

**EXPERIMENTATION DE TECHNIQUES DE MITIGATION DES
EFFETS DE LA FONTE DU PERGELISOL SUR LES
INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT DU NUNAVIK :
AEROPORT DE TASIUJAQ**

Rapport final



Alban Ficheur

Guy Doré

Rapport GCT-2010-06

Ministère des transports du Québec

Groupe de recherche en ingénierie des chaussées

www.gci.ulaval.ca

Juin 2011



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de génie civil

Résumé

Trois techniques de mitigation, un remblai à convection d'air, une section à drain thermique et une section à pente adoucie, ont été mises en place dans l'épaulement du remblai de la piste d'aéroport de Tasiujaq afin de valider, par des essais en conditions réelles d'exploitation, leurs efficacités respectives. Ces trois techniques favorisent l'évacuation de la chaleur contenue dans le sol, afin de préserver l'intégrité du pergélisol présent sous la piste. Cette étude présente les résultats des trois années de suivi des données thermiques. Par ailleurs, des simulations numériques effectuées avec le logiciel *GéoStudio*, ont permis de reproduire ce que pourrait être le comportement d'une section de référence sans les écoulement d'eau qui la perturbent grandement sur le terrain. Enfin une étude économique des différentes techniques de mitigation a été réalisée sous l'approche coût / bénéfice technique.

Abstract

Three mitigation techniques, an air convection embankment, an embankment with an integrated heat drain and an embankment with gentle slope, have been implemented in the shoulder of the Tasiujaq airfield. The purpose of this study is to validate through testing in real operating conditions, their respective performance. Those techniques increase heat extraction from the soil and thus preserve integrity of permafrost existing under the runway. This paper presents results for the three years of thermal data monitoring. Moreover numerical simulations, done with the software *GeoStudio*, allowed to predict the behavior of a reference section without disruption by a water flow. Finally an economical study of the different mitigations techniques was done under the approach cost / technical benefit.

Table des matières

Chapitre 1.0.....	1
Mise en contexte	1
 Chapitre 2.0.....	 4
Revue de littérature.....	4
2.1. Le pergélisol	4
2.2. Présence d'infrastructures et réchauffement du sol	7
2.2.1. Perturbation de l'équilibre thermique à la surface du sol.....	7
2.2.1.1. Le bilan thermique à la surface du sol	7
2.2.1.2. Le type de couvert de surface	9
2.2.1.3. La présence d'eau.....	10
2.2.1.4. Le vent	11
2.2.1.5. Les radiations solaires	12
2.2.1.6. La température de l'air	13
2.2.2. Les changements climatiques	14
2.2.2.1. Etat des changements climatiques.....	14
2.2.2.2. Effets des changements climatiques	17
2.2.3. Les mécanismes de dégradation	18
2.2.3.1. Dégradation liées aux changements climatiques	18
2.2.3.2. Dégradations liées à l'infrastructure	20
2.3. Les méthodes de mitigation	22
2.3.1. Méthodes basées sur la prévention de la pénétration de la chaleur.....	24
2.3.1.1. Augmentation de l'épaisseur du remblai	24
2.3.1.2. Utilisation d'une couche de tourbe	25
2.3.1.3. Utilisation d'une couche d'isolant polystyrène / polyuréthane.....	26
2.3.1.4. Utilisation de surfaces réfléchissantes	27
2.3.1.5. Ecrans contre le soleil et la neige.....	28
2.3.2. Méthodes basées sur l'extraction de chaleur	29
2.3.2.1. Utilisation de thermosiphons	29

