes suffisamment importante pour assurer le transport de la neige et son accumulation dans les creux du côté est de la piste (Figure 68). Des mesures d'épaisseur de neige ont été faites à l'hiver 2006 à divers endroits de la piste qui étaient sujet aux affaissements (Tableau 8). Les épaisseurs relevées s'échelonnaient entre 50 et 180 cm. Par endroits, le couvert neigeux est suffisant pour empêcher la reprise en gel du sol durant l'hiver et peut donc provoquer un réchauffement localisé du pergélisol. En effet, des études du régime thermique sous-nival dans la région (Bouchard, 2005; Allard et al. 2004) ont montré que les sites en bordure de route qui recueillent environ 60 cm de neige en hiver voient la température moyenne annuelle en surface du sol atteindre environ $-0,4$ °C; au-delà de 1 mètre de neige, la température dépasse 0 °C. Comme les tassements localisés sous les congères retiennent des flaques d'eau en été, celles-ci se réchauffent davantage que le terrain avoisinant sous l'effet du rayonnement solaire, ce qui amplifie la dégradation.

Localisation (à 11 m des lumières vers le champ)	Côté de la piste	Épaisseur de neige
Chaînage 2+820 m à 9 m des balises	Ouest	65 cm
Chaînage 2+890 m à 9 m des balises	Ouest	50 cm
Chaînage 2+460 m à 11 m des balises	Est	60 cm
Chaînage 2+250 m à 10 m des balises	Est	100 cm
Chaînage 2+040 m à 23 m des balises	Est	150
Ponceaux à 20-23 m des balises	Ouest	170 cm
Ponceaux à 20 m des balises	Est	180 cm
Ponceaux à mi-talus	Est	40 cm

Tableau 8 Épaisseurs de neige le 7 mars 2006 sur les bordures de la piste de Salluit

4- Diagnostic

La piste de Salluit présente des signes de dégradation liés au régime thermique positif et à la fonte du pergélisol à des emplacements spécifiques.

Le secteur au nord de la voie de circulation, côté ouest, s'est tassé vraisemblablement parce que le réchauffement a atteint le till excavé lors de la construction, sous le remblai épais de seulement 70 cm. De plus, le remplissage de la zone tassée avec du granulats MG-20b a été suivi de l'érosion et du transport du granulats dans le fossé au point d'obstruer le ponceau qui passe sous la voie d'accès (Figure 69) et de retenir l'eau dans le fossé (Figure 70). La dégradation pourrait se poursuivre dans ce secteur avec le réchauffement des températures atmosphériques.

Ailleurs, la fonte est localisée, surtout du côté est où de grandes épaisseurs de neige s'accumulent dans les dépressions de la topographie. Cette fonte localisée du pergélisol est exacerbée par un mauvais système de drainage qui retient l'eau contre le remblai et, même, qui favorise son infiltration sous la piste par endroits. Une des dépressions observée est à mettre en lien avec la présence d'un lac situé au niveau du chaînage 2+270 m. Il est à noter que le déversoir de ce lac est obstrué (Figure 71). Une simple intervention à la pelle mécanique suffirait pour abaisser le niveau du lac de plus d'un mètre, ce qui réglerait en partie les problèmes d'inondation dans ce secteur de la piste.

Dans le secteur du chaînage 2+040 m, le drainage est là encore déficient, et le double ponceau ne remplit plus sa fonction. L'accumulation de neige dans ce secteur, en cuvette à proximité du remblai, a certainement causé un réchauffement du pergélisol dans le secteur, ce qui a accentué le problème. En effet, toute la zone peut être considérée comme une combe à neige (Figure 72). On remarque également qu'il existe des problèmes d'infiltration d'eau sous la piste dans ce même secteur. Des trous d'infiltration sont observables dans le talus même de la piste (Figure 73). Cette eau s'infiltré sans être canalisée et se répand sous la piste ce qui peut accélérer la dégradation du pergélisol sous celle-ci. Cette eau ne semble pas trouver son exutoire de l'autre côté, ouest, de la piste (actuellement, il se peut qu'elle y règle, accroissant le contenu en glace des vides entre les blocs).

La figure 74 présente une synthèse des problèmes et anomalies rencontrées sur la piste de Salluit.

Parmi les anomalies constatées, on notera également que des processus de cryo-expulsion se produisent et sont en train d'endommager la clôture de l'aéroport et l'un de ses portails, en les arrachant progressivement du sol (Figure 63).

En résumé, sauf pour le cas difficile de la zone construite en déblai dans le secteur de la voie de circulation et au nord, la majorité des problèmes de dégradation rencontrés sur la piste de Salluit sont dus à des accumulations de neige sur son côté est ainsi qu'au système de drainage inadéquat. Quelques mesures simples et immédiates pourraient améliorer cet état de fait, notamment en rétablissant dans leur fonction les dispositifs drainants déjà existant et désobstruant certains exutoires propres au réseau hydrographique du secteur.

Les problèmes d'affaissement semblent aussi étroitement liés aux propriétés mécaniques du till. Il serait nécessaire d'en prélever des échantillons afin de l'étudier de façon plus approfondie et de

déterminer son comportement en situation de dégel. En effet, advenant un réchauffement climatique plus prononcé, les tassements s'étendront d'abord aux sections de piste minces sur till.



Figure 55 Affaissement près de la voie de circulation de la piste de Salluit



Figure 56 Affaissement sur la bordure est de la piste, près des pontceaux



Figure 57 Mare à proximité d'une dépression sur la bordure est de la piste



Figure 58 Ponceaux affaissés et inopérants au chaînage 2+040 m du côté est de la piste



Figure 59 Tronçon de la route de l'aéroport sujet au tassement en hiver 2006



Figure 60 Remplissage des dépressions par ajout de gravier par-dessus l'asphalte (juillet 2006)

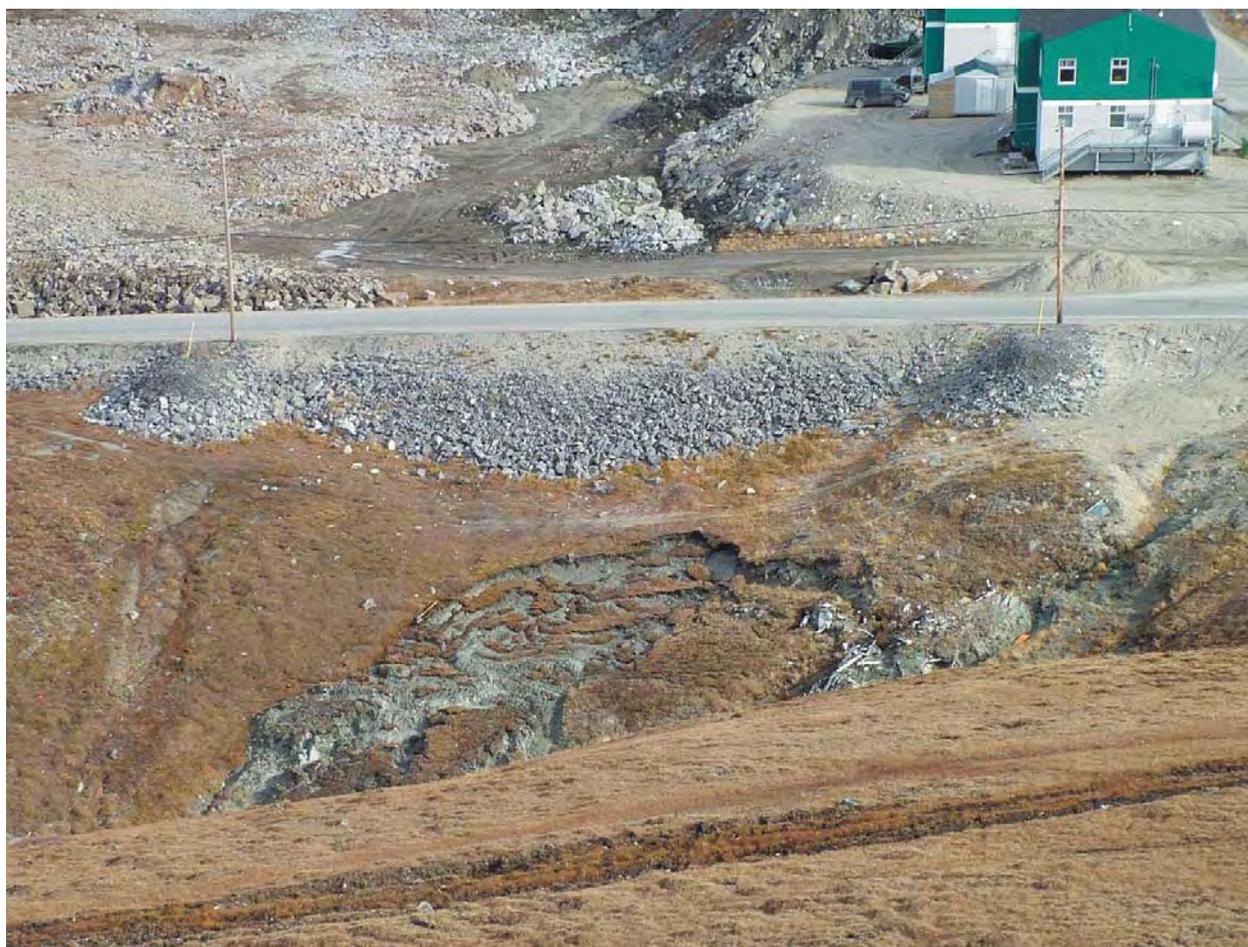


Figure 61 Glissement de terrain (fin août 2006) près de la côte à l'entrée du village

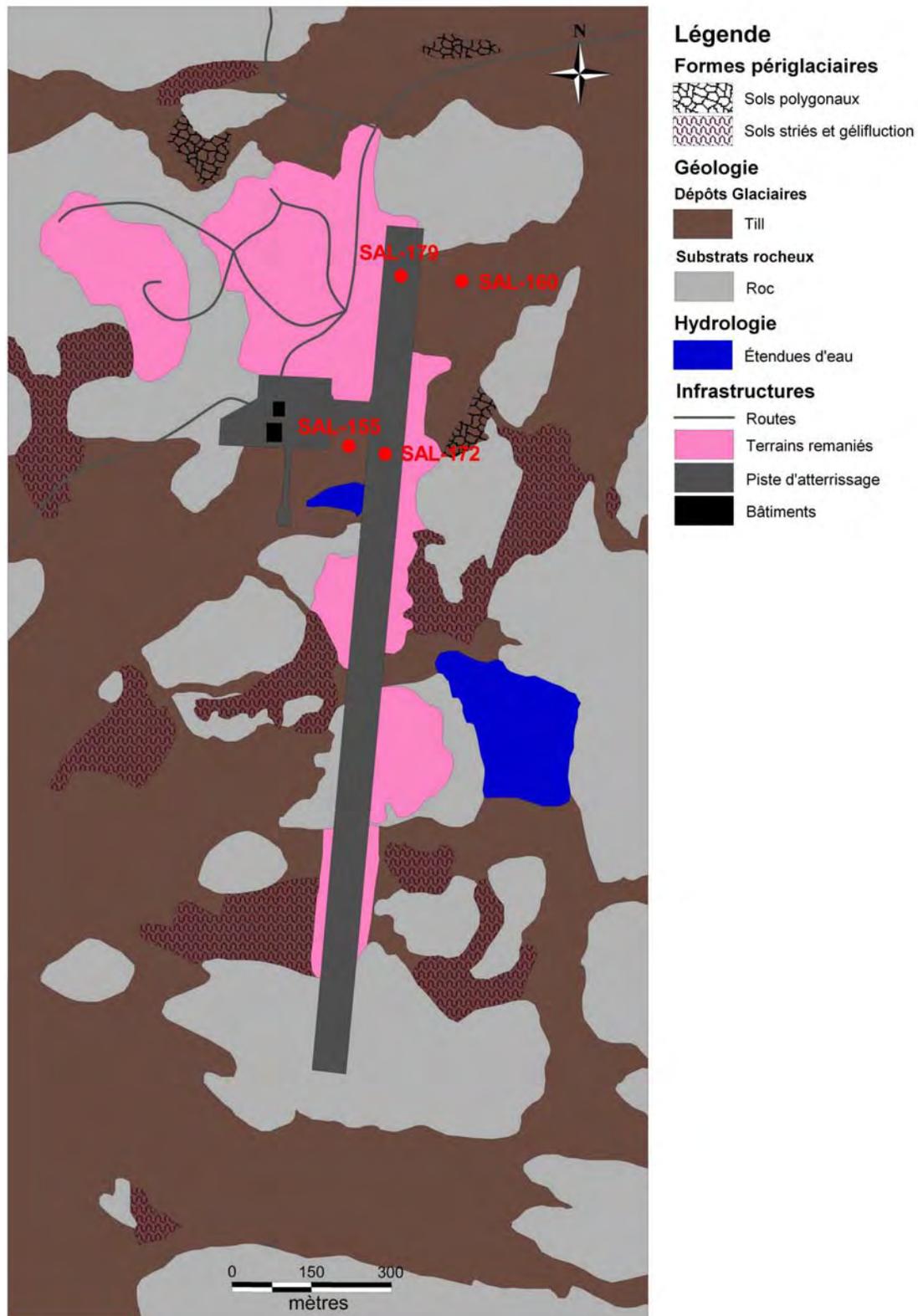


Figure 62 Cartes des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Salluit, avec la localisation des câbles à thermistances



Figure 63 Clôture expulsée par le soulèvement au gel non loin de la piste de Salluit

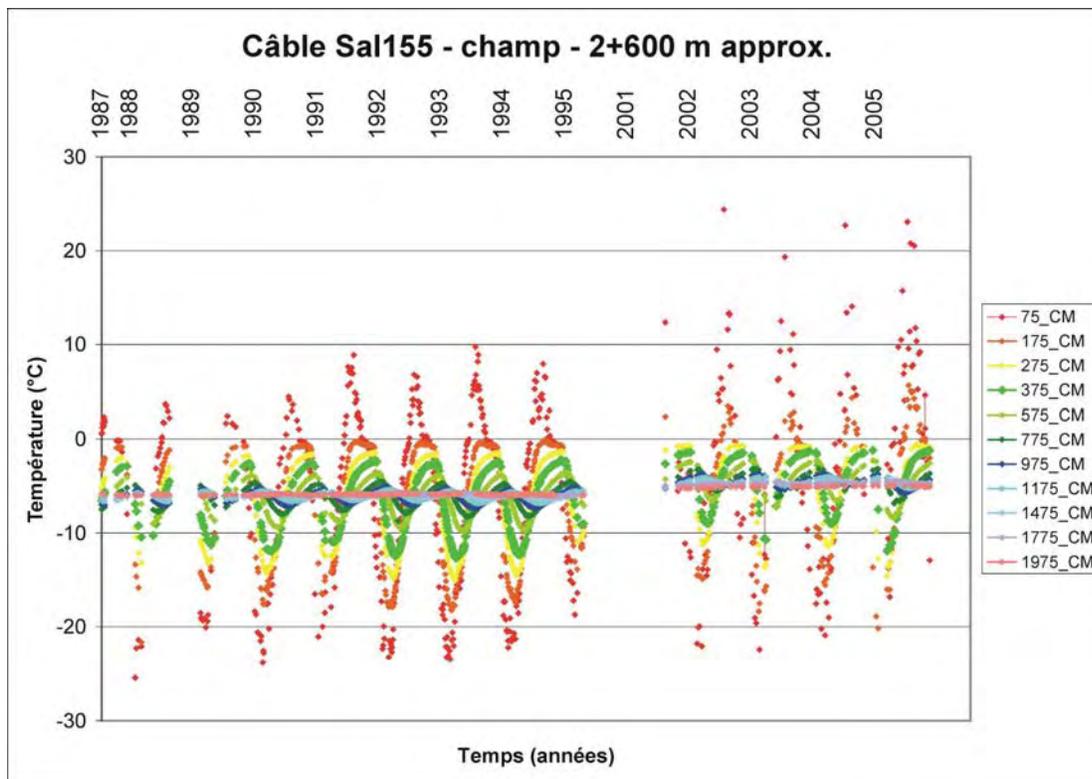


Figure 64 Température du sol pour le câble Sal-155 de 1987 à 2005 (hors piste)

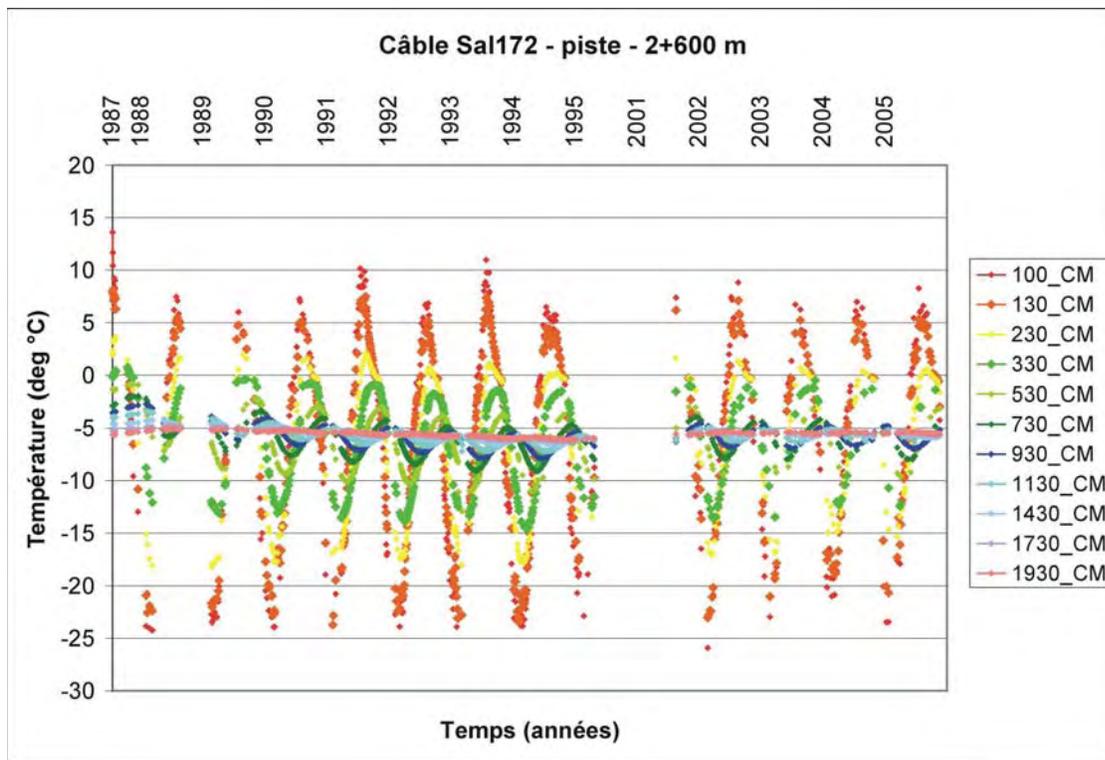


Figure 65 Température du sol pour le câble Sal-172 de 1987 à 2005 (dans piste)

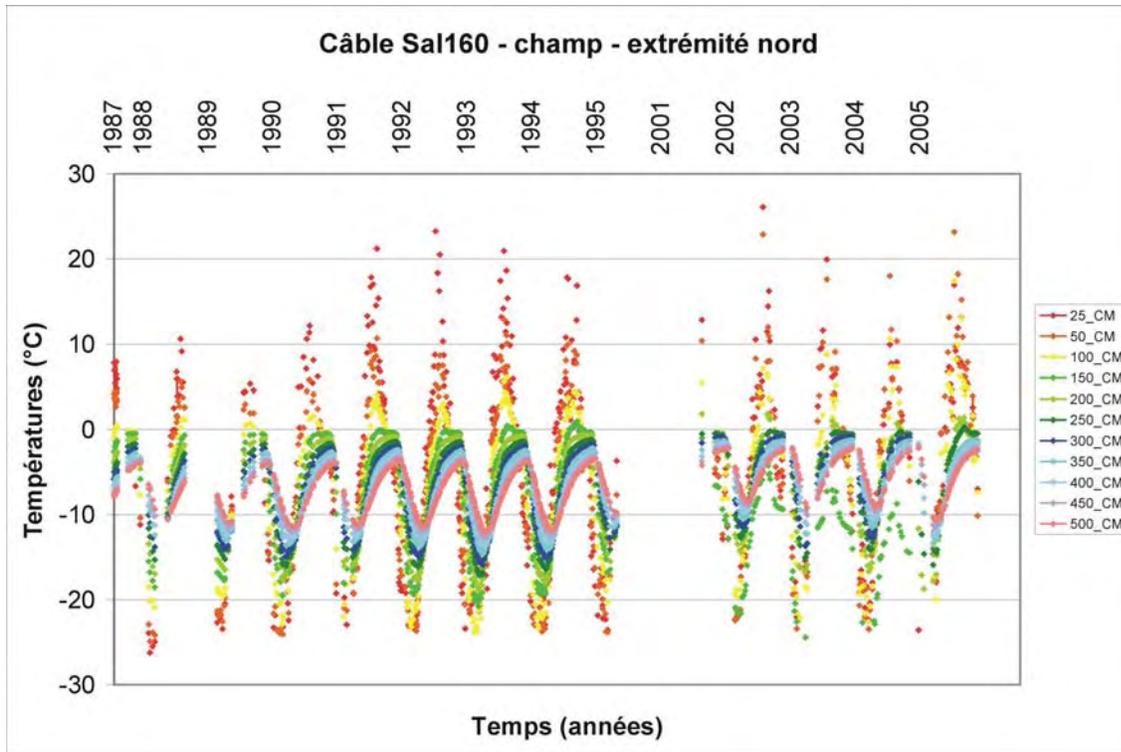


Figure 66 Température du sol pour le câble Sal-160 de 1987 à 2005 (hors piste)

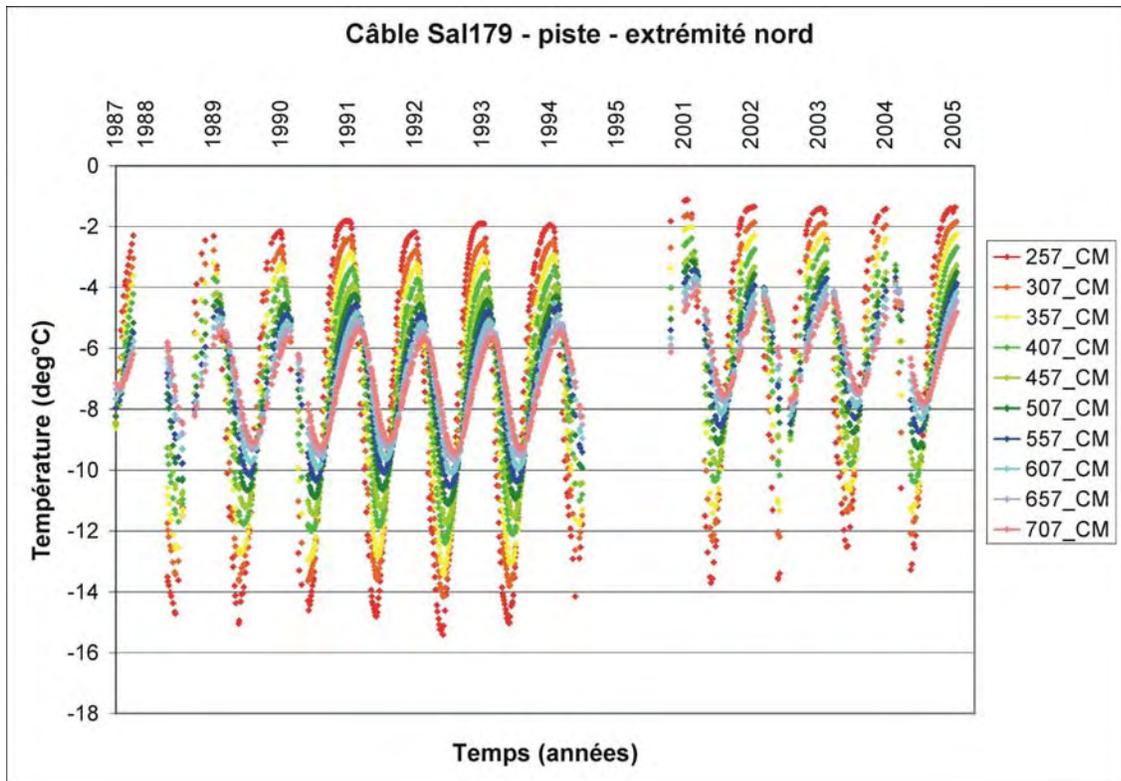


Figure 67 Température du sol pour le câble Sal-179 de 1987 à 2005 (dans piste)

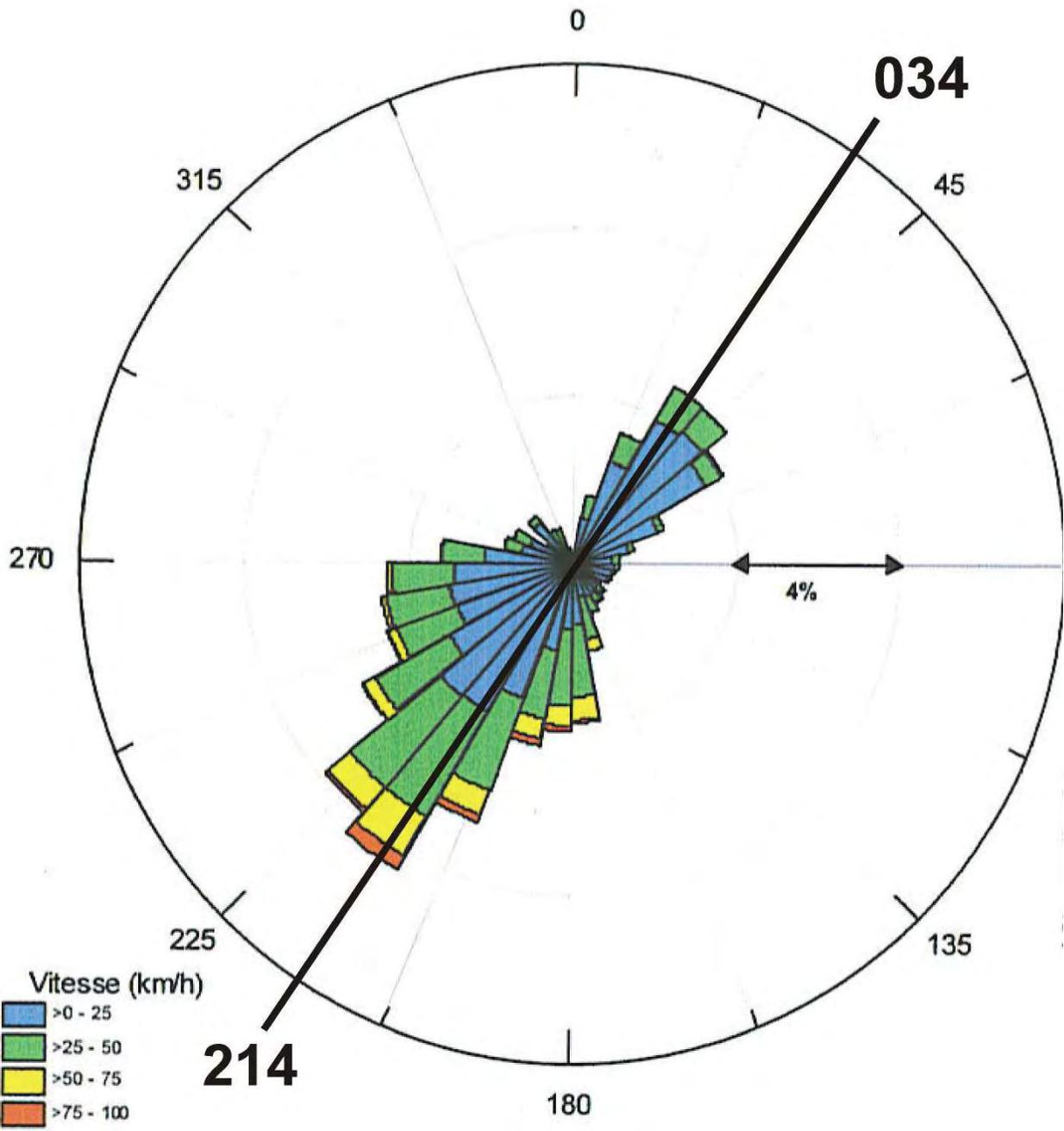


Figure 68 Direction préférentielle et vitesse moyenne du vent pour l'aéroport de Salluit



Figure 69 Colmatage du talus et du ponceau de la voie de circulation de la piste de Salluit



Figure 70 Inondation du secteur nord de la voie de circulation de la piste de Salluit



Figure 71 Exutoire bouché du lac proche du côté est de la piste de Salluit



Figure 72 Combe à neige en bordure est de la piste de Salluit



Figure 73 Trou d'infiltration d'eau sur la bordure est de la piste de Salluit

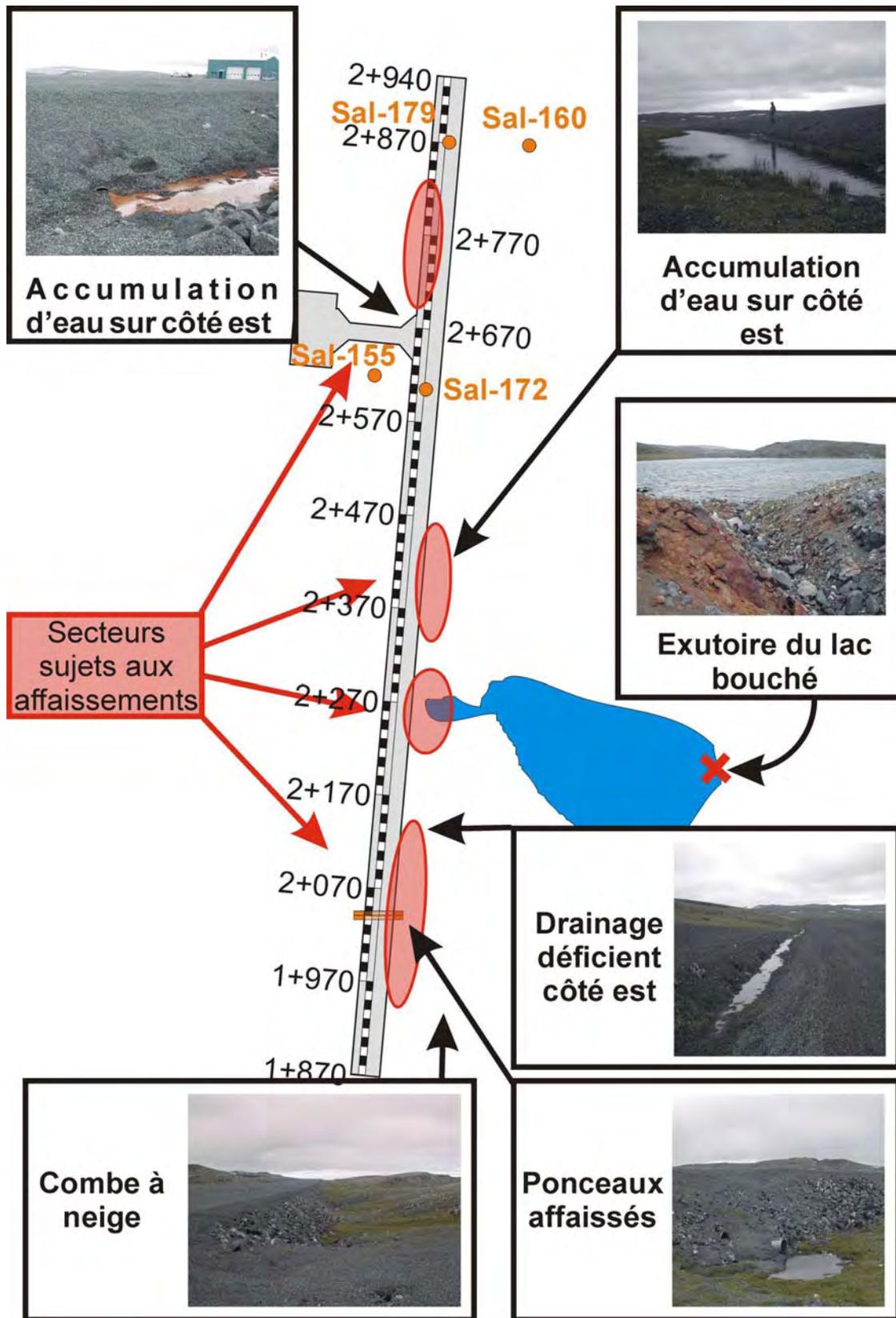


Figure 74 Synthèse de problèmes rencontrés sur la piste de Salluit

KANGIQSUJUAQ

1- Contexte

Le Village :

Kangisujuaq est situé sur la côte du détroit d'Hudson à 420 km au nord-ouest de Kuujuaq (61,59 °N ; 71,93 O). Il s'agit d'une communauté de 566 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord). Le village s'est développé à 10 km du détroit d'Hudson, sur la rive sud-est de la baie Wakeham, dans la zone de pergélisol continu.

L'aéroport :

L'aéroport de Kangisujuaq ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1989 (d'après les plans « tel que construit »). La piste d'atterrissage, d'une longueur de 1070 mètres, du chaînage 4+950 au 6+020 m (longueur totale de la surface profilée : 1190 m, du chaînage 4+890 à 6+080 m) et 44 m de largeur (30 m pour la bande de roulement), est orientée selon un axe nord-ouest sud-est (151-331° N), à une altitude moyenne de 146,9 m (152,7 m à son extrémité NO et 141,1 m à son extrémité SE).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

Hormis une érosion de l'épaisseur de la couche superficielle de MG-20b et un petit affaissement localisé à 360 m à gauche de l'entrée sur la piste du côté de l'aérogare (soit approximativement entre les chaînages 5+560 et 5+580 m), la piste est dans un bon état (Beaulac et Doré ;2005).

La comparaison entre l'état initial et actuel de la piste réalisée à l'aide de photographies aériennes n'a pas permis de mettre en évidence des problèmes évidents de dégradation du pergélisol ou de la piste.

Une visite sur le terrain effectuée en juillet 2005 a permis de constater que les talus du remblai de la piste étaient ennoyés sous une épaisse couche de MG-20b (Figure 75). Cette situation pourrait être attribuable aux opérations de déneigement et de nivellement. En effet, le profil transversal arrondi original était aplani en 2005. La figure 75 montre également un petit affaissement sur la bordure sud, à l'extrémité sud-est de la piste, sans doute due à des phénomènes autres que la dégradation de pergélisol, puisque à cet endroit la piste repose sur le roc.

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

La piste de Kangisujuaq a été construite au sommet d'une colline rocheuse dont l'altitude avoisine 150 m au-dessus du niveau de la mer (Allard et al., 1994). La piste et la route qui la dessert sont construites sur le roc (Figure 76).

b- Hydrographie et drainage :

De par sa configuration topographique, le réseau hydrographique à proximité de la piste est pour ainsi dire inexistant. Il ne s'y trouve ni mare ni ruisseau et le drainage est assuré par l'écoulement le long des pentes de la colline.

c- Le pergélisol :

Le pergélisol consiste en roc gelé. Ce type de terrain est stable au dégel et restera inaltéré moyennant un réchauffement du climat.

Les seuls phénomènes périglaciaires observés à proximité de la piste sont des ostioles situés en contrebas dans des dépôts sableux.

d- Facteurs climatiques :

Un câble à thermistances de 20,5 m de profondeur avait été installé dans l'affleurement près de l'extrémité ouest de la piste à l'époque de la construction de la piste. Ce câble n'étant pas automatisé, il n'a permis que des lectures manuelles et très sporadiques qui ne peuvent permettre de décrire en détail le régime thermique du pergélisol dans le roc.

Néanmoins, au début des années 1990, la couche active dans le roc atteignait 3,2 m et la température moyenne à 20,5 m oscillait autour de $-5,75^{\circ}\text{C}$. Près de la surface, vers un mètre de profondeur, les températures annuelles variaient entre $8,5^{\circ}\text{C}$ et $-22,5^{\circ}\text{C}$ pour une moyenne de -6°C . Dans les années 2000, le profil s'est réchauffé : le mollisol atteint maintenant 3,45 m et la température à 20.5 m est de $4,90^{\circ}\text{C}$ (Figure 77).

4- Diagnostic

La piste de Kangiqsujjuaq ne montre pas de signe de dégradation découlant de la fonte du pergélisol. Les seuls problèmes observés sont mineurs et semblent attribuables à l'usure du temps et aux procédures d'entretien de la piste.



Figure 75 Couche de MG-20b et affaissement sur les talus du remblai de la piste de Kangiqsujjuaq

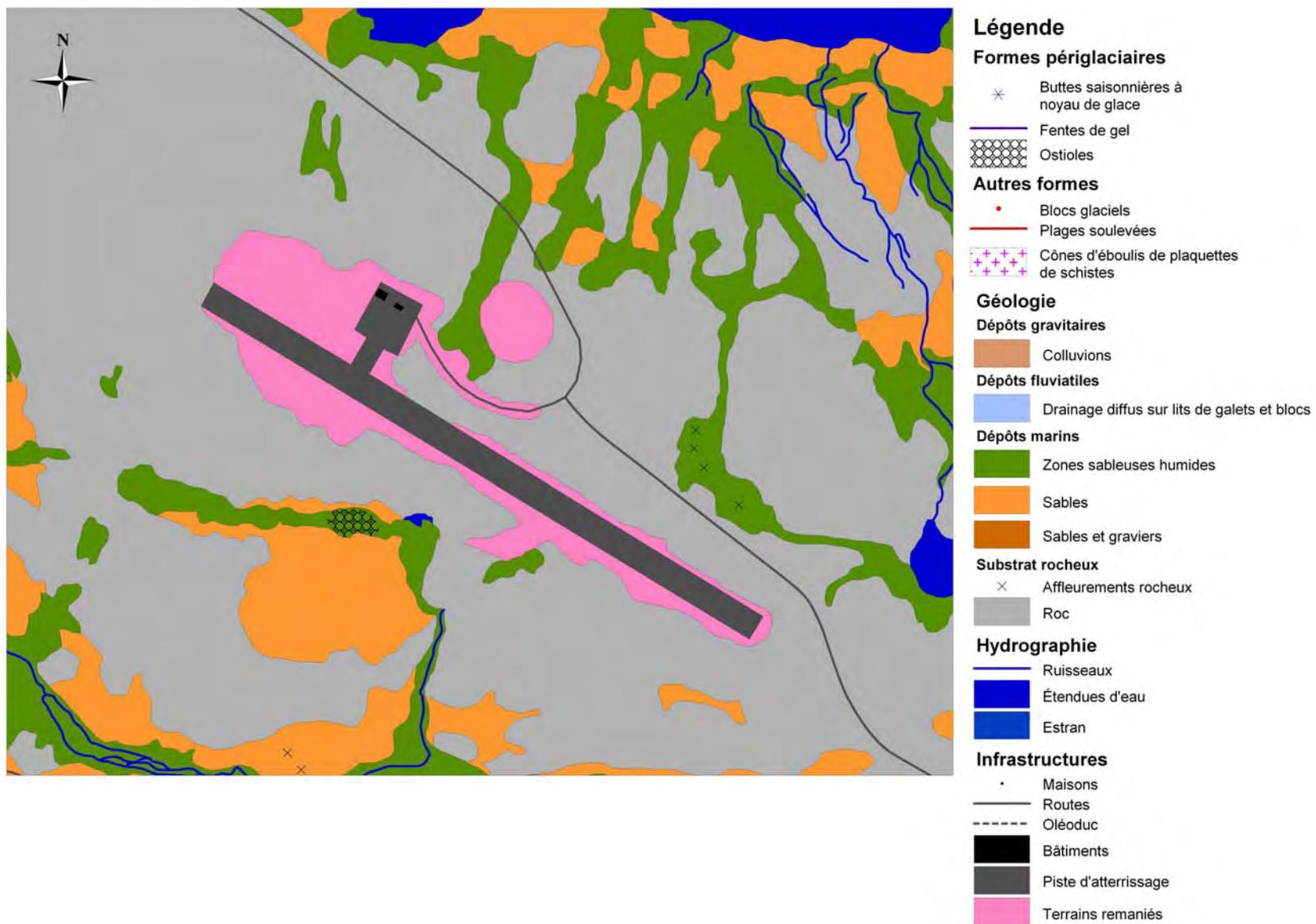


Figure 76 Carte des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Kangiqsujuaq

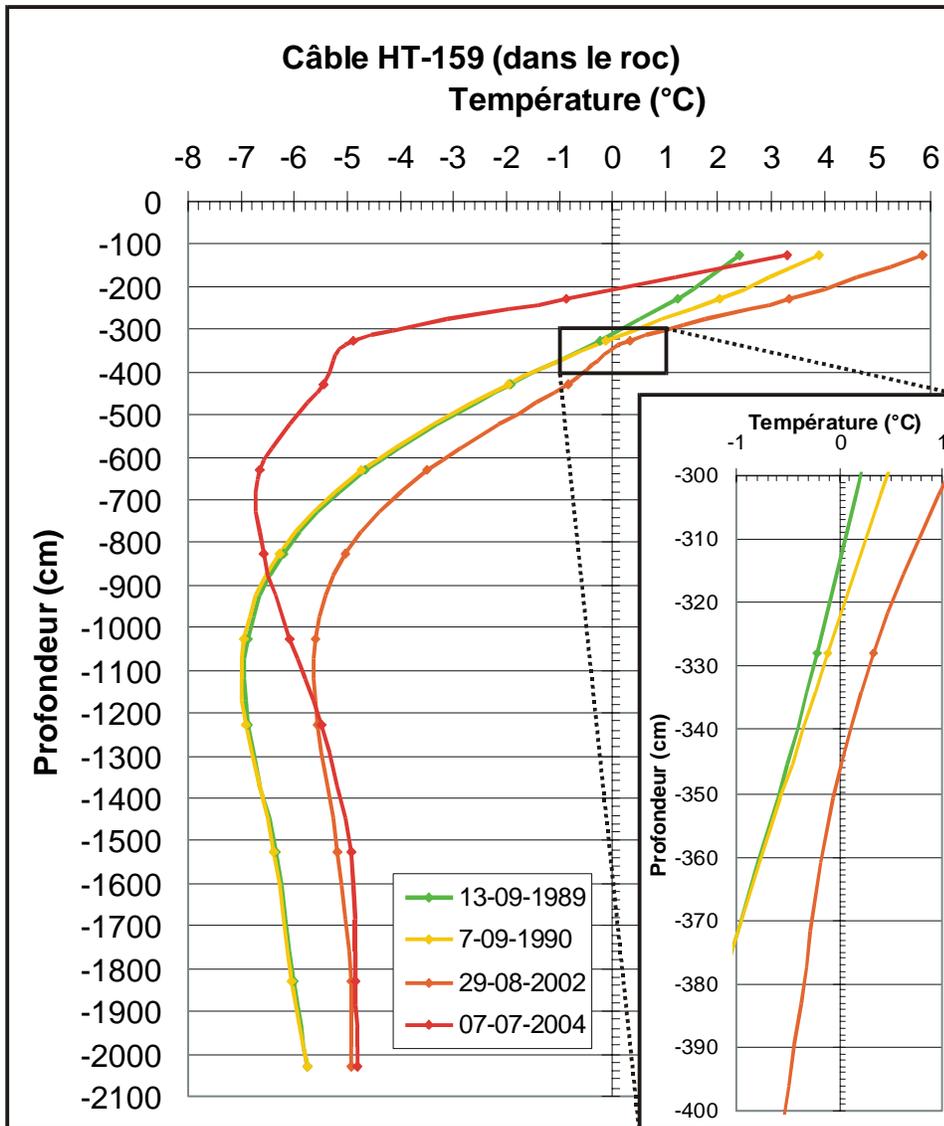


Figure 77 Température du sol pour l'aéroport de Kangiqsujuaq (dans le roc)

1- Contexte

Le Village :

Située à 340 km au nord-ouest de Kujjuaq (61.04 °N ; 69.57 °O), Quaqtaq est une communauté de 305 habitants (population en 2001, Statistique Canada). Le village s'est progressivement développé sur le rivage de la Baie du Diana qui est formée par une péninsule ancrée sur la côte ouest de la Baie d'Ungava et qui se prolonge dans le détroit d'Hudson. La communauté a été constituée en village nordique en 1978. Le village est dans la zone de pergélisol continu.