2.3.2.2.	Déneigement	31
2.3.2.3.	Utilisation de conduits de ventilation	31
2.3.2.4.	Remblai à convection d'air	33
2.3.2.5.	Drain thermique	36
2.3.3.	Méthodes basées sur le renforcement du remblai	38
2.3.3.1.	Utilisation de géosynthétiques	38
2.3.3.2.	Bermes et pentes douce.....	39
2.3.4.	Autres méthodes	40
2.3.4.1.	Dégel provoqué.....	40
2.3.4.2.	Excavation/ remplacement.....	40
2.3.4.3.	Entretien	40
2.3.4.4.	Couvert végétal	40
2.3.5.	Combinaisons de techniques	41
Chapitre 3.0.....	42	
Pertinence du projet.....	42	
3.1.	Lacunes des connaissances par rapport à la problématique	42
3.2.	Objectifs du projet	43
3.3.	Organisation du document.....	44
Chapitre 4.0.....	46	
Site d'essai de Tasiujaq.....	46	
4.1.	Localisation	46
4.2.	Détérioration de la piste.....	47
4.3.	Caractéristiques locales	48
4.3.1.	Géologie du site.....	48
4.3.2.	Enneigement.....	52
4.3.3.	Drainage	55
4.4.	Sections expérimentales	56
4.5.	Instrumentation	59
4.5.1.	Emplacement de l'instrumentation.....	59

4.5.2.	Acquisition des données.....	60
Chapitre 5.0.....		62
Analyse des données thermiques.....		62
5.1.	Correction des données.....	62
5.1.1.	Défectuosité du SAD#3.....	62
5.1.2.	Traitement des données.....	63
5.2.	Données thermiques.....	66
5.2.1.	Données en fonction du temps.....	67
5.2.2.	Données par profondeur.....	70
5.2.2.1.	En dessous du contact remblai / sol naturel.....	71
5.2.2.2.	1 mètre sous le contact remblai / sol naturel.....	73
5.2.2.3.	1,7 mètre sous le contact remblai / sol naturel.....	74
5.2.3.	Données trompettes.....	75
5.2.3.1.	Comportements saisonniers.....	75
5.2.3.2.	Comportements extrêmes.....	78
5.2.4.	Températures issues des systèmes de ventilation et température de l'air extérieur.....	80
5.2.4.1.	Température de l'air extérieur.....	81
5.2.4.2.	Différences de température entre cheminée d'entrée et cheminée de sortie.....	82
5.2.4.3.	Analyse des températures des entrées et sorties d'air.....	85
5.3.	Efficacité des sections.....	87
5.3.1.	Efficacité évaluée selon la température à l'interface remblai / sol naturel.....	87
5.3.2.	Efficacité évaluée selon l'indice d'extraction de chaleur.....	89
Chapitre 6.0.....		96
Simulations numériques.....		96
6.1.	Logiciel utilisé.....	96
6.2.	Le modèle.....	98
6.2.1.	Principe du modèle.....	98
6.2.2.	Paramètres du modèle.....	99
6.2.2.1.	Géométrie du modèle.....	99

6.2.2.2.	Maillage du modèle.....	101
6.2.2.3.	Propriété des sols	101
6.1.1.1.1.	Conductivité thermique.....	101
6.1.1.1.2.	Teneur en eau	102
6.1.1.1.3.	Capacité thermique	102
6.2.2.4.	Conditions initiales et limites.....	102
6.3.	Résultat des simulations	104
6.3.1.	Modèle de la section à pente douce.....	104
6.3.2.	Modèle de la section de référence	107
6.3.3.	Correction des efficacités	110
6.3.3.1.	Correction de la température à l'interface remblai / sol naturel	110
6.3.3.2.	Correction des indices d'extraction	112
Chapitre 7.0.....	114	
Coûts des différentes techniques.....	114	
7.1.	Introduction	114
7.2.	Coûts de construction des sections	115
7.3.	Durées de vie et coûts d'entretien des sections	118
7.4.	Graphiques de rentabilité.....	120
Chapitre 8.....	124	
Discussion.....	124	
8.1.	Discussion sur les données thermiques	125
8.1.1.	La section de référence.....	126
8.1.2.	La section à pente douce	126
8.1.3.	La section à remblai à convection d'air.....	127
8.1.4.	La section à drain thermique	128
8.2.	Discussion sur les modélisations	129
8.3.	Discussion sur l'étude de rentabilité.....	130

Chapitre 9.....	133
Conclusion.....	133
Bibliographie.....	135
Annexe 1 :	141
Sections types des remblais d'essais	141
Annexe 2 :	145
Disposition de l'instrumentation dans les sections	145
Annexe 3 :	149
Analyse des données mensuelles.....	149