L'aéroport :

L'aéroport de Quaqtaq ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1989 (d'après les plans « tel que construit »). La piste d'atterrissage, qui mesure 1070 mètres de long et 30 m de largeur, est orientée selon un axe nord-ouest sud-est (155-335°), à une altitude moyenne de 30 m.

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

À date, aucun problème majeur n'a été détecté sur cette piste. Seul un secteur limité entre les chaînages 1+260 à 1+300 pourrait avoir subi un léger tassement au cours des années récentes, quoiqu'aucune observation ou mesure précise ne le confirme hors de tout doute. De plus, le terrain de part et d'autre de la piste le long de sa moitié sud porte des évidences de processus périglaciaires actifs, surtout un réseau de sillons et de fentes de gel correspondant fort probablement à un réseau de coins de glace.

D'après Beaulac et Doré (2006), la piste ne présente pas des épaisseurs de MG-20b supérieures aux 15 cm originaux du revêtement superficiel. Ceci indique qu'il n'y a pas eu de remplissage pour combler une éventuelle dépression engendrée par un affaissement de la piste. En revanche, Beaulac et Doré signalent une diminution de la couche de MG-20b ainsi que la présence d'une légère dépression dans le secteur construit en déblai.

3- Caractéristiques du milieu

a- Géologie de surface :

La géologie des dépôts de surface de la région du village et de l'aéroport est relativement simple et ne comprend que trois unités principales : des aires en affleurement rocheux, des secteurs en sable et gravier ainsi que de vastes aires classifiées sur la carte comme alluvions dans les terrains bas et les fonds de vallée entre les collines rocheuses (Figure 78). Le roc consiste en gneiss granitique gris, à grain moyen. Les sables et graviers consistent principalement en matériaux grossiers, du moins pour les premiers un à deux mètres en surface, contenant souvent des coquilles marines fossiles. Une visite des nombreuses petites gravières le long des routes qui sillonnent le territoire autour du village a révélé que ces sables et graviers ne constituent la plupart du temps qu'un mince recouvrement de 2 à 3 m tout au plus sur le roc. Les « alluvions » consistent en réalité en dépôts de blocaille à matrice de sable grossier mal trié et partiellement recouverts de végétation herbacée et de mousses. Ces aires sont traversées de réseaux de drainage diffus. Elles constituent des zones inondables pour une période de quelques semaines lors de la fonte des neiges et sont sillonnées de ruisseaux, dont plusieurs sont intermittents en été. Ces dépôts sont interprétés comme étant le résultat du remaniement par l'écoulement fluvial diffus de dépôts de sables, graviers et blocs littoraux marins. Comme le patron spatial complexe de répartition des affleurements rocheux et des plaines alluviales le suggère, et comme le suggère aussi la présence d'affleurements rocheux ponctuels le long des ruisseaux (notamment dans le village), les « alluvions » de fond de vallée forment aussi une couverture très mince sur le substrat rocheux.

La moitié nord de la piste repose directement sur le roc. Une bonne partie d'ailleurs, entre la voie de circulation et la balise de navigation, est établie directement sur une surface rocheuse nivelée qui a servi de fond de carrière lors de la construction pour fournir le matériel de remplissage aux extrémités. La moitié sud repose sur des dépôts sableux.

À la transition entre le roc et les dépôts meubles, sur une distance d'environ 40 mètres, la piste repose sur un dépôt légèrement différent des sables marins environnants et dont la nature n'a pu être précisée de façon absolue ni lors de la construction ni suite à des forages par après. Avant la construction, ce secteur avait la forme d'une butte au sommet plat ou légèrement convexe et surélevée d'environ 1.8 m. Le sommet en a été nivelé, créant un secteur en déblai. Comme le sol gelé en dessous avait une texture fine, un géotextile a été étendu sur cette section pour éviter la contamination des granulométries entre le soubassement et la pierraille du remblai de la piste. Une couche de matériel 0-56 mm de 15 cm d'épaisseur a été étalée sur le géotextile pour le protéger, puis le remblai de la piste a été déposé, pour une épaisseur totale de 2 m. Il est donc à noter que la tranche de terrain déblayée à cette époque correspondait à peu de choses près à l'épaisseur du mollisol. Par conséquent, ce segment de la piste repose directement sur le pergélisol d'origine, lequel contient généralement plus de glace que le mollisol.

Le sol resté en place, originalement « pergélisolé » et sur lequel repose maintenant la piste, est constitué de sables très fins limono-argileux qui contient des cailloux anguleux. Un forage peu profond réalisé en juillet 2004 juste en marge de la piste dans ce secteur a permis d'extraire du sol un échantillon de diamicton à matrice silteuse, contenant des cailloux. Ce forage a atteint une profondeur équivalente à 0,43 m sous la base de la piste. Ce dépôt est possiblement un till ou un diamicton glaciomarin (Figure 79). Les sondages effectués à côté de la piste à cet endroit en 1990 (Allard et al., 1994) et à l'été 2004 donnent une idée adéquate des caractéristiques du sol. À en juger par les quelques fines lentilles visibles dans le petit échantillon extrait, le contenu en glace est faible. Ceci est confirmé par des teneurs pondérales en eau non négligeables (12 à 18%), mais qui sont du même ordre de grandeur que la porosité, qui fait que ce sédiment cimenté par une glace diffuse devient fluide au dégel. Comme ce secteur semblait sensible lors de la construction, un câble à thermistances a été inséré sous la piste. Les lectures manuelles ont été faites de façon sporadique jusqu'en 2002 (avec une absence de lecture de 1993 à 2002), puis les lectures du câble ont été automatisées en juin 2004.

Le reste de la piste, dans sa partie sud, s'étend sur 480 m. Elle repose sur le sol non perturbé. En surface, les sols et la morphologie sont légèrement différents d'un côté à l'autre de la piste.

- Côté ouest : la surface du terrain est composée de sable très grossier et de gravier, comprenant des blocs, et dont l'épaisseur atteint au moins 1,45 m d'après une excavation à la pelle complétée par un forage. Le sol y a été échantillonné jusqu'à une profondeur équivalente à 0,25 m sous le niveau de fondation de la piste. Il est à noter qu'une nappe d'eau perchée d'approximativement 20 cm d'épaisseur reposait sur le front de dégel le 17 juillet 2004. Le terrain est sillonné de sillons de fentes de gel qui forment un réseau polygonal non organisé en polygones fermés. Un tel matériel, peu gélif, est fort peu propice à la formation de glace de ségrégation. Il ne contient que de la glace de porosité et, lors du dégel, ne tasse pas. Par ailleurs, nos excavations n'ont pas permis de détecter la présence de coins de glace quoiqu'il pourrait fort bien y en avoir sous les conditions climatiques prévalentes.
- Côté est : le sol est sableux. De 0,6 à 1 m de profondeur, il s'agit d'un sable fin, légèrement limoneux, de couleur gris-jaune et contenant des débris coquilliers. De fines lentilles de glace sont observables près de la base du mollisol non encore dégelé au moment du sondage à la mi-juillet 2004 (Figure 79C). Là également, on a noté la présence d'une nappe d'eau perchée sur le front de dégel, d'une épaisseur approximative de 10 cm, le 18 juillet 2004. De 1 à 2,37 m de profondeur, on passe à du sable moyen, bien trié et contenant toujours des fragments de coquilles (Figure 79B, échantillon prélevé à 2,12 m de profondeur). Ce forage a été effectué à 10 m seulement de la piste, la profondeur atteinte par rapport à la base de la piste étant 1,17 m. En concordance avec cette sa granulométrie, ce sédiment est pauvre en glace.

En résumé, dans ce troisième secteur, la piste repose sur un matériel non gélif.

Le profil au géoradar levé à 50 MHz se caractérise par différents patrons de réflexion. Au nord, entre le chaînage 0+750 et 1+150 m, l'abondance de grands réflecteurs hyperboliques provoqués par les

fractures indique clairement que le remblai repose directement sur le socle rocheux. En direction du sud, ces patrons de réflexion s'estompent à partir du chaînage 1+150 m ; on entre alors dans la zone en déblai. Les ondes électromagnétiques sont atténuées à partir de 4 m de profondeur car le matériau de la butte cryogène qui était anciennement située dans cette zone a une faible résistivité électrique. À partir du chaînage 1+350 jusqu'au 1+675 m, le signal électromagnétique s'atténue moins rapidement que dans la zone en déblai. Un réflecteur localisé à une profondeur d'environ 5 m de profondeur est associé au contact entre les sables et graviers et le roc sous-jacent. Le plancher rocheux s'inclinant lentement sous la partie sud de la piste, les dépôts sableux atteignent une épaisseur qui peut être estimée entre 3 et 4 m (Figure 80).

Sur les relevés de résistivité électrique faits à l'été 2004 avec le Ohm Mapper, les deux premiers mètres du profil ont une résistivité électrique qui varie de 3,0 à 4,0 k Ω .m (Figure 81). Ceci correspond au remblai. Sous la première partie de la piste, du chaînage 0+750 au 1+150 m, la résistivité électrique varie de 2,6 à 3,8 k Ω .m ce qui correspond au roc gneissique sous-jacent dont les valeurs sont très proches de celles du remblai. Là où s'élevait l'ancienne butte cryogène, entre les chaînages 1+150 et 1+350 m, la résistivité électrique est plus faible jusqu'à des profondeurs de 2 à 8 m. Une autre zone de résistivité similaire se retrouve entre les chaînages 1+325 et 1+575 m à des profondeurs comprises entre 5 et 12 m, tandis que la résistivité électrique est similaire à celle du remblai et du roc gneissique entre 2 et 5 m de profondeur.

D'autres relevés de résistivité électrique, et de polarisation provoquée réalisés en marge de la piste, du côté ouest par Seguin et Lévesque (1990), le long de la zone en déblai, ont révélé également la présence d'une petite cuvette d'au plus 4 à 5 m de profondeur dans le roc, laquelle contient les dépôts à matrice de limon et de sable fin. La résistivité du matériau était de l'ordre de 2 k Ω .m, une valeur correspondant à un sable avec peu de glace. Le profil au géoradar à haute résolution (200 Mhz) réalisé sur la piste elle-même laisse voir aussi une cuvette, profonde possiblement de 3,5 à 4 mètres, et contenant cette lentille de sol un plus fin à cet endroit. L'épaisseur de cette lentille devrait être de l'ordre de 1 mètre.

b- Hydrographie et drainage :

Suivant la pente naturelle du terrain qui est en direction est-ouest, un système de drainage a été conçu pour évacuer l'eau vers l'ouest. Un fossé longe la piste sur son côté est et descend vers le sud. Il contourne le bout de la piste et remonte du côté ouest avant de se déverser dans un ruisseau et rejoindre le drainage naturel local en direction du village. Il est important de noter que sur la plus grande partie de son trajet, et surtout à l'extrémité sud de la piste, le thalweg de ce fossé est plus bas que le niveau de la rivière à chenaux multiples qui coule dans la plaine environnante. Une digue édifiée lors de la construction de la piste protège le fossé. Toutefois, des évidences d'érosion et des « lignes d'eau » dans le fossé le long de la piste indiquent que la rivière déborde dans le fossé au printemps (Figure 82A). Ces inondations du fossé contribuent actuellement à une légère érosion des flancs de la piste (Figure 82B).

c- Le pergélisol :

Dans les terrains traversés par la piste d'atterrissage, le pergélisol apparaît dans l'ensemble peu sensible au dégel. En effet, pour moitié elle repose sur du roc, et pour l'autre sur des matériaux grossiers dont la teneur en glace ne peut excéder que de très peu le volume de porosité du matériel. Le seul endroit qui peut être sujet à tassement est le secteur en déblai dont le sédiment sableux diamictique argilo-limoneux est plus susceptible au gel et contient un peu de glace de ségrégation. C'est d'ailleurs dans ce secteur qu'un léger tassement aurait été observé jusqu'à maintenant, mais pour lequel aucune preuve concise n'existe (Beaulac et Doré, 2005).

Parmi les formes et structures périglaciaires rencontrées, on peut noter des sillons de polygones (fentes de gel) qui sont situés autour de la partie sud de la piste dans les sols sableux. Bien que les sondages n'aient pas permis de voir réellement des coins de glace, la probabilité qu'ils soient présents est très élevée. En effet, on en retrouve plus au sud, à Aupaluk dans des sols de texture comparable et sous des sillons identiques. Il est même possible que quelques uns soient enfouis sous la piste, compte tenu de quelques réflexions paraboliques observées sur les profils au géoradar (malheureusement pas avec une netteté permettant une certitude absolue). D'autres formes périglaciaires actives rencontrées sont des « frost blisters », qui sont des accumulations de glace saisonnières dans le sol. Ils ont également été

observés dans le ruisseau à chenaux divergents près de l'extrémité sud de la piste. Là où ils se forment présentement, ils ne posent aucun inconvénient pour la piste.

d- Facteurs climatiques :

Quatre câbles à thermistances ont été installés à Quaqtq. Trois d'entre eux atteignent des profondeurs d'environ 20 m. Le premier est dans le roc (Quaq158), le second dans les sables et graviers 80 m à l'est de la piste (Quaq156); le troisième commence dans le remblai à 20 m du bord et se prolonge dans les sables et graviers sous la piste (Quaq175). Le quatrième câble (Quaq178) 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 des nivellements 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.

Un capteur thermique mesurant la température de l'air est adjoint au câble de référence Quaq156. Il permet de déterminer que la température atmosphérique moyenne pour la période de juin 2004 à juin 2005 a été de - 6.2 °C. Les indices de gel et de dégel pour la même période ont été respectivement de – 2886 et 685 degrés-jours. Les températures atmosphériques mensuelles moyennes mesurées depuis l'installation en juin 2004 apparaissent au tableau 9.

MOIS	Température atmosphérique moyenne mensuelle (°C)
Juillet 2004	6.91
Août 2004	6.73
Septembre 2004	3.49
Octobre 2004	0.54
Novembre 2004	-5.10
Décembre 2004	-19.08
Janvier 2005	-26.13
Février 2005	-21.04
Mars 2005	-15.31
Avril 2005	-6.22
Mai 2005	-0.77

Tableau 9 températures atmosphériques mensuelles moyennes pour Quaqtac de juillet 2004 à mai 2005

La figure 83 présente les températures du sol acquises sur une période de 17 ans par le câble Quaqtac156 situé dans le terrain naturel non loin de la piste d'atterrissage. Il s'agit là d'un site en milieu naturel non perturbé par l'activité humaine et servant de référence. L'enregistrement thermique peut être considéré comme représentatif de la tendance climatique à long terme. Malgré un trou d'une décennie dans l'acquisition des données, une augmentation des températures est évidente, jusqu'à atteindre 1.6 °C à 20 m de profondeur, soit de -5.1 à -3.5 °C.

En comparaison, le graphique de la figure 84 présente les enregistrements thermiques acquis durant la même période (1988-2005) par le câble de 20 m situé sous la piste (Quaqtac175). Les tendances observées sont semblables à celles observées pour le câble de référence. Durant la période allant de 1988 à 1994, les températures sont globalement plus chaudes sous la piste que dans le champ (Figure 85). En revanche, durant la période 2004/2005, on peut observer une inversion, les températures dans le champ étant devenues plus chaudes que sous la piste. Une conséquence de ce réchauffement est l'épaississement du mollisol et la descente du plafond du pergélisol. Sous la piste, le plafond est situé autour de 2.5 m de profondeur. En fonction de l'épaisseur du remblai, qui varie de 2 m à plus de 2,5 m en fonction de l'endroit, le plafond du pergélisol se situe soit dans le remblai, soit dans l'ancien mollisol du terrain naturel sous-jacent qui est une couche pauvre en glace et peu susceptible au tassement.

L'autre câble situé dans la piste (Quaqtac178), d'une longueur de 5 m, met également en évidence le réchauffement du profil thermique (Figure 86). Le plafond du pergélisol atteignait 2,3 – 2,4 m durant la période allant de 2002 à 2004, comparativement à environ 2 m avant 1994. À cet endroit, l'épaisseur du remblai est approximativement de 1,60 m ; le mollisol se trouve donc maintenant dans le terrain naturel sous-jacent.

En résumé, en terrain naturel, le dégel du mollisol atteint 1,56 m (Figure 87), tandis que sous la piste le plafond du pergélisol est maintenant (2005) situé à 2.5 m (Figure 88). Suite au réchauffement climatique des années 1993-2005, le dégel a donc pénétré d'un peu moins d'un mètre dans le pergélisol à texture fine et contenant un peu de glace sous la zone en déblai.

Les 15 et 16 mai 2005, la saison de dégel est arrivée très subitement, la température atmosphérique passant de – 6 à près de 2 °C en 40 heures. Après un léger regel le 17, la vague de chaleur a atteint 7 °C le 23 mai. Cette hausse a entraîné la fonte rapide de la couverture neigeuse et provoqué un apport subit d'eau de fonte le 16 mai. Ce phénomène est particulièrement bien rendu par les enregistrements de la thermistance à 56 cm du câble Quaqtac156 (Figure 89) qui a enregistré une hausse brutale de température qui ne peut être due qu'à un apport subit de chaleur par convection alors que l'eau s'est infiltrée subitement dans le mollisol grossier non saturé. Dans les jours qui suivent, la poussée de chaleur s'est poursuivie par conduction, plus lentement. Il est remarquable de constater que suite à cette première vague de chaleur printanière la température à 50 cm a dépassé 8 °C le 24 mai, soit une valeur supérieure à celle enregistrée dans l'air la veille. Ce réchauffement rapide, aussi noté à un mètre dans le

remblai doit être attribué à un faible albédo de la surface de la piste et à une forte conductivité thermique du matériel rocheux compacté (0-20 mm et 0-60 mm) qui en compose les couches superficielles.

Malheureusement, l'enregistrement du câble Quaq175 s'étant interrompu en mars 2005 suite à un problème technique (apparemment un débranchement de fil suite à une secousse de la boîte des instruments lors d'une opération de déneigement), ce câble n'a pu enregistrer l'impact de la hausse subite de température dans la piste. Toutefois, le câble Quaq178 a enregistré de façon remarquable l'arrivée soudaine d'eau à travers le remblai le 16 mai. La hausse rapide par conduction a affecté les profondeurs de 2 m et 2.5 m, dénotant une inondation de la piste. La fonte subite de la neige autour de la piste, associée à un débordement probable de la rivière dans le fossé qui contourne l'extrémité sud de la piste a provoqué l'inondation de sa fondation. Selon le suivi thermique du câble Quaq178 pour les mois suivants, il semble que cette eau infiltrée a regelé. Par contre la poussée de chaleur apportée par convection lors de la fonte nivale a fait faire un bond au profil thermique. Il n'est pas impossible aussi que le sol sableux sous la moitié sud de la piste se soit ainsi enrichi en eau de façon définitive.

4- Diagnostic

Au vu des échantillonnages, des relevés au géoradar et des autres données et observations acquises sur le terrain, le secteur en déblai de la piste entre les chaînages 1+260 et 1+300 demeure sensible au dégel du pergélisol. Avec le réchauffement climatique, cela devrait engendrer d'autres tassements. Toutefois, bien que déterminé avec peu de précision, le volume de sol sensible sous ce secteur apparaît restreint. Le tassement qui en découlera sera selon toutes probabilités localisé et de faible ampleur. L'entretien devrait être réalisable et se poursuivre selon les procédures appliquées actuellement.

Le fossé qui longe la piste ne remplit pas son rôle lors de la fonte printanière et l'inondation qui en découle contribue au réchauffement saisonnier du pergélisol sous la piste.

Comme les sondages en marge de la piste l'ont montré, il existe une nappe d'eau perchée sur le front de dégel et le plafond du pergélisol. Cette nappe s'étend inévitablement sous la moitié sud de la piste. Toutefois, cela n'a pas d'impact structural car le sol est peu gélif.

Quant à la route d'accès à l'aéroport, elle repose principalement sur du roc et des dépôts grossiers, mais elle traverse également une zone de sables limoneux mal drainés. Il conviendrait donc d'en assurer un suivi.

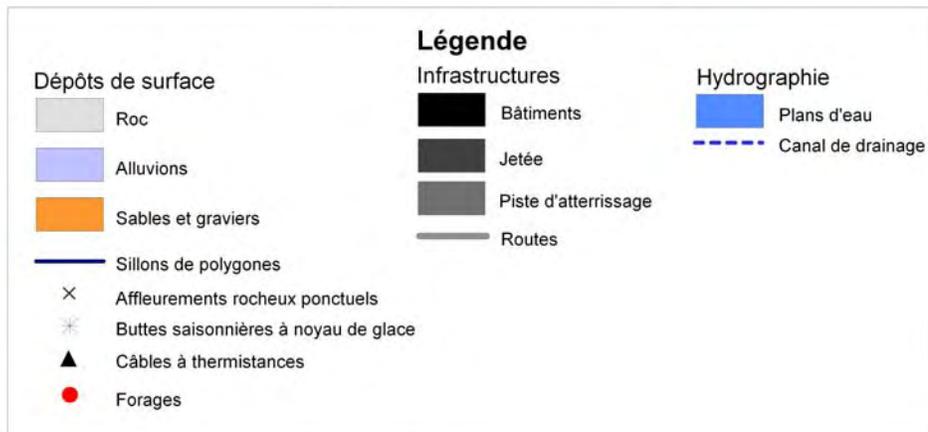
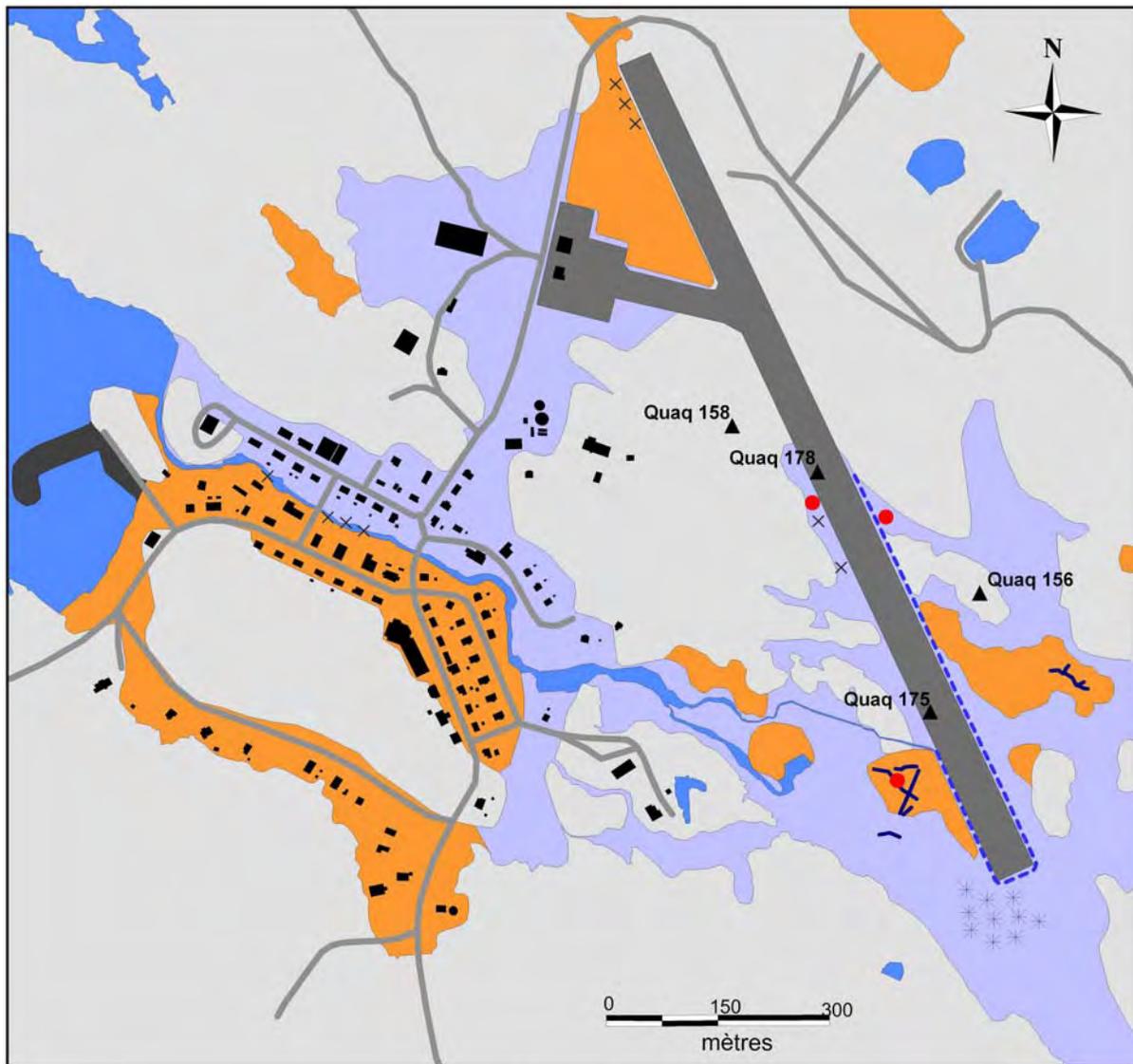


Figure 78 Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Quaqaq



Figure 79 Échantillon de sol prélevé à l'aéroport de Quaqtaq

- A- Diamicton pauvre en glace composé de sable fin limono-argileux et de cailloux anguleux ;
- B- sable moyen bien trié et pauvre en glace (pergélisol) ;
- C- sable fin légèrement limoneux avec fines lentilles de glace (mollisol).

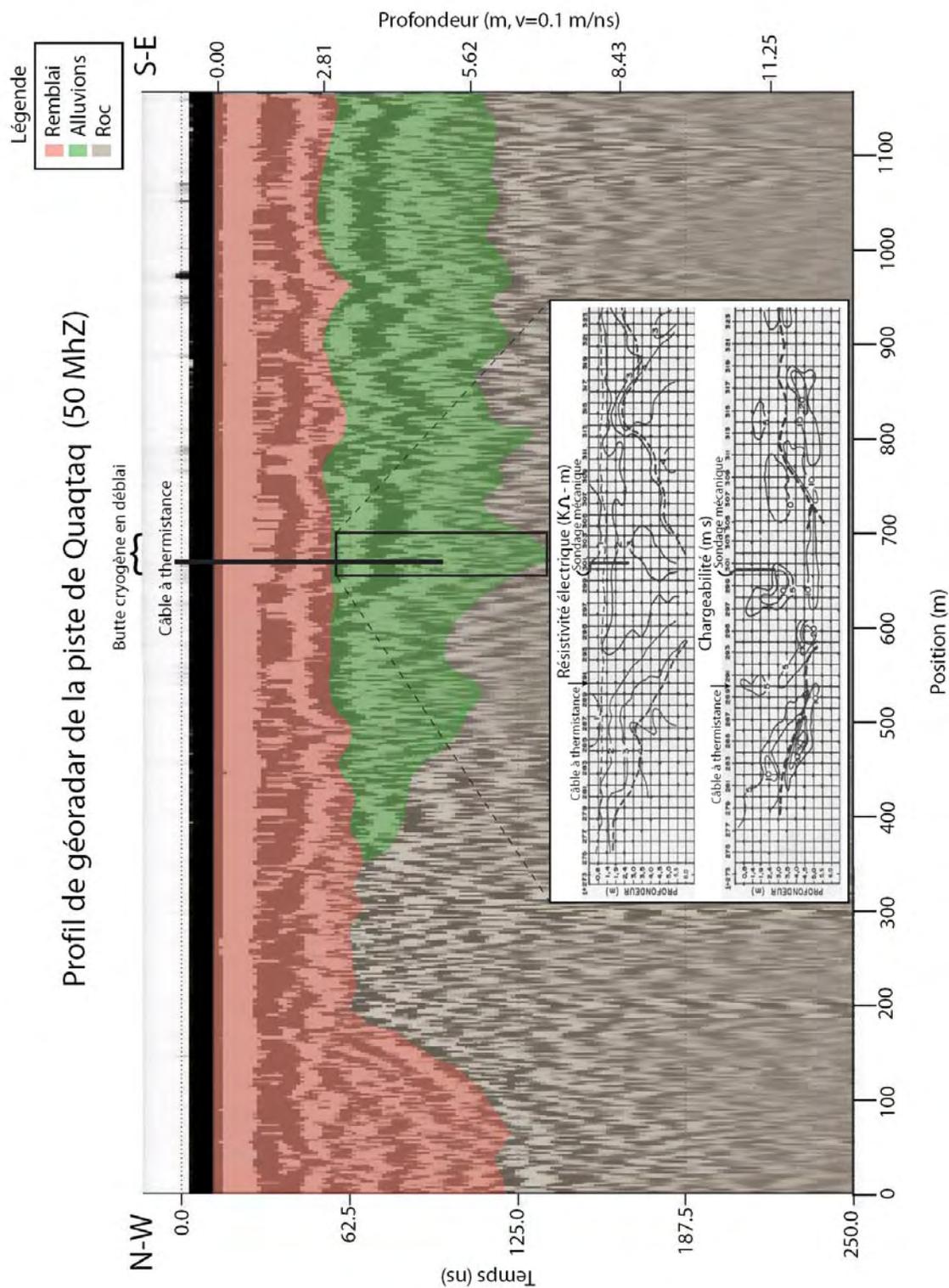
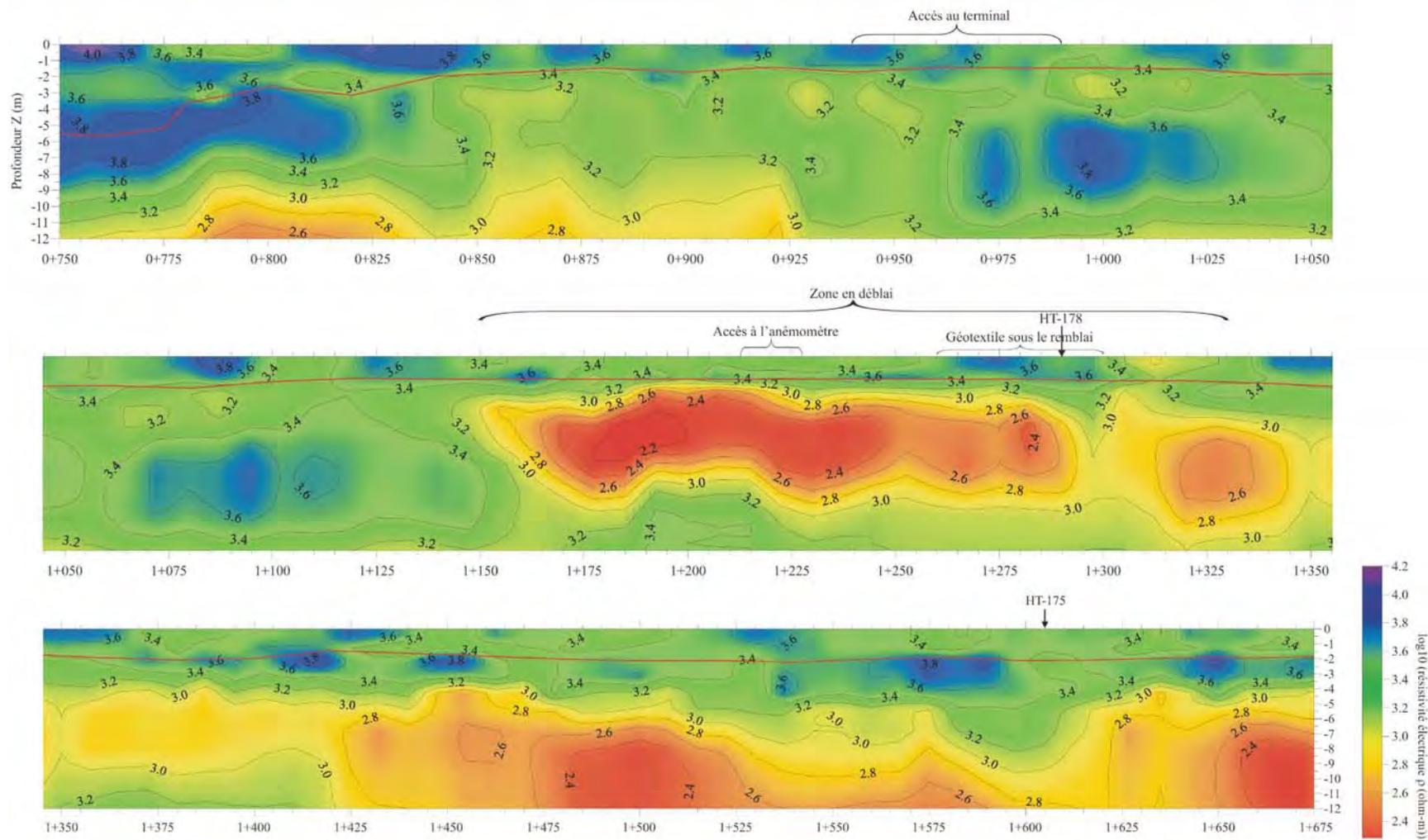


Figure 80 Profil de géoradar de la piste de Quaqtq à 50 Mhz
 La zone en déblai au chaînage 1+300 a aussi fait l'objet de profil de résistivité électrique par Seguin et Lévesque (1990).



Auteur : Catherine Savard

Figure 81 Image de résistivité électrique de la piste de Quaqtqa



Figure 82 Exemple de problèmes liés au drainage et à l'hydrographie

A- Marques d'inondation d'un fossé longeant la piste d'atterrissage ;
B- Érosion sur le flanc de la piste.

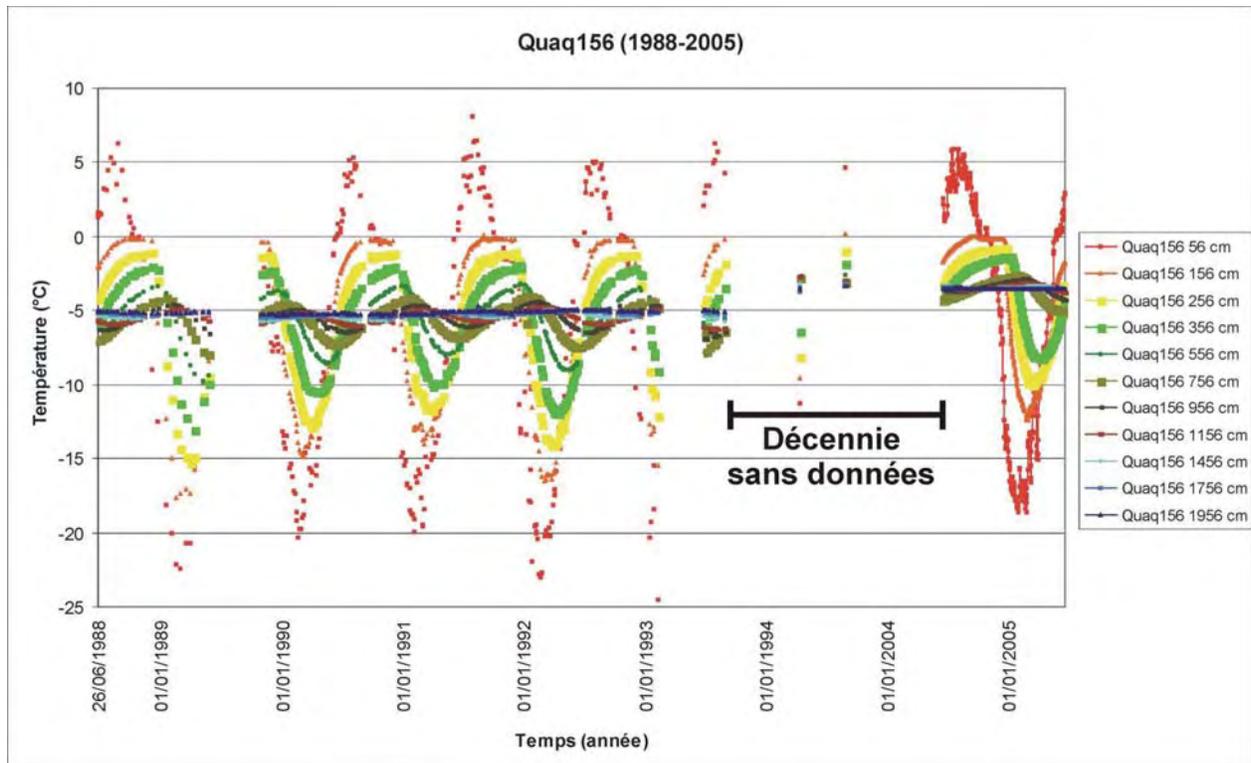


Figure 83 Température du sol pour le câble Quaq156 de 1988 à 2005 (site de référence hors piste).

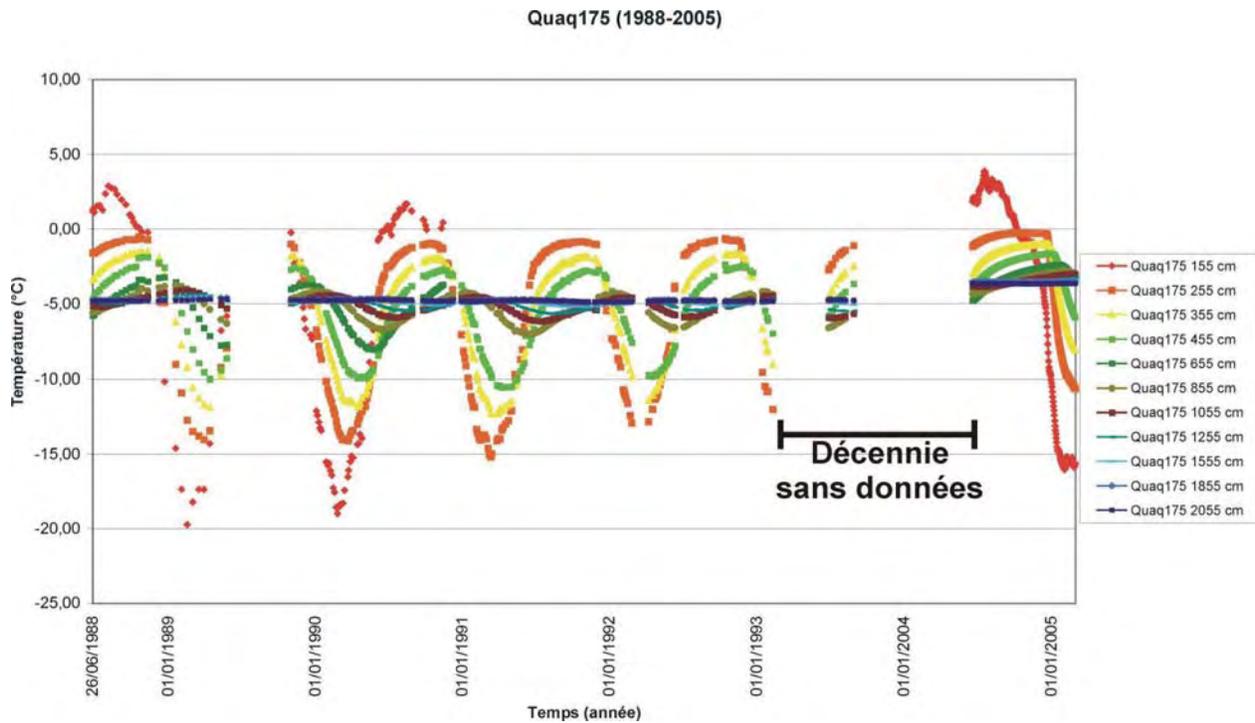


Figure 84 Température du sol pour le câble Quaq175 de 1988 à 2005 (piste).

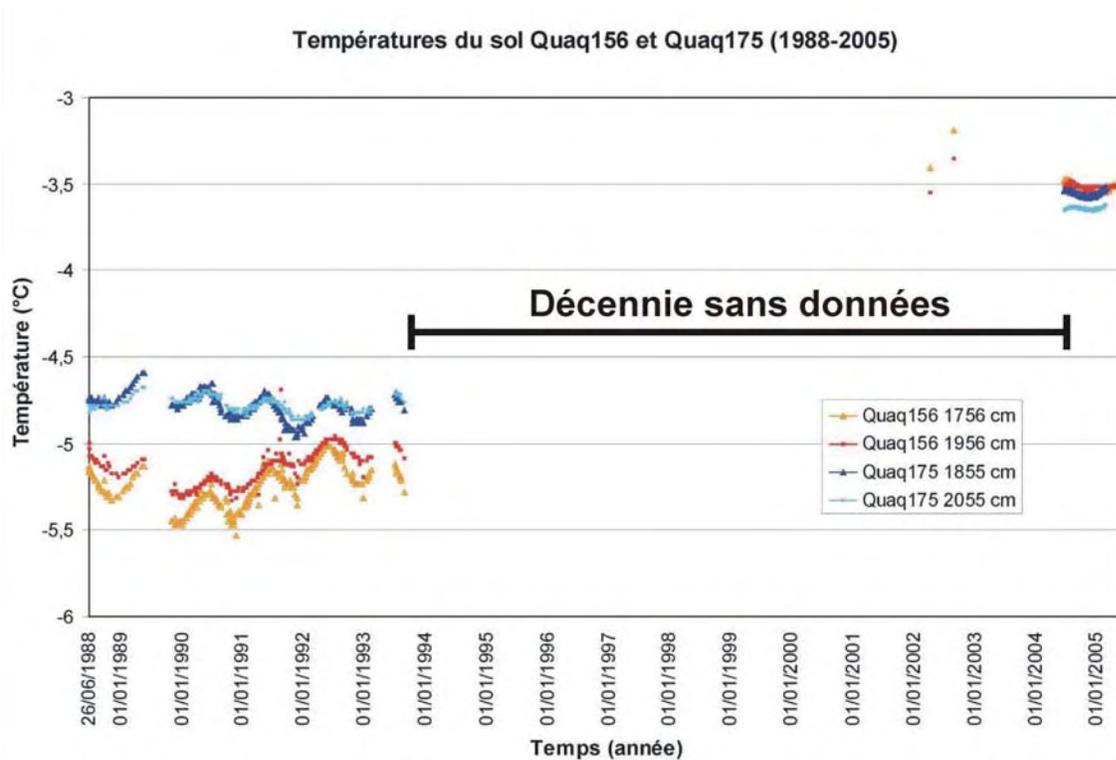


Figure 85 Température du sol pour les câbles Quaqa156 (hors piste) et Quaqa175 (piste) de 1988 à 2005

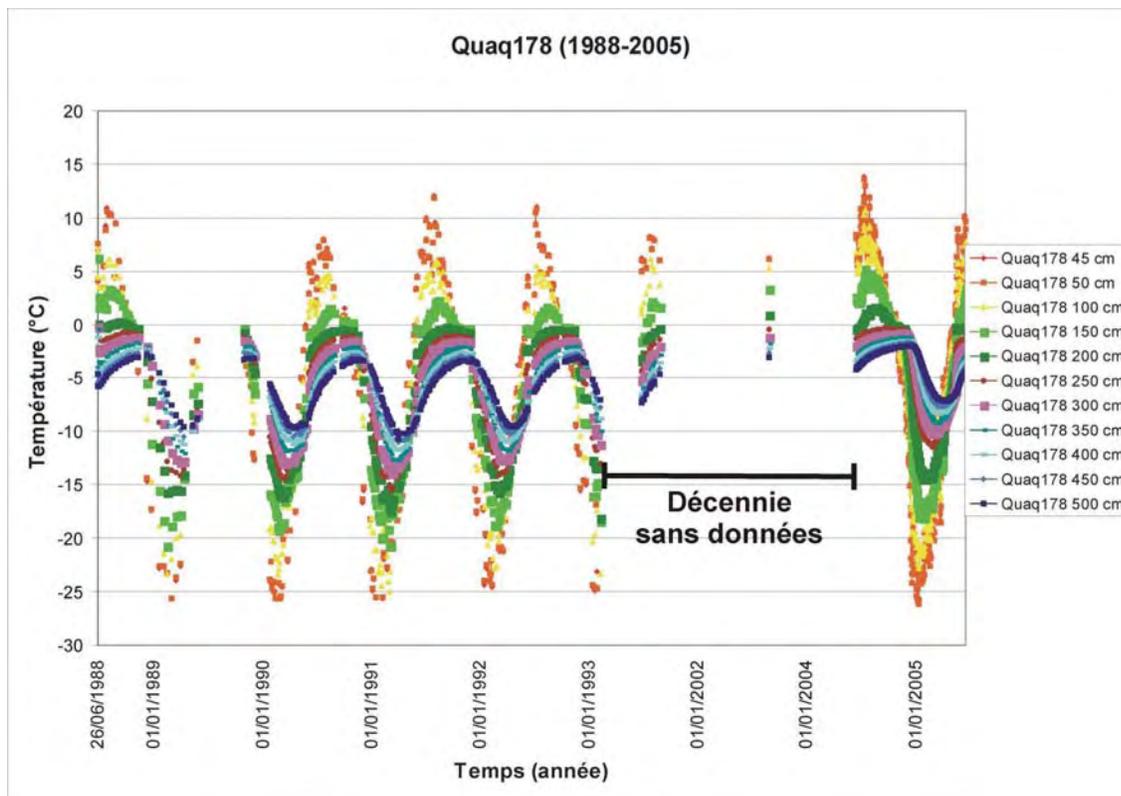


Figure 86 Température du sol pour le câble Quaqa178 (dans piste) de 1988 à 2005

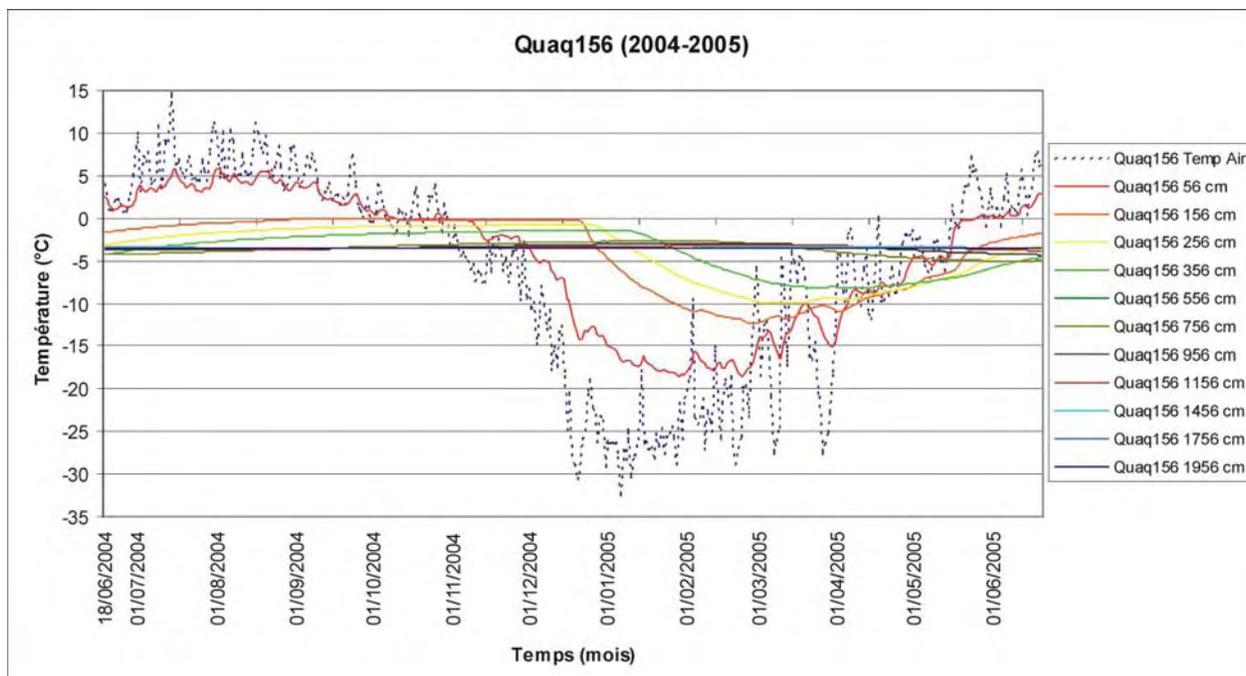


Figure 87 Température du sol pour le câble Quaq156 (hors piste) de juillet 2004 à juin 2005

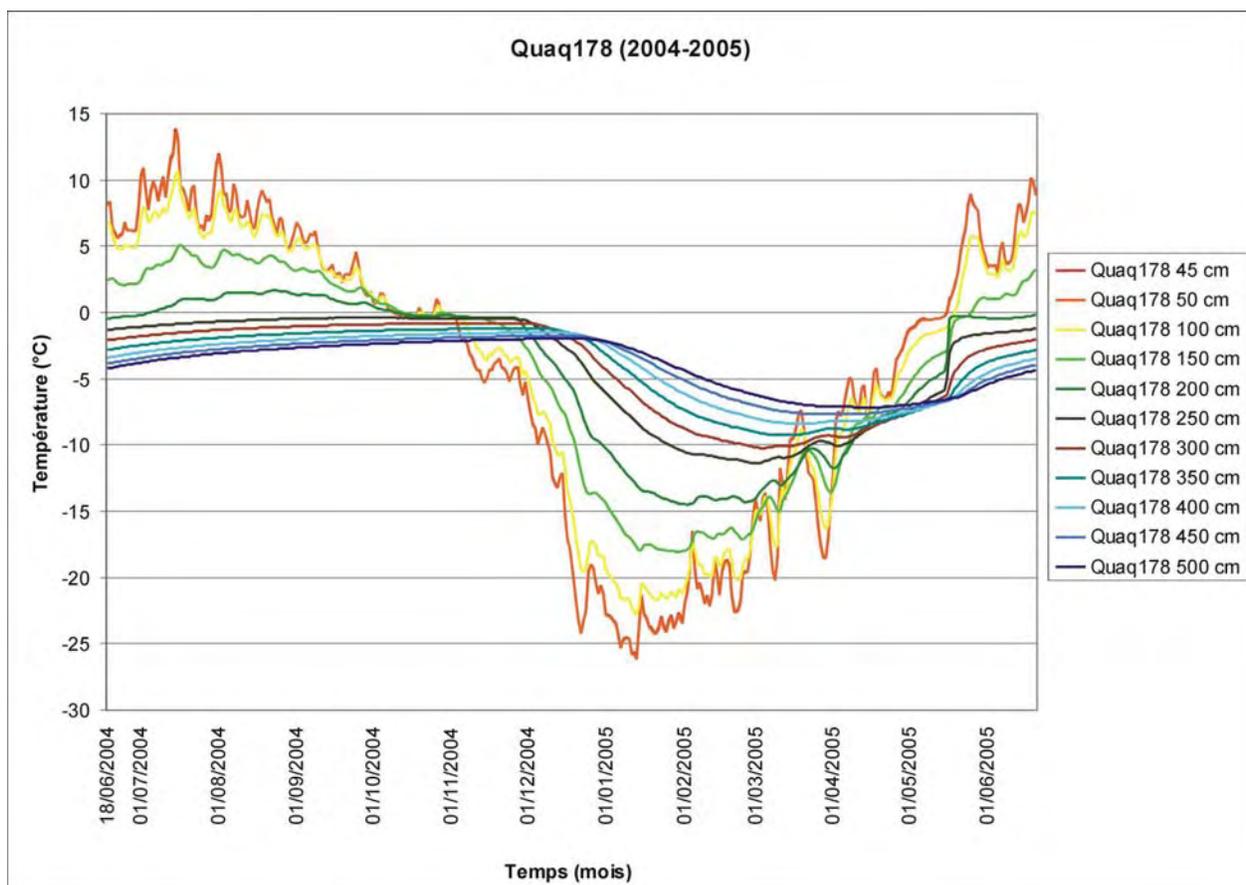


Figure 88 Température du sol pour le câble Quaq178 (dans piste) de juillet 2004 à juin 2005

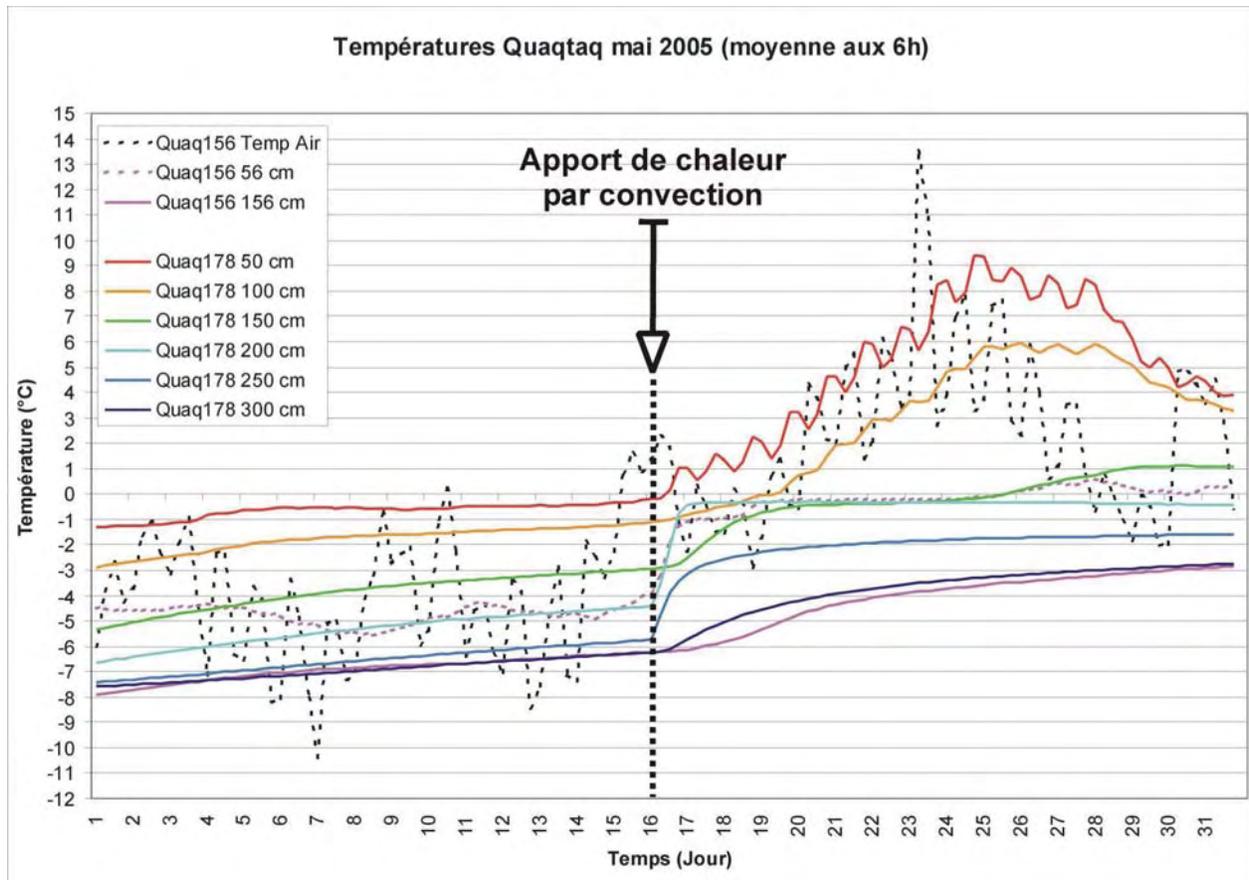


Figure 89 Température du sol pour les câbles Quaqaq156 (hors piste) et Quaqaq178 (dans piste) de mai 2005

KANGIRSUK

1- Contexte.

Le village :

Kangirsuk (60.04 °N, 70.04 °O) est situé sur la rive nord de la rivière Arnaud, à 13 km de son embouchure sur la baie d'Ungava. Le village est situé à 110 kilomètres au sud de Quaqtaq et à 90 kilomètres au nord d'Aupaluk. Comptant 496 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord Canada), Kangirsuk a été constitué en municipalité en 1981.

L'aéroport :

L'aéroport de Kangirsuk ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1987. La piste d'atterrissage, d'une longueur effective de 1070 mètres (longueur totale de 1180 m, du chaînage 0+540 à 1+720 m) et 60 m de largeur, est orientée selon un axe nord-est sud-ouest (038-218° N), à une altitude moyenne de 113 m (103 m à son extrémité SO et 123 m à son extrémité NE).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

Lors de la construction, une section de la piste, s'étendant entre les chaînages 0+780 et 1+040 m, a été construite en déblai sur une longueur de 200 m et une profondeur allant jusqu'à 5 m. Une fois cette section arasée, il a été rapporté que le terrain était constitué de sable silteux (40% de particules fines) avec un contenu en glace important de 50% (Tremblay et Doré, 1988). Un géotextile a été posé sur le plancher du déblai en fin d'été alors qu'il était gelé. Par-dessus celui-ci, 15 cm de matériel granulaire ont été étendus, après quoi le remblai de 70 cm a été construit. Un enrochement et du géotextile ont été placés dans les fossés pour prévenir les problèmes de stabilité de pente.

Au nord de ce secteur, le drainage de la piste a été optimisé par le biais de deux ponceaux qui la traverse perpendiculairement, laissant ainsi l'eau s'écouler d'est en ouest, en direction du village.

Dès les premières années suivant la construction de la piste des tassements, irréguliers selon les endroits, ont été constatés. Ceux-ci avaient atteint jusqu'à 23 cm par endroit lors de la première année. À l'été 2004, des fissures de tension d'une longueur de 4 à 6 m et d'une largeur de 1 à 3 cm étaient observables en bordure de piste (Figure 90), ainsi qu'une légère dépression longitudinale en milieu de piste.

Des mesures d'épaisseur de MG-20 corroborent cette dégradation, puisque jusqu'à 61 cm d'épaisseur de gravier ont pu être mesurés par endroit au lieu des 15 cm d'origine, toujours dans ce secteur. Ce surplus est attribuable aux fréquents travaux de resurfaçage qui ont pour but de contrecarrer les affaissements et de garder la piste opérationnelle.

Il est aussi à noter que du granulats MG-20 recouvre les pentes des remblais y ayant été entraîné au fil des ans par la grappe lors des opérations de déneigement et de nivellement. Ce matériel colmate le talus et limite la possibilité d'un refroidissement hivernal du remblai par convection d'air. De même, des membranes géotextiles de couleur sombre affleurent par endroits, comme cela peut être vu au niveau des ponceaux. Cela induit un effet d'albédo susceptible d'augmenter le réchauffement à la surface du sol.

Enfin, une dépression a été observée au chaînage 0+780, mais celle-ci est attribuable aux atterrissages répétés à cet endroit.

3- Caractéristiques du milieu

a- Géologie de surface :

Le village se trouve près du littoral au pied d'un escarpement rocheux. Il est principalement établi sur des affleurements de schiste qui appartiennent à la formation géologique de Churchill du bouclier

canadien. Les principaux dépôts meubles rencontrés dans la région consistent en till, en dépôts fluvio-glaciaires et en dépôts de la mer D'Iberville, notamment d'anciennes plages marines.

La carte des dépôts (figure 91) montre que l'ensemble du milieu naturel aux environs immédiats de la piste d'atterrissage a été remanié lors des travaux de construction, le matériel de remaniement étant composé principalement de sables et de graviers.

Le roc affleure en de nombreux endroits le long de la moitié nord de la piste, parfois sous la forme de buttes rocheuses d'éjection périglaciaires. Cependant, des dépôts de surface originels sont présents le long du côté est de la piste, à l'endroit où le milieu naturel a été moins perturbé par la construction. Il s'agit de sédiments de plage et des sables et graviers littoraux, ainsi que des alluvions au sud-est de la piste. L'extrémité nord de la piste s'appuie, quant à elle, sur le socle rocheux. Une colline à l'est de la piste est constituée de till; sa surface est parsemée d'ostioles à bourrelets.

Stratigraphie :

À l'été 2004, cinq excavations ont été réalisées à l'aide d'une pelle mécanique (KT de 1 à 5, Figure 92 et 93). En appui, trois coupes stratigraphiques et plusieurs dizaines de trous de tarière ont permis de reconstituer la séquence générale:

1. Sable fin, d'épaisseur variable (0 – 1 m), qui est probablement un faciès de sables littoraux, parsemé de blocs glaciels. Cette unité est discontinue et n'apparaît pas dans certains secteurs du terrain naturel. Elle contient de fines lentilles de glace. La zone en déblai fut en partie excavée dans ce matériel sur près de 200 m.
2. Sables grossiers et gravier, stratifiés par endroits, comportant des galets décimétriques et des blocs d'origine glacielle (Figure 93). Située entre 50 et 100 cm sous la surface du terrain naturel, cette unité, pauvre en glace, est un faciès de plage. La zone de déblai a été, partiellement et sur certains secteurs, excavée dans ce matériel.
3. Diamicton à matrice fine limono-sableuse incorporant des graviers et quelques blocs anguleux décimétriques à métriques (Figure 94). À un peu plus d'un mètre de profondeur sous la surface du terrain naturel, cette unité est interprétée comme étant un till de fond. Riche en glace, ce matériel se liquéfie au dégel. D'une épaisseur variable, il repose vraisemblablement sur le socle rocheux.

La troisième unité est la plus problématique en terme de dégradation du pergélisol ; elle est propice au fluage et aux affaissements lors du au dégel.

D'après la répartition des affleurements rocheux et les excavations, le tiers nord de la piste semble reposer sur un terrain stable soit rocheux, soit recouvert d'un dépôt mince.

Secteur en déblai :

Le 19 juin 2005, une excavation a été faite dans la piste d'atterrissage dans le secteur où le terrain avait été nivelé lors de sa construction pour y mettre en place un câble à thermistance (Figure 95). L'épaisseur de dépôt qui avait été arasée à cet emplacement était approximativement de trois mètres. Ce fut l'occasion d'accroître les connaissances sur ce secteur problématique.

Alors que le remblai original de la piste était inférieur à un mètre à cet endroit, celui-ci mesure maintenant plus de 1,40 m, avec une épaisseur de MG-20 excédant 50 cm (Figure 96).

À partir de 1,40 m de profondeur, au contact remblai-terrain naturel, un forage a été pratiqué avec une foreuse portable, jusqu'à une profondeur de 3 mètres. Le terrain sous-jacent au remblai était le till caillouteux à matrice fine limono-sableuse.

De 1,40 jusqu'à 2 m, le sol était sec et pauvre en glace. Le contenu en glace était supérieur à partir de deux mètres, ce qui laisse supposer que le plafond du pergélisol se situait à proximité de ce niveau. À 2,50 m, les sédiments fluaient abondamment pendant le forage, ce qui était significatif d'une abondante quantité de glace.

Observation géophysiques

Le profil au géoradar en mode réflexion de la piste est présenté à la figure 97. Sur ce profil, le réflecteur associé au contact entre le remblai et le milieu naturel est franc.

Sous la partie nord de la piste, la texture de l'image radar consiste en une multitude de réflecteurs paraboliques superposés, caractéristiques d'un roc jointif. Immédiatement sous le réflecteur associé à l'interface remblai-milieu naturel, un autre réflecteur est associé au contact entre les sédiments et le socle rocheux. Ce réflecteur peut être suivi de l'extrémité nord de la piste en s'approchant de la zone de déblai où il se scinde en deux réflecteurs à partir du chaînage 1+250 m. Le nouveau réflecteur traduit le début de la couche de till à matrice fine.

En continuant vers le sud, la couche de sables et graviers disparaît, on entre alors dans la zone de déblai, et il ne reste plus que le contact entre le remblai et le till. Le contact entre le till et le roc plonge en profondeur puis devient indiscernable à partir du chaînage 1+150 m. Il n'est alors plus possible d'évaluer l'épaisseur des dépôts qui recouvrent le socle rocheux. Cette atténuation du signal électromagnétique est probablement due à une fraction fine importante et à une teneur en eau élevée. Les différents contacts stratigraphiques réapparaissent à proximité du chaînage 0+800 m. Tout semble donc indiquer que la zone en déblai est constituée principalement de till logé dans une dépression dans le socle rocheux. L'extrémité sud de la piste présente des réflecteurs subhorizontaux associés au contact entre remblai, entre sables et till, puis le socle rocheux.

Un relevé de résistivité électrique a été fait sur la piste à l'été 2004 avec le Ohm Mapper (Figure 98). Il présente une résistivité électrique très variable, entre 32 (101,5) et 31623 (104,5) Ohm.m. La résistivité est cependant beaucoup plus faible dans la zone en déblai entre les chaînages 0+780 et 1+040 m.

Le contact entre le remblai et le milieu naturel est net. La résistivité électrique du remblai de la piste est uniforme sur toute sa longueur, soit 1995 ($10^{3,3}$) ohm.m, ce qui correspond aux valeurs minimums attendues du gneiss dioritique (entre 10^3 et 10^6 Ohm.m) dont il est constitué. À l'exception de la zone en déblai, la résistivité électrique du milieu naturel sous le remblai de piste demeure dans les valeurs attendues pour le gneiss dioritique, mais est plus élevée que pour le remblai ($10^{4,1}$ ou 12590 ohm.m).

Au nord, une grande partie de la piste repose directement sur le socle rocheux ou sur une mince couche de sédiments qui la sépare du socle. Les sédiments du milieu naturel sous le remblai sont des sables et graviers de granulométrie grossière qui possèdent une résistivité électrique semblable au socle rocheux, ce qui empêche de les en discerner. Plus au sud, la couche de sables et graviers repose sur le till à matrice fine dont la résistivité électrique est également élevée. Il est donc impossible d'identifier les contacts entre les différentes unités stratigraphiques sur l'image électrique.

La présence de ponceaux métalliques situés sous le remblai provoque des anomalies ponctuelles de faible résistivité électrique aux chaînages 1+125 et 1+505 m.

Une zone de faible résistivité électrique, variant de 80 ($10^{1,9}$) à 1260 ($10^{3,1}$) ohm.m, est observable dans le secteur en déblai. Ceci est sans doute dû à un pergélisol moins froid avec une teneur en eau non gelée.

Un relevé de résistivité électrique a également été effectué dans le milieu naturel non perturbé, sur la colline de till, vis-à-vis avec la zone en déblai (Figure 99). La résistivité électrique des trois premiers mètres est très variable, cela étant sans doute dû à la présence de nombreux blocs visibles en surface. Ces deux à trois premiers mètres ont une résistivité électrique de 800 ($10^{2,9}$) à 5 010 ($10^{3,7}$) ohm.m. Pour ces profondeurs, la résistivité est plus faible entre les chaînages 0+840 et 1+005 m, avec des valeurs oscillant autour de 1995 ($10^{3,3}$) ohm.m. En revanche, à partir du chaînage 1+025 m et en se dirigeant vers le nord, la résistivité électrique en surface est plus élevée et elle varie entre 5 010 ($10^{3,7}$) et 31 620 ($10^{4,5}$) ohm.m, cela étant dû aux nombreux blocs englobés dans le dépôt de même qu'à la présence de glace abondante dans les premiers mètres sous la surface. Aux profondeurs supérieures à 3 m, la résistivité électrique est plus faible qu'en surface, et s'échelonne entre 80 ($10^{1,9}$) et 800 ($10^{2,9}$) ohm.m, ce qui correspond au till à matrice fine avec un contenu moindre en glace.

Un relevé au géoradar à haute fréquence (200 Mhz) fait au même endroit conforte cette interprétation et permet de l'améliorer (Figure 100). Un réflecteur quasi continu à 1,5 m de profondeur doit

correspondre au plafond du pergélisol. Sous ce réflecteur jusqu'à environ 3,5 m de profondeur apparaît un niveau au signal fort comportant des réflecteurs subhorizontaux discontinus typiques d'un sol riche en glace de ségrégation. Au-delà le signal s'atténue, fort probablement parce que la teneur en glace diminue avec la profondeur.

Ces deux relevés géophysiques effectués sur le till en milieu naturel indiquent que ce dépôt meuble est riche en glace sur les premiers 3,5 m sous le plafond du pergélisol. Ce même niveau riche en glace a été exposé lors du déblai durant la construction de la piste et il s'est retrouvé non protégé des transferts de chaleur estivaux sous le remblai mince et conducteur.

b- Hydrographie et drainage :

La piste étant orientée à peu près perpendiculairement à la pente générale, elle intercepte donc le drainage naturel qui se canalise vers le ruisseau qui dévale vers le village par un profond ravin. Deux ponceaux situés aux chaînages 1+125 et 1+505 m permettent le drainage de l'eau de ruissellement. La piste étant inclinée vers le sud, ces ponceaux jouent un rôle bénéfique en permettant d'évacuer au moins pour moitié les eaux de ruissellement avant que celles-ci n'atteignent la zone en déblai. Une digue a été installée près de celui situé au plus près de la zone en déblai de façon à augmenter son pouvoir de captation. Il est fort probable que si ces ponceaux ne jouaient plus leur rôle, une quantité plus importante d'eau transiterait par la zone problématique et accentuerait sa dégradation.

c- Le pergélisol :

Dans les terrains traversés par la piste d'atterrissage, le pergélisol n'apparaît sensible au dégel qu'aux endroits où on note la présence du till de fond sous les sables et graviers grossiers. Le premier tiers nord de la piste repose soit sur le roc soit sur les sables et graviers. Le tiers central repose à la fois sur les sables et gravier, puis du till qui est d'épaisseur modeste, le roc se trouvant en moyenne à une profondeur de 3 mètres. Le dernier tiers repose majoritairement à même le till, riche en glace, dont l'épaisseur est mal connue, quoique le profil au géoradar suggère des valeurs entre 4 et 6 m. C'est d'ailleurs dans ce secteur que les tassements ont été observés (Beaulac et Doré, 2005).

Parmi les formes et structures périglaciaires rencontrées, on peut noter de nombreuses ostioles à bourrelet sur la colline qui surplombe la piste sur son côté est (figure 101). Ces formes sont généralement diagnostiques d'un pergélisol riche en glace de ségrégation sous la surface. Sur le côté ouest de la piste, qui est presque entièrement constitué de roc, on note la présence de formes d'éjection rocheuse, imputables au soulèvement au gel de quartier de roc délimité par des fractures; ce processus ne semble pas pour le moment représenter une menace pour la piste d'atterrissage.

d- Facteurs climatiques :

Le tableau 10 présente les profondeurs de dégel rencontrées aux mois de juillet 2005 et 2006 dans les différentes excavations ; celles-ci s'échelonnent entre 1,4 et 3,0 m. On peut en déduire que, selon l'endroit, le plafond du pergélisol, sous la piste, se situe soit dans le roc, soit dans le till de fond, compte tenu de la minceur des dépôts marins sableux.

Excavation	KT 1	KT 5	KT 2	KT 3	KT 4	Piste (0+850 m)
Profondeur de dégel	3,0 m	1,5 m	2,0 m	1,8 m	>80 cm (roc)	1,4 m
Période	Juillet 2005					Juin 2006

Tableau 10 Profondeurs de dégel atteintes aux mois de juillet 2005 et juin 2006 pour les différentes excavations

À l'été 2005, la piste a été dotée d'un câble à thermistances implanté au chaînage 0+850 m. Il acquiert des mesures de température de la piste et du sol sous-jacent jusqu'à 3 m de profondeur. Un capteur pour mesurer la température de l'air a également été placé sur ce site pour référence atmosphérique.

Jusqu'au 19 juin 2005, il n'existait que peu de données permettant un suivi thermique. Il est donc impossible de connaître sa situation initiale. Cependant, il est certain que la surface arasée du terrain

naturel de la zone déblayée était pergélisolée lors de la construction. Actuellement, le remblai est dégelé dès le mois de juin.

Les données de la station ont été récupérées en octobre 2005 et sont présentés en figure 102. Ces mesures sont encore insuffisantes pour procéder à une analyse exhaustive du régime thermique de la piste, mais il déjà possible d'en déduire la profondeur du plafond du pergélisol en 2005, soit 2,20 m. Si on teint compte que 35 cm de MG-20 ont été rajoutés pour compenser l'affaissement de la piste à cet endroit et que cette épaisseur correspond au volume de glace qui a fondu dans le till et que 80 cm de till de fond ont été dégelés au cours des ans (ce matériel étant pergélisolé à l'origine), on peut estimer le tassement survenu à approximativement 30%. Ceci est très conservateur, car la recharge en MG-20 est une action locale qui ne saurait traduire un tassement généralisé de la piste dans ce secteur. Ceci est néanmoins cohérent avec les estimations de volume en glace du dépôt.

Un voyage d'inspection rapide effectué le 8 mars 2006 a permis de prendre deux mesures d'épaisseur de neige sur le côté ouest de la piste, dans le secteur en déblai, aux chaînages 0+870 et 0+930 m. Les épaisseurs mesurées pour ces deux emplacements étaient respectivement de 0,60 et 0,75 m à 10 m des lumières de piste. Cette couverture nivale n'est pas excessive, mais elle est suffisante pour maintenir le sol à une température moins froide.

4- Diagnostic

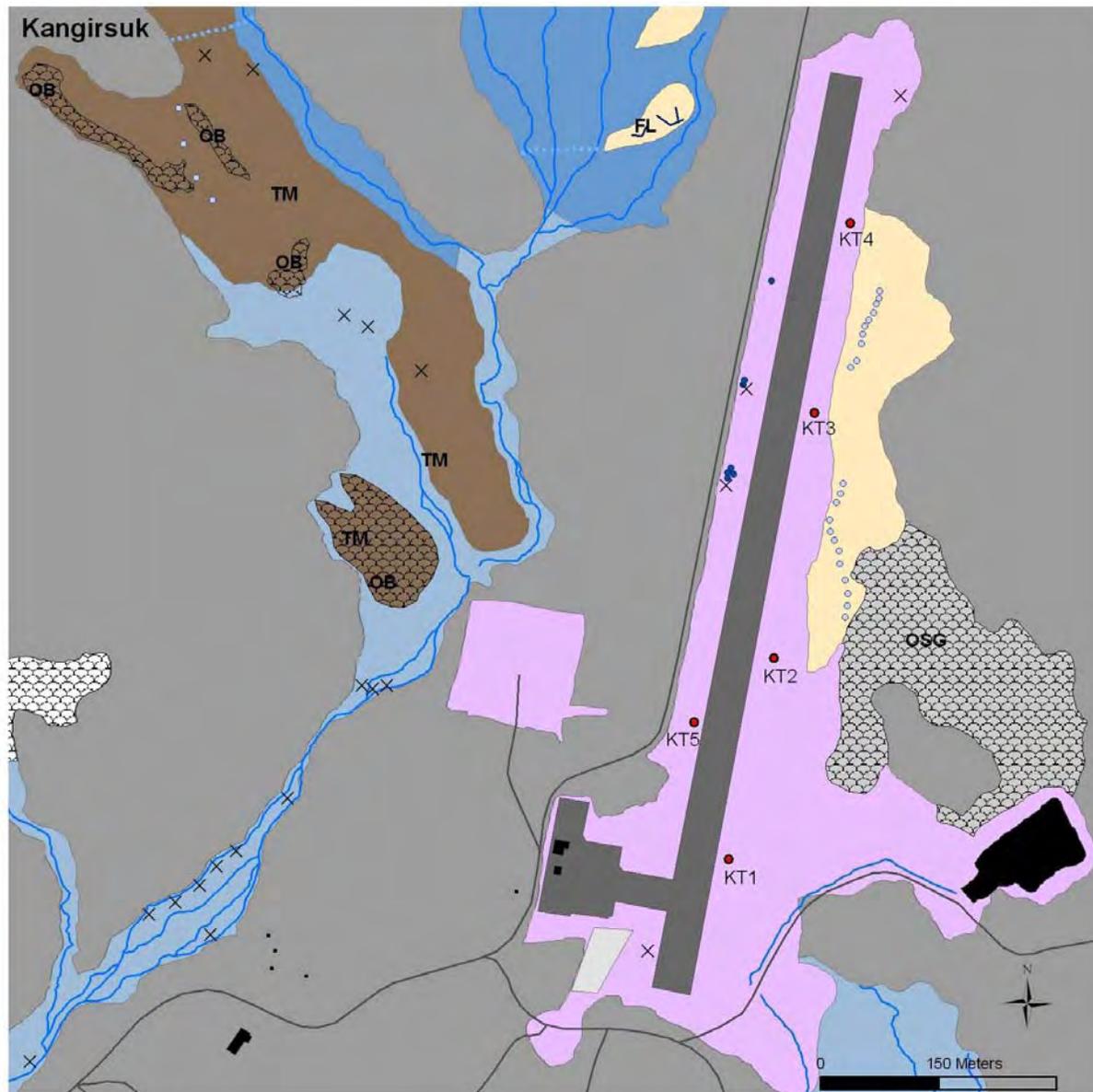
Le seul matériel critique identifié pour la stabilité de la piste est le till de fond. Celui-ci a été rencontré lors des diverses excavations en terrain naturel comme sous la piste. Situé entre 1,0 et 1,40 m sous la surface du terrain naturel, il repose sur le socle rocheux et son épaisseur, bien qu'indéterminée dans la zone en déblai, ne devrait pas excéder quelques mètres. Ce matériel à matrice fine peut avoir des teneurs en glace élevées et provoquer des tassements et du fluage lorsqu'il dégèle. Le tassement se traduit sur la piste par une surface ondulée et par la présence de dépressions et de fissures de tension près des pentes du remblai. Les situations passées et actuelles sont synthétisées dans la figure 103.

D'après les données actuellement disponibles, il est fort probable que les tassements vont se poursuivre sur la piste de l'aéroport de Kangirsuk. Dans le secteur en déblai, à l'emplacement du câble à thermistance, le dépôt de till à matrice fine se poursuit jusqu'à 3 m de profondeur au moins. Si le front de dégel continue à progresser au cours des ans et se rend jusqu'à ce niveau, il devrait se produire encore 30% de tassement sur la tranche de sol à dégeler, soit 24 cm pour une épaisseur de 80 cm (de 2,20 à 3,00 m de profondeur). Les dégradations dans ce secteur surviendront donc au prorata de l'épaisseur de till qui restera à dégeler et de la vitesse d'approfondissement de la couche active, elle-même dépendante du taux de réchauffement climatique. Pour pouvoir quantifier exactement les dégradations potentielles, il est conseillé d'effectuer un ou plusieurs forages dans ce secteur pour connaître la profondeur exacte du roc.

Avec un couvert neigeux inférieur à 80 cm, la neige ne semble pas être un facteur aggravant pour la dégradation du pergélisol sous la piste, tout du moins à cet endroit. Néanmoins, il est recommandé de porter une attention particulière au déneigement de la piste. D'une part en préservant la couche de MG-20 qui est déblayée avec elle, et d'autre part en s'assurant de ne pas entreposer la neige dans la zone en déblai. On préférera plutôt un déblayage vers le secteur nord de la piste qui, reposant sur du roc ou du matériel grossier, ne devrait subir de tassement.



Figure 90 Fissures de tension dans la zone construite en déblai de la piste d'atterrissage de Kangirsuk



Formes périglaciaires

- formes d'éjections rocheuses
- blocs glaciels
- fentes de gel
- ▨ champs d'ostioles sablo graveleuses
- OSG : ostioles sablo-graveleuses
- OB : ostioles à bourrelets

Dépôts fluviatiles

- lits fluviatils à chenaux multiples sur galets et blocs
- drainage diffus à chenaux sur fond de dépôts meubles

Dépôts marins

- sédiments de plage
- sable, graviers et blocs
- FL : flèche littorale
- TM : terrasse marine

Dépôts glaciaires

- till

Roche en place

- roc
- × affleurements rocheux

Infrastructures

- cimetière
- piste
- bâtiment
- route
- excavations à la pelle mécanique
- déblais et terrains remaniés

Hydrographie

- cours d'eau
- ⋯ ligne de rivage soulevé

Photo-interprétation: Cyrielle LAURENT, Michel ALLARD
Réalisation: Cyrielle LAURENT, avril 2006

Figure 91 Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Kangirsuk

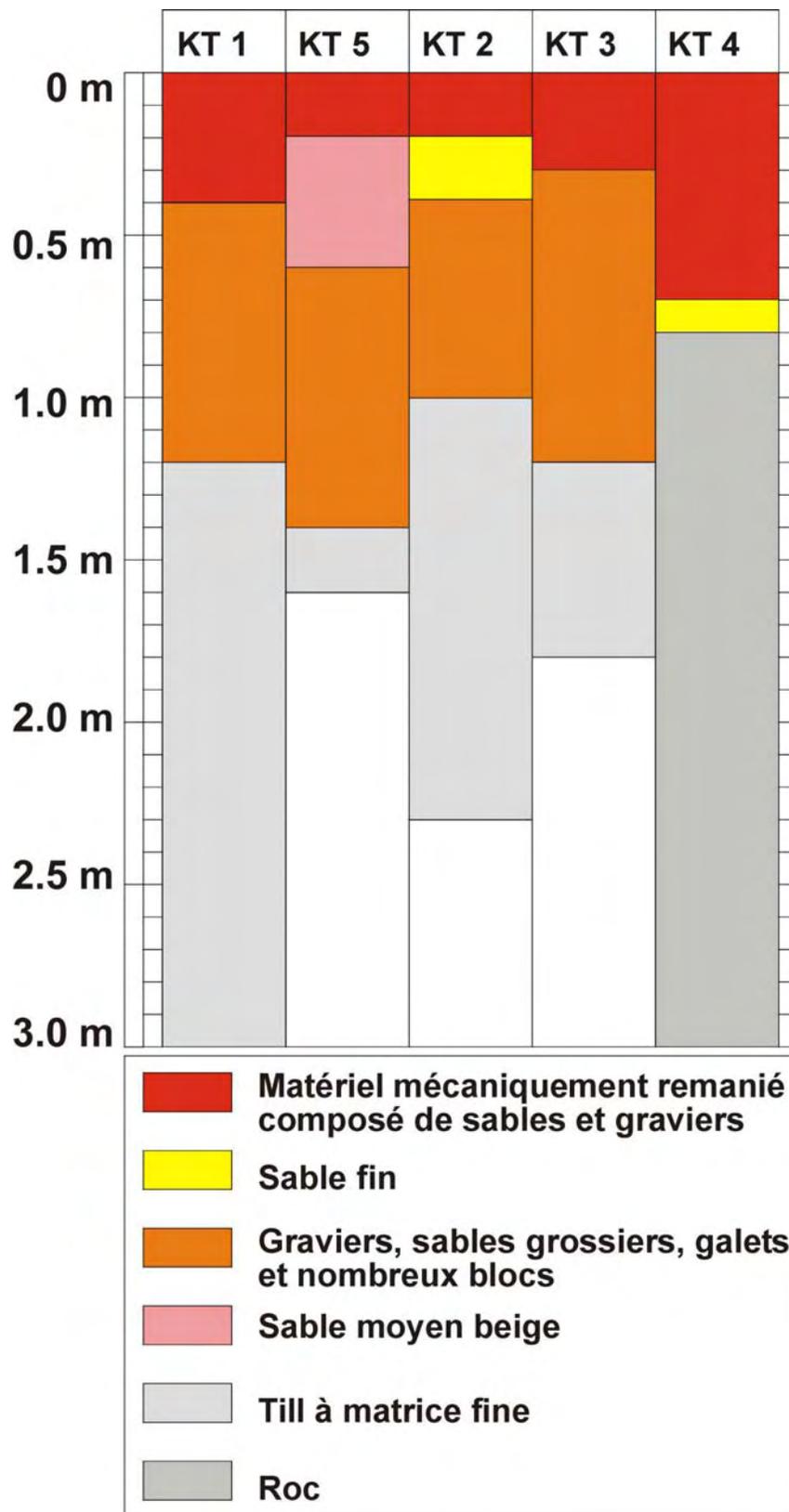


Figure 92 Stratigraphie des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Kangirsuk (présenté du sud vers le nord)

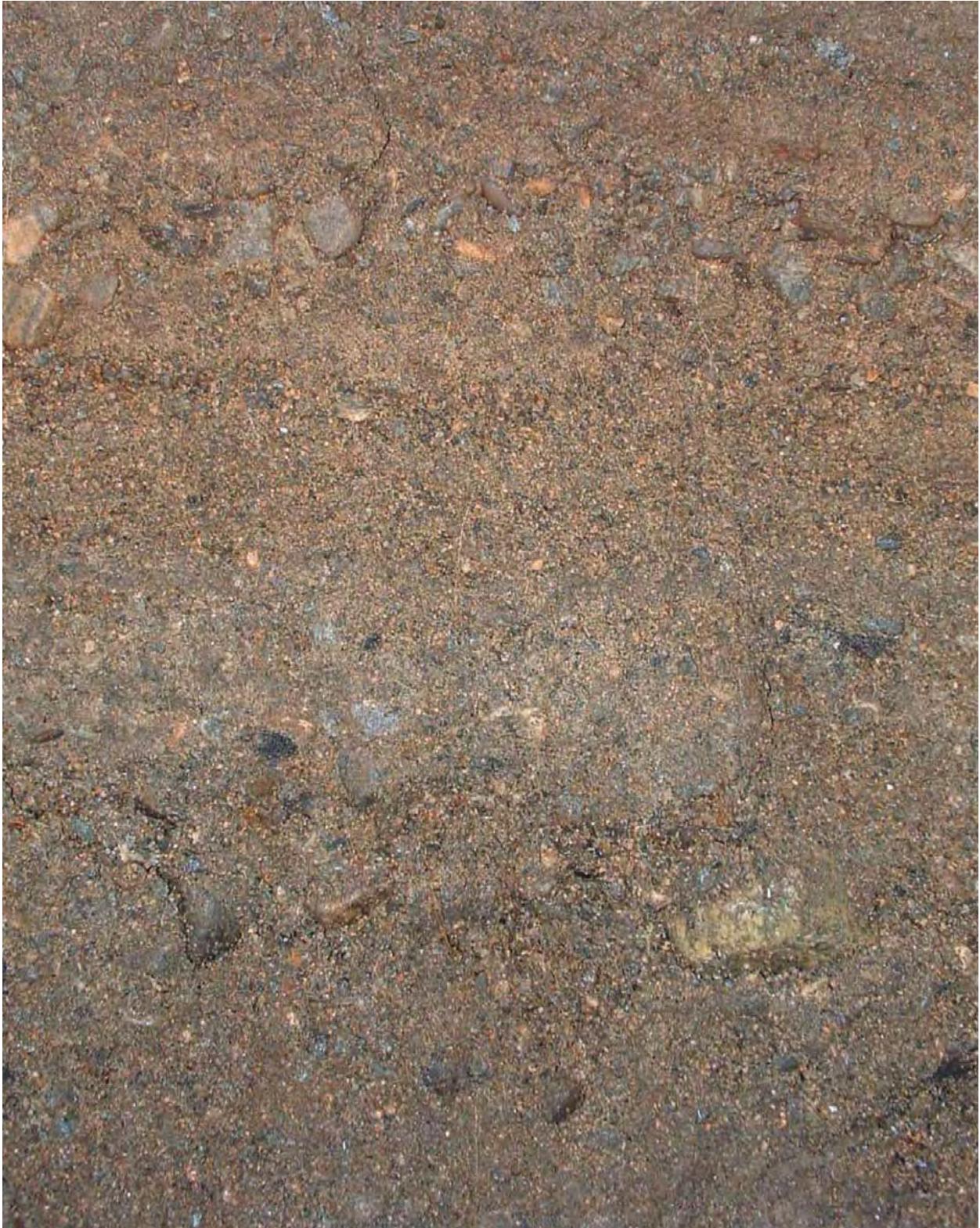


Figure 93 Unité stratifiée de sables grossiers et de graviers, pauvre en glace (faciès de plage)



Figure 94 Till à matrice limono-sableuse riche en glace (sédiment de couleur grise).
a- Excavation à la pelle mécanique ;
b- Le matériel se liquéfiant au dégel.