Liste des tableaux

Tableau 1. Stratigraphie du sondage TAS_F3	51
Tableau 2. Paramètres du modèle pour les 2 couches de sol	105
Tableau 3. Données caractéristiques des paramètres considérés (tiré de (Binxiang et coll., 2007) et (Wen et coll., 2007))	105
Tableau 4. Différentiel de température à l'interface remblai / sol naturel entre les différentes sections et la section de référence tout au long de la période de suivi	112
Tableau 5. Liste des coûts associés à la construction de chaque section sur une largeur de 50 mètres à Tasiujaq en septembre 2007	116
Tableau 6. Coût de construction des quatre sections sur une largeur de 50 mètres à Tasiujaq en septembre 2007	117
Tableau 7. Coût de construction et durée de vie des quatre sections sur une largeur de 50 mètres à Tasiujaq	119

Liste des figures

Figure 1. Localisation des quatorze communautés inuites dans la région du Nunavik (Lemelin et coll., 2008).....	1
Figure 2. Schématisation des températures minimales et maximales d'un sol contenant du pergélisol (tiré de Osterkamp et Burn, 2003).....	5
Figure 3. Distribution des zones de pergélisol (tiré de Ressources naturelles Canada, ?).....	6
Figure 4. Schéma des échanges énergétiques entre le sol et l'atmosphère (tiré de Hermansson, 2004).....	8
Figure 5. Tendances climatiques à Kuujuaq entre 1948 et 2006 (tiré de Allard et coll., 2009)....	15
Figure 6. Evolution de la distribution du permafrost entre la période 1901-1930 (image du haut) et la période 2071-2100 selon le modèle B1, HadCM3 (image du bas) (tiré de Aus des Beek et coll., 2008).....	16
Figure 7. Evolution des températures à des profondeurs sélectionnées à Tasiujaq entre 1993 et 2006 (tiré de Allard et coll., 2009).....	17
Figure 8. Relation entre la MAGT (t), l'amplitude des variations de température (A) et la profondeur du pergélisol (ξ) (tiré de Cheng et coll., 2004).....	19
Figure 9. Profils des vitesses des ondes de cisaillement par une étude MASW à l'aéroport de Puvirnituk (tiré de Karray et coll., 2009).	20
Figure 10. Mécanisme de dégradation (tiré de Doré et coll., 2007).....	22
Figure 11. Taille critique de l'épaisseur du remblai en fonction du MAAT pour le projet du Qinghai-Tibet Railway (tiré de Cheng et coll., 2004).....	25
Figure 12. Photo du déplacement des plaques de polystyrène (tiré de Gandhal, 1978).....	27
Figure 13. Ecran solaire / neige le long du projet Qinghai -Tibet Railway (modifié de Cheng et coll., 2007).....	29
Figure 14. Schéma d'une section test avec thermosiphon enfouit complètement (adapté de Xu, 2007).....	30
Figure 15. Installation de bouchons sur des conduits d'air transversaux le long du Qinghai-Tibet Railway (tiré de Guoyu et coll., 2005).....	32
Figure 16. Installation de cheminées sur des systèmes de ventilation parallèles à la piste (Zarling et coll., 1984).....	33
Figure 17. Différentes géométries de l'utilisation de remblai à convection d'air (tiré de Cheng et coll., 2007).....	34
Figure 18. Drain thermique (tiré de Jorgensen et coll., 2008).....	36
Figure 19. Schéma du fonctionnement de la section à drain thermique (Doré et coll., 2007).....	37
Figure 20. Mise en place du géocomposite dans l'épaulement du remblai de Tasiujaq (Lemelin et coll., 2008).....	38
Figure 21. Adoucissement de la pente 1V : 8H sur le site de Tasiujaq (Lemelin et coll., 2008)....	39
Figure 22. Plan de la zone des sections (Lemelin et coll., 2008).....	43

Figure 23. Photo du village de Tasiujaq.....	46
Figure 24. Diverses formes de dégradation sur la piste de Tasiujaq (modifié de Allard et coll., 2009).....	48
Figure 25. Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Tasiujaq (Allard et coll., 2009)	49
Figure 26. Vitesse cumulée du vent au cours de la période 2006 / 2009 en fonction de son orientation.....	53
Figure 27. Fréquence cumulée du vent au cours de la période 2006/2009 en fonction de son orientation.....	53
Figure 28. Etat du couvert neigeux en avril 2005 A-côté est, B-côté ouest (Allard et coll., 2009)	54
Figure 29. Zone où l'enneigement dépasse 80 cm le long de la piste de Tasiujaq (Allard et coll., 2009).....	55
Figure 30. Accumulation d'eau au pied de la section de référence en juillet 2009.	56
Figure 31. Localisation des planches d'essai le long de l'aéroport de Tasiujaq.....	57
Figure 32. Schéma des quatre sections de la planche d'essai de Tasiujaq	58
Figure 33. Intérieur d'une des deux boîtes contenant deux SAD	61
Figure 34. Capture d'écran Excel de la mise en forme conditionnelle des températures de la section à drain thermique pour la période allant du 22 au 30 juin 2010	64
Figure 35. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juin 2010 avant traitement des données non concordantes.....	65
Figure 36. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juin 2010 après traitement des données non concordantes	65
Figure 37. Evolution de la température en fonction de la profondeur et du temps pour les quatre sections	69
Figure 38. Evolution des températures mesurées par les thermistances localisées sous le contact remblai / sol naturel sous les quatre sections soit A6 (située à -0,14m du contact), B11 (située à -0,34m du contact), C8 (située à -0,16m du contact) et D6 (située à -0,15m du contact).	71
Figure 39. Évolution des températures mesurées par les thermistances localisées à 1 mètre sous le contact entre le remblai et le sol naturel sous les quatre sections soit A9 (située à -1,06m du contact), B13 (située à -0,94m du contact), la moyenne de C10 et C12 (situées à -0,75m et -1,25 du contact), et la moyenne de D8 et D10 (situées à -0,74m et -1,39m du contact).	73
Figure 40. Évolution des températures mesurées par les thermistances localisées à 1,7 mètre sous le contact entre le remblai et le sol naturel sous les quatre sections soit A11 (située à -1,65m du contact), B16 (située à -1,77m du contact), C14 (située à -1,93m du contact), et la moyenne de D10 et D12 (situées à -1,39m et -2,03m du contact).	74
Figure 41. Régimes thermiques moyens des quatre sections pour les mois de mars 2008, septembre 2008, mars 2009, septembre 2009, mars 2010 et septembre 2010	76
Figure 42. Maximum et minimum de température à chaque profondeur des quatre sections entre le 1er janvier 2008 et le 10 octobre 2010	79