Figure 95. Excavation faite dans la piste de Kangirsuk le 19 juin 2005

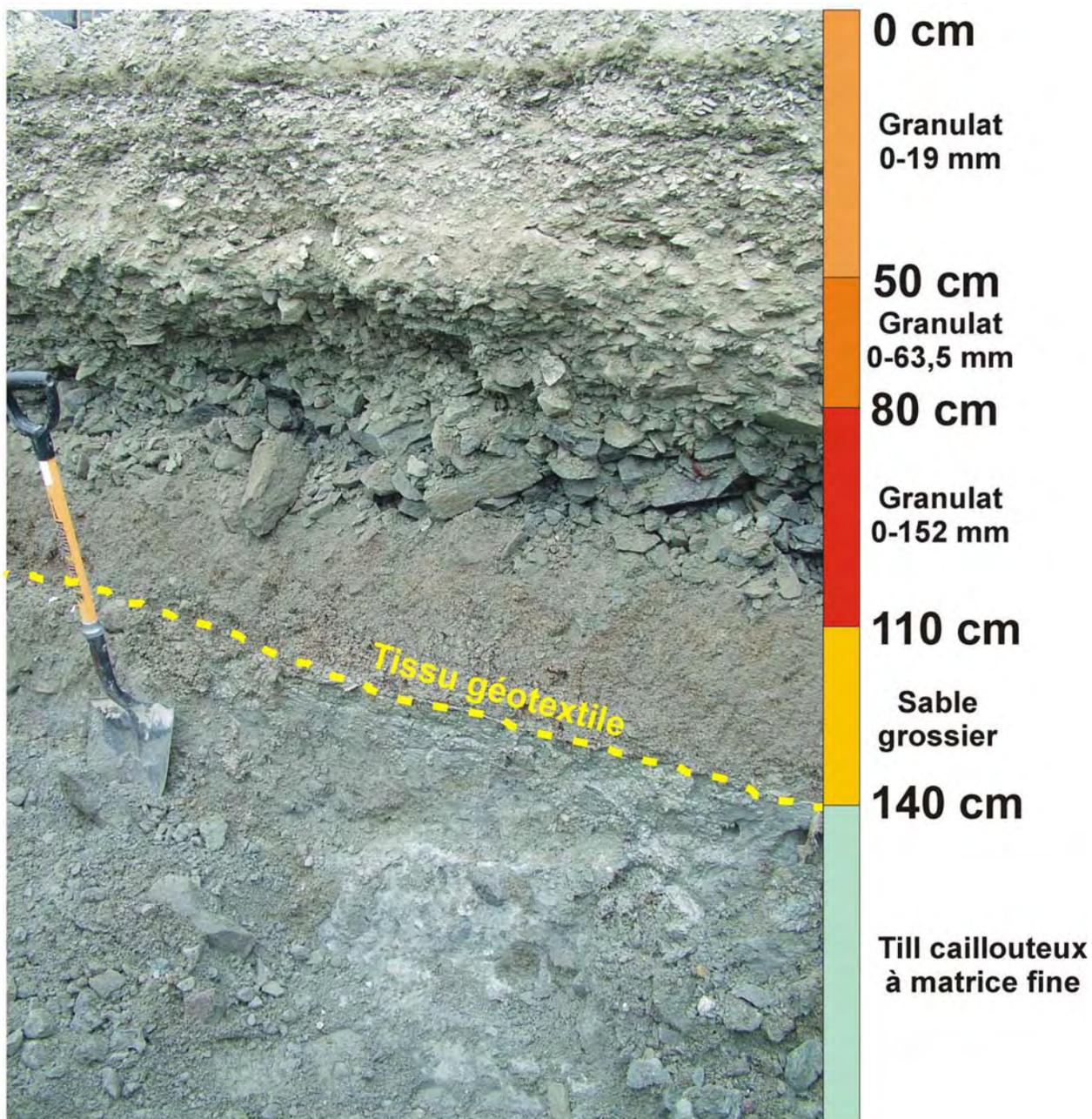


Figure 96 Stratigraphie du remblai et terrain naturel sus-jacent tel qu'observé lors de l'excavation du 19 juin 2005

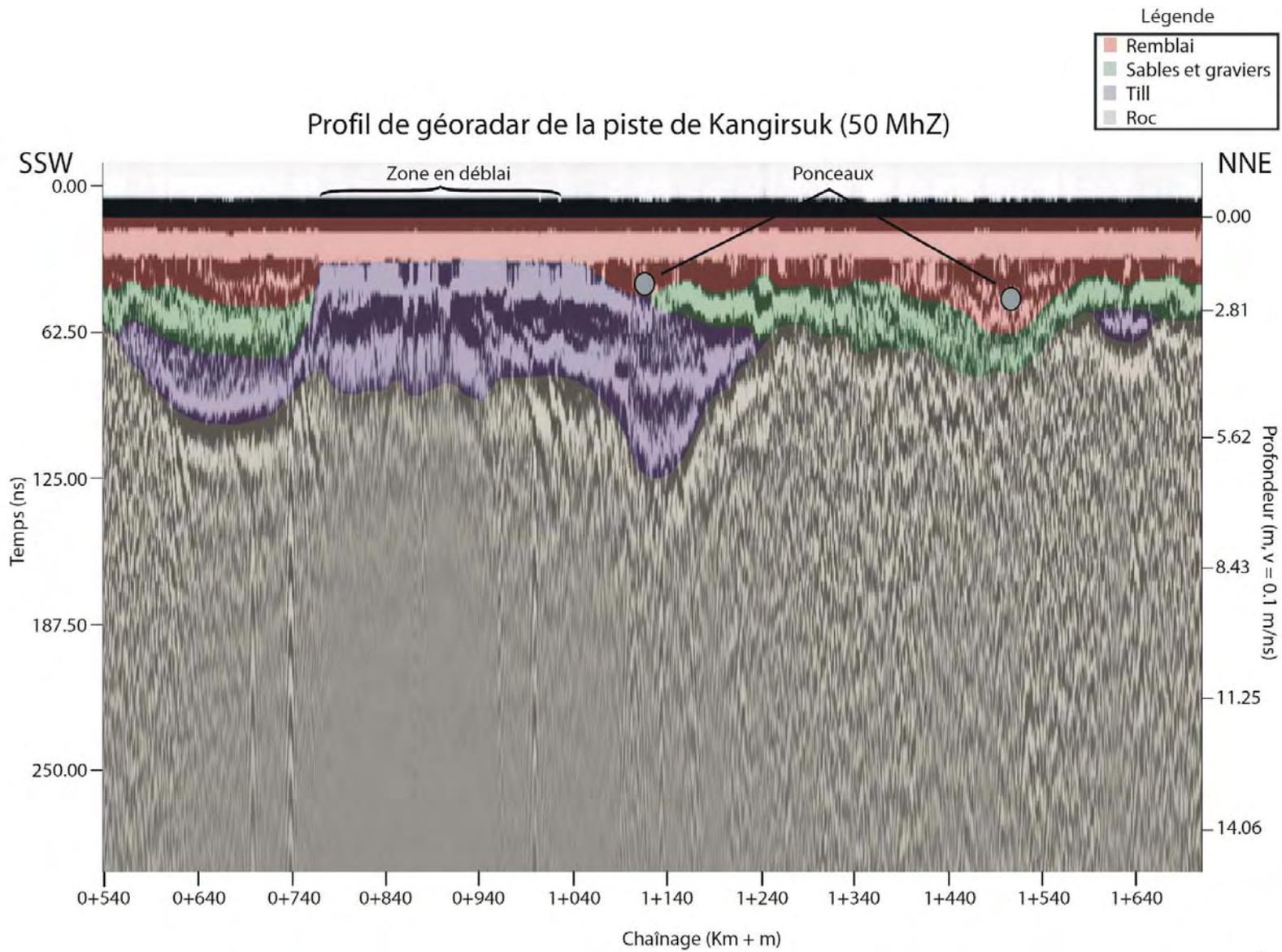
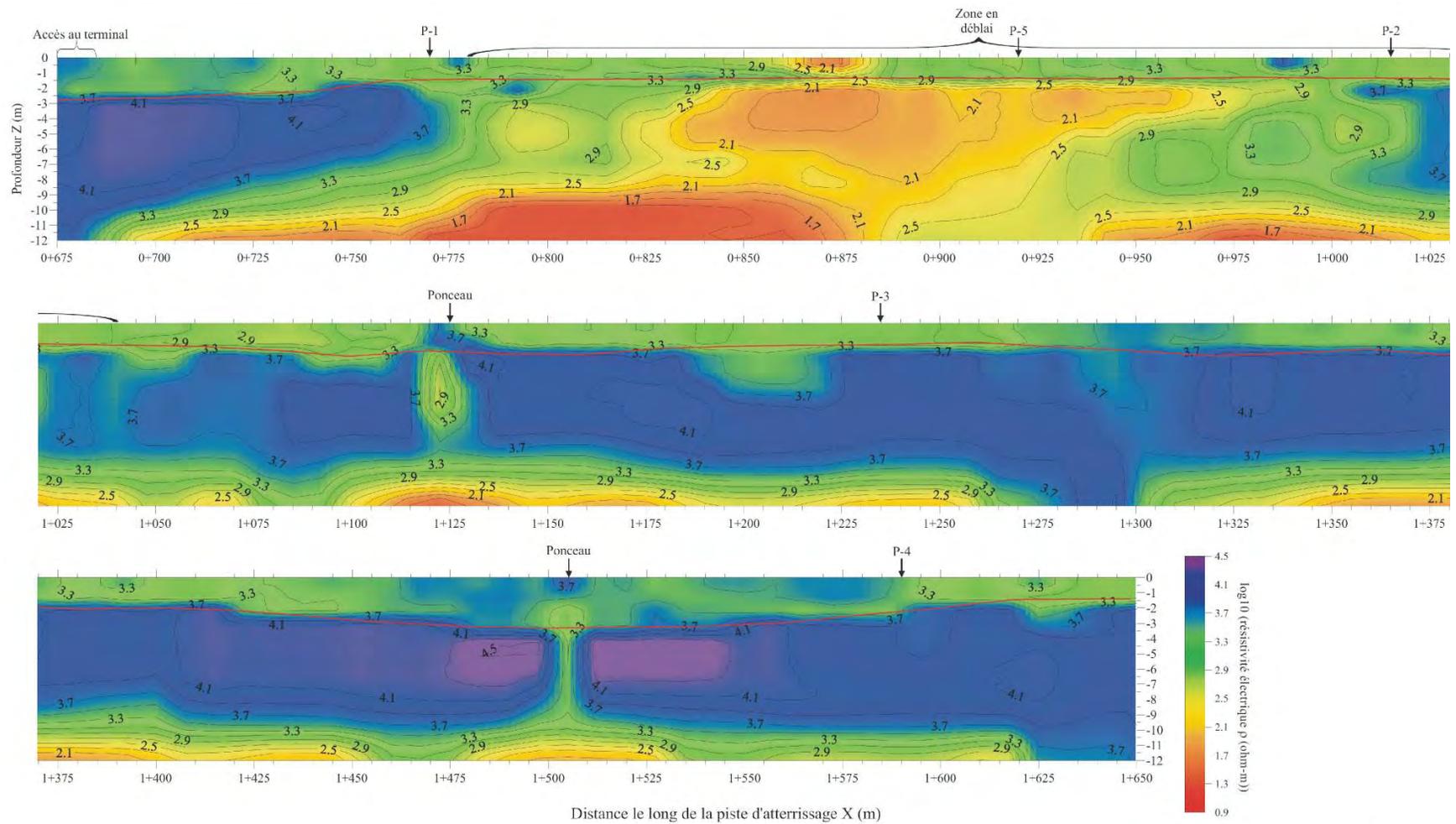


Figure 97 Profil de géoradar de la piste de Kangirsuk à 50 MHz



Auteur : Catherine Savard

Figure 98 Image de résistivité électrique de la piste de Kangirsuk



Figure 101 Ostioles sur la butte de till à l'est de la piste

Kangirsuk (juin-oct 2005)

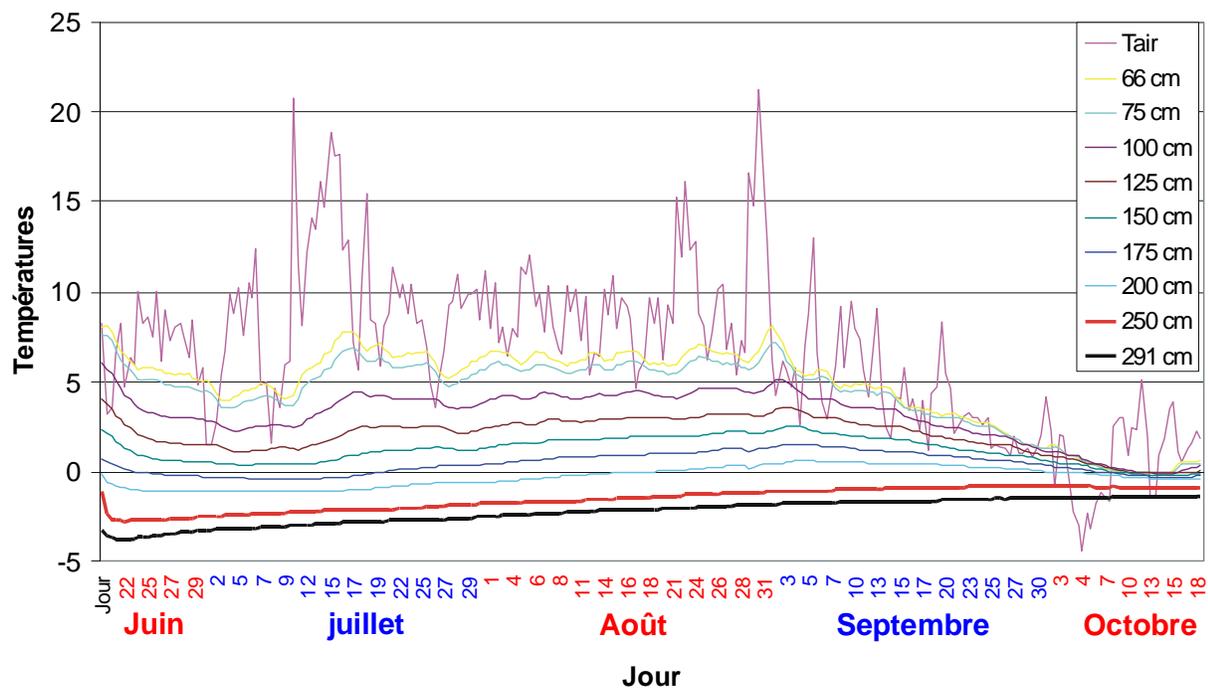


Figure 102 Température de la piste dans la zone en déblai de juin à octobre 2005

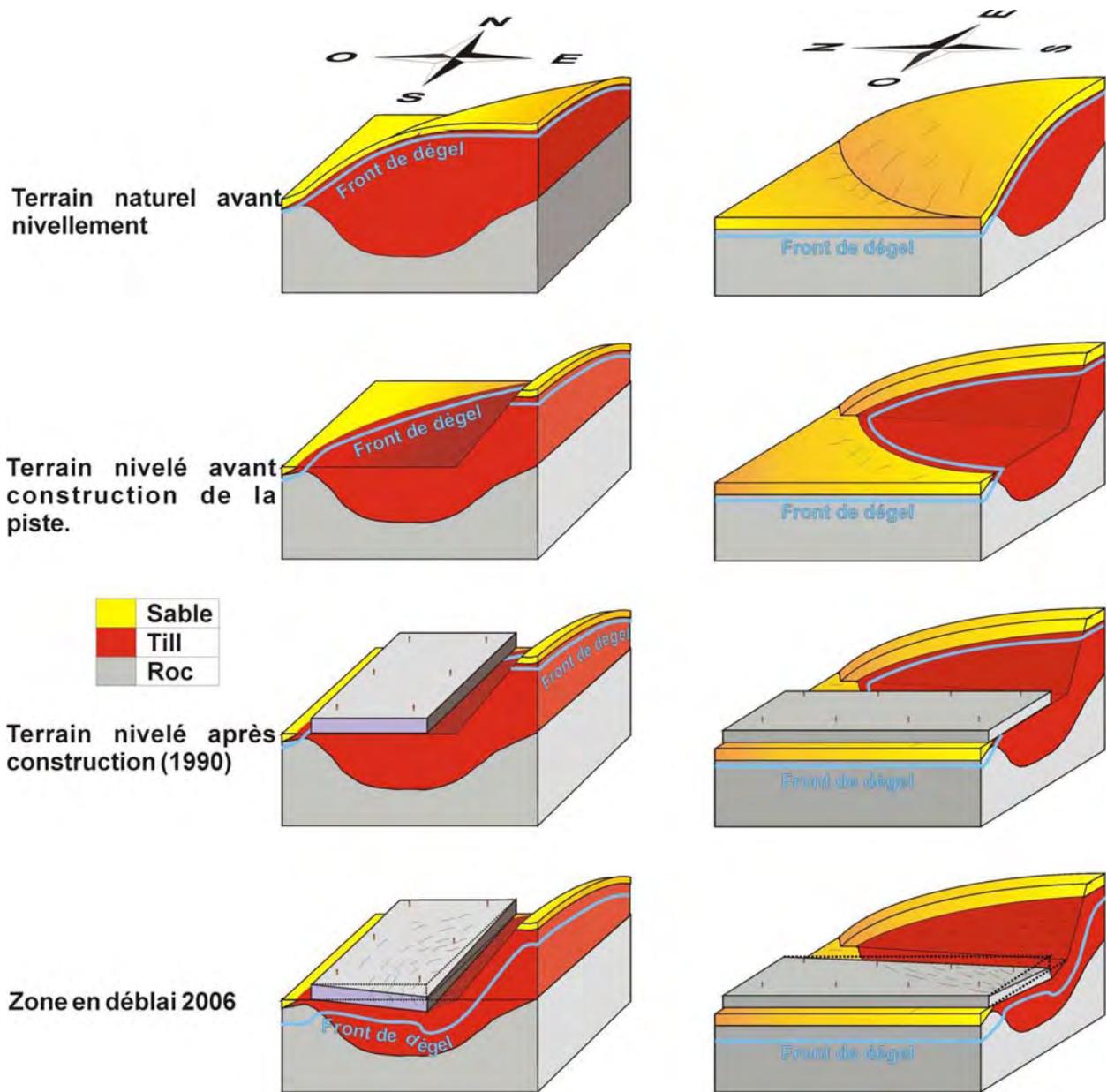


Figure 103 Figure de synthèse sur la condition environnementale de la piste de Kangirsuk

1- Contexte

Le Village :

Située à 150 km au nord de Kujuaq et 80 km au sud de Kangirsuk (59.30 °N ; 69.58 °O), Aupaluk est une communauté de 152 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord). Le village s'est développé sur la rive sud de la Baie de Hopes Advance sur la côte ouest de la Baie d'Ungava. Situé dans la zone de pergélisol continu, Aupaluk a été incorporé en tant que village nordique en 1981.

L'aéroport :

L'aéroport d'Aupaluk ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1990 (d'après les plans « tel que construit »). La piste d'atterrissage, d'une longueur de 1070 mètres (longueur totale de 1180 m, du chaînage 5+060 à 6+240 m) et 40 m de largeur (30 m pour la bande de roulement), est orientée selon un axe nord-est sud-ouest (043-223° N), à une altitude moyenne de 29 m (22 m à son extrémité SO et 36 m à son extrémité NE).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

À date, aucun problème majeur de stabilité n'a été détecté sur cette piste. Selon Beulac et Doré (2005), le remblai de la piste étant très épais et constitué d'un empierrement de gros blocs, cette configuration favorise le refroidissement du remblai par convection d'air et aide au maintien du pergélisol. Le phénomène de convection est d'autant plus efficace que les vides de l'empierrement ne sont pas complètement colmatés par le granulat MG-20.

Des profils d'épaisseur de MG-20 relevés sur la piste ont confirmé que la piste ne présentait pas actuellement de problème de stabilité et d'affaissement majeur. Néanmoins, le profil mesuré longitudinalement au centre de la piste est apparu onduleux, la surface de roulement étant inégale. Des relevés faits transversalement à trois endroits distincts de la piste ont mis en évidence que les granulats s'accumulaient sur les côtés de la surface de roulement, au niveau des lumières de balisage. Une dépression s'est formée au centre de la piste. Deux raisons probables sont avancées pour expliquer ces anomalies : un mauvais nivellement de la piste et les opérations de déneigement.

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

Le village d'Aupaluk a été établi sur une série d'anciennes plages marines (figure 104). Celles-ci ont été soulevées progressivement lors du relèvement isostatique consécutif à la déglaciation. Tout comme le village, dont elle n'est distante que de 400 m, la piste d'atterrissage, la piste traverse différents niveaux de plage. Ces plages sont composées de sable grossier et de gravier et parsemées de blocs glaciels (c.a.d. apportés et déposés par les glaces flottantes).

Dans le secteur de l'aéroport, le sol est sillonné par de nombreuses fissures thermiques qui forment un réseau de plusieurs polygones à coins de glace (figure 104). Ceux-ci ont été cartographiés de manière détaillée, incluant les coins de glaces qui ont été recouverts par le remblai lors de la construction de la piste d'atterrissage (figure 105).

Un profil au géoradar en mode réflexion a été levé au centre de la piste à 50 MHz (figure 106). Ce profil présente des réflecteurs subhorizontaux dans le sol sous la piste : le premier, quasi continu à environ un mètre sous la surface du terrain naturel correspond au plafond du pergélisol au début des années 1990, lors de la construction vers 1,3 m de profondeur (Allard et al., 1994). Le second, un peu plus profond est très net. Sa continuité latérale suggère une surface de contact où le contenu en glace

change abruptement ; l'interprétation la plus plausible est une discontinuité de dégel, c'est-à-dire un niveau plus bas où fut situé le plafond du pergélisol lors d'une période antérieure plus chaude qu'actuellement. On note aussi des réflecteurs paraboliques dus à la présence de blocs glaciels tout le long de la piste et à de diverses profondeurs. Certains réflecteurs paraboliques sont aussi associés à des coins de glace. Par endroits, on constate une atténuation du signal plus en profondeur, notamment entre 5+170 et 5+205 m, entre de 5+310 à 5+325 m, de 5+570 à 5+595 m et entre 5 +700 et 6+170 m.

Un relevé de résistivité électrique a été effectué au centre de la piste d'Aupaluk avec le dispositif OhmMapper (Figure 107). Les valeurs de résistivité électrique varient entre 63 ($10^{1,8}$) et 15 850 ($10^{4,2}$) ohm.m. La résistivité électrique est élevée, soit entre 2 512 ($10^{3,4}$) et 15 850 ($10^{4,2}$) ohm.m sur toute la longueur de la piste mais elle diminue graduellement avec l'augmentation de la profondeur. Cette résistivité élevée est caractéristique des sables et graviers gelés. Une zone de faible résistivité électrique est présente entre les chaînages 5+675 et 6+170 m pour des profondeurs entre 10 et 15 m. Des zones similaires se trouvent également à des profondeurs entre 14 et 15 m. Elles sont situées à des endroits ponctuels et sont localisées entre les chaînages 5+170 et 5+200 m, 5+270 et 5+350 m, 5+440 et 5+475, 5+570 et 5+620 m. Cependant, les informations sur la stratigraphie issues de l'étude du terrain ne permettent pas de déterminer la cause de la faible résistivité électrique. Enfin, l'extrémité sud de la piste a généralement une résistivité électrique plus faible que son extrémité nord, ce qui est dû à une couche moins résistive à plus de 10 m de profondeur. Comme aucun dépôt d'argile marine (dont l'eau interstitielle serait saline) n'a été cartographié ou foré durant les précédents travaux de terrain, la basse résistivité en profondeur résulte vraisemblablement de la présence d'un roc relativement conducteur (possiblement un schiste métamorphique) sous les sables et graviers marins.

Un relevé de résistivité électrique a également été effectué dans le milieu naturel, à ouest de la piste, parallèlement à celle-ci (figure 108). La couche superficielle, de moins de 4 m de profondeur, présente des résistivités électriques relativement élevées et très variables, comprises entre 1 000 (10^3) et 3 981 ($10^{3,6}$) ohm.m. Ces valeurs sont attribuables aux sables et graviers gelés des plages soulevées. Deux zones de résistivité électrique de 15 850 ($10^{4,2}$) ohm.m situées aux chaînages 6+062 et 6+627 m sont associées à la présence de coins de glaces, la glace étant un matériau très résistif. Le milieu devient moins résistif à des profondeurs supérieures à 4 m, la résistivité électrique diminuant jusqu'à des valeurs moindres que 1000 (10^3) ohm.m. La couche profonde peu résistive, probablement le roc, est donc également détectée dans le milieu naturel.

Le milieu naturel est traversé par des coins de glace dont certains se propagent jusque sous la piste, mais ayant une résistivité électrique élevée du fait qu'ils sont constitués de glace massive, ils ne sont pas discernables des sables et graviers gelés qui ont également une résistivité très élevée.

Un profil de géoradar à 200 MHz a été levé dans le milieu naturel (figure 109). La plus haute résolution à cette fréquence permet, comme dans le cas précédent, d'identifier des réflecteurs sub-parallèles à la surface du terrain. Un premier réflecteur de faible intensité représente le front de dégel au moment du relevé à la mi-juillet 2004. Un second réflecteur franc entre 1 et 1,5 m de profondeur (pour une vitesse de propagation de 0,1 m/ns) correspond au plafond du pergélisol. Un autre réflecteur relativement continu à près de 2 m de profondeur correspond vraisemblablement à la discordance de dégel interprétée à 50 MHz sous la piste. Plusieurs réflecteurs paraboliques révèlent la présence des coins de glace transversaux au profil. Seuls les moins équivoques ont été identifiés comme tels. La masse de glace identifiée entre 6+255 et 6+270 m correspond probablement à un coin de glace en coupe longitudinale ou à une intersection entre deux coins de glace. Au-delà de 3 m de profondeur, le signal s'atténue progressivement, quoique l'on puisse encore percevoir des stratifications ondulantes dans les sables marins.

b- Hydrographie et drainage :

La piste intercepte le drainage naturel qui se fait d'est en ouest, en direction de la baie. Un fossé de drainage a été aménagé à l'extrémité sud de la piste, sur son côté est, afin de faciliter l'évacuation de l'eau de fonte des neiges et des précipitations. Au débouché du fossé, le ruissellement provoque une injection d'eau dans le mollisol ce qui entraîne la formation de plusieurs dizaines de buttes cryogènes saisonnières à noyau de glace (frost-blisters) dans le champ au sud-ouest de la piste (figure 110 A et B). Le gonflement en hiver puis la fonte de ces buttes saisonnières provoquent un déchirement du couvert végétal, ce qui avec la répétition du phénomène sur une base annuelle entraîne la formation de

dépansions dans le terrain. Celles-ci vont alors canaliser le ruissellement de surface. Le risque lié à ce phénomène est qu'il peut entraîner un déséquilibre thermique du sol et déstabiliser les coins de glace par leur érosion thermique.

Il est à noter qu'un petit lac jouxte la piste d'atterrissage en haut de pente à un peu moins de 200 mètres de son extrémité nord. Celui-ci se draine partiellement chaque année lors de l'été au travers un réseau de coins de glace en dégradation. Ce drainage s'effectuant par le nord-ouest, l'eau ainsi libérée ne contribue pas à l'hydrographie du secteur proximal de la piste d'atterrissage.

c- Le pergélisol :

De par la nature des dépôts qui les constituent, les terrains pergélisolés traversés par la piste d'atterrissage sont dans l'ensemble peu sensibles au dégel. En effet, les sédiments grossiers qui forment les plages soulevées sont pauvres en glace et stables au dégel, leur teneur en glace ne pouvant excéder, au pire, que de très peu le volume de porosité du matériel. De plus, l'eau interstitielle des sables et graviers de ces terrains n'est probablement pas saline considérant le fait que ces sédiments sont perméables et qu'ils ont été délavés lors de leur émergence.

Dans le secteur de la piste d'atterrissage, deux formes et structures périglaciaires sont rencontrées. Il s'agit des buttes cryogènes saisonnières et de fentes de gel accompagnées de coins de glace. Les buttes cryogènes sont essentiellement situées dans le secteur sud-ouest de la piste d'atterrissage. Là où ils se forment présentement, ils ne posent pas d'inconvénient direct pour la piste. Néanmoins, leur impact sur l'hydrographie peut éventuellement constituer l'origine d'une déstabilisation thermique du pergélisol.

Les coins de glace se retrouvent dans les deux tiers sud de la piste. Ces coins de glace peuvent atteindre quelques mètres de profondeur, quelques dizaines de centimètres de largeur et plusieurs dizaines de mètres de longueur. Certains d'entre eux se propagent sous la piste proprement dite ce qui en fait un facteur critique pour la stabilité de celle-ci.

d- Facteurs climatiques :

Deux câbles à thermistances ont été installés dans le secteur de l'aéroport d'Aupaluk. Le premier câble (Aup294) est situé dans la piste d'atterrissage, au chaînage 5+386 m, à une vingtaine de mètres de l'accotement ouest de la piste. Le câble 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. Le second câble (Aup299) est situé à environ une quarantaine de mètres de l'accotement ouest du remblai de la piste, en vis-à-vis du chaînage 5+384 m. Il constitue donc une station de référence dans le 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 adjoind.

La température atmosphérique moyenne mesurée pour la période de juin 2004 à juin 2005 a été de $-5,8$ °C. Les indices de gel et de dégel pour la même période ont été respectivement de - 3066 et 937 degrés-jours. Les températures atmosphériques mensuelles moyennes mesurées depuis l'installation en juin 2004 apparaissent au tableau 11.

MOIS	Température atmosphérique moyenne mensuelle (°C)
Juillet 2004	9,3
Août 2004	8,7
Septembre 2004	4,9
Octobre 2004	1,3
Novembre 2004	-6,3
Décembre 2004	-21,5
Janvier 2005	-27,53
Février 2005	-22
Mars 2005	-16,3
Avril 2005	-6,1
Mai 2005	0,8

Tableau 11 Températures atmosphériques mensuelles moyennes pour Aupaluk de juillet 2004 à mai 2005

La figure 111 présente les températures du sol acquises sur une période de 15 ans par le câble Aup299 situé dans le terrain naturel non loin de la piste d'atterrissage. Il s'agit là d'un site en milieu naturel non perturbé par l'activité humaine et servant de référence. L'enregistrement thermique fournit des informations sur la tendance climatique à long terme, malgré des manques dans les données. Bien que deux trous de 25 et 35 mois existent dans la période d'acquisition de la dernière décennie, une augmentation des températures peut-être relevée, de l'ordre de 0,7 °C à 19,1 m de profondeur, sur une période de 13 ans soit de -3.4 en 1991 à -2,7 °C en 2004.

En comparaison, le graphique de la figure 112 présente les enregistrements thermiques acquis durant la même période (1990-2005) par le câble de 5 m situé sous la piste (Aup294). Les données sont dans ce cas-ci très fragmentaires et il est difficile de dégager une tendance.

La figure 113 présente un cycle annuel de température dans le champ à côté de la piste pour l'année 2004/2005. Dans ce secteur, le plafond du pergélisol se situe à 2,24 m de profondeur. Sous la piste (Aup294), d'après les températures mesurées au cours de l'année 2004/2005 (Figure 112), le plafond est situé à 2,83 m de profondeur. À cet endroit, le remblai a une épaisseur de 3,6 m ; le dégel n'atteint donc pas le milieu naturel. En moyenne, le remblai de la piste d'atterrissage d'Aupaluk a une épaisseur de 3,5 m, mais celle-ci varie entre 1,1 et 5,4 m d'un bout à l'autre de la piste, le remblai étant moins épais à son extrémité NE. On peut présumer que le dégel saisonnier n'atteint pas le milieu naturel sous une grande partie de la piste et que seul le milieu naturel sous le remblai de la piste à l'extrémité nord de la piste, où le remblai est moins épais, est affecté par un dégel saisonnier. Rappelons que dans ce secteur, les coins de glace sont plus rares, et que le sol est pauvre en glace et peu susceptible au tassement. Les données trop fragmentaires ne permettent pas d'estimer l'épaisseur du mollisol sous la piste lors de la décennie antérieure.

Le début de la saison de dégel ne se manifeste pas de la même manière selon que l'on se situe dans le champ, ou sous la piste. Dans le champ, en milieu naturel (Aup299), la saison de dégel arrive très subitement, et on observe une augmentation rapide des températures les moins profondes (Figure 115). Ce patron de réchauffement se répète d'année en année (Figure 116). Cette hausse est entraînée par la fonte rapide de la couverture neigeuse, ce qui provoque une infiltration subite d'eau de fonte entre fin avril et début mai. Dans un premier temps, la hausse brutale de température est due qu'à un apport subit de chaleur par convection alors que l'eau percole subitement dans le mollisol grossier non saturé. Dans les jours qui suivent, la poussée de chaleur se poursuit par conduction, plus lentement.

Sous la piste, à l'emplacement du câble Aup294, le patron thermique du début de la saison de dégel diffère du champ en milieu naturel du fait que le réchauffement est progressif et se fait uniquement par conduction (Figure 117). Il semble donc que ce secteur de la piste ne soit pas sujet à un apport subit en eau et à une inondation de la structure.

4- Diagnostic

La piste d'atterrissage de l'aéroport d'Aupaluk ne présente pas actuellement de signe de dégradation significatif dû à la fonte du pergélisol.

Néanmoins, il convient d'exercer une surveillance. En effet, de nombreux coins de glace qui l'avoisinent et passent sous son remblai quelques fois de bord en bord, constituent un facteur critique préoccupant pour sa stabilité future. Il convient de porter une attention toute particulière aux conditions de drainage du terrain afin d'éviter la concentration du ruissellement de surface imputable à la fonte des neiges le long des coins de glace situés en marge de la piste. Le fossé doit pouvoir continuer de bien dévier et canaliser l'eau de ruissellement vers l'extrémité sud-ouest de la piste et empêcher qu'un écoulement suive un coin de glace en dessous. En effet, un écoulement d'eau dans les coins de glace peut entraîner leur fonte catastrophique par érosion thermique. Si le phénomène atteint les coins de glace situés sous la piste, ceci pourrait être la cause de multiples détériorations et affaissements.

De tels phénomènes d'érosion thermokarstiques ont été observés sur les rives du petit lac situé au nord de l'enceinte de l'aéroport (Figure 104). Ils sont cause des baisses soudaines du niveau du lac qui se sont produites en octobre 2002, en août 2003 et au cours des étés 2004 et 2005.

Le front de dégel est situé dans le remblai sur la majeure partie de la piste. Cependant, le remblai est beaucoup moins épais entre les chaînages 5+070 et 5+200 m, où le front de dégel pénètre dans le milieu naturel sous-jacent. Comme la piste repose sur un sol non gélif, ceci n'est pas critique. Par contre, si le réchauffement climatique se poursuit, le mollisol pourrait pénétrer dans le milieu naturel, notamment là où sont situés les coins de glace ce qui pourrait les amener à fondre. Dans ce cas, des tassements pourraient alors se produire.

La figure 118 synthétise la problématique des coins de glace pour la piste d'atterrissage d'Aupaluk. Advenant une dégradation des coins de glace pour une raison hydrographique ou climatique, la piste pourrait être significativement endommagée.

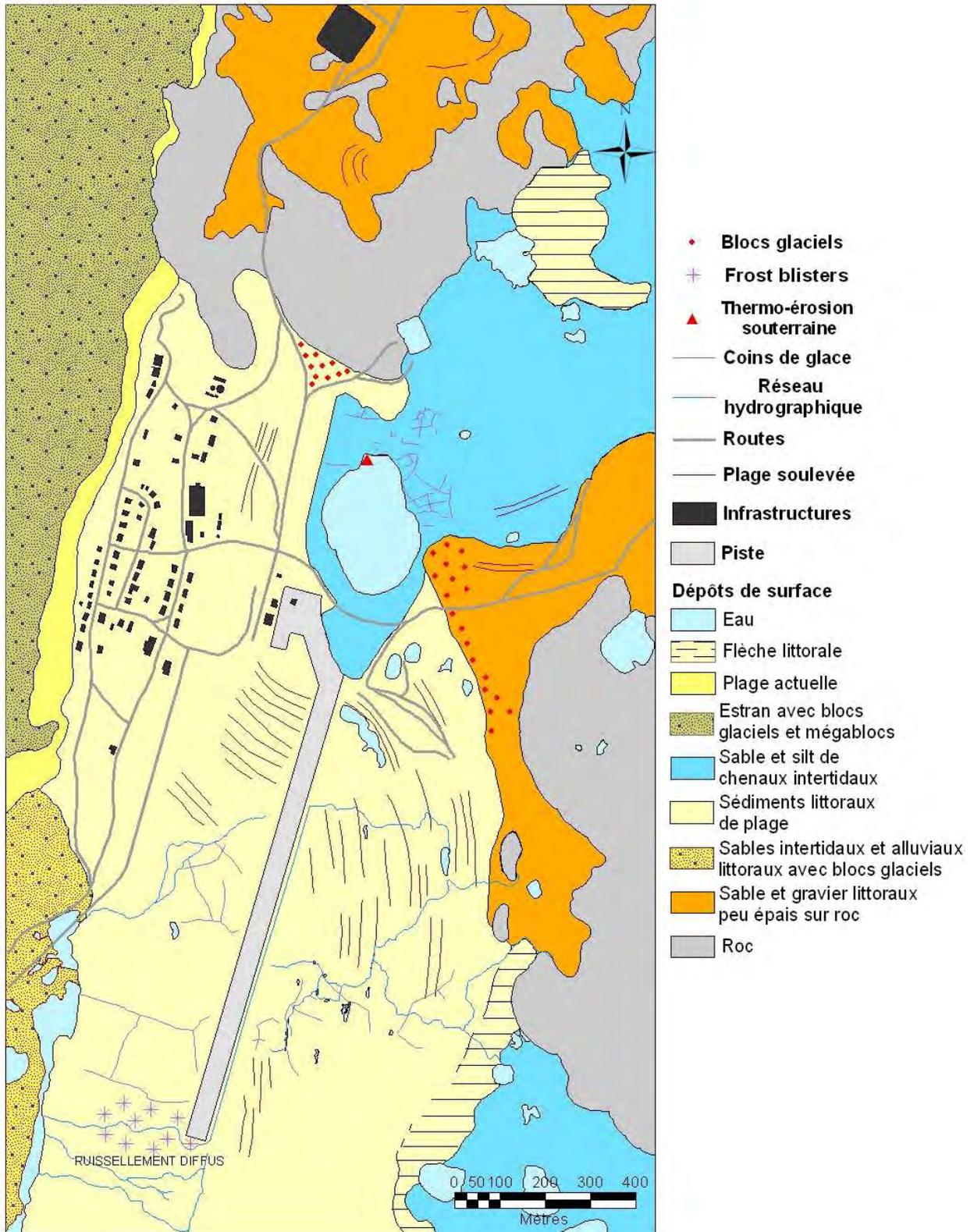


Photo-interprétation: O. Beaulieu

Figure 104 Carte des dépôts de surface de l'aéroport d'Aupaluk



Figure 105 Coin de glace passant sous la piste d'atterrissage d'Aupaluk

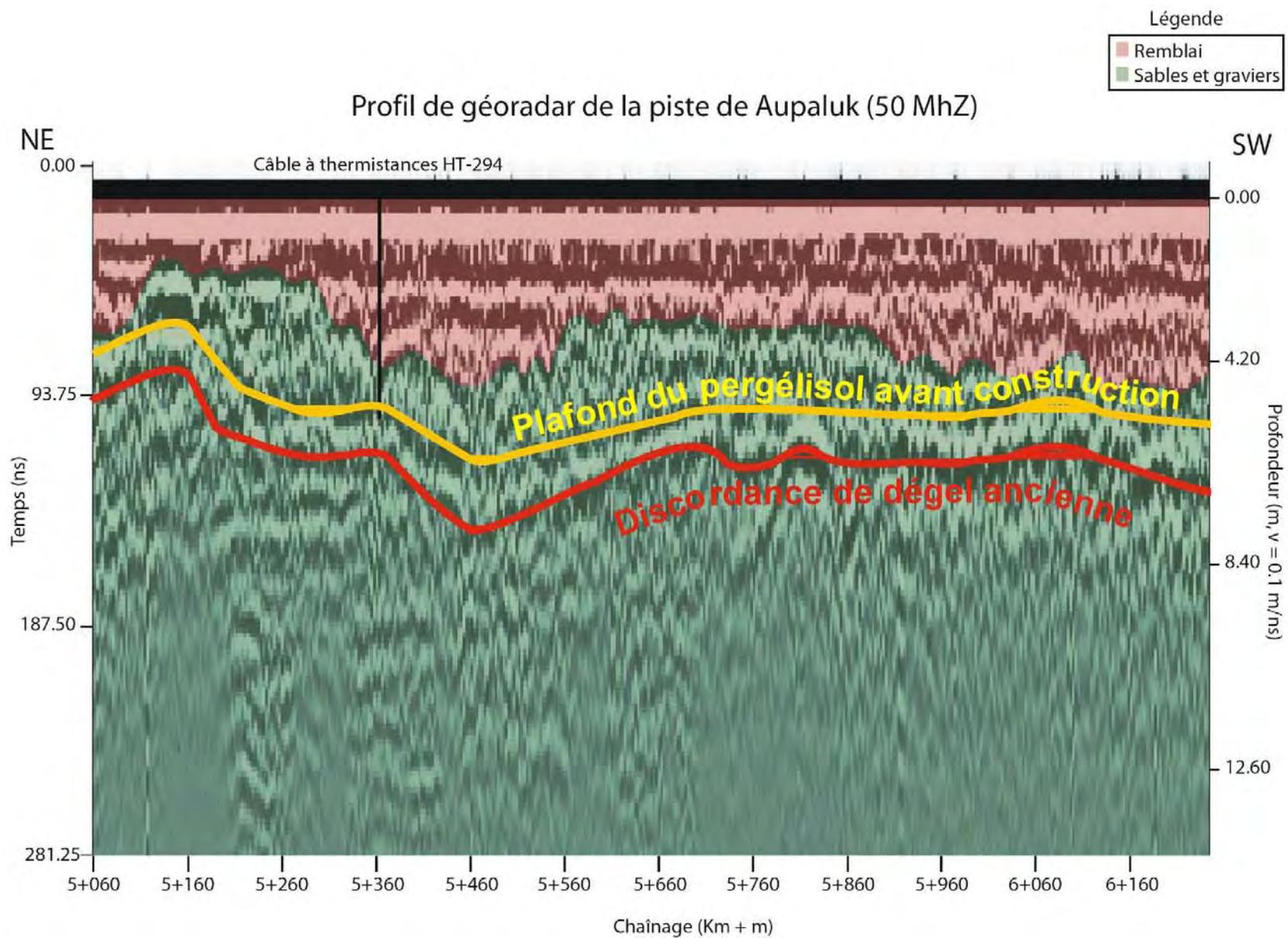
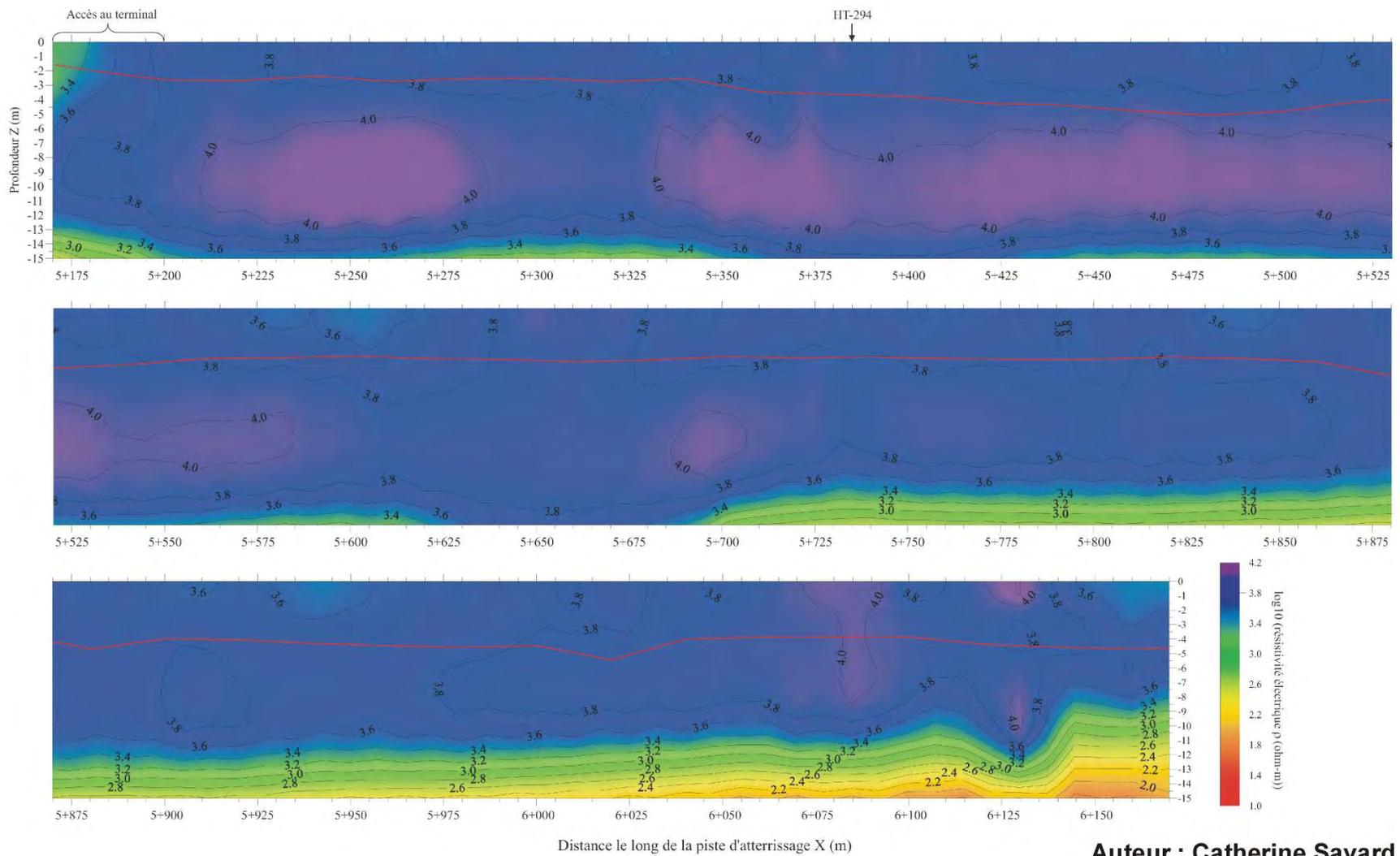


Figure 106 Profil de géoradar de la piste d'Aupaluk à 50 MhZ



Auteur : Catherine Savard

Figure 107 Image de résistivité électrique de la piste d'Aupaluk

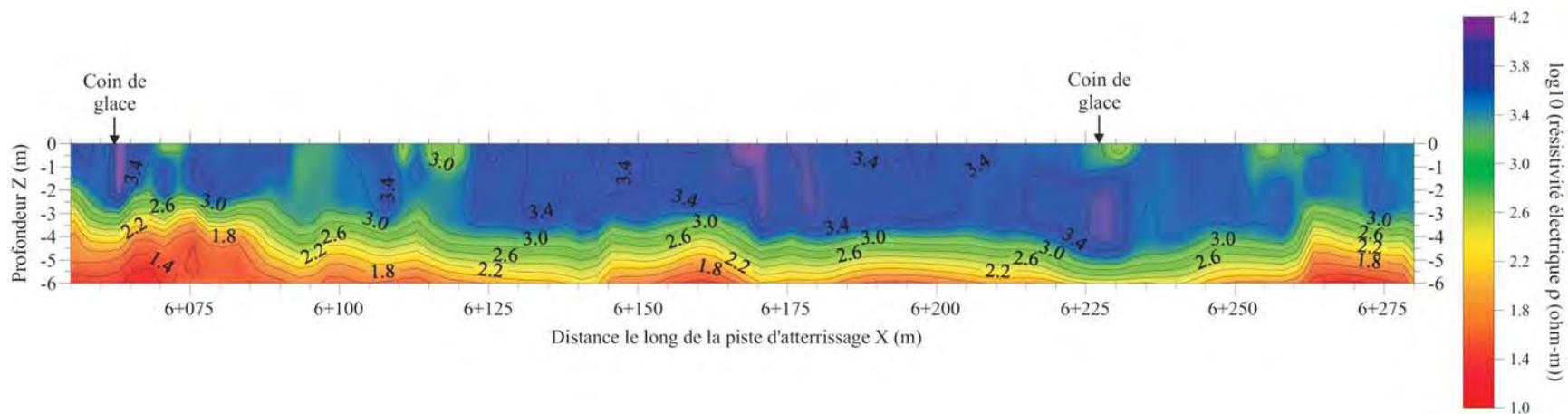


Figure 108 Image de résistivité électrique du milieu naturel d'Aupaluk

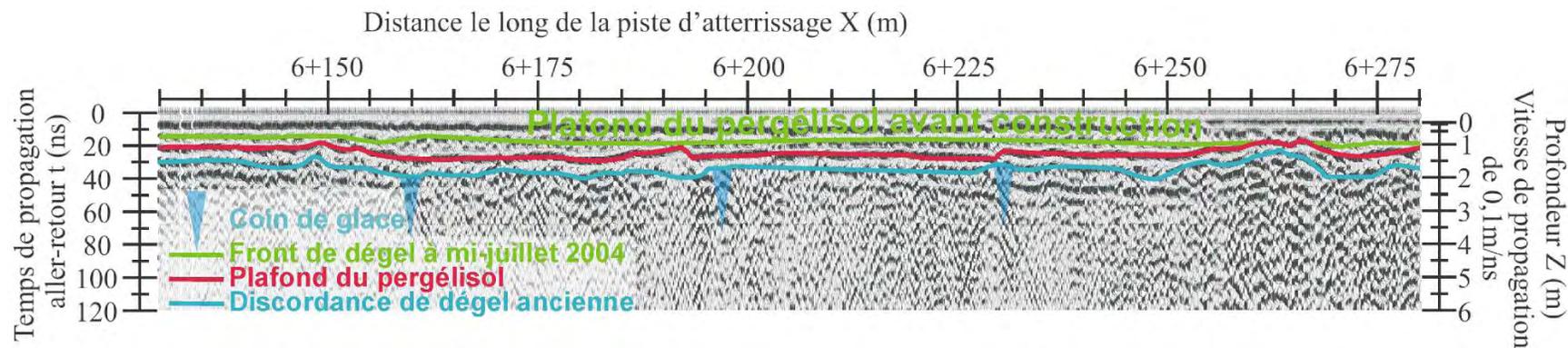


Figure 109 Profil de géoradar en mode réflexion de 200 MHz du milieu naturel d'Aupaluk

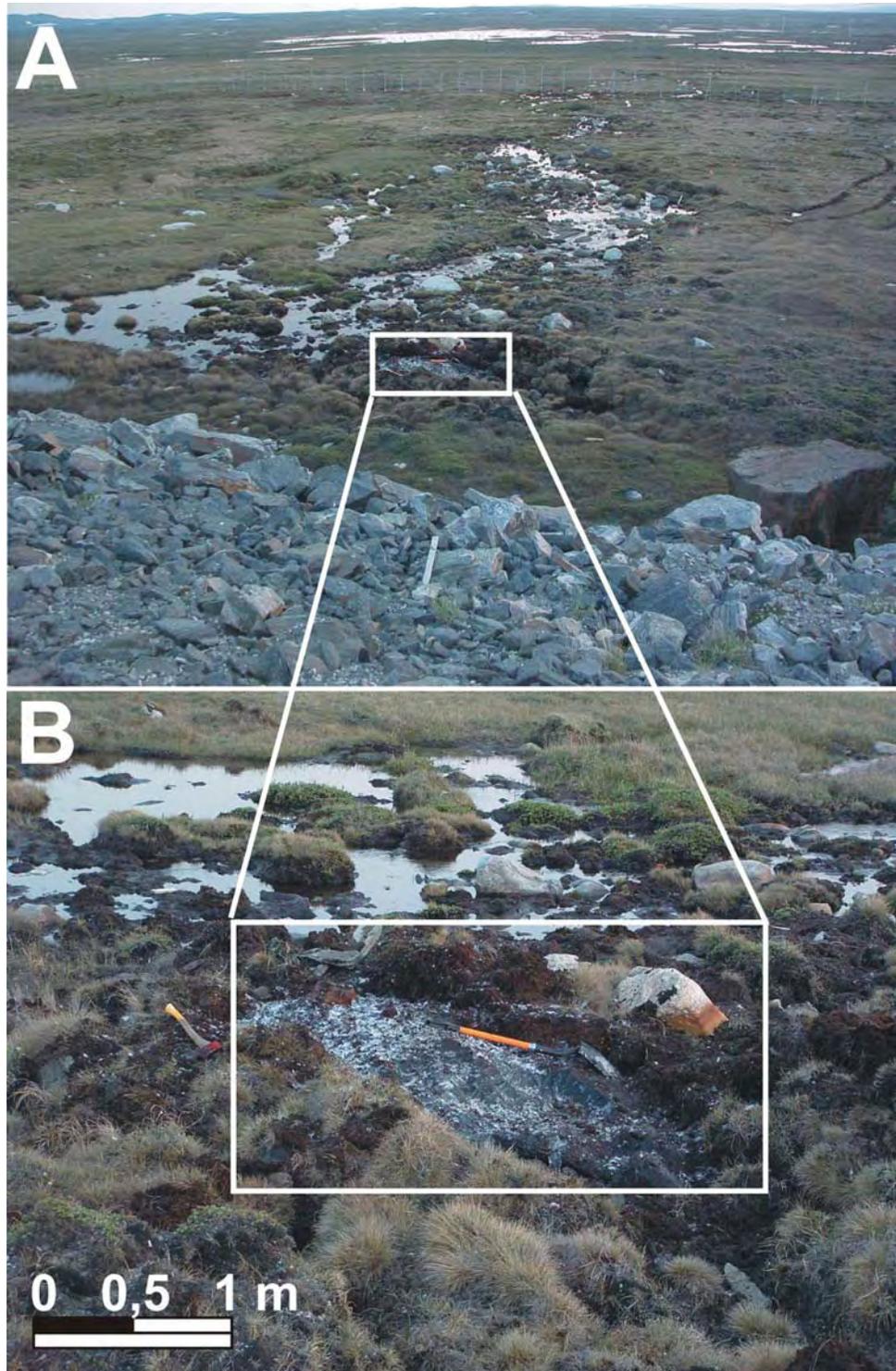


Figure 110 Drainage dans le secteur sud-ouest de la piste d'atterrissage d'Aupaluk

a- Zone de buttes cryogènes saisonnières à la sortie du canal de drainage;
b- Noyau de glace constituant une butte cryogène (frost blister).

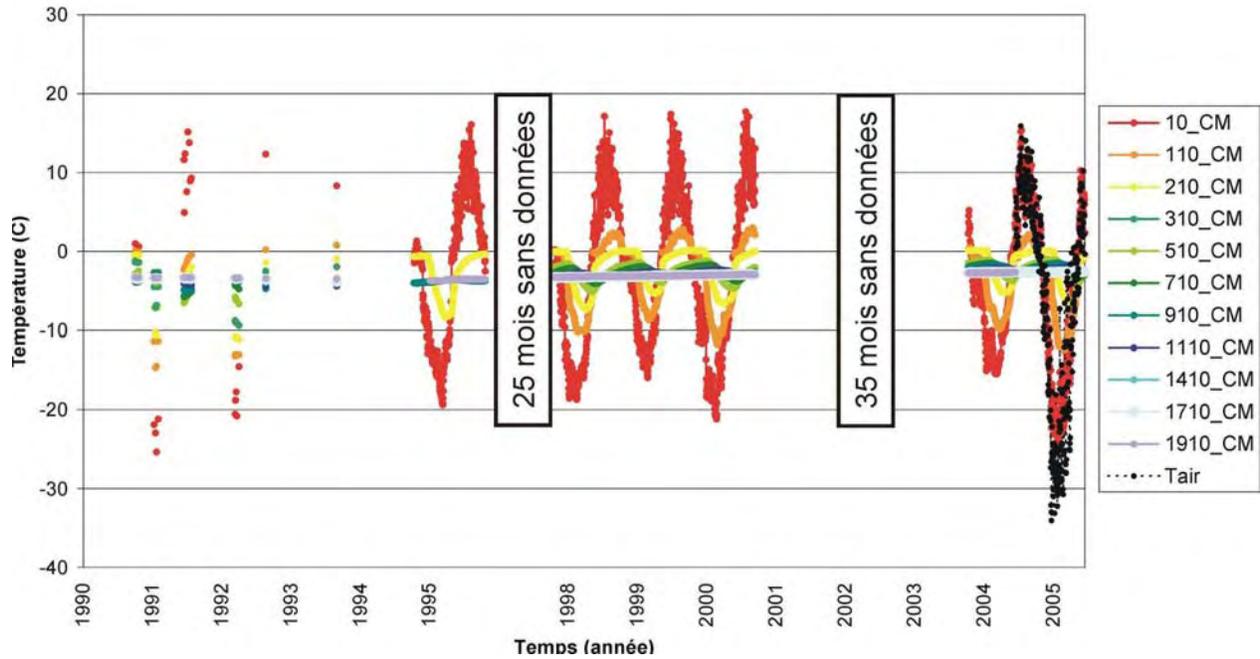


Figure 111 Température du sol pour le câble Aup299 de 1990 à 2005 (site de référence hors piste).

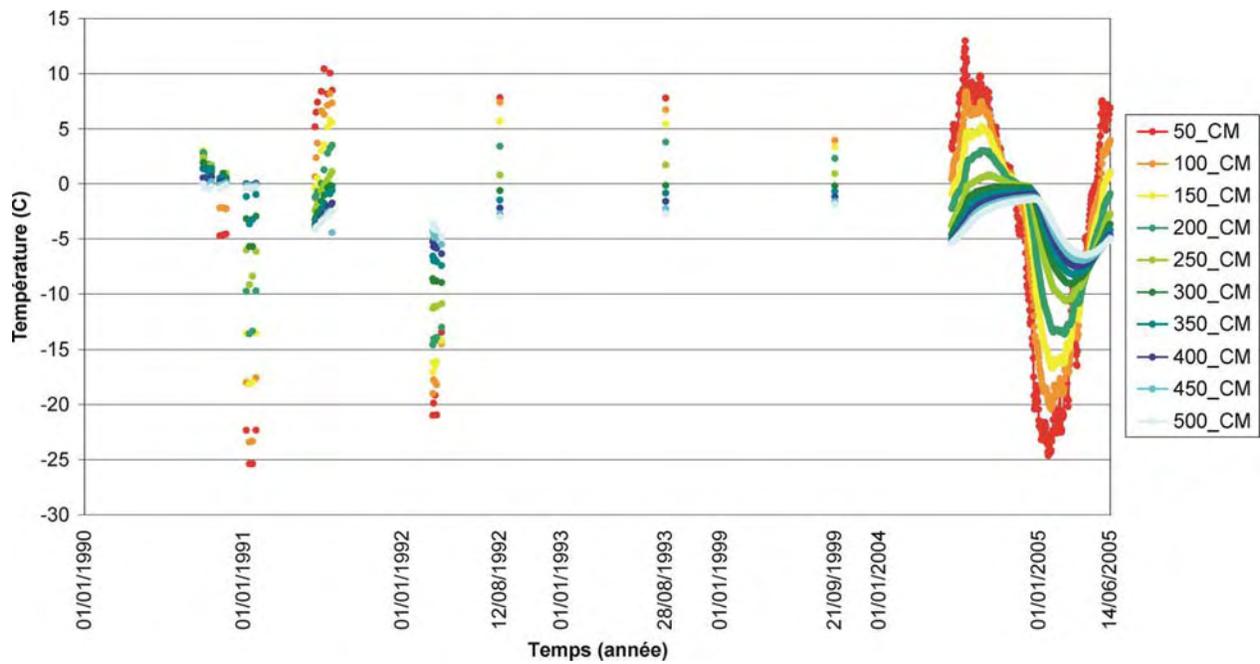


Figure 112 Température du sol pour le câble Aup294 de 1990 à 2005 (piste).

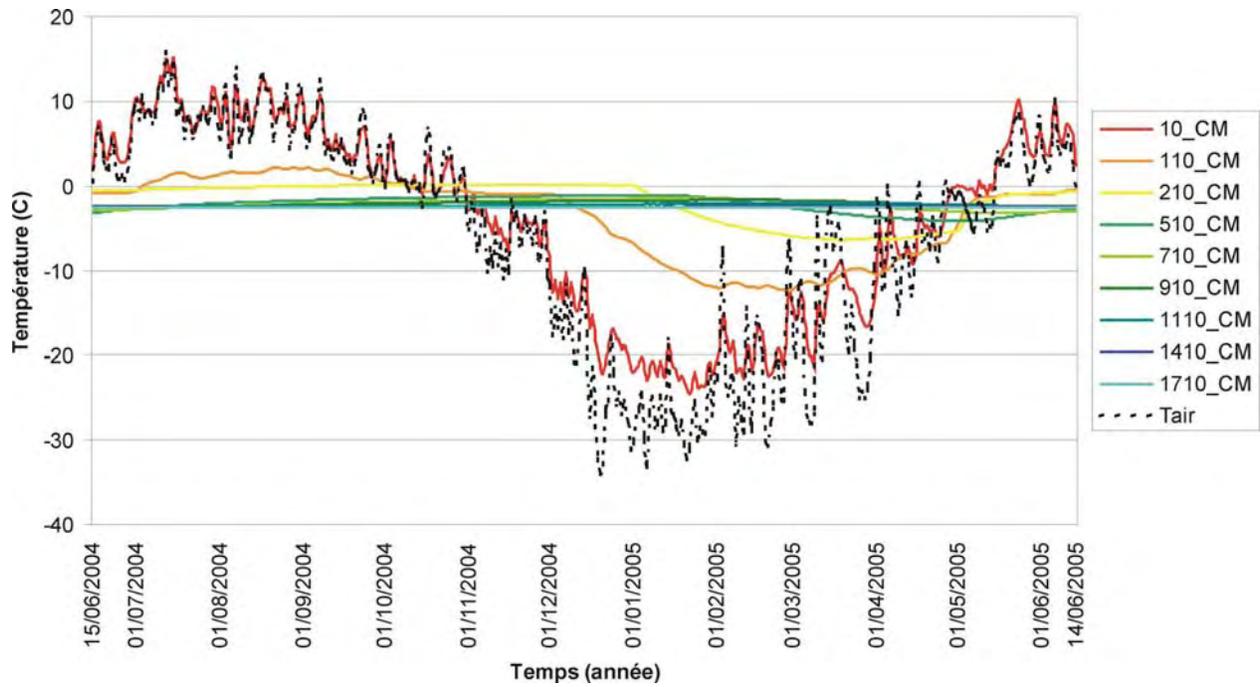


Figure 113 Température du sol pour le câble Aup299 (hors piste) de juin 2004 à juin 2005

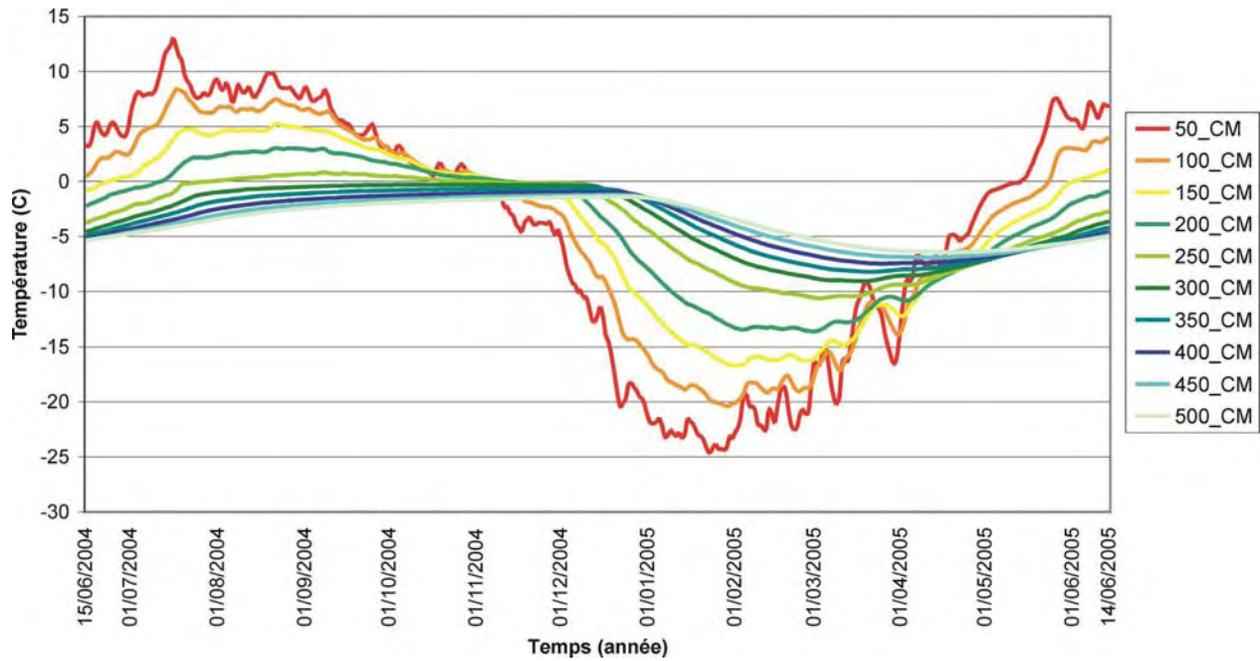


Figure 114 Température du sol pour le câble Aup294 (dans piste) de juin 2004 à juin 2005

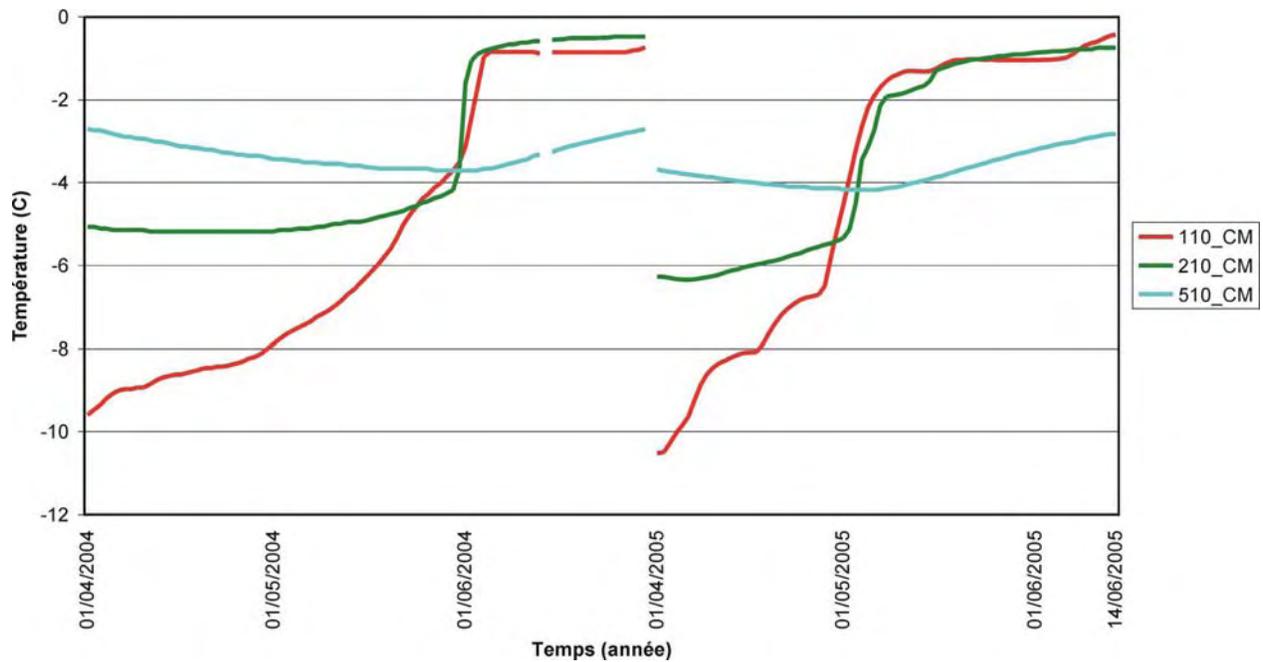


Figure 115 Température du sol pour le câble Aup299 (hors piste) pour les printemps (avril-mai-juin) de 2004 et 2005

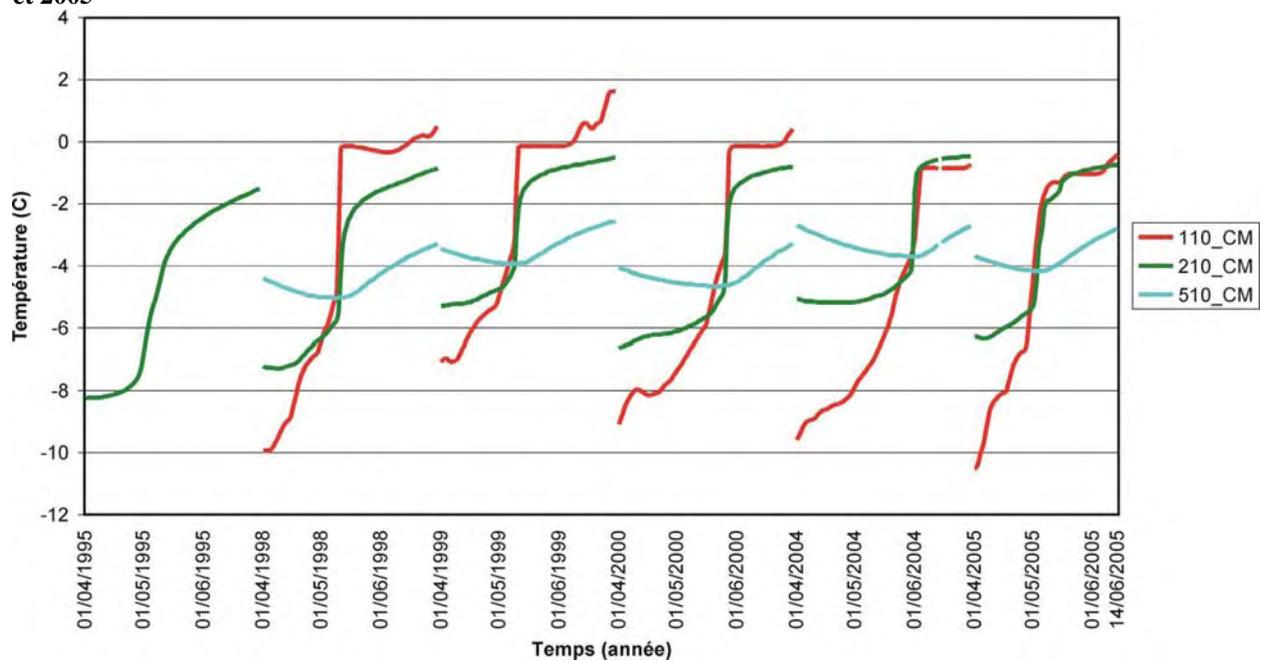


Figure 116 Température du sol pour le câble Aup299 (hors piste) pour les printemps (avril-mai-juin) de 1995, 1998, 1999, 2000, 2004 et 2005

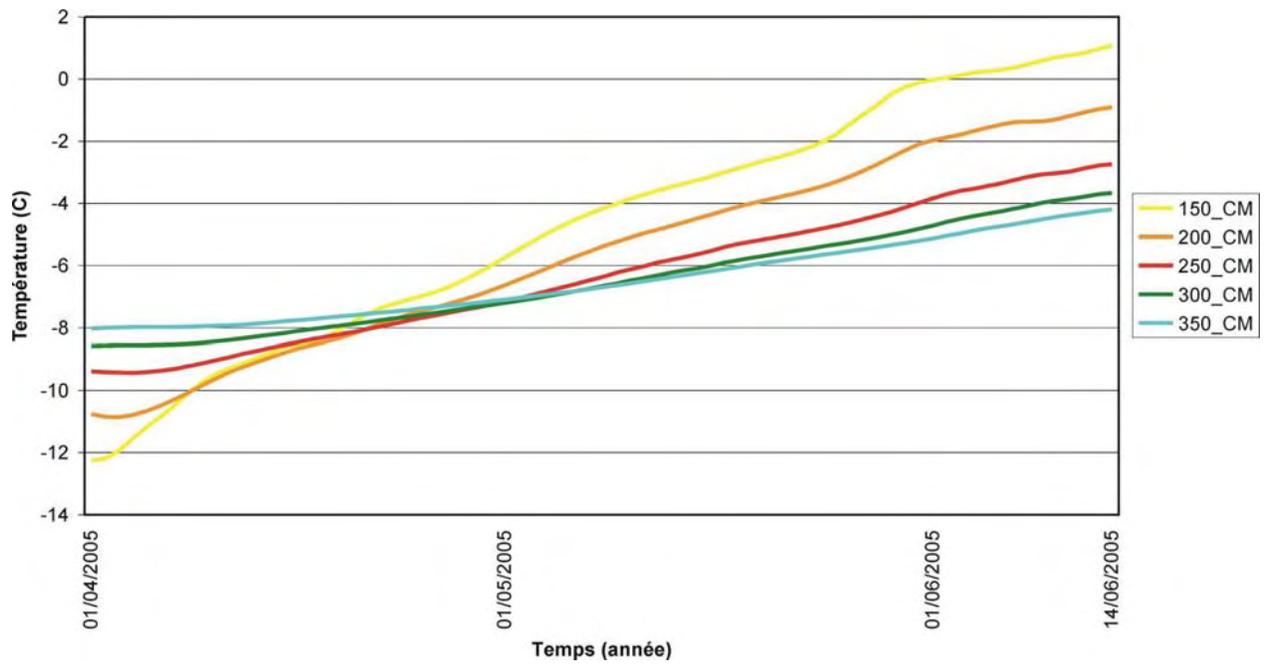
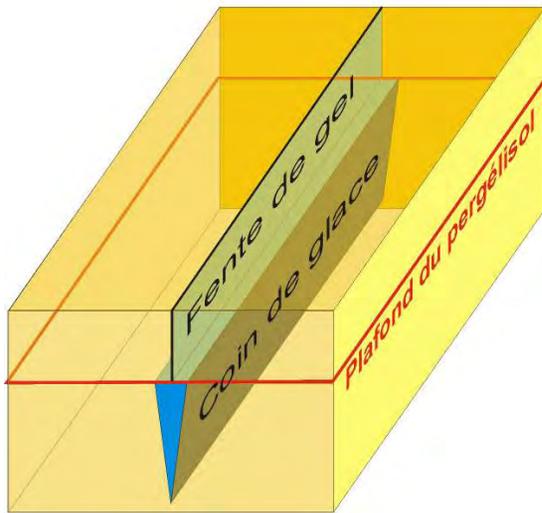
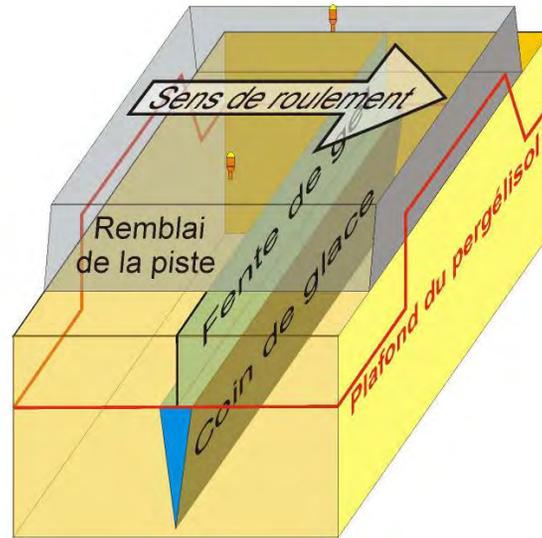


Figure 117 Température du sol pour le câble Aup294 (piste) pour le printemps 2005 (avril-mai-juin)

**Situation
initiale**



**Situation
actuelle**



**Situation
si dégradation**

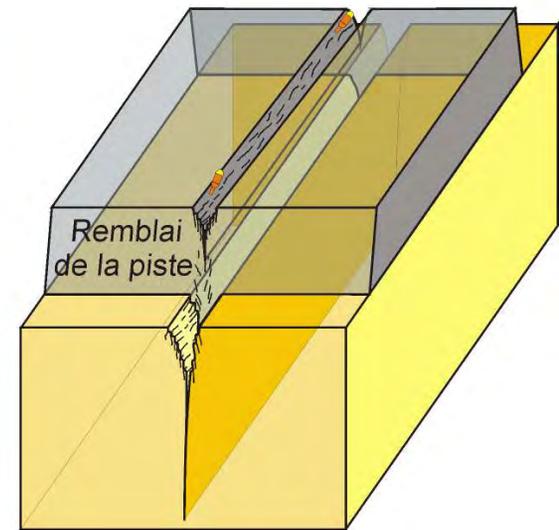


Figure 118 Diagramme synthèse de la situation de la piste d'Aupaluk

TASIUJAQ

1- Contexte

Le village :

Situé à 110 km au nord-est de Kuujjuaq et 80 km au sud d'Aupaluk, le village de Tasiujaq a été établi sur les rives de la baie aux Feuilles, au fond de l'anse Profonde. Le village est situé sur la rive nord de la rivière Bérard, à son embouchure. La communauté, qui compte 237 habitants (Affaires Indiennes et du Nord Canada) est constituée en village depuis 1971.

L'aéroport :

L'aéroport de Tasiujaq ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1990. La piste d'atterrissage, d'une longueur effective de 1070 mètres (longueur totale de 1180 m, du chaînage 4+940 à 6+120 m) et 44 m de largeur, est orientée selon un axe nord-est sud-ouest (057-237° N), à une altitude moyenne de 34 m (32 m à son extrémité NE et 37 m à son extrémité SO).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

La piste d'atterrissage de Tasiujaq présente plusieurs tassements différentiels répartis sur toute sa longueur. Cependant, ceux-ci affectent davantage son accotement est.

D'après Beaulac et Doré (2006), les profils des épaisseurs de MG-20b indiquent qu'il y a eu peu de tassement au centre de la piste, mais que ses bordures ont été plus touchées par les processus de dégradation. Les affaissements les plus notables sont situés à proximité de la voie de circulation, approximativement au chaînage 5+225 m (Figure 119). Des fissures de tension accompagnent la dépression, d'une largeur de 35 m, qui se propage jusqu'au centre de la piste et peut atteindre 50 cm de profondeur par rapport à la surface originale (Figure 119 C). On note également la présence de mares au pied du remblai (Figure 119 D et 119 E). La piste est affectée aussi de nombreux tassements, surtout sur ses bords, des deux côtés à son extrémité sud-ouest au-delà du petit lac qu'elle traverse (du chaînage 5+810 au chaînage 5+860 m). D'autres affaissements accompagnés de fissuration ont été observés de part et d'autre de la voie de circulation, ainsi qu'à proximité de l'anémomètre, aux environs du chaînage 5+995. Ce dernier tassement, d'à peu près un décimètre de profond pour une largeur de 15 m s'étend d'un bord à l'autre de la piste.

De grandes quantités de MG-20b recouvrent les talus de la piste tandis que beaucoup de cailloux se retrouvent dans les champs avoisinants (Figure 119 F). Ceci est dû au déneigement par la grappe et la souffleuse durant l'hiver. Enfin, il est à noter qu'un rechargement partiel de la piste en granulats (MG-20) a eu lieu en juillet 2004, lors de notre principale période de travaux sur le terrain.

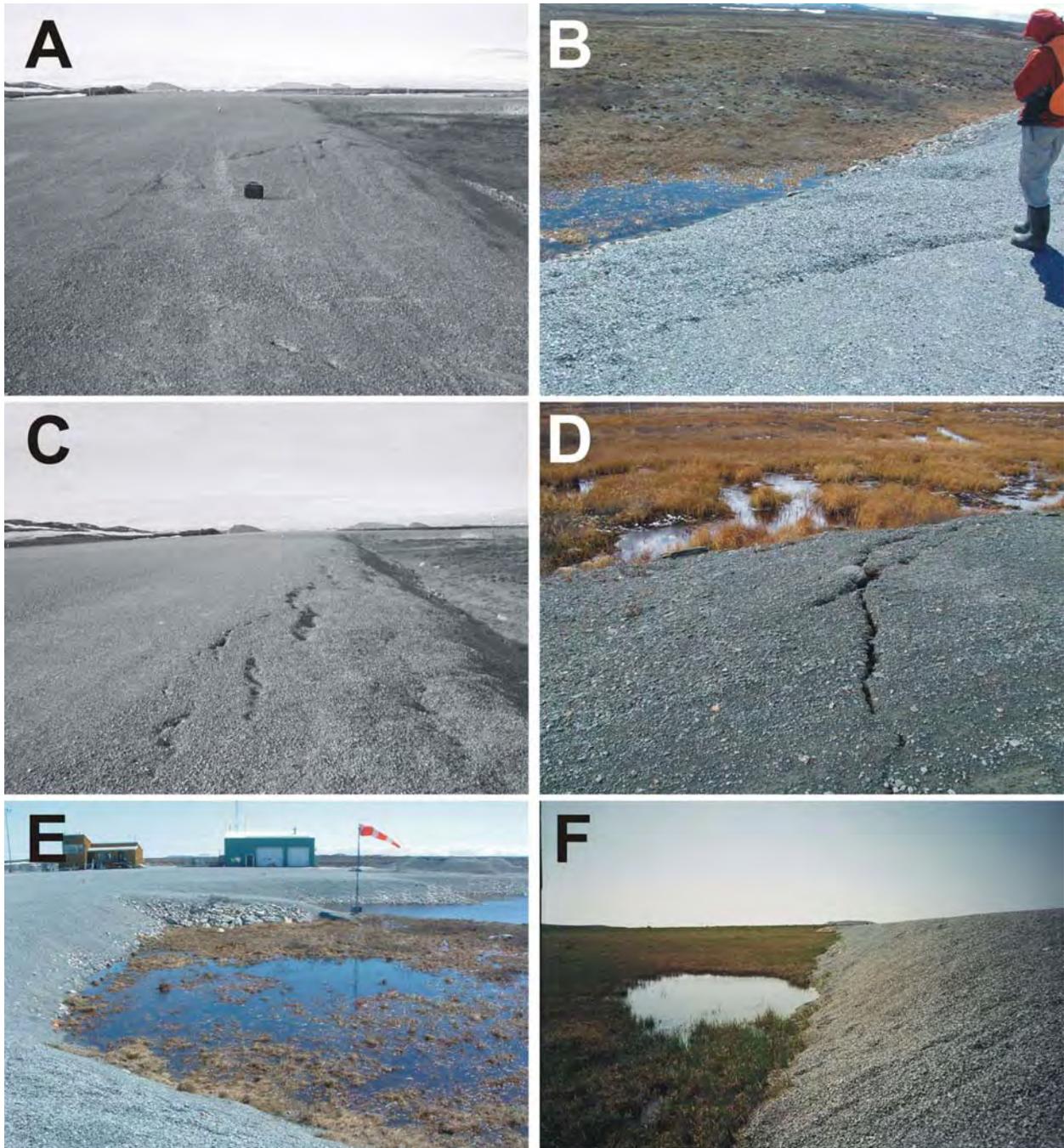


Figure 119 Diverses formes de dégradation sur la piste de Tasiujaq

- a- Dépression à proximité du taxiway; b- Fissuration proche du talus ;
 c- Diverses fentes de tension ; d- Mare d'eau et dégradation ;
 e- Mare d'eau à proximité du remblai ; f- Talus recouvert de MG-20b.

3- Caractéristiques du milieu

a- Géologie de surface :

Une dizaine de coupes stratigraphiques étudiées dans des excavations creusées à la pelle dans le mollisol et plusieurs dizaines de trous à la tarière ont permis de dresser une carte détaillée des dépôts de surface (Figure 120).

Le paysage de la région de Tasiujaq est caractérisé par la présence d'une série de terrasses marines et fluviales taillées au cours de l'Holocène dans des dépôts de surface glaciaires, marins, fluvio-glaciaires, littoraux, estuariens et fluviaux. L'aéroport est construit à proximité de la rivière Bérard sur une terrasse d'origine fluviale dont la surface est recouverte par endroits d'un placage de dépôts fluviaux anciens et d'alluvions récentes. La piste traverse un petit lac peu profond ($\approx 0,5$ m) qui occupe un méandre abandonné entre les chaînages 5+810 et 5+860. Le drainage naturel se fait principalement par un ruisseau parallèle à la piste (du sud-ouest vers le nord-est) en direction du village et de la rivière Bérard. Les terrains à proximité de la piste sont plats et peu accidentés ; seul accident topographique marquant, un gros cordon de blocs glaciaires est situé non loin de l'extrémité sud-ouest de la piste (Figure 120).

Trois excavations réalisées à l'aide d'une pelle mécanique et six forages peu profonds réalisés à l'aide d'une petite foreuse portative ont permis de prélever des échantillons de sols gelés. Une coupe stratigraphique de 11 m de hauteur a été exposée avec une pompe à eau le long de la berge de la rivière Bérard, à seulement 150 m de distance de la piste. La stratigraphie générale de la terrasse sur laquelle repose l'aéroport est illustrée la figure 121. Des échantillons des différentes unités stratigraphiques ont été prélevés ; certains d'entre eux ont été conservés gelés et soumis à des analyses granulométriques, de teneur en eau et de salinité de l'eau interstitielle. Les granulométries sont présentées succinctement à la figure 121.