Figure 43. Evolution de la moyenne sur 9 jours des températures à midi de l'air extérieur au cours des 3 années de suivi	81
Figure 44. Evolution du différentiel de température entre la cheminée d'entrée (CY2) et la cheminée de sortie (CX2) de la section à remblai à convection d'air pendant toute la période de suivi, et moyenne sur 9 jours de la température de l'air extérieur	83
Figure 45. Evolution du différentiel de température entre la cheminée d'entrée (CY2) et la cheminée de sortie (CX2) de la section à remblai à convection d'air pendant toute la période de suivi, et moyenne sur 9 jours de la température de l'air extérieur.	84
Figure 46. Evolution des températures des cheminées de sortie d'air des sections à remblai à convection d'air et à drain thermique, ainsi que la température extérieure au cours de la période de suivi	85
Figure 47. Evolution des températures des cheminées d'entrée d'air des sections à remblai à convection d'air et à drain thermique, ainsi que la température extérieure au cours de la période de suivi	86
Figure 48. Evolution de la moyenne annuelle de la température à l'interface remblai / sol naturel pour les quatre sections.	87
Figure 49. Evolution de la moyenne hivernale et estivale de la température à l'interface remblai / sol naturel pour les quatre sections	88
Figure 50. Flux de chaleur par année et par section entre les profondeurs 0 mètre et -0,5 mètre..	91
Figure 51. Effet de l'écoulement d'eau sur le calcul des gradients thermiques entre 0 et 0,5 mètre de profondeur dans le sol naturel	92
Figure 52. Flux de chaleur par année et par section entre les profondeurs 0 et -2 mètres	93
Figure 53. Evolution de la valeur mensuelle du flux de chaleur entre 0 et -0,5 mètre de la section à pente douce et évolution de la moyenne mensuelle température extérieure	94
Figure 54. Capture d'écran de la géométrie de la colonne de sol modélisée sous GEOSTUDIO	100
Figure 55. Résultat de la modélisation de la section à pente douce à la fin du mois de février 2008.....	104
Figure 56. Comparatif entre les profils thermiques du modèle et du site d'essai à la fin des mois de janvier, de mars et de mai 2008 pour la section à pente douce	106
Figure 57. Comparatif entre les profils thermiques du modèle et du site d'essai à la fin des mois de juillet, de septembre et de novembre 2008 pour la section à pente douce	107
Figure 58. Comparatif entre les profils thermiques du modèle et du site d'essai à la fin des mois de janvier, de mars et de mai 2008 pour la section à pente douce	109
Figure 59. Comparatif entre les profils thermiques du modèle et du site d'essai à la fin des mois de juillet, de septembre et de novembre 2008 pour la section de référence.....	110
Figure 60. Température à l'interface remblai / sol naturel au cours de l'année 2008 pour les sections d'essai et les modèles de la section de référence et de la pente douce	111

Figure 61. Flux de chaleur par année et par section entre les profondeurs 0 et -2 mètres, avec correction pour la section de référence.....	113
Figure 62. Evolution des coûts totaux annuels pour les différentes techniques en fonction du tassement annuel pour une largeur affectée de 3,5 m.....	121
Figure 63. Evolution des coûts totaux annuels pour les différentes techniques en fonction du tassement annuel pour une largeur affectée de 7 m.....	122
Figure 64. Evolution des coûts totaux annuels pour les différentes techniques en fonction du tassement annuel pour une largeur affectée de 14 mètres	122

Liste des symboles et abréviations

A	albédo
A_i	amplitude de la température à la surface du sol
c_v	capacité de chaleur volumique
G	flux de chaleur par conduction dans le sol
H	flux de chaleur sensible
k	conductivité thermique
L	bilan des radiations à ondes longues
LE	flux de chaleur latente
MAAT	température moyenne annuelle de l'air (mean annual air temperature)
MAGT	température moyenne annuelle à la surface du sol (mean annual ground temperature)
Q	flux de chaleur
S	radiation solaire
SAD	système d'acquisition des données
t	temps
T	température
z	profondeur
λ	longueur d'onde
Θ	teneur en eau volumique
Θ_u	teneur en eau volumique non gelée (unfrozen)
ξ	profondeur du pergélisol

Chapitre 1.0

Mise en contexte

Le Nunavik, avec une superficie d'environ 515 000 km², constitue le tiers nord de la province du Québec. Sur ce territoire, on compte 14 communautés où vivent 11000 inuits ainsi qu'un village cri. Ces communautés sont toutes établies le long des côtes de la Baie d'Ungava, du détroit d'Hudson et de la baie d'Hudson, et sont très espacées les unes des autres : entre 80 et 240 kilomètres avec le plus proche voisin. Les villages nordiques sont d'autant plus isolés qu'ils ne sont ni reliés entre eux, ni avec le reste du Québec, par des routes ou des voies ferrées. Les moyens de transport aériens et maritimes sont donc fondamentaux pour assurer tout déplacement de population ou de marchandise.



Figure 1. Localisation des quatorze communautés inuites dans la région du Nunavik (Lemelin et coll., 2008)

La desserte maritime est assurée en été par des cargos venant du sud et qui apportent machineries, véhicules, matériaux de constructions et produits pétroliers. Le transport aérien, qui est lui journalier, est donc chargé du transport des personnes et de toutes les autres denrées, périssables ou