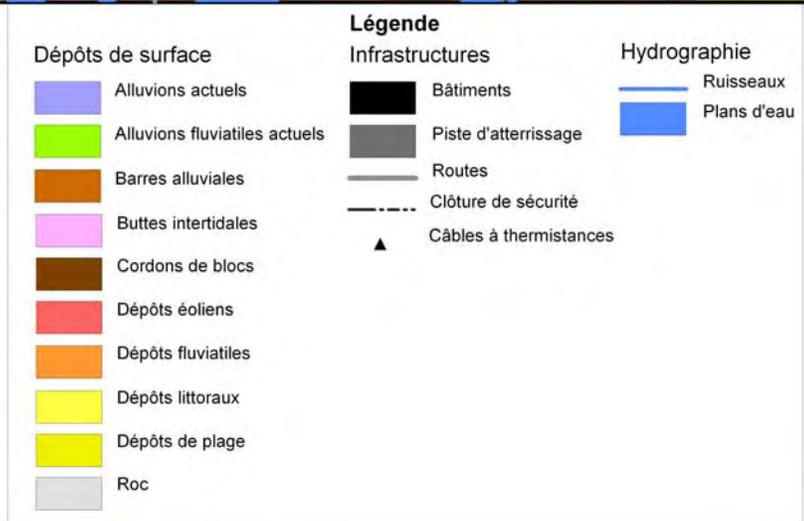
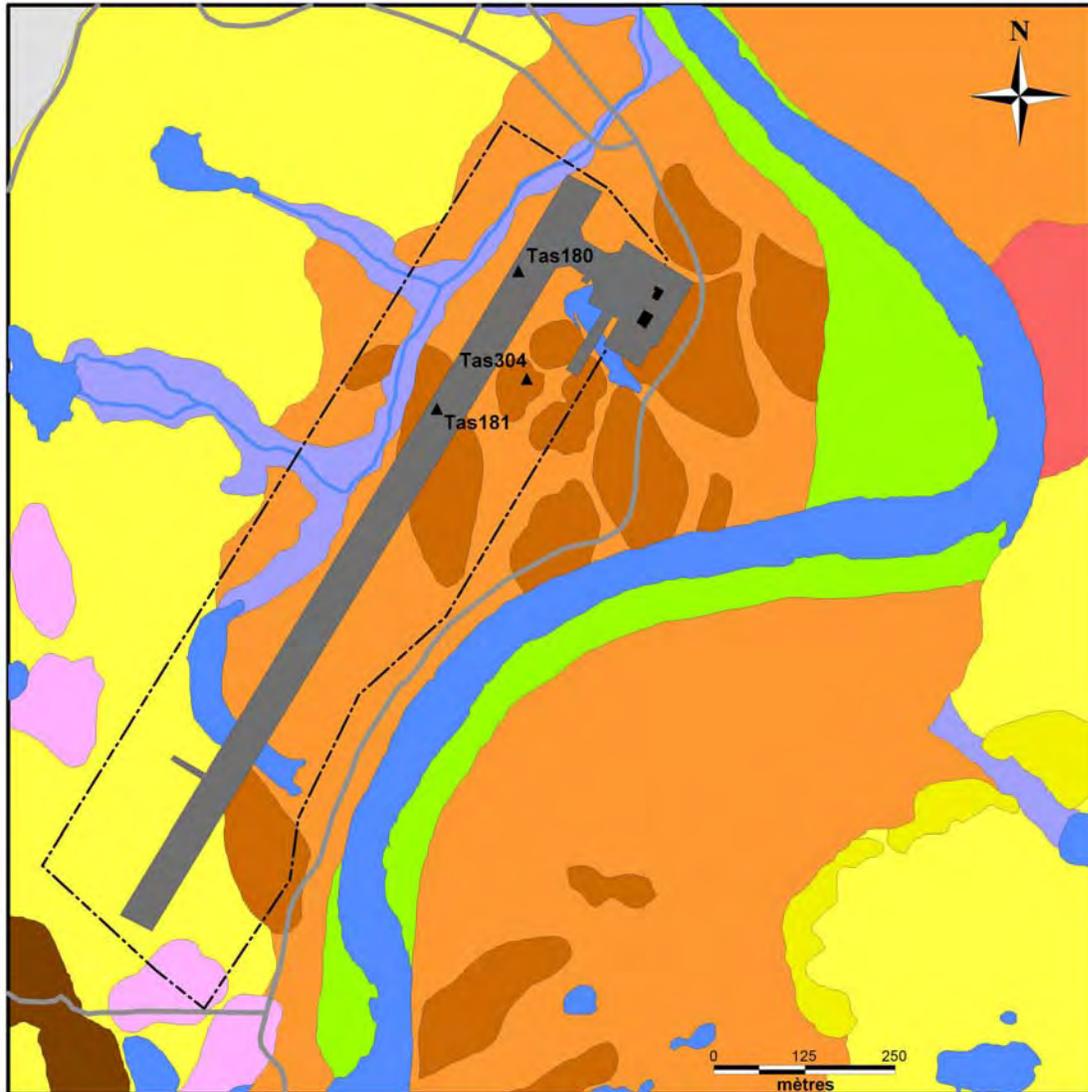


Figure 120 Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Tasiujaq

(1) La première unité rencontrée en surface est d'origine fluviale. Cette unité d'épaisseur inégale fait en moyenne 0,7 m. En surface, elle se présente sous la forme de barres alluviales basses et plates et de chenaux évasés peu profonds. Le patron de ces barres et chenaux est plus facilement visible sur les photographies aériennes que sur le terrain. L'horizon organique de surface fait de 5 à 30 cm d'épaisseur selon la microtopographie. Au début de l'été, l'horizon organique encore gelé contient d'abondantes lentilles de glace (Figure 122 A). Les barres alluviales sont essentiellement composées de sédiments sablo-graveleux stratifiés, pauvres en glace, comportant des galets fluviaux et des blocs glaciels. Les chenaux sont composés de sables grossiers à fins, pauvres à riches en glace, avec, en moindres proportions, des cailloux et des blocs glaciels.

(2) La deuxième unité est un diamicton intertidal glacial qui se situe entre 0,7 à 3 m de profondeur. L'épaisseur et la granulométrie de cette couche sont variables dans l'espace. Le diamicton est composé de sables grisâtres dont la granulométrie est variable, allant de fine à grossière (Figure 122 B); ce dépôt est parfois même silteux lorsqu'il s'agit de vase intertidale (Figure 122 D). Il ne présente pas de stratification apparente. La matrice contient plusieurs blocs décimétriques et métriques d'origine glacielle (Figure 122 B). La teneur en eau moyenne est de 17,9%, soit une valeur inférieure à la saturation qui serait plutôt de l'ordre de 35%. Toutefois, cette eau est saumâtre avec des valeurs mesurées de 4,6 à 18,2 g Na Cl/L, pour une moyenne de 8 g/L. La teneur en glace des sédiments est également très variable. Il s'agit essentiellement de glace interstitielle mais on y trouve aussi de fines lentilles de glace d'épaisseur millimétrique (Figure 122 B,C,D). Ce matériel se liquéfie en dégelant.

(3) La troisième unité se trouve entre 3 et 4 m de profondeur. Elle est constituée de sables grossiers avec des graviers, des cailloux et des petits blocs. Le tout est grossièrement stratifié et très pauvre en glace (Figure 122 E).

(4) La quatrième unité, entre 4 et 10,9 m de profondeur est composée de graviers et de blocs sub-anguleux. La matrice est stratifiée et constituée de sable très grossier contenant, par endroits, des coquilles marines entières et fragmentées. Cette unité est très pauvre en glace (Figure 122 C).

(5) La cinquième unité observée est constituée d'argile marine massive. Elle est rencontrée à une profondeur de 10,9 m, pratiquement au niveau de la rivière. Son épaisseur demeure inconnue et on ignore s'il y a d'autres unités sous-jacentes (graviers fluvio-glaciaire ou till ?) avant d'atteindre le socle rocheux de la vallée.

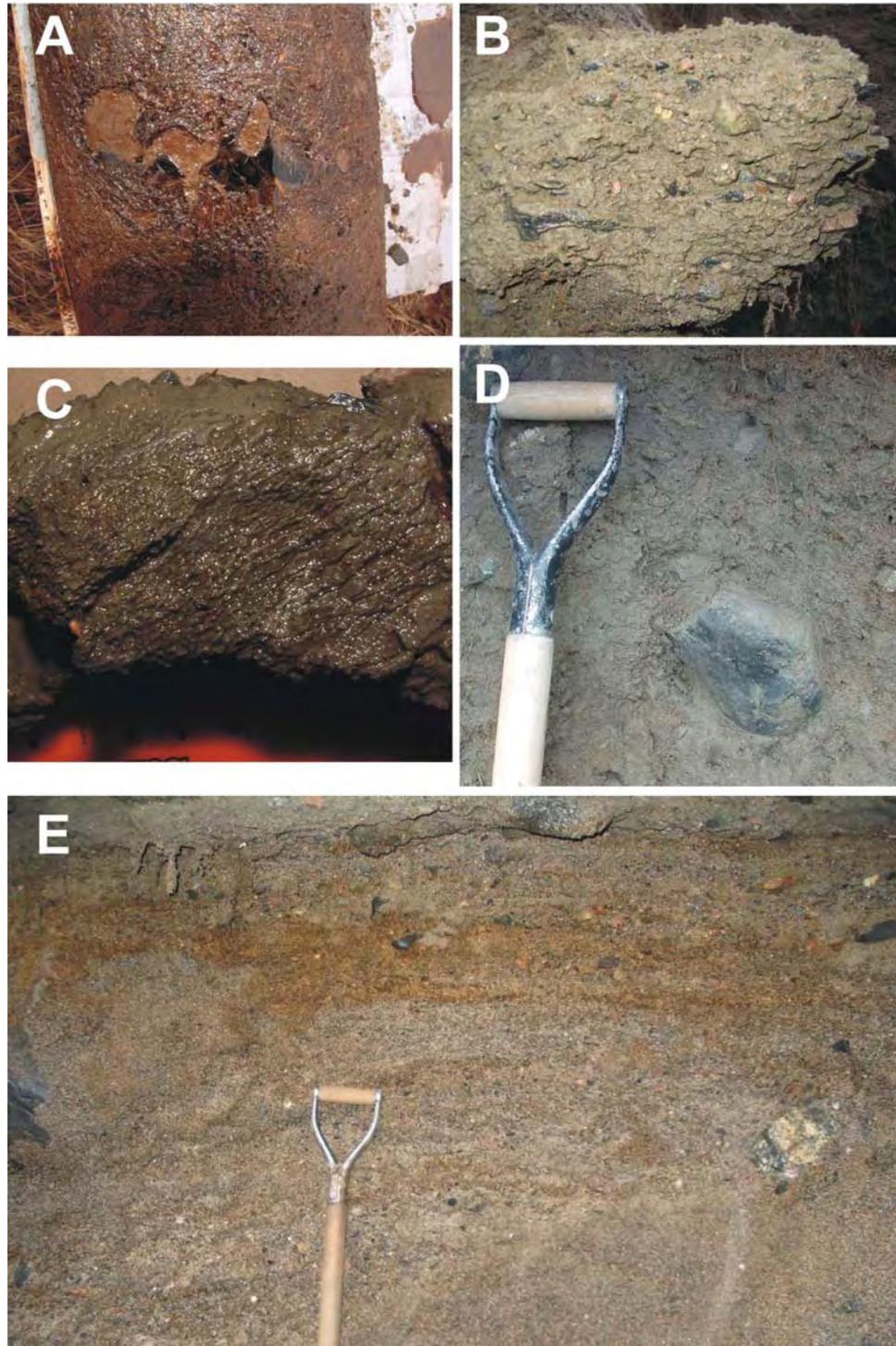


Figure 122 Les différentes unités sédimentaires de la terrasse de l'aéroport de Tasiujaq
a- Tourbe gelée du mollisol avec lentille de glace (unité 1).
b- Diamicton intertidal à faciès sablo-graveleux (unité 2).
c- Diamicton intertidal à faciès limoneux riche en lentilles de glace (vase intertidale se liquéfiant au dégel ; unité 2).
d- Diamicton intertidal à faciès sableux avec blocs glaciels (unité 2).
e- Quatrième unité de sables très grossiers, graviers et blocs glaciels, le tout très pauvre en glace.

Il est à remarquer que lors de la construction de la piste, une petite butte sableuse de 2 m de hauteur et de 30 m de diamètre se trouvait sur son tracé (entre les chaînages 5+070 et 5+100 m, Allard et al., 1994). Elle a été arasée au moment de la construction et sa base se retrouve maintenant sous la piste devant l'aérogare. Un sondage réalisé dans la butte avant son nivellement en septembre 1988 a révélé la présence en surface de 1,75 m de sable très grossier au-dessus d'un sable très fin limoneux. La profondeur de dégel était alors de 1,75 m, soit au contact entre les deux matériaux. Le cœur de la butte serait donc constitué de limon sableux gelé, susceptible de fluer au dégel. La glace intergranulaire observée jusqu'à une profondeur de 3,14 m est presque invisible à l'œil nu. Les teneurs en eau, après fusion, oscillent néanmoins entre 10,8 et 20,7%. On peut en déduire que le volume de glace est sensiblement du même ordre, et donc relativement peu important. Conséquemment, seule une faible partie de la hauteur de la butte aurait été attribuable au soulèvement géglival. Son origine ne serait donc pas due uniquement à l'occurrence du pergélisol, mais également à une accumulation localisée de sable et gravier sur la terrasse (sédimentation littorale holocène).

Plusieurs relevés géophysiques ont été effectués sur la piste, ainsi que sur les terrains avoisinants.

Un profil au géoradar en mode réflexion à une fréquence de 50 MHz est présenté à la figure 123. Le réflecteur correspondant au contact entre le remblai et le milieu naturel est net et peut être suivi sur toute la longueur de la piste. L'épaisseur du remblai varie entre 1,6 et 4,4 m avec une valeur moyenne de 2,4 m. Il est cependant plus épais à l'emplacement du lac dans l'ancien méandre (de 5+830 à 5+860 m approximativement). Les autres réflecteurs identifiés sont ceux associés aux contacts stratigraphiques entre les couches, soit le passage du diamicton aux sables grossiers, puis la transition aux sables et graviers et, enfin, le contact stratigraphique franc aux argiles marines. Sur la majeure partie du profil, des réflecteurs discontinus sont causés par des stratifications éparses dans les graviers sous-jacents alors que le contact avec les argiles apparaît assez régulièrement. En somme, la pénétration générale du signal jusqu'à une douzaine de mètres de profondeur suggère l'absence de couches très riches en fines dans les premiers mètres sous la piste. La continuité des contacts révélée par ce profil indique que la stratigraphie d'ensemble telle qu'observée dans la coupe stratigraphique est relativement uniforme sous presque toute la longueur de l'ouvrage, exception faite de l'ancienne butte aplanie lors de la construction.

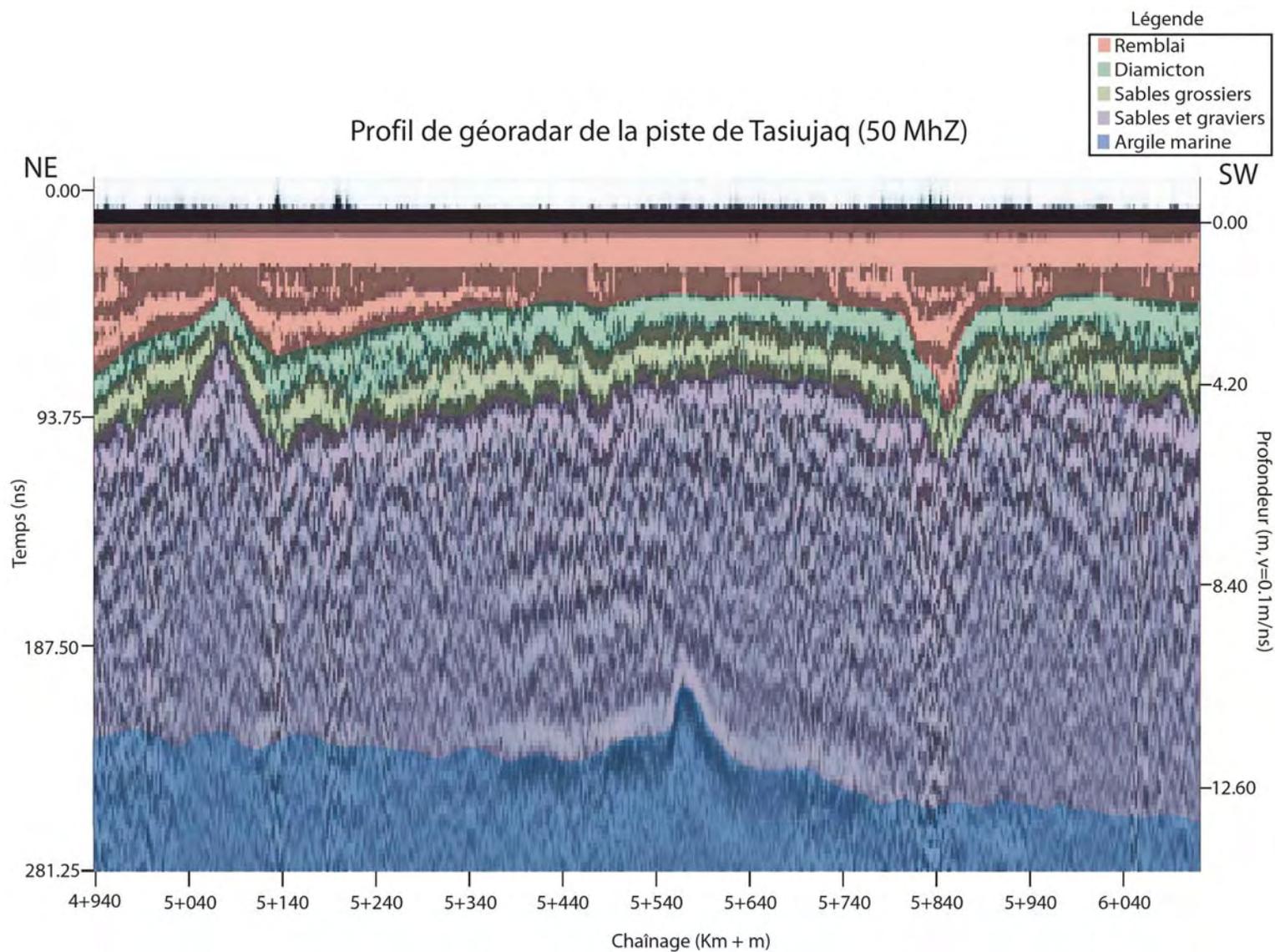


Figure 123 Profil au géoradar de la piste de Tasiujaq à 50 Mhz

Sur le profil de résistivité électrique effectué au centre de la piste avec le dispositif OhmMapper à l'été 2004 (relevé T-L3, Figure 124), les valeurs de résistivité oscillent entre $10^{1.5}$ (30) et $10^{4.7}$ (50000) ohm.m. Les trois premiers mètres du profil présentent les valeurs les plus élevées attribuables au remblai. Les valeurs de résistivité les plus faibles se retrouvent entre 13 et 15 m de profondeur, ce qui correspond à la couche d'argile marine massive visible dans la coupe naturelle et rencontrée lors de l'installation du câble Tas304. Là où s'élevait l'ancienne butte cryogène, entre les chaînages 5+050 et 5+105 m, la résistivité électrique est plus faible (de $10^{1.5}$ à $10^{2.8}$, soit de 30 à 630 ohm.m). Cela est dû au fait que le cœur de la butte était constitué de limon. L'image électrique suggère que l'épaisseur de ce limon pourrait atteindre une dizaine de mètres. De 3 à 8 m de profondeur et sur toute la longueur du levé, les valeurs fluctuent aux alentours de 1000 ohm.m, mais elles sont plus faibles (approximativement 400 ohm.m) et plus profondes sous le lac et les dépressions. Sous la première partie de la piste, du chaînage 0+750 au 1+150 m, la résistivité électrique varie entre 400 et 6300 ohm.m. Enfin, de 8 à 13 m de profondeur, ainsi qu'entre les chaînages 5+350 et 5+825 m, les résistivités sont plus fortes (de 4000 à 15900 ohm.m).

D'autres levés ont été effectués en parallèle à 10 m de part et d'autre de ce transept central (T-L2, Figure 125, et T-L4, Figure 126). Ceux-ci ont fait apparaître des résistivités plus faibles dans certaines sections de la piste, notamment aux endroits où se situent les tassements (de 5+175 à 5+350 m entre 6 et 12 m de profondeur pour T-L2), l'ancienne butte (entre 5+050 et 5+105 m sur T-L4) et à l'extrémité sud-ouest de la piste, au delà du lac. Il est d'ailleurs probable que sous ce dernier, le sol demeure dégelé à longueur d'année à cause de la présence d'un talik sous-lacustre. Ceci se traduirait par des résistivités plus faibles, attribuables à un sol plus chaud et humide. D'autres sections de sol seraient possiblement dégelées, même à une température légèrement inférieure à 0 °C, à cause de la salinité présente dans le diamicton. Les chaînages concernés seraient entre 5+205 et 5+995 m, et entre 5+945 et 6+030 m.

Des levés de résistivité électrique ont également été effectués dans le milieu naturel, du côté sud-est de la piste et parallèlement à celle-ci (Levés T-M6 et T-M7, Figure 127). On peut y observer de nombreuses variations de résistivité dans les premiers mètres, ce qui serait imputable à la présence de blocs ainsi qu'à une alternance des zones de terrain humides et sèches. La zone de résistivité électrique plus faible qui correspond aux argiles marines profondes se situe entre 10 et 12 m de profondeur.

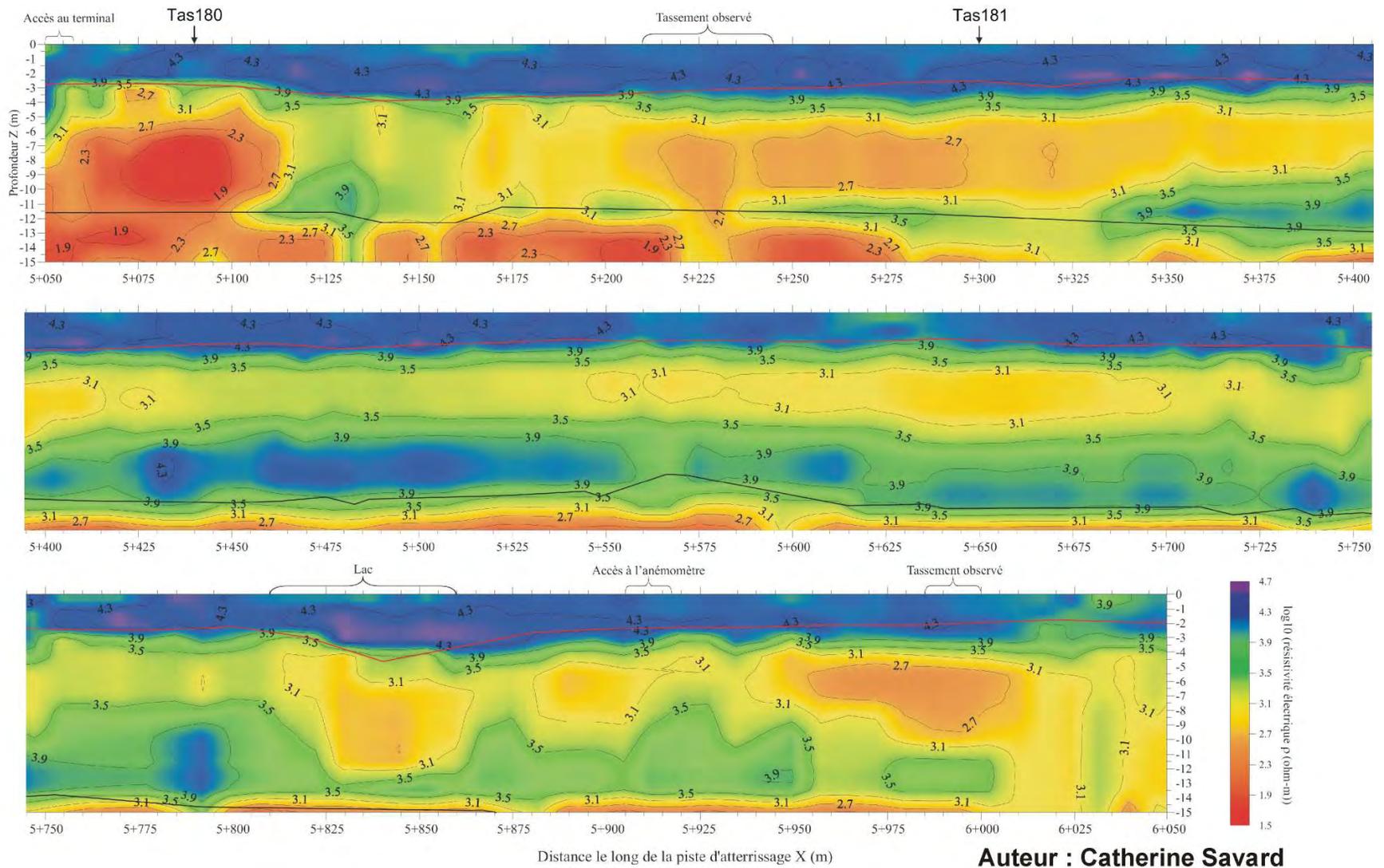
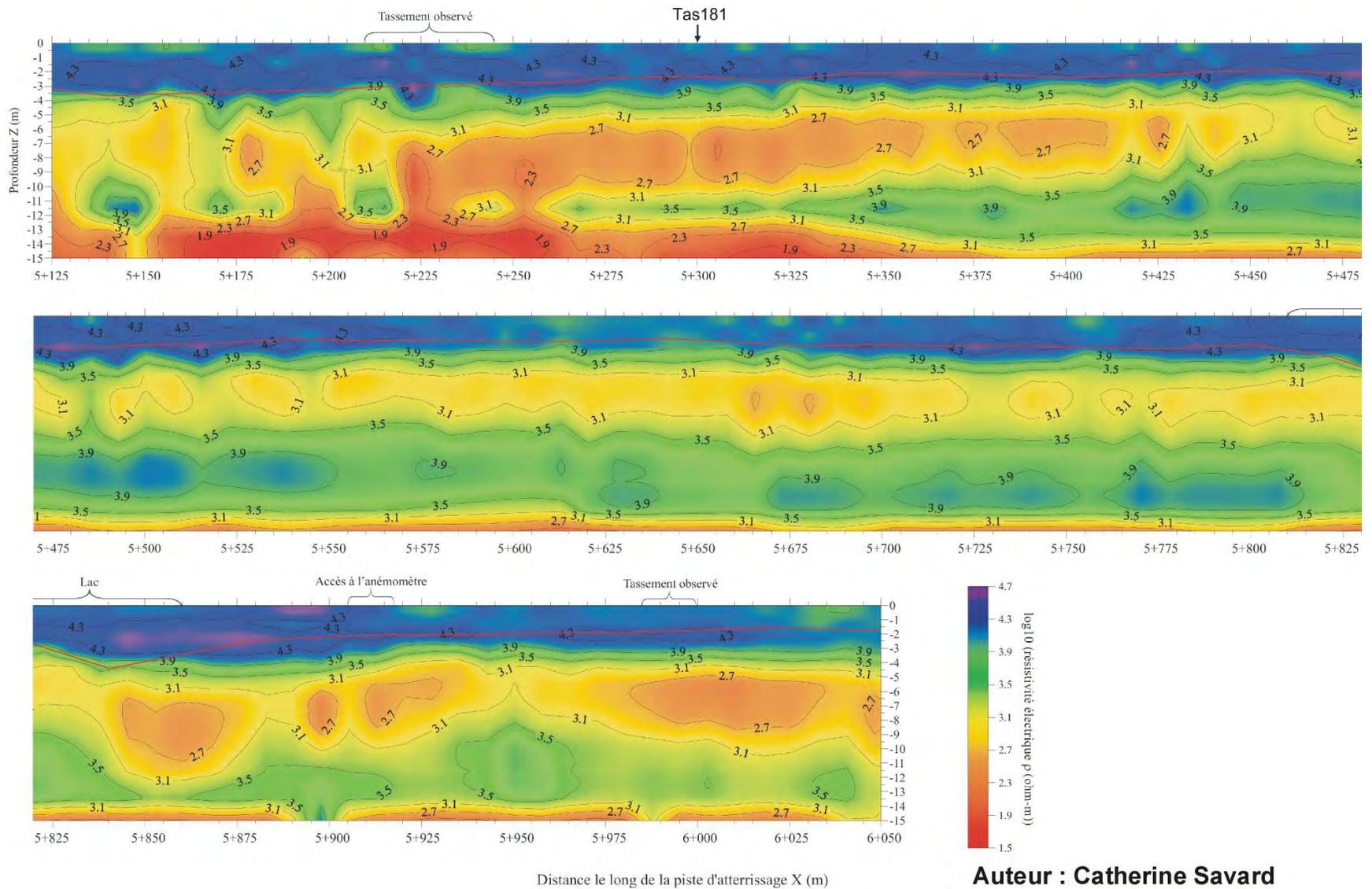


Figure 124 Image de résistivité électrique de la ligne de levé T-L3 au centre de la piste d'atterrissage de Tasiujaq



Auteur : Catherine Savard

Figure 125 Image de résistivité électrique de la ligne de levé T-L2 en bordure est de la piste d'atterrissage de Tasiujaq

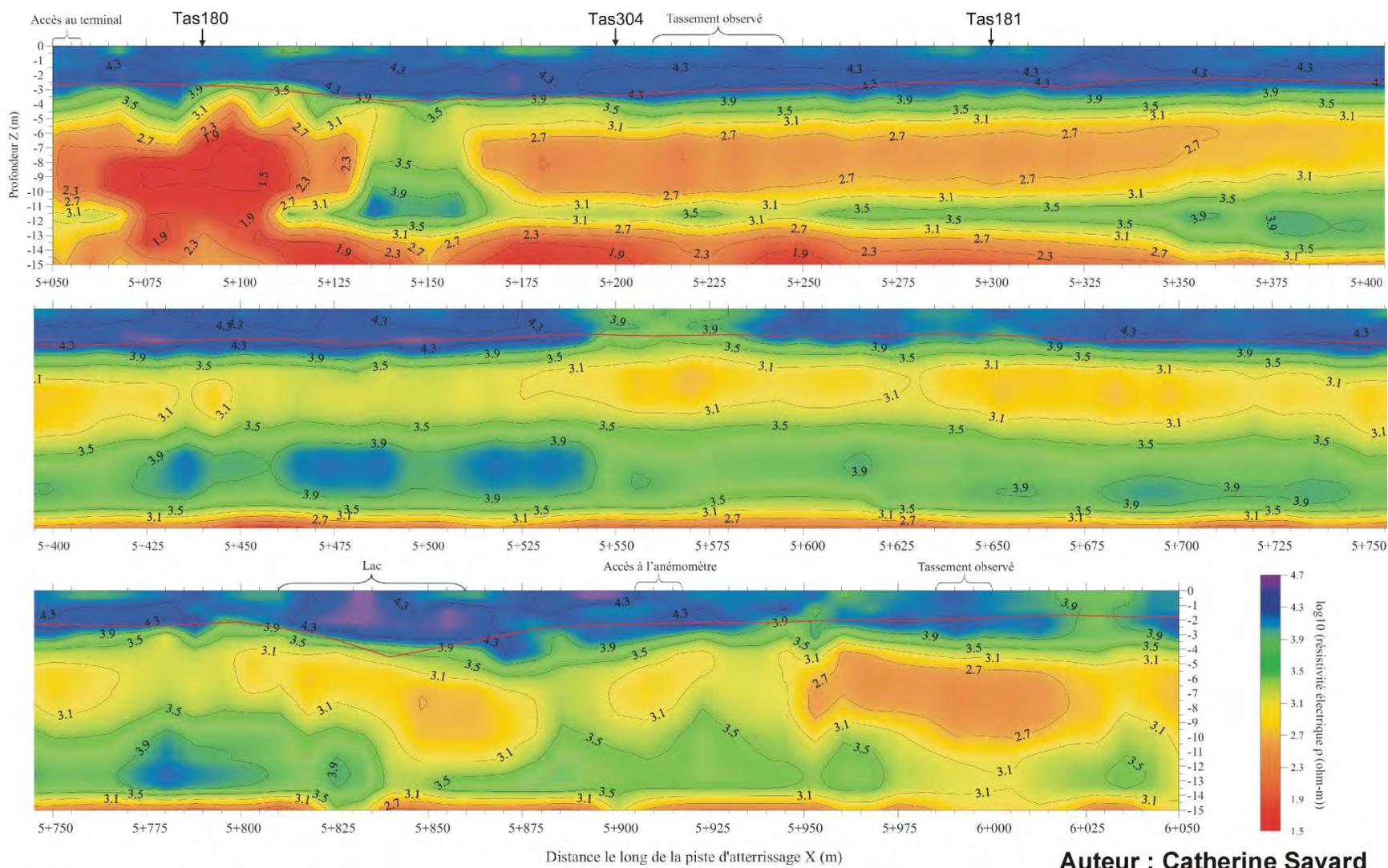


Figure 126 Image de résistivité électrique de la ligne de levé T-L4 en bordure ouest de la piste d'atterrissage de Tasiujaq

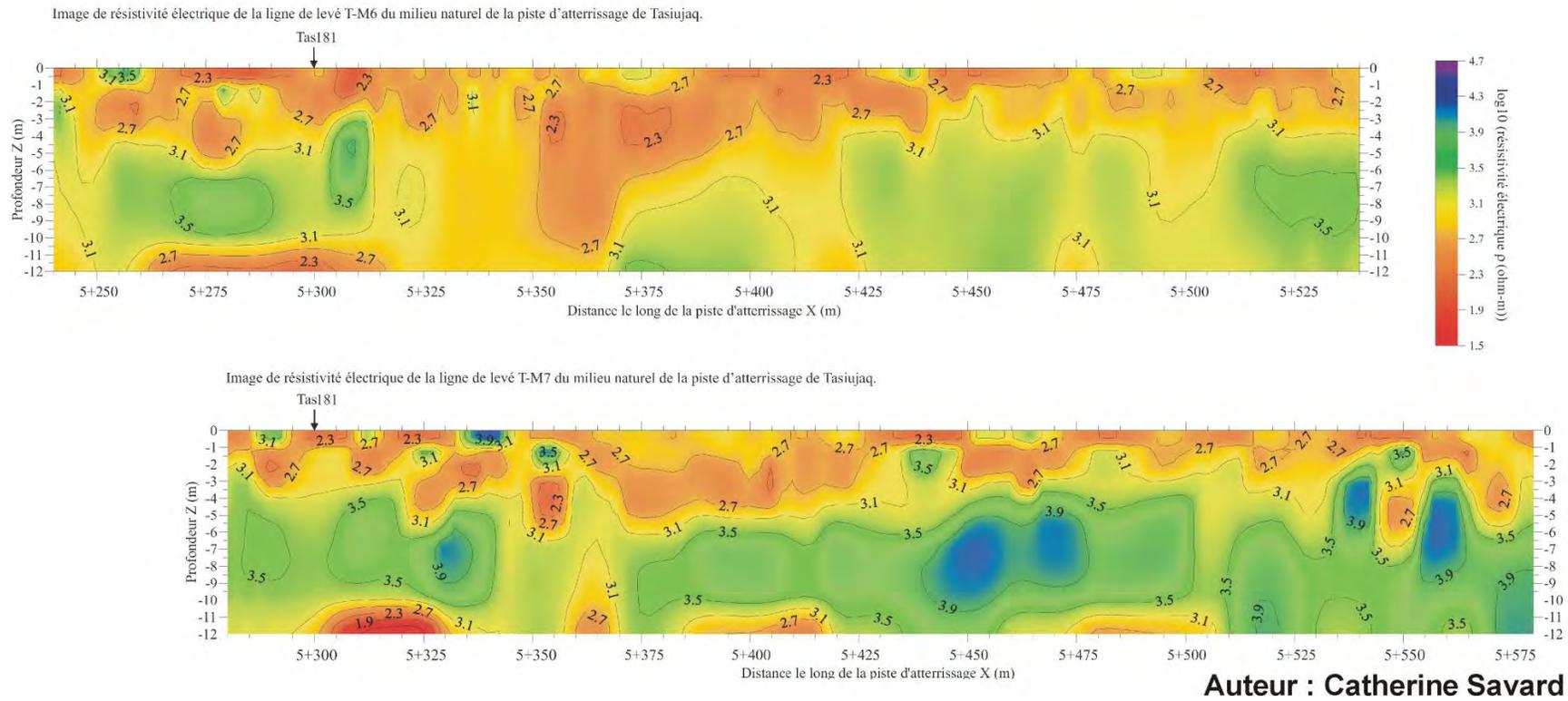


Figure 127 Image de résistivité électrique des lignes de levé T-M6 et T-M7 du milieu naturel à proximité de la piste d'atterrissage de Tasiujaq

b- Hydrographie et drainage :

Le drainage naturel du terrain se fait par un ruisseau parallèle à la piste sur son côté nord mais à une bonne distance. Ce ruisseau rejoint la rivière Bérard après être passé sous le pont de la route qui conduit à l'aérogare. Durant l'été 2004, de multiples accumulations d'eau ont été observées en bordure de la piste d'atterrissage, à différents emplacements. Durant le printemps, une combe à neige située au pied du cordon de blocs glaciels alimente en eau de fonte une marre intermittente située à l'extrémité sud-ouest de la piste. On note également la présence d'une assez grande mare à proximité de la voie de circulation. Rappelons enfin que la piste enjambe un ancien méandre abandonné qui, dû à l'apport des eaux de fontes printanières, se transforme en lac d'une cinquantaine de centimètres de profondeur (des chaînages 5+810 à 5+860 m).

c- Le pergélisol :

Dans la terrasse sur laquelle la piste d'atterrissage est située, le pergélisol peut être considéré comme sensible au dégel dans ses trois premiers mètres puisque les unités stratigraphiques y présentent des contenus non négligeables en glace et des matériaux quelques fois fins. En revanche, de 3 à 11 m, le matériel est grossier et pauvre en glace. En dessous de 11 m et jusqu'à une profondeur indéterminée, le sédiment est une argile marine qui peut potentiellement contenir des couches de glace. Aucune observation ne permet d'appuyer cette hypothèse jusqu'à présent.

Les salinités mesurées dans l'eau interstitielle des sédiments peuvent influencer significativement le comportement du pergélisol lors du gel ou du dégel. Des salinités comme celles mesurées à Tasiujaq peuvent provoquer un abaissement du point de congélation de 0,5 à 1,1 °C. Dans de telles conditions, l'épaisseur de la couche active peut être sensiblement accrue lors des dégels annuels tandis que des tassements peuvent se produire précocement, c'est à dire avant de réchauffer jusqu'à 0 °C.

d- Climat et régime thermique du pergélisol :

Régime thermique :

Quatre câbles à thermistances ont été installés à Tasiujaq lors de la construction de l'aéroport. Le premier est situé dans le roc (Tas157) à 800 mètres au nord-ouest de l'aérogare, 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. Le second câble est situé à une quarantaine de mètres de la piste, dans la terrasse (Tas304). 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 est trop molle. Néanmoins, ce forage confirme près de la piste la stratigraphie observée dans la coupe naturelle le long de la rivière. Le troisième (Tas181) a une longueur de 5 m 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. Le quatrième et dernier câble (Tas180), mesurant également 5 m, se trouve au chaînage 5+090 m, à l'endroit de l'ancienne butte cryogène. Au moment de la construction, les 1,8 m supérieurs de la butte ont été nivelés; 5 cm d'isolant rigide (mousse de polystyrène) ont été posés sur la surface aplanie puis recouverts d'environ 1,80 m de remblai. La première thermistance du câble était originellement à 60 cm sous la surface de la piste, le câble traversant l'isolant et se terminant dans les sédiments fins.

Un capteur thermique mesurant la température de l'air est adjoint au câble de référence Tas157. La température moyenne annuelle de l'air pour les années 2003 et 2004 est de -4,7 et -6,1 °C respectivement. Les indices de gel et de dégel pour ces années sont respectivement de -3089 et 1357 degrés-jours pour 2003 et de -3228 et 1005 degrés-jours pour 2004. Les températures moyennes mensuelles de l'air mesurées depuis l'installation en juin 2002 apparaissent au tableau 12.

MOIS	Température atmosphérique moyenne mensuelle (°C)			
	2002	2003	2004	2005
Janvier	--	-19.99	-22.84	-27.23
Février	--	-27.90	-22.10	-21.90
Mars	--	-25.00	-19.38	-16.23
Avril	--	-10.85	-10.80	-5.70
Mai	--	2.57	-2.26	2.45
Juin	--	6.77	3.61	7.88
Juillet	10.67	11.26	10.71	11.76
Août	9.92	11.35	10.38	10.87
Septembre	5.97	9.31	5.41	6.18
Octobre	0.84	0.95	1.87	--
Novembre	-9.75	-5.49	-6.26	--
Décembre	-15.13	-11.55	-21.75	--
Moyenne		-6.1	-4.7	

Tableau 12 Températures moyennes mensuelles de l'air pour Tasiujaq de juillet 2002 à septembre 2005

La figure 128 présente les variations des températures du sol sur une période de 12 ans enregistrées par le câble Tas304 situé dans le terrain naturel non perturbé par l'activité humaine, à 42 m de la piste. Ce câble peut donc servir de référence pour illustrer l'effet du réchauffement climatique. L'enregistrement thermique peut être considéré comme représentatif de la tendance climatique à long terme dans cette région.

Malgré un trou de 3 ans dans l'acquisition des données, une augmentation des températures dans le pergélisol est observée. Ainsi dans le terrain naturel (Tas304) cette hausse atteint 1,3 °C à 11 m de profondeur, soit de - 4,0 à - 2,7 °C. Au début de la période d'enregistrement, le mollisol atteignait une épaisseur de 130 cm. Actuellement, l'épaisseur du mollisol fait environ 2,0 m et elle a même dépassé cette profondeur à la fin de l'été 2005.

En comparaison, les graphiques des figures 129 et 130 présentent respectivement les enregistrements thermiques acquis durant une période de 16 ans (1989-2005) par les câbles de 5 m, Tas180 et Tas181, situés dans la piste. Bien qu'atteignant des profondeurs moindres, les tendances observées sont semblables à celles observées pour le câble de référence Tas304. Originellement, la profondeur maximum du front de dégel atteignait 2,5 m dans le cas de Tas180 et 3,0 m pour Tas181. La différence de profondeur de dégel peut être expliquée par la présence de la couche isolante en mousse de polystyrène de 5 cm d'épais à l'endroit de l'ancienne butte (Tas180), ce qui retarde le dégel annuel. Cependant, pour les années 2004-2005, les profondeurs atteintes par le front de dégel sont de l'ordre de 2,9 m pour Tas180, à l'emplacement de l'ancienne butte, et de 3,4 m pour Tas181, soit une augmentation de 0,4 m sur 16 ans. Le dégel pénètre sur une profondeur de 1,1 m à travers ce qui était du pergélisol dans le cas de la butte (1,8 m de remblai), tandis qu'il progresse jusqu'à 1,6 m de profondeur, dans ce qui serait l'ancien mollisol dans le cas de Tas181 (1,75 m de remblai). Il est probable que maintenant le dégel atteint également le pergélisol, ce qui entraîne des tassements inégaux en fonction de la nature des sols traversés par le dégel. En résumé, en terrain naturel, le dégel du mollisol dépasse maintenant 2 m de profondeur (Figure 131), tandis que sous la surface de la piste, le plafond du pergélisol est maintenant (2005) situé à 2,9 m (Figure 132) et 3,4 m (Figure 133), selon la présence ou non d'une couche isolante. Suite au réchauffement climatique des années 1993-2005, le dégel a donc pénétré de 0,4 à 0,7 m dans le pergélisol à l'emplacement des câbles à thermistances. Notons qu'il n'y a pas encore eu de tassement documenté à l'endroit précis où les câbles plongent verticalement dans la piste (à 20 m du bord). La raison probable pour cette absence de tassement

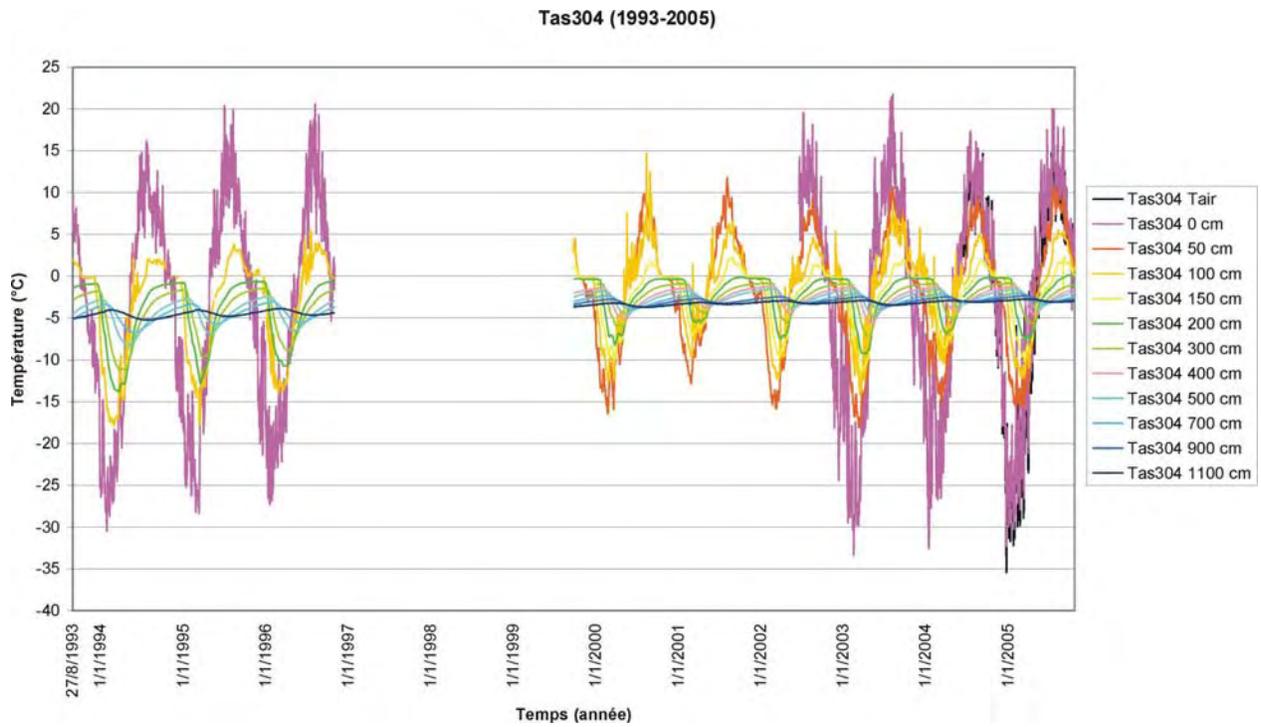


Figure 128 Température du sol pour le câble Tas304 de 1993 à 2005 (site de référence hors piste)

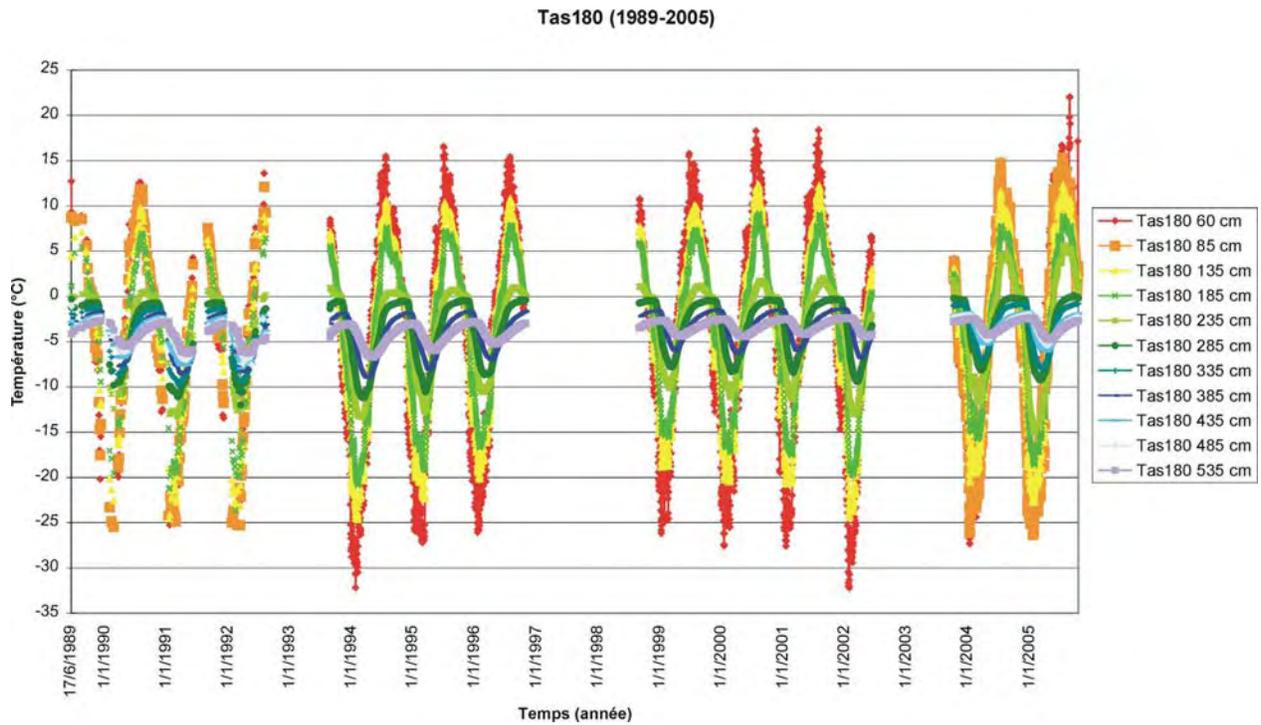


Figure 129 Température du sol pour le câble Tas180 de 1989 à 2005 (piste, ancienne butte, 5+090)

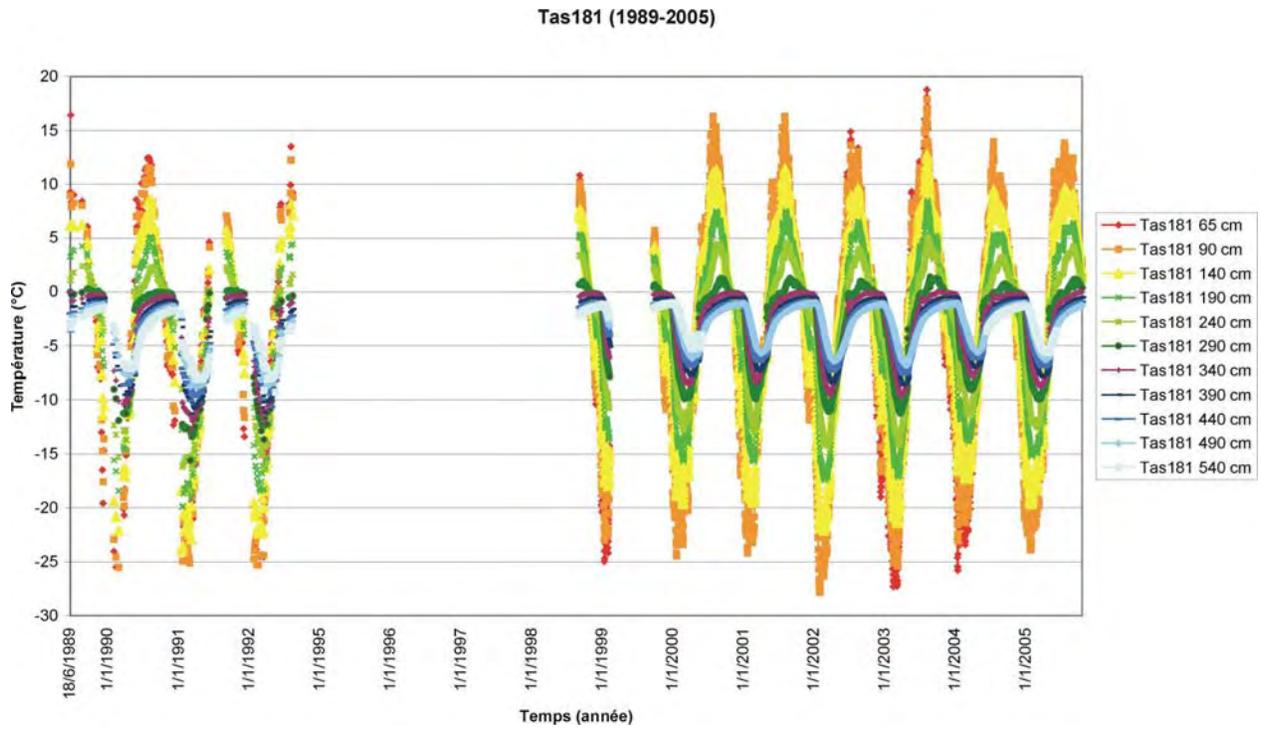


Figure 130 Température du sol pour le câble Tas181 de 1989 à 2005 (piste, 5+300)

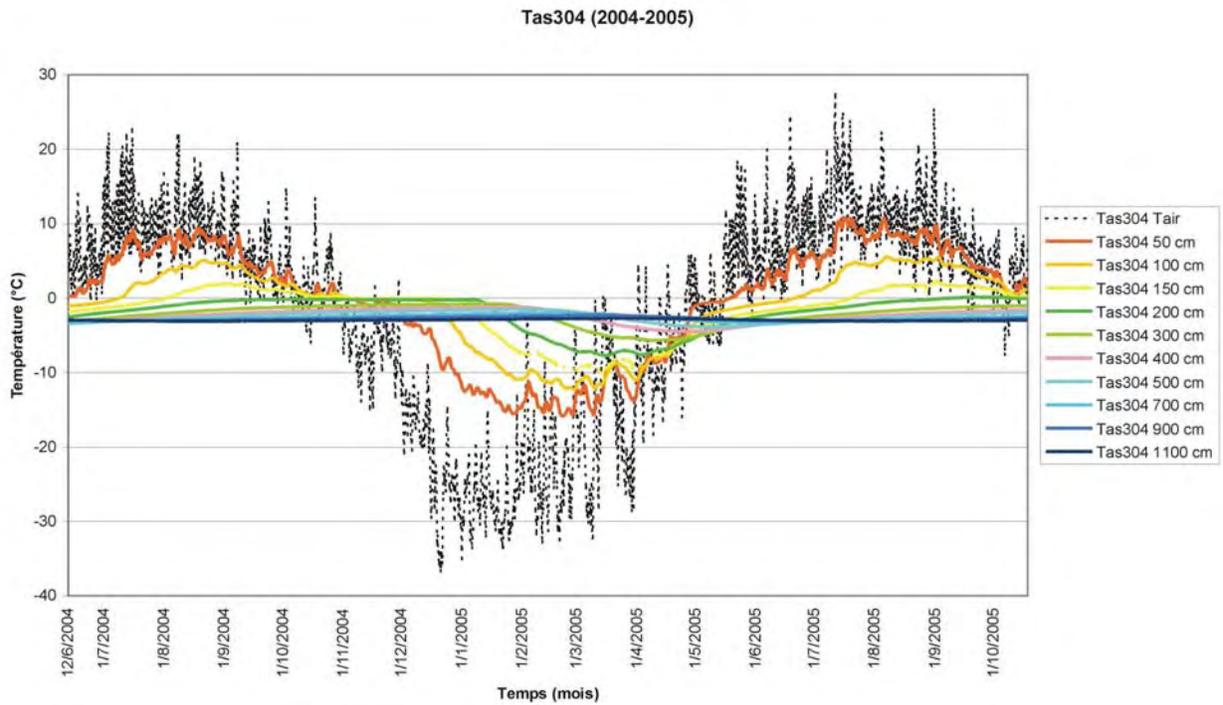


Figure 131 Température du sol pour le câble Tas304 en 2004-2005 (hors piste)

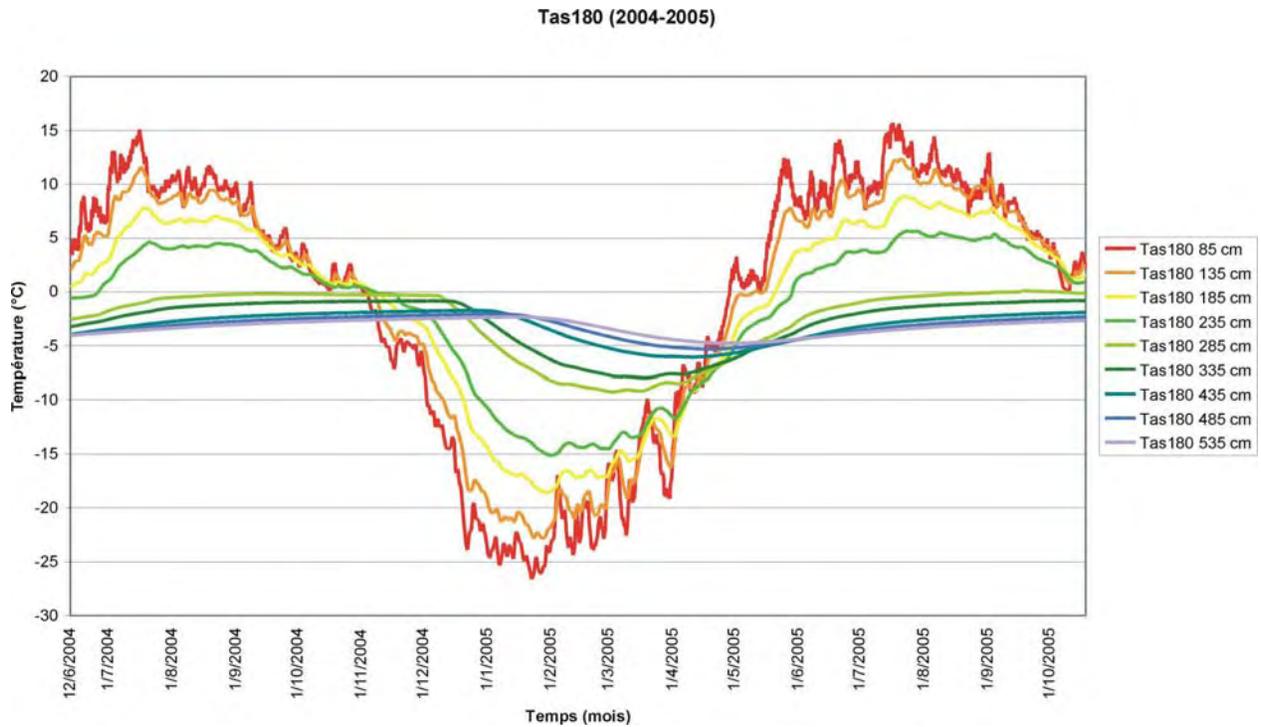


Figure 132 Température du sol pour le câble Tas180 en 2004-2005 (piste, ancienne butte, 5+090).

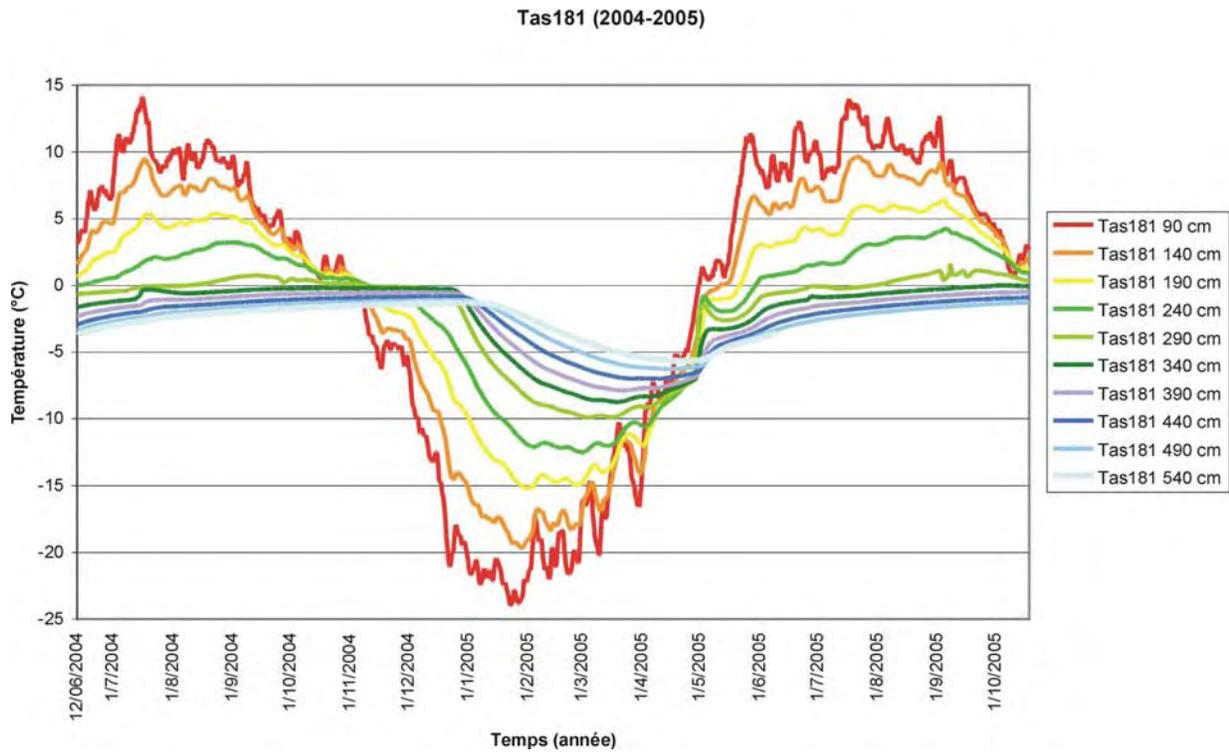


Figure 133 Température du sol pour le câble Tas181 en 2004-2005 (piste, 5+300)

jusqu'à maintenant au câble Tas181 est que ce dégel est encore limité à la couche superficielle de sable et gravier et n'a pas encore affecté le diamicton silteux en dessous.

La Figure 134 présente les profils de température dans le sol du câble Tas181 pour les profondeurs 2,4, 2,9 et 3,4 m, c'est à dire dans le mollisol actuel jusqu'au contact du pergélisol. Ici, seuls les mois d'avril et de mai sont conservés de manière à pouvoir observer la fluctuation des températures durant les premiers temps de la période de dégel printanier sur six années, de 2000 à 2006. On peut remarquer qu'à l'exception de l'année 2002, le réchauffement du sol se produit en 4 phases. Dans un premier temps, les profils ont des pentes qui traduisent un réchauffement lent, par conduction, au gré du réchauffement printanier. Puis dans un second temps, les températures augmentent abruptement. Ceci est probablement dû à l'arrivée subite des premières eaux de fonte dans le terrain. Il est probable que de l'eau s'infiltré dans les premières couches du mollisol, provoquant un réchauffement par convection, jusqu'à saturation de celui-ci. Dans un troisième temps, on note une brusque rechute des températures, ce qui pourrait traduire un refroidissement suite au gel des eaux infiltrées dans le mollisol qui est demeuré gelé. La cause exacte de l'apport soudain de chaleur par convection reste à vérifier. Enfin, dans un dernier temps, la pente des profils de température s'inverse de nouveau mais de manière plus douce. On observe un retour à une augmentation graduelle des températures, selon un taux comparable à celui de la première phase. Il s'agit donc d'un retour à un mode de transfert de chaleur par conduction.

Enneigement :

Les conditions d'enneigement en périphérie de la piste d'atterrissage ont un impact important sur son régime thermique. Des observations et des mesures d'épaisseur de neige ont été effectuées sur le terrain en avril 2005. À cette période de l'année, la hauteur du banc de neige dépasse la hauteur du remblai, surtout sur le côté est (Figure 135 A), de même que sur les deux côtés dans le quart sud-ouest de la piste. De manière à en estimer les effets possibles, deux types de mesures ont été faites. D'une part, on a procédé à un relevé des épaisseurs de neige le long de dix transects, sur des distances de 15 à 25 m en partant de la base du remblai. D'autre part, des enregistreurs autonomes de température ont été placés dans le champ, juste sous la surface de la couche organique, suivant quatre de ces transects. Trois enregistreurs ont été utilisés par transect, répartis de la base du remblai jusqu'à 10 à 20 m dans le champ. Les épaisseurs de neige présentées à la figure 136 mettent clairement en évidence une accumulation de neige plus importante du côté est (de 60 à 175 cm, Figure 136 B) que du côté ouest (de 25 à 105 cm, Figure 136 A). Comme le démontrent les enregistrements thermiques issus des dataloggers (Figure 136 C, D, E et F), là où les accumulations de neige sont les plus importantes, on observe également les températures de la surface du sol les plus élevées. Ceci se traduit, au pied du remblai côté est (Figure 136 D et 136 F), par des températures supérieures de 6 °C à celles mesurées au pied du talus, côté ouest (Figure 136 C et 136 E), pour les mois de janvier et d'avril 2005. Ainsi, la neige joue bel et bien un rôle d'isolant thermique. Le fait que les accumulations de neige soient plus importantes sur le côté est que sur le côté ouest (Figure 135) s'explique par deux facteurs. D'une part, durant l'hiver, les vents dominants soufflent du sud-ouest, ce qui cause un enneigement plus important contre le flanc sud-est de la piste, notamment dans l'enclave du terminal, au nord-est. D'autre part, lors des opérations de déneigement, la neige est repoussée sur le côté est entre les balises de la piste.

Sur le terrain en avril 2005, il fut observé que l'épaisseur de neige dans la toundra est supérieure à la hauteur de la piste pour toute la section sud-ouest à partir du lac (Figure 135 A). Outre la piste qui constitue un obstacle au vent de surface et qui favorise l'accumulation, la topographie d'ensemble du secteur favorise aussi l'enneigement. En effet, l'espace entre le gros cordon glaciaire et la piste constitue une vaste zone déprimée où la rétention de la neige est favorisée.

L'impact thermique de l'enneigement est majeur. Les compilations mensuelles et annuelles des données enregistrées en surface du sol sous la neige révèlent en effet que la température moyenne annuelle est supérieure à 0 °C jusqu'à une distance d'une quinzaine de mètres de la piste (tableau 13), le long de son flanc est, là où les accumulations sont plus importantes. À l'exception d'un enregistreur, toutes les températures moyennes annuelles de surface au plus près de la piste sont supérieures à 0 °C.

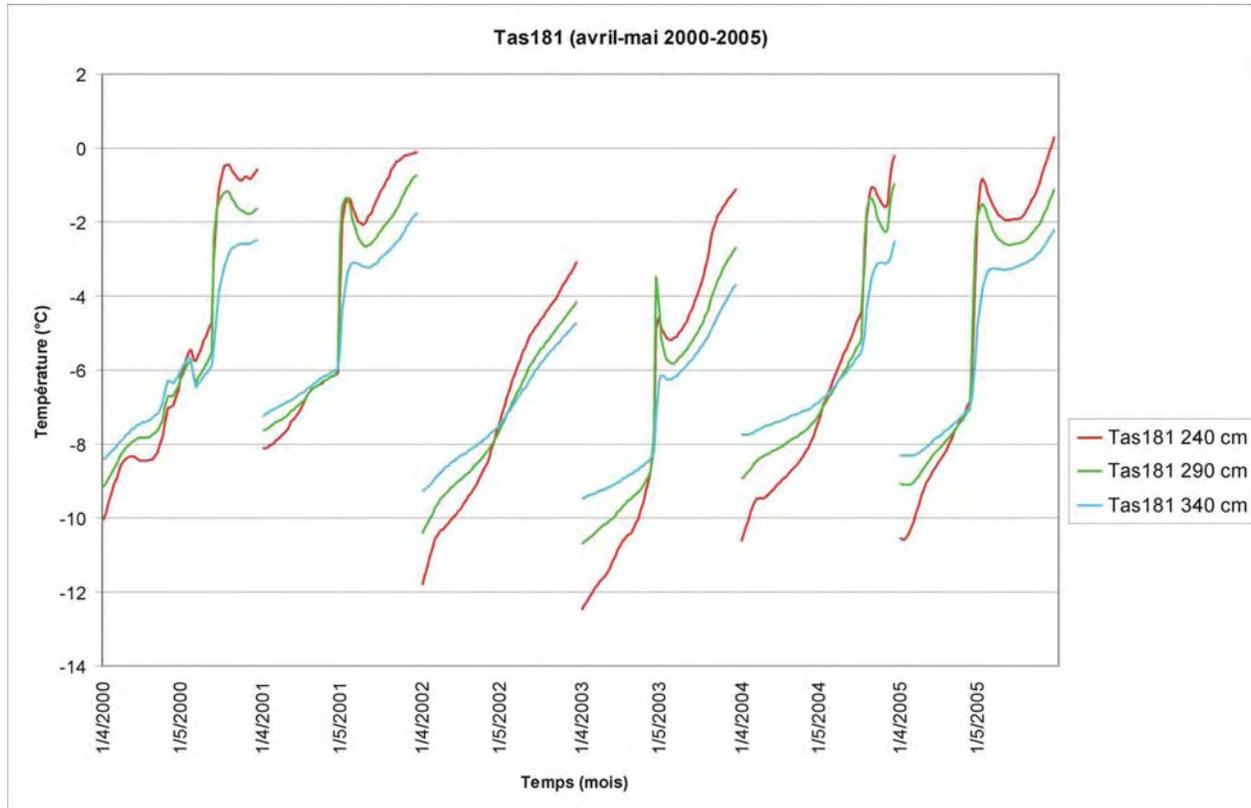


Figure 134 Température du sol pour le câble Tas181 des mois d’avril et mai de 2000 à 2005 (piste, 5+300)

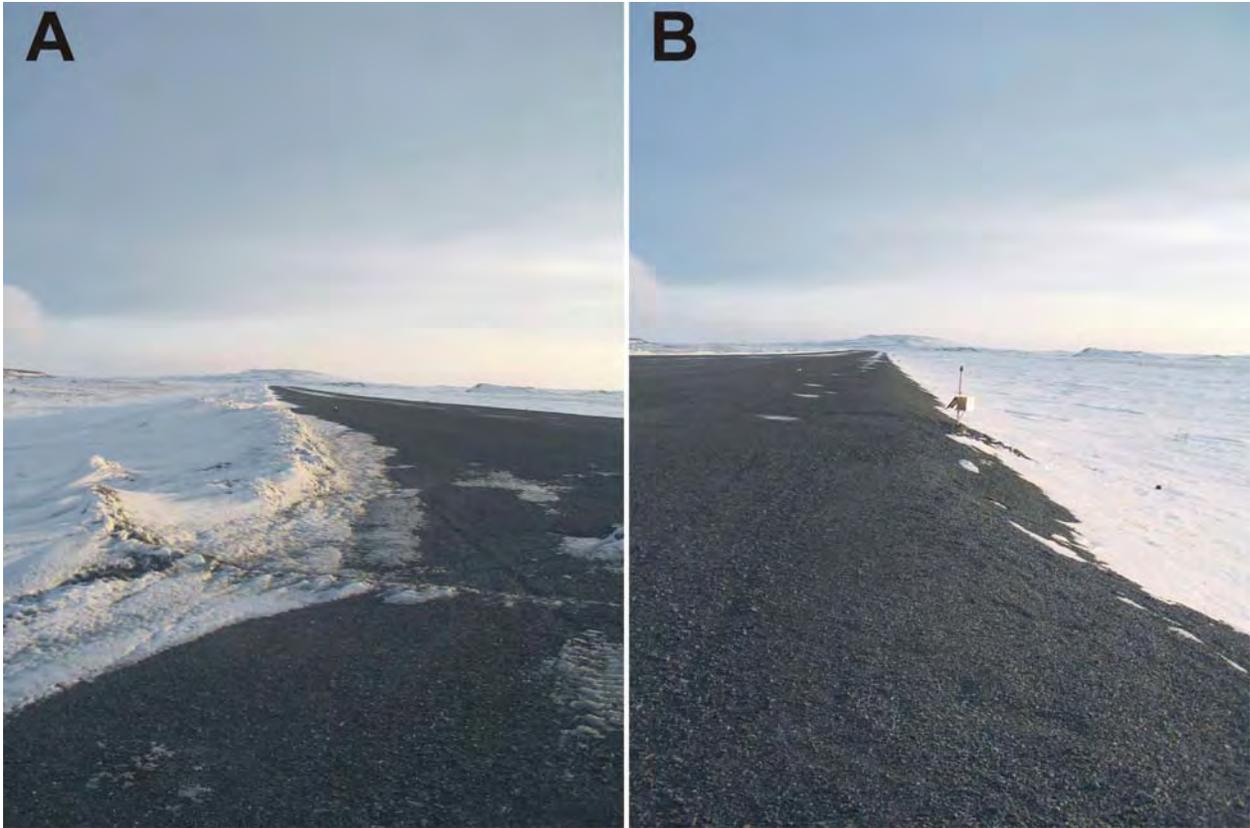


Figure 135 Accumulation de neige sur les bordures de la piste de Tasiujaq

- a- Épais couvert neigeux du côté est ;
- b- moindre couvert neigeux du côté ouest.

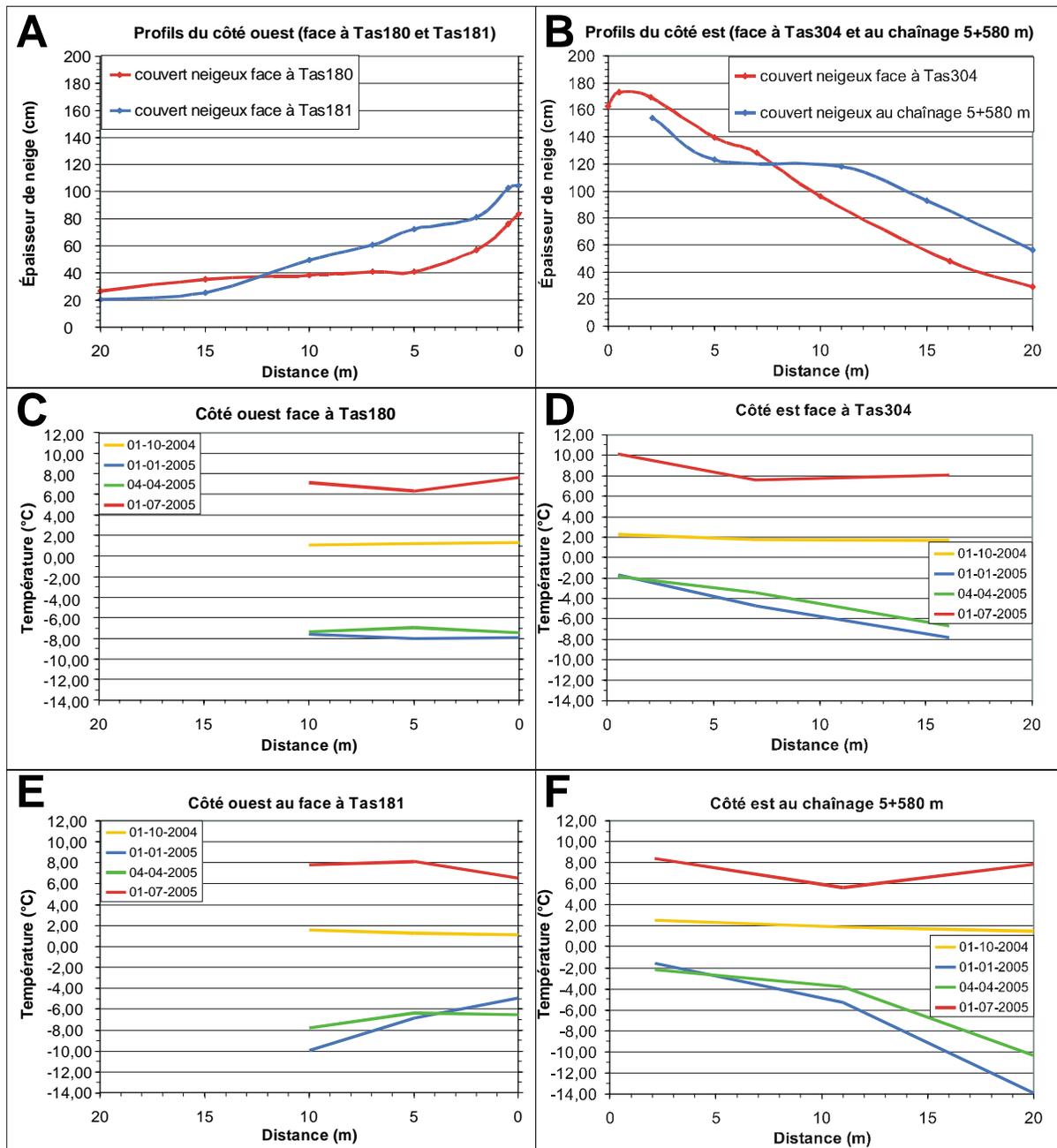


Figure 136 Enneigement des talus de la piste d'atterrissage de Tasiujaq

- a- Profil de l'épaisseur de neige côté ouest ;
- b- Profil de l'épaisseur de neige côté est ;
- c- Températures au sol côté ouest face à Tas180 ;
- d- Températures au sol côté est face à Tas304 ;
- e- Températures au sol côté ouest face à Tas181 ;
- f- Températures au sol côté sud-est au chaînage 5+580 m.

Position par rapport à la piste	Côte est, face à Tas304 (Figures 18B et 18D)			Côte ouest, face à Tas180 (Figures 18A et 18C)			Côte ouest, face à Tas181 (Figures 18A et 18E)			Côte est, au chaînage 5+580 m (Figures 18B et 18F)		
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
Enregistreur												
Distance à la piste (m)	0,5	7,0	16,1	0,0	5,0	10,0	0,0	5,0	10,0	2,1	11,0	20,0
Ep neige Av2005 (cm)	172,7	128,3	48,3	83,8	40,6	38,1	105,0	72,4	38,1	153,7	118,1	55,9
T moy. Août	11,71	9,37	9,63	9,64	8,49	8,89	8,10	9,36	9,64	11,08	8,06	9,52
T moy. Septembre	6,25	5,23	5,14	4,95	4,54	4,65	4,36	4,92	5,15	6,24	4,82	5,04
T moy. Octobre	1,46	1,03	1,05	0,78	0,66	0,45	0,69	0,56	1,00	1,57	1,01	0,92
T moy. Novembre	-1,13	-1,34	-1,37	-0,97	-0,91	-1,28	-1,34	-2,09	-2,22	-0,48	-0,71	-2,38
T moy. Décembre	-1,43	-5,28	-5,11	-4,75	-4,02	-4,48	-3,69	-4,56	-6,80	-1,04	-2,96	-9,68
T moy. Janvier	-2,15	-4,86	-8,01	-8,86	-8,12	-8,69	-6,42	-7,60	-10,95	-2,39	-6,92	-15,04
T moy Février	-2,22	-4,39	-8,22	-8,36	-8,36	-9,06	-7,05	-7,25	-10,66	-2,61	-5,27	-14,76
T moy Mars	-2,05	-3,57	-7,53	-7,31	-7,24	-8,26	-7,27	-6,53	-8,83	-2,22	-4,18	-11,97
T moy Avril	-1,36	-2,00	-4,65	-4,91	-4,63	-4,92	-4,42	-4,12	-5,60	-1,56	-2,50	-6,55
T moy Mai	2,43	1,95	2,97	2,18	1,57	1,59	0,49	1,45	2,30	1,11	1,24	3,13
T moy Juin	9,57	6,90	7,79	7,98	5,99	6,42	6,49	7,99	7,87	7,42	4,50	7,53
T moy 2004/2005	2,77	1,01	0,15	0,05	-0,30	-0,46	-0,14	0,16	-0,74	2,29	0,35	-2,02

Tableau 13 Positionnement et températures moyennes des enregistreurs thermiques

La mise en relation des températures moyennes annuelles de surface avec l'épaisseur de neige mesurée en fin d'hiver permet de déterminer qu'au delà d'une épaisseur de l'ordre de 77 cm, le sol a un bilan thermique annuel positif, donc qui conduira à la dégradation du pergélisol (figure 137). Interpolé à partir des mesures le long de transects (de A à J), le croquis de la figure 138 illustre la zone où l'épaisseur de neige est supérieure à 80 cm tout autour de l'ouvrage.

On remarque également l'expansion d'une végétation arbustive dense le long de la piste, composée principalement de saules et de bouleaux nains. Cette expansion a été favorisée principalement par la protection hivernale offerte aux branches et aux bourgeons par l'accumulation de neige le long du remblai. En retour, cette arbustaie favorise l'accumulation nivale en piégeant la neige transportée au ras du sol par les vents. Par ailleurs, les températures estivales de l'air observées depuis 2002, plus chaudes qu'auparavant, sont très favorables à la croissance végétale. L'effet thermique de l'impact écologique de la piste est donc appelé à s'accroître avec le réchauffement climatique.

4- Diagnostic

a- rôle de la salinité du diamicton :

Une relation empirique générale a été établie entre la salinité de l'eau interstitielle et l'abaissement du point de fusion par Veli et Grishin (1983 ; dans Ladanyi (1996)) :

$$dT = 62 \times \left(\frac{S}{(1000 + S)} \right)$$

où S est la salinité en gr/L.

Pour les salinités mesurées à Tasiujaq (de 4,6 à 18,2 g/L, moyenne de 8.35 g/L), le point de fusion du diamicton varie donc dans l'espace entre -0,29 et - 1,11 °C. La valeur moyenne est de -0.51 °C. En vérifiant où se situent ces valeurs sur les profils thermiques des câbles à thermistances, on a pu estimer les profondeurs possibles que peut maintenant atteindre le dégel du pergélisol ainsi que les valeurs de résistivité électrique correspondantes (tableau 14).

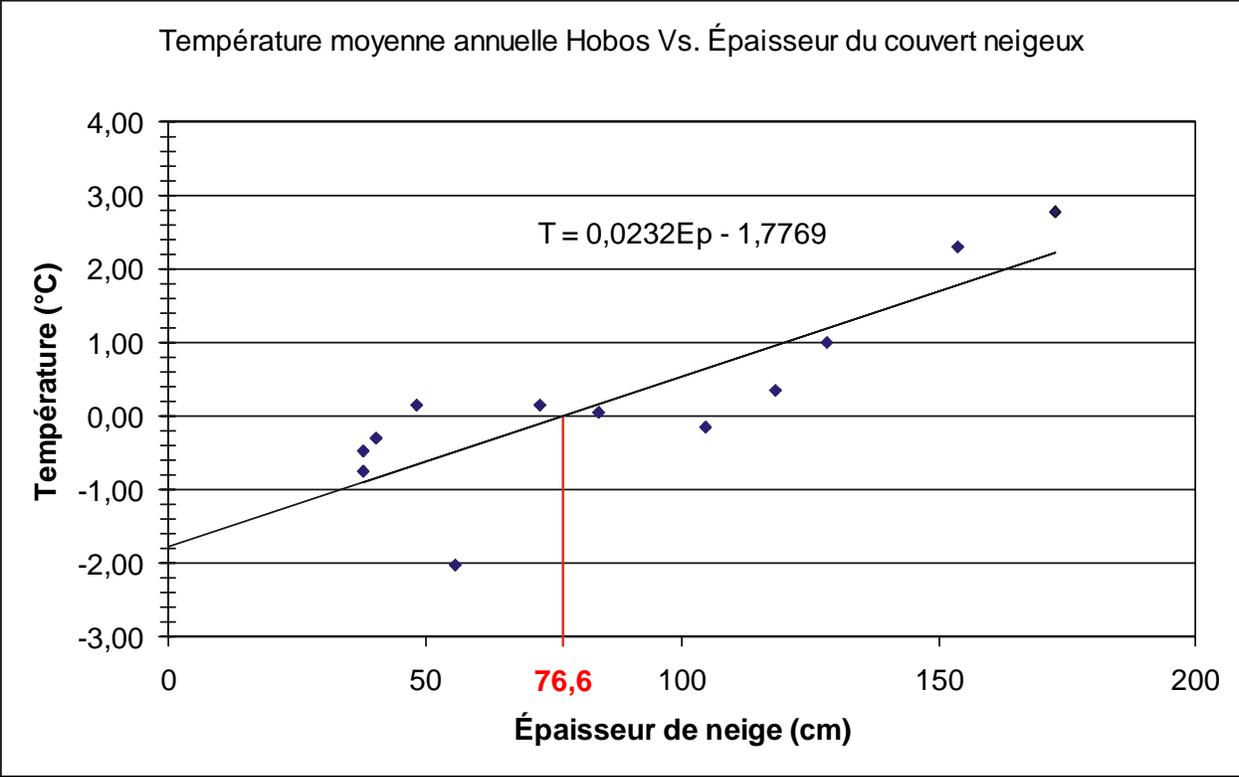


Figure 137 Température moyenne annuelle Hobos Vs. Épaisseur du couvert neigeux

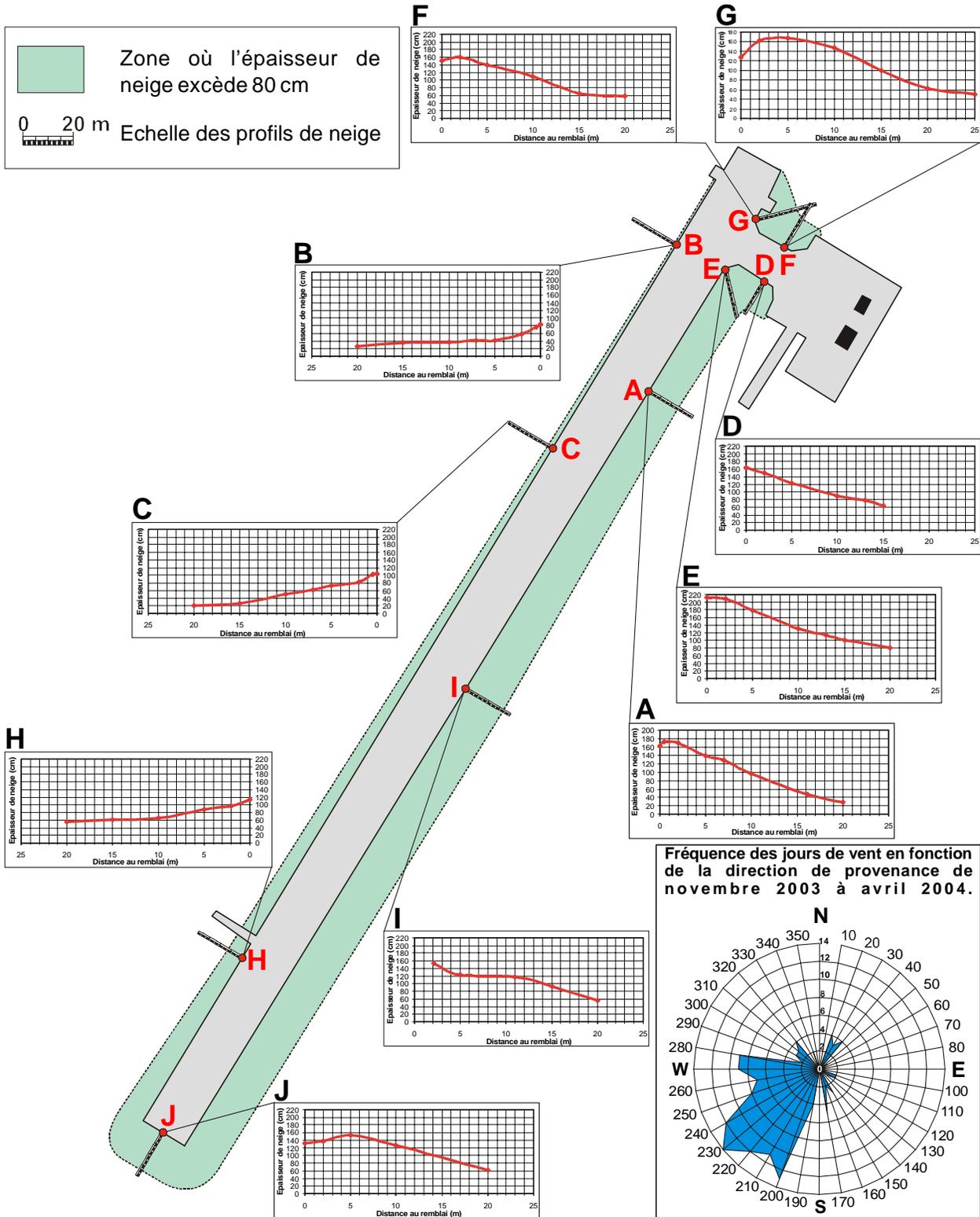


Figure 138 Enneigement de la piste de Tasiujaq et direction des vents

Câble	Température de dégel	Épaisseur du mollisol	Résistivité électrique
Tas180	-1,11 °C	360 cm	3161 Ohm.m ($10^{3,5}$)
	-0,51 °C	314 cm	1995 Ohm.m ($10^{3,3}$)
Tas181	-1,11 °C	466 cm	1585-1995 Ohm.m ($10^{3,2} - 10^{3,3}$)
	-0,51 °C	390 cm	5012 Ohm.m ($10^{3,7}$)
Tas304	-1,11 °C	348 cm	--
	-0,51 °C	244 cm	--

Tableau 14 Températures de dégel et épaisseurs de mollisol potentielle maximales et moyennes en fonction de l'abaissement du seuil de congélation dû à la salinité pour les câbles Tas180, Tas181 et Tas304

Les levés de résistivité électrique montrent qu'aux profondeurs où les températures susceptibles de dégel s'appliquent, les valeurs de résistivité s'échelonnent de 1585 ($10^{3,2}$) à 5012 ($10^{3,7}$) Ohm.m (Tableau 14). En les comparant avec les valeurs cartographiées sous la piste (Figures 125, 126 et 127), on peut constater que déjà le pergélisol est susceptible d'être dégelé sur de longues sections et jusqu'à des profondeurs de plusieurs mètres. Ceci est d'autant plus vrai pour les profils de résistivité levés au bord et pour l'extrémité sud-ouest de la piste.

b- Impact double du réchauffement climatique et de l'enneigement :

Le réchauffement du climat au cours de la dernière décennie a certes contribué hausser les profils thermiques et à faire pénétrer le front de dégel annuel plus profondément sous la piste, la conduisant de façon générale dans un état de stabilité thermique de plus en plus précaire et initiant certainement de tassements. Si le climat continue de réchauffer, à long terme l'instabilité va s'accroître. C'est toutefois l'enneigement qui à court et moyen terme est le principal facteur à l'origine des détériorations observées.

En effet, le patron de dégradation correspond aux conditions d'enneigement. Ainsi dans le secteur de l'aérogare, de la voie d'accès et de la partie nord de la piste, les tassements et fissures de tensions sont apparus surtout du côté est où se produisent les plus grandes accumulations à cause des vents dominants et des opérations de déneigement. Cela se manifeste par des températures moyennes annuelles en surface du sol supérieures à 0 °C au pied du remblai et jusqu'à une distance de 15 m de la piste. Moins enneigé, le côté ouest est moins affecté par les tassements. Toute l'extrémité sud-ouest de la piste est entourée en hiver par un couvert de neige de plus d'un mètre d'épaisseur. Comme la relation de la figure 137 l'indique, le sol de part et d'autre de cette section de la piste ne peut actuellement avoir que des températures moyennes annuelles positives.

En somme, en s'additionnant au réchauffement climatique, l'enneigement fait en sorte que le pergélisol est actuellement en dégradation non seulement au pied du remblai et sous la piste, mais aussi dans le champ en périphérie. Cette dégradation gagne progressivement des bords vers l'intérieur de la piste, où le sous-sol demeure encore plus froid qu'à l'extérieur suite au refroidissement du profil post-construction. La dégradation de la piste et le tassement de la surface se produisent principalement à la suite de la fusion de la glace dans le diamicton glacial, approximativement entre 0,7 et 3 m sous la surface du sol naturel. Cette fusion commence à des températures quelque peu inférieures à 0 °C, à cause de la salinité. La comparaison entre les conditions thermiques et géotechniques existantes juste après la construction en 1990 et les conditions actuelles (2006) est présentée à la figure synthèse 139.

Comme les unités sableuses et graveleuses au delà de 3 m de profondeur sont non gélives, les tassements doivent être consécutifs au dégel du diamicton près de la surface. Les secteurs qui se sont effondrés de 30 à 50 cm ont probablement terminé leurs tassements. Mais ceux-ci sont appelés à s'étendre latéralement et vont progressivement affecter l'ensemble de l'ouvrage. Ce processus prendra quelques années pendant lesquelles il sera nécessaire d'augmenter la fréquence des réparations pour maintenir l'aéroport opérationnel.

A plus long terme, avec le réchauffement climatique. Le dégel atteindra la couche argileuse à plus de 11 m de profondeur. Comme elle n'a pu être caractérisée, il est impossible présentement de seulement spéculer des impacts qui en découleront.

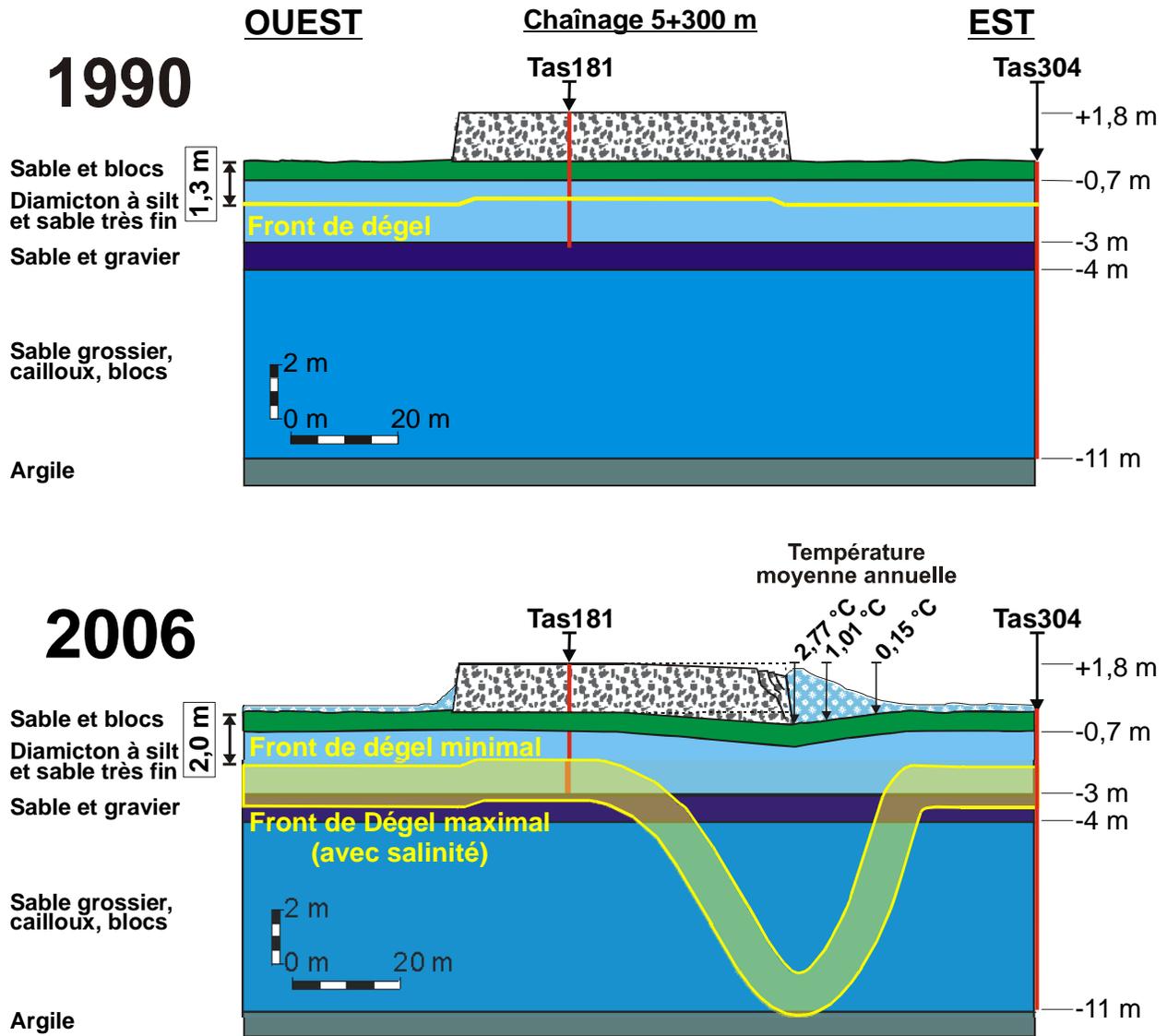


Figure 139 Comparaison des situations thermiques et géotechniques de la piste de Tasiujaq lors de sa construction et en 2006

KANGIQSUALUJJUAQ

1- Contexte

Le Village :

Situé à 160 km au nord-est de Kuujuaq et à 100 km à l'ouest des monts Torngat, sur la côte est de la baie d'Ungava, Kangiqsualujjuaq (58.69 °N ; 65.97 °O) est une communauté de 757 habitants (Ministère des Affaires Indiennes et du Nord). Le village s'est développé à l'intérieur des terres, au fond d'une anse de la rivière George à 25 km du littoral de la baie. Développée dans la zone de pergélisol discontinu et abondant, la communauté de Kangiqsualujjuaq été légalement constituée en municipalité en 1980.

L'aéroport :

L'aéroport de Kangiqsualujjuaq ainsi que ses infrastructures ont été achevés en 1989. La piste d'atterrissage, d'une longueur de 1070 mètres, du chaînage 5+000 au 6+070 m (longueur totale de la surface profilée : 1190 m, du chaînage 4+940 à 6+130 m) et 44 m de largeur (30 m pour la bande de roulement), est orientée selon un axe nord-ouest sud-est (161-341° N), à une altitude moyenne de 56,7 m (47,9 m à son extrémité NO et 65,5 m à son extrémité SE).

2- État des lieux (compte rendu sur l'état de la piste et de la route)

D'après Beaulac et Doré (2005), une seule légère dépression a été remarquée à l'occasion d'un relevé longitudinal du profil de la piste, effectué dans son axe central (chaînage 0+780 m selon les auteurs, non localisable sur les plans de constructions).

Les relevés d'entretien effectués par le MTQ en 2002 et 2003 mentionnent un aplatissement du profil transversal ainsi que la présence de trois dépressions de faible amplitude : une en face du chemin d'accès du côté opposé de l'aérogare, et deux autres affaissements sur le côté gauche de l'accès à la piste du côté de l'aérogare (à 60 m de l'extrémité de la piste, du talus jusqu'au-delà des balises pour l'une, et à 360 m de l'extrémité nord du talus à la ligne de balises pour l'autre).

Enfin, la comparaison entre l'état initial et actuel de la piste réalisée à l'aide de photographies aériennes n'a pas permis de mettre en évidence des problèmes évidents de dégradation du pergélisol ou de la piste.

3- Caractéristiques du terrain

a- Géologie de surface :

L'aéroport de Kangiqsualujjuaq a été construit dans le fond d'une vallée qui est pour partie remplie de till et de sédiments marins (Figure 140 et 141). Sous la piste d'atterrissage, le sol est constitué de dépôts épais de sables et graviers très grossiers. Sa partie centrale repose sur d'anciens niveaux de plage. Non loin, plus à est, le point topographique le plus élevé sous le remblai est un cordon de blocs glaciels soulevé par le relèvement isostatique. Cette géologie de surface a déjà été bien étudiée lors de nombreux travaux de géophysique (Seguin et al., 1988; Gahé, 1988 ; Seguin et Lévesque, 1990). Des excavations faite à la rétrocaveuse lors de l'étude préliminaire des sols avaient permis de constater que ces matériaux ne contiennent aucune glace excédentaire et que, par conséquent, ils ne sont nullement susceptibles de tasser au dégel (Allard et al., 1994). Malgré le fait que les sondages et relevés géophysiques effectués au cours des années 1980 n'aient pas détecté de sols fins, on ne peut totalement exclure la présence de lentilles de granulométrie plus fine et pouvant contenir de la glace par endroits sous la surface du terrain. En effet, dans la vallée de Kangiqsualujjuaq, à distance de la piste, des buttes cryogènes silteuses percent la surface ici et là. De plus, Seguin et Lévesque (1990) ont détecté des poches de faible résistivité électrique ($\cong 10$ k Ω . m) vers 3.5 m de profondeur aux alentours du chaînage 5+010. Advenant un approfondissement du mollisol (3 m maximum en 1990) en conséquence du

réchauffement climatique, de telles couches, ou poches, de sédiments gélifs inclus dans les graviers pourraient fondre et provoquer des tassements.

b- Hydrographie et drainage :

Le réseau hydrographique à proximité de la piste se résume pour l'essentiel à un lac situé à proximité de la section est de la piste, sur son côté nord. Celui-ci est alimenté par les eaux de ruissellement provenant du versant nord de la vallée et se déverse par un petit ruisseau, vers l'est, en direction du village. Ce lac jouxte la piste et est associé à une zone de sable fin mal drainé. Il est à noter que c'est dans ce secteur que des signes de détérioration auraient été observés.

Il est fort probable que l'extrémité est de la piste, là où le remblai atteint son épaisseur maximum de 8,5 m, repose sur des terrains qui sont saturés en eau dès le début du printemps. D'autres mares sont situées à plus de 200 m de l'extrémité nord-ouest de la piste, en association avec des buttes cryogènes, mais à une distance qui ne permet pas une quelconque interaction avec l'infrastructure.

c- Le pergélisol :

De par la nature des terrains traversés par la piste, le pergélisol du secteur de l'aéroport de Kangiqsualujjuaq ne semble pas sensible au dégel. Les dépôts marins littoraux sableux ne peuvent contenir de la glace dans un volume qui excède la porosité du matériel.

Peu de phénomènes et formes périglaciaires sont à rapporter aux abords immédiats de la piste. Seule la concentration de buttes cryogènes riches en glace peut être rapportée à 200-250 m au nord-ouest de l'extrémité nord-ouest de la piste. Celles-ci ne représentent pas une menace pour la piste.

d- Facteurs climatiques :

Deux câbles à thermistances non automatisés apportent des connaissances pertinentes à l'état du pergélisol en rapport direct avec la piste. Le câble HT-300 est en terrain naturel dans les sables et graviers à côté de la piste. Il a vu son profil se réchauffer au cours des années récentes (Figure 142). En octobre 1994, le plafond du pergélisol se trouvait à 2,20 m de profondeur et la température du pergélisol à 18,75 m de profondeur était de l'ordre de $-1,0$ °C, tandis qu'en juin 2006, elle était de $-0,3$ °C. Un réchauffement de $0,7$ °C est donc survenu en 10 ans. Le câble HT-182 est planté dans la piste à son endroit le plus mince, à savoir au chaînage 5+448, à 13 m du centre de la piste, où le remblai fait 2,7 m d'épaisseur. Entre 1989 et 1993, l'isotherme de 0 °C atteignait la profondeur de 4 m, pour une pénétration de 1,3 m dans le sol sous-jacent. Le 6 octobre 2004, le dégel atteignait pour la même période une profondeur de 4,17 m (Figure 4), soit 1,5 m dans le terrain naturel. Cette profondeur est inférieure au 2,2 m d'épaisseur originale de l'ancienne couche active pauvre en glace. Le pergélisol d'avant construction n'est donc pas encore atteint par le front de dégel.

4- Diagnostic

Plus de 15 ans après sa construction, la piste de Kangiqsualujjuaq ne semble pas démontrer de signe de dégradation notable.

Bien qu'il manque des informations concernant le régime thermique de la piste faite d'enregistrements ou de modélisation, il semble peu probable que celle-ci puisse être sujette à une déstabilisation imputable au réchauffement climatique dans un avenir rapproché, à moins que des couches spatialement discontinues de sols gélifs non-observées, mais peut-être présentes, en viennent à dégeler suite à l'approfondissement du mollisol avec le réchauffement climatique. C'est à surveiller. Le rôle du lac à l'extrémité sud-est de la piste est à surveiller aussi; s'il s'agrandissait cela pourrait signifier un début de tassement localisé du pergélisol.



Figure 140 Piste d'atterrissage de Kangiqsualujjuaq

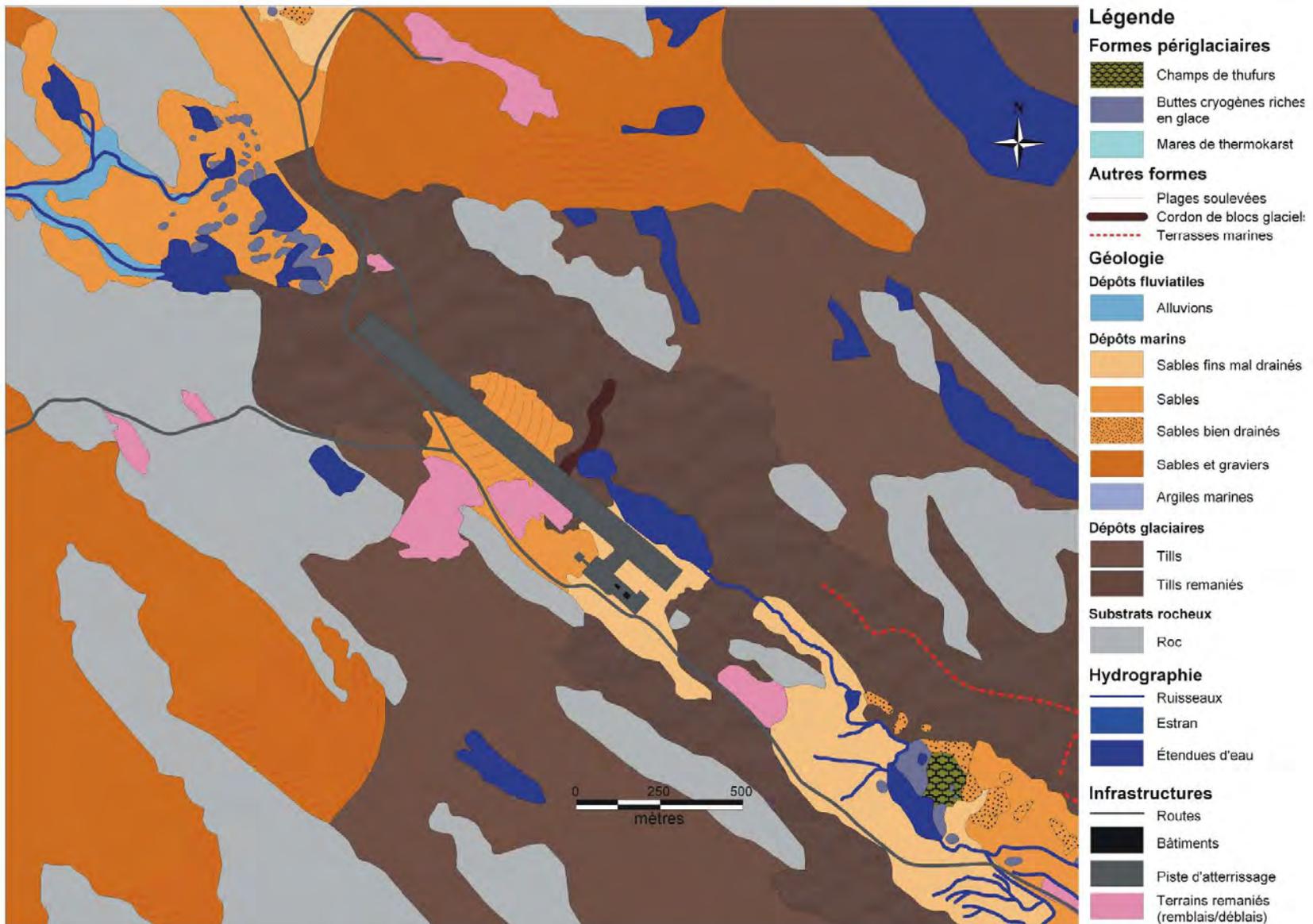


Figure 141 Carte des dépôts de surface de la piste d'atterrissage de Kangiqsualujjuaq

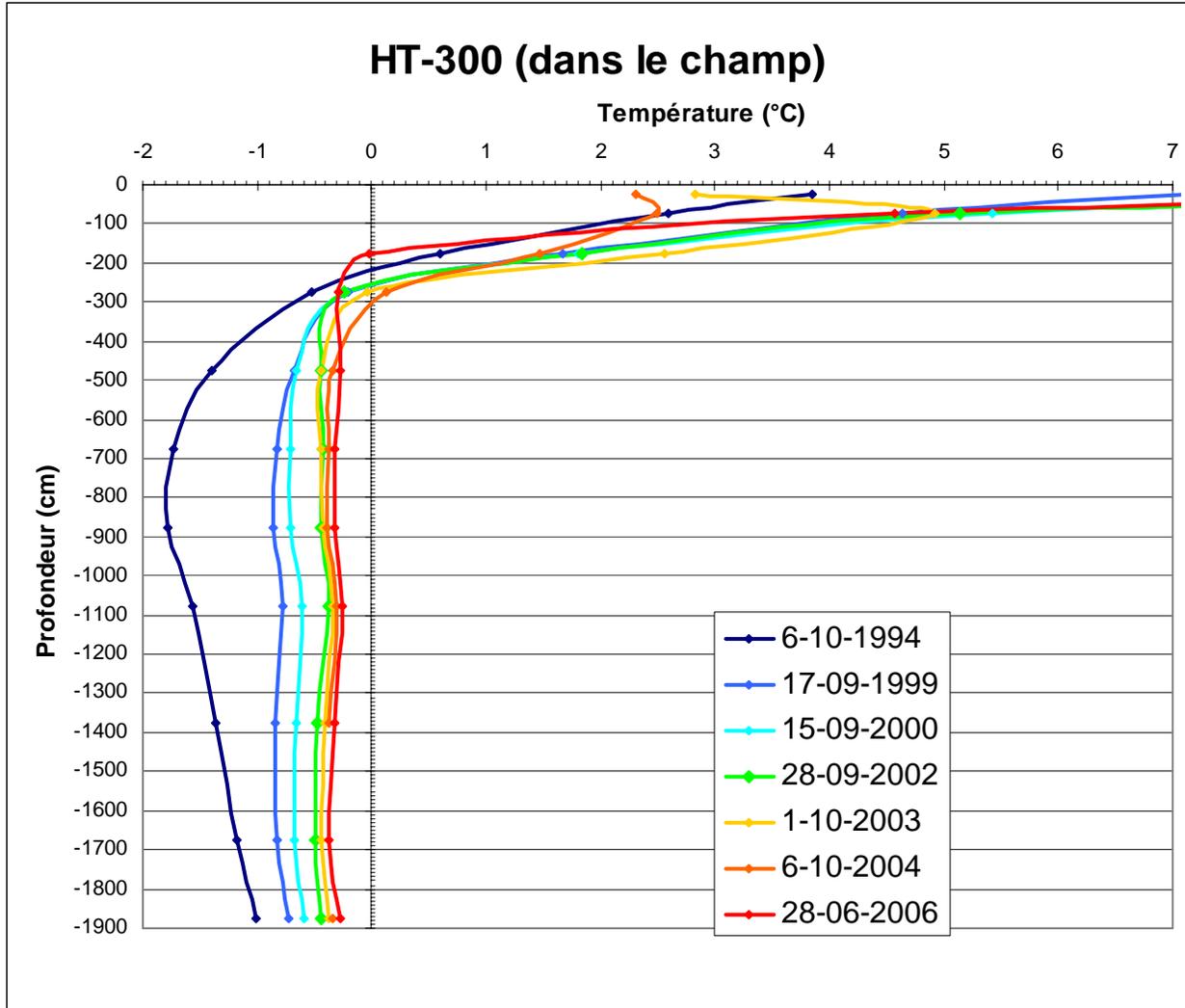


Figure 142 Température du sol dans le champ proche de la piste de Kangiqsualujjuaq (câble HT-300)

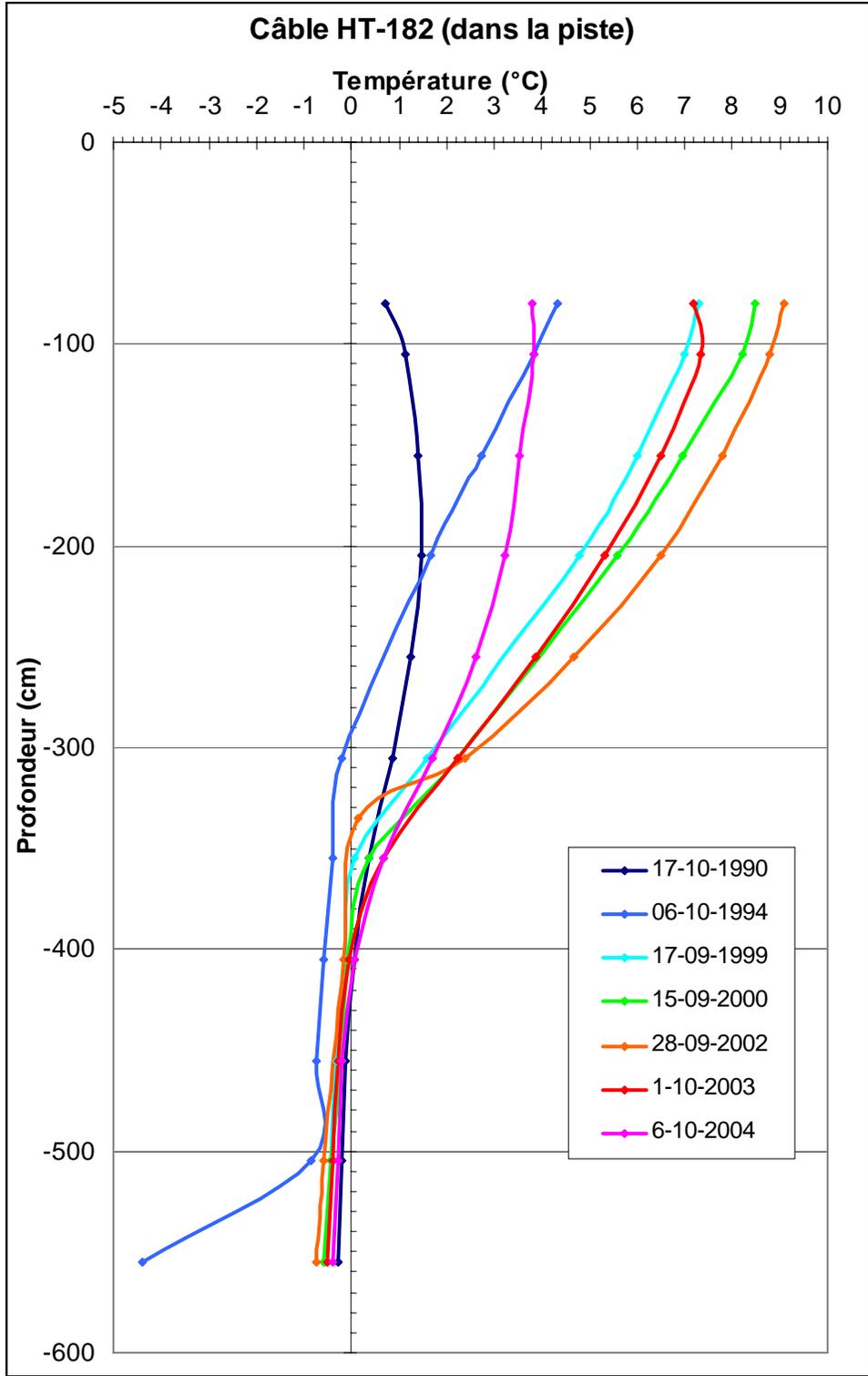


Figure 143 Température du sol sous la piste de Kangiqsualujjuaq (câble HT-182)

Tableau 15 : synthèse des aéroports

Tableau 15 Synthèse des aéroports

Le tableau 15 résume les éléments clés du diagnostic propre à chacun des aéroports ainsi que les risques associés à l'évolution future des pistes dans un contexte de réchauffement climatique. Pour chaque élément présentant un risque, une recommandation d'action est proposée.

SITE	ÉLÉMENTS CLÉS DU DIAGNOSTIC	RISQUES/ÉVOLUTION FUTURS	RECOMMANDATIONS
Umiujaq	<ul style="list-style-type: none"> - Piste sur roc stable sauf courte section - Route instable sur plusieurs sections à dépôts meubles minces. 	<ul style="list-style-type: none"> - tassements localisés et limités possibles, mais remédiables avec entretien 	<ul style="list-style-type: none"> - entretenir - suivre l'évolution et entretenir la route. Ne paver que dans quelques années lorsqu'elle sera stabilisée.
Inukjuak	<ul style="list-style-type: none"> - Affaissement des bordures - Tassement du fond des fossés de part et d'autre (rétention d'eau) - Méconnaissance du pergélisol 	<ul style="list-style-type: none"> - possibles coins de glace appelés à fondre sous la piste - les affaissements vont continuer malgré le resurfaçage de juillet 2006 - incertitude persistante sur l'impact de la fonte du pergélisol à venir sous la piste faute de caractérisation adéquate. 	<ul style="list-style-type: none"> - combler les fossés et adoucir le profil transversal pour le rendre aérodynamique et réduire les accumulations latérales de neige. - canaliser le drainage à distance de la piste en l'éloignant dans toutes les directions possibles. - mieux caractériser le pergélisol local
Puvirnituaq	<ul style="list-style-type: none"> - Sol gélif de ± 1 m d'épaisseur sous le remblai dans la « vallée » - Section de la route d'accès sur sol gélif 	<ul style="list-style-type: none"> - ce secteur tassera éventuellement avec le réchauffement climatique en commençant par le versant ouest enneigé - ce secteur finira par tasser à une date future à cause du réchauffement climatique 	<ul style="list-style-type: none"> - procéder à l'entretien au fur et à mesure (peu d'autre choix ?!) - procéder à l'entretien au fur et à mesure (peu d'autre choix)

SITE (TMA : 2005)	ÉLÉMENTS CLÉS DU DIAGNOSTIC	RISQUES/ÉVOLUTION FUTURS	RECOMMANDATIONS
Akulivik	<ul style="list-style-type: none"> - Section ouest de la piste en plaine sur sable. Argile présente probablement au-delà de 4m de profondeur. - Plusieurs coins de glace sous la piste - Tassement (rétention d'eau dans les fossés) - Section est de la piste en déblai et remblai mince sur till. S'affaisse présentement - Route construite sur sites gélifs dans le secteur près du village 	<ul style="list-style-type: none"> - risque d'érosion thermique de coins de glace si l'eau coule sous la piste - les tassements vont s'accroître sous les fossés qui retiennent de l'eau stagnante - le tassement va se poursuivre et s'étendre - la route restera instable 	<ul style="list-style-type: none"> - entretenir les fossés pour éviter l'écoulement d'eau sous la piste - réparer et entretenir les fossés - entretenir périodiquement la zone en affaissement sur till - ne pas paver ni la route, ni la piste (pergélisol trop sensible)
Ivujivik	<ul style="list-style-type: none"> - Piste sur roc sauf une courte section sur dépôts meubles avec possible présence d'une couche de silt 	<ul style="list-style-type: none"> - sera stable encore longtemps 	<ul style="list-style-type: none"> - surveiller section sur dépôt - mieux caractériser le sol sous le dépôt leverait toute incertitude

SITE (TMA : 2005)	ÉLÉMENTS CLÉS DU DIAGNOSTIC	RISQUES/ÉVOLUTION FUTURS	RECOMMANDATIONS
Salluit	<ul style="list-style-type: none"> - Piste sur roc et sur till Le centre de la piste et les remblais épais ne sont pas encore affectés par la fonte du pergélisol - Secteur au nord de la voie de circulation construit en déblai actuellement affecté par du tassement. La recharge en gravier encombre les fossés et obstrue un ponceau. - Plusieurs secteurs enneigés et mal drainés sur le côté est sont des « points chauds » où le bord du remblai s'affaisse suite à la fonte locale du pergélisol - La route d'accès est abondamment déformée par la fonte du pergélisol en-dessous. 	<ul style="list-style-type: none"> - au fur et à mesure du réchauffement, le tassement va s'étendre dans les secteurs en déblai et dans les secteurs à remblai mince sur till (un secteur non encore affecté à l'extrémité sud) - Cette dégradation locale se poursuivra si non contrôlée à cause de la récurrence des congères - la route d'accès va continuer de se dégrader - les processus liés à l'approfondissement du plafond du pergélisol riche en glace dans la vallée vont finir par briser la route (glissements, érosion thermique). 	<ul style="list-style-type: none"> - prévoir l'entretien du secteur nord en tassement ; récurer et réaménager les fossés engorgés de gravier - re-concevoir les modalités de déneigement et le système de drainage du côté est - enlever le pavage de la route - instaurer un programme de maintien de l'intégrité écologique le long de la route
Kangiqsujjuaq	<ul style="list-style-type: none"> - Piste et route sur le roc 	<ul style="list-style-type: none"> - stable 	<ul style="list-style-type: none"> -

SITE	ÉLÉMENTS CLÉS DU DIAGNOSTIC	RISQUES/ÉVOLUTION FUTURS	RECOMMANDATIONS
Quaqtaq	<ul style="list-style-type: none"> - Moitié nord de la piste sur le roc, moitié sud sur des dépôts. Court secteur central en déblai - Fossé de drainage subit des inondations qui infiltrent la piste lors de printemps brusque. - Présence probable de quelques coins de glace sous la piste - Route apparemment stable 	<ul style="list-style-type: none"> - avec le dégel à venir, des tassements sont possibles dans la partie centrale, mais n'ont pas commencé à se manifester - l'inondation des fossés sera récurrente et de plus en plus fréquente avec les printemps hâtifs. 	<ul style="list-style-type: none"> - surveiller et entretenir la piste - dégager la neige des fossés du côté sud à la fin de l'hiver pour prévenir l'inondation. - le concept de drainage aura éventuellement à être révisé
Kangirsuk	<ul style="list-style-type: none"> - Moitié ouest et extrémité est sur le roc. Longue section en déblai sur till qui tasse suite au dégel du pergélisol depuis la construction 	<ul style="list-style-type: none"> - le tassement va se poursuivre, s'accélérer et s'étendre avec le réchauffement climatique 	<ul style="list-style-type: none"> - prévoir des travaux de réparation continus à long terme (autres choix ?)
Aupaluk	<ul style="list-style-type: none"> - Piste construite sur sable et gravier - Présence d'un réseau de coins de glace en dessous - Le pergélisol n'a pas encore commencé à fondre en-dessous - Fossé de drainage longe la piste sur le côté est retient de l'eau stagnante 	<ul style="list-style-type: none"> - risque éventuel de l'érosion hydro-thermique de coins de glace sous la piste, ce qui pourrait la sectionner 	<ul style="list-style-type: none"> - entretien de la pente du fossé pour maintenir l'évacuation d'eau et prévenir un écoulement sous la piste - idem

SITE (TMA : 2005)	ÉLÉMENTS CLÉS DU DIAGNOSTIC	RISQUES/ÉVOLUTION FUTURS	RECOMMANDATIONS
Tasiujaq	<ul style="list-style-type: none"> - Piste en remblai sur terrain plat sur une épaisse séquence stratigraphique de dépôts meubles. Deux couches en surface sont porteuses de risque. - Une couche sensible sur dégel entre 0.7 et 3 m de profondeur - Une couche d'argile d'épaisseur inconnue au-delà de 11 m de profondeur - Tassements importants le long des flancs s'étendant jusqu'au centre par endroits - Les congères qui accumulent tout le tour causent une température du sol trop chaude pour le maintien du pergélisol - Le pergélisol fond sous les bords. Le régime thermique au centre est encore froid, mais réchauffe avec le climat 	<ul style="list-style-type: none"> - les dégradations observées vont se poursuivre et s'étendre à l'ensemble - On assistera à un ralentissement ou un arrêt des dégradations quand la couche sensible entre 0.7 et 3 m aura fini de dégeler (quand ? selon le rythme du réchauffement). - À plus long terme (quand ?), le dégel de l'argile en profondeur pourrait changer totalement le régime géomorphologique. 	<ul style="list-style-type: none"> - prévoir des opérations récurrentes d'entretien majeur - re-profiler les versants ?

SITE (TMA : 2005)	ÉLÉMENTS CLÉS DU DIAGNOSTIC	RISQUES/ÉVOLUTION FUTURS	RECOMMANDATIONS
Kangiqualujjuaq	<ul style="list-style-type: none"> - Piste sur dépôts grossiers épais de façon générale. Des poches de pergélisol sensible en profondeur dans ces dépôts pourraient exister mais n'ont pas été détectées avec certitude - Pas de problème dû au pergélisol actuellement malgré un léger réchauffement des températures sous la piste. 		<ul style="list-style-type: none"> - Surveiller, entretenir

Conclusion

La compilation et l'analyse de l'ensemble des dossiers d'aéroports au Nunavik fait ressortir quelques faits saillants relatifs au réseau:

- Le pergélisol à l'aéroport d'Inukjuak reste encore mal caractérisé. Cette situation découle d'un manque de moyens pour organiser en 2005 ou en 2006 une campagne de sondages avec une équipe, laquelle aurait requis environ une semaine de travail appuyée par une logistique suffisante (logement, transport d'équipement, salaires, location de machinerie).
- L'enneigement des bordures des pistes et des fossés est présentement le facteur principal qui contribue à la dégradation du pergélisol. Cette dégradation tend ensuite à progresser vers l'intérieur des ouvrages. Toutes les pistes sont sensibles à ce processus à cause de la géométrie des remblais qui favorise l'accumulation de la neige redistribuée par le vent. Tasiujaq, Inukjuak et Salluit sont actuellement les cas les plus évidents. Avec le réchauffement climatique, ce facteur est appelé à s'accroître parce que plus la température atmosphérique est élevée de façon générale moins l'épaisseur de neige requise pour isoler le pergélisol est importante.
- Au problème d'enneigement est associé un problème de rétention de flaques d'eau dans les fossés dont la pente est devenue inégale à cause des tassements différentiels. Il en résulte une accélération des tassements par réchauffement radiatif en été. Il en résulte aussi que de l'eau percole dans la structure de certaines pistes (entre autres Salluit), y apportant de la chaleur par conduction.
- Comme les données thermiques le démontrent dans tous les cas documentés, la fonte du pergélisol ne se produit actuellement que de façon localisée sous quelques pistes. Dans la majorité des cas, ce processus survient sous des sections de pistes construites en déblai. C'est le cas en particulier de Kangirsuk, Salluit et Akulivik. Quatqaq a aussi une section de piste en déblai à surveiller, mais selon les observations disponibles, son sous-sol ne semble pas extrêmement sensible au dégel.
- En conséquence du réchauffement climatique qui va se poursuivre, l'approfondissement du mollisol sous les remblais, avec ses conséquences, va se faire sentir progressivement, en commençant par les secteurs les plus minces.
- Là où les données thermiques permettent des comparaisons entre les pistes et les sols naturels avoisinants (par exemple à Akulivik et à Tasiujaq), l'approfondissement du mollisol depuis quinze ans a été plus important dans les sols naturels que sous les pistes. Un facteur principal explique ce fait : l'amplitude thermique est réduite dans le sol sous les pistes à cause de l'épaisseur des remblais ; c'est simplement un effet géométrique sur le profil thermique. Un autre facteur potentiellement contribuant mais non quantifié est la ventilation des remblais en blocaille qui favorise le refroidissement du sous-sol par convection en hiver et la conductivité thermique élevée des roches concassées qui les composent.
- Certaines pistes sont construites sur des réseaux de coins de glace qui n'ont pas encore commencé à fondre (Aupaluk et Akulivik pour sûr, mais aussi possiblement Quatqaq et Inukjuak). Ces coins de glace constituent une menace à long terme avec le réchauffement du pergélisol. À court terme le principal risque est l'écoulement d'eau sous ces pistes qui viendrait provoquer l'érosion thermique de ces coins et engendrer des affaissements linéaires dans les ouvrages. D'où la nécessité d'un entretien adéquat ou d'un « redesign » des fossés de drainage.

En somme, des travaux d'entretien importants sont à prévoir pour maintenir les pistes et les routes pleinement opérationnelles. Dans un premier temps, l'adaptation aux conditions d'enneigement et l'amélioration des dispositifs de drainage sont prioritaires. Dans un deuxième temps, il faut prévoir des travaux récurrents pour l'entretien, en fonction de la vitesse de dégradation du pergélisol. Terminé au début des années 1990, il y a donc plus de 15 ans, le réseau est de toute façon parvenu à une étape normale de travaux d'entretien, certains ayant déjà commencé. Les réfections requises doivent s'inclure dans le cycle d'entretien des infrastructures de transport, comme c'est le cas du réseau de routes et de ponts ailleurs au Québec.

- Afin d'être en mesure de prévoir l'expansion spatiale de la dégradation du pergélisol sous les pistes, il est recommandé de procéder à la cartographie numérique en 3D des épaisseurs de remblais. Cela peut être fait en numérisant les plans originaux. Une fois cette étape accomplie, une modélisation numérique du régime thermique des ouvrages, en fonction des meilleures hypothèses de réchauffement climatique du Modèle Régional Canadien du Climat permettra d'estimer le rythme des tassements à venir, leur ampleur et leur étendue. Ces calculs bénéficieraient d'être validés sur les résultats de mesures obtenues des câbles à thermistances; ces mesures sont aussi des valeurs permettant de calculer de façon empirique les propriétés thermiques (diffusivité, conductivité) des matériaux à introduire dans la modélisation. Convertis en volume de matériaux nécessaires aux réfections, les résultats de ce travail permettront d'estimer les coûts d'entretien pour les années à venir et, donc, de planifier les opérations d'entretien aussi bien en termes financiers qu'en termes techniques.
- Parallèlement, continuer de tester de nouveaux concepts d'ingénierie pour retarder les dégradations du pergélisol dues au réchauffement climatique. En plus de créer de nouvelles connaissances pratiques pour l'aménagement nordique, cette approche est susceptible de conduire à un étalement des coûts d'entretien sur un plus long terme en ralentissant le rythme des dégradations.

Références

- Allard, M., Pilon, J.A. et Frydecki, J. (1994). Le pergélisol et les aéroports du Québec nordique. Rapport final au Ministère des transports du Québec. 72 p.
- Allard, M., Wang, B. and Pilon, J.A. (1995). Recent cooling along the Southern Shore of Hudson Strait, Québec, Canada, documented from permafrost temperature measurements. *Arctic and Alpine Research*, 27: 157-166.
- Allard, M., Fortier, R., Gagnon, O. et Michaud, Y. (2004) Problématique du développement du village de Salluit, Nunavik. Rapport final. Une communauté en croissance sur un terrain sensible au changement climatique. Ministère de la sécurité publique du Québec. 93p.
- Arctic Climate Impact Assessment » (2004) Impacts of a warming Arctic. Cambridge University Press, 139 p.
- Beaulac, I. et Doré, G. (2005) Bilan de la condition des pistes et des chemins d'accès menant aux aéroports du Nunavik. Université Laval, Département de génie civil, rapport GCT-2005-09, 123 p.
- Bouchard, F. (2005) Topoclimat et microclimats de la vallée de Salluit (Nunavik). Université Laval, Département de géographie, mémoire de maîtrise.
- Calmels, F.C., Gagnon, O. and Allard, M. (2005). A portable earth-drill system for permafrost studies. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16: 311-315.
- Environnement Canada (2007) Site Web de données climatiques : www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca
- Gahé, Émile (1988). Géomorphologie cryogène et géophysique dans la région de Kangiqsualujuaq. Département de géographie, Université Laval, thèse de doctorat
- Holland, M.M., Bitz, C.M. and Tremblay, B. (2006) Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters*, 33:L23503, DOI: 10.1029/2006GL028024/2006
- Ladanyi (1996) La conception et la réhabilitation des infrastructures de transport en régions nordiques. Ministère des transports du Québec, Études et recherches en transports, Génie et environnement, 123p.
- Lévesque, R., Allard, M., Seguin, M.K. et Pilon, J.A. (1987). Recherches en cours sur le pergélisol, aéroport de Salluit. Rapport préliminaire dans le cadre du programme de recherche sur les infrastructures en milieu de pergélisol. Transports Québec, 32 p.
- Ménard, É., Allard, M. and Michaud, Y. (1998). Field data of ground surface temperatures in various biophysical micro-environments near Umiujaq, eastern shore of Hudson Bay, Canada. In A.G. Lewkowicz and M. Allard (editors) *Permafrost, Seventh International Conference, Proceedings*, Yellowknife, Canada. Université Laval, centre d'études nordiques, Collection Nordicana, No 57, p. 723-730.
- Savard, C. (2006) Imagerie Électrique de la sous-fondation pergélisolée des pistes d'atterrissage au Nunavik. Mémoire de maîtrise, Département de géologie et génie géologique, Faculté des sciences et génie, Université Laval, Québec, 223 p.
- Seguin, M.K., Gahé, É. Allard, M. and Ben Miloud, K. (1988) Permafrost geophysical investigation at the new airport site of Kangiqsualulluaq, Northern Québec, Canada. *In Permafrost, Fifth International Conference, Proceedings*, Trondheim, Norway, p. 980-988.

Sushama, L., Laprise, R. and Allard, M. (2006) Modeled current and future soil thermal regime for northeast Canada. *Journal of Geophysical research*, 111. D18111, DOI:10.1029/2005JD007027/2006

Tremblay, C. and Doré, G. (1988) Airport network and housing construction programs in northern Québec, Canada. *In* Permafrost, Fifth International Conference, Proceedings, Trondheim, Norway, p. 1500-1506.

Seguin, M.K. et Lévesque, R. (1990) Détection, par méthodes géophysiques, de sols gélifs à l'emplacement de pistes d'atterrissage au Nunavik, Québec. Dans Burgess, M.M., Harry, D.G. et Sego, D.C. (éditeurs) *Pergélisol-Canada, Actes de la cinquième conférence canadienne sur le pergélisol*. Québec, Centre d'études nordiques, Collection Nordicana, No 54, p 239-245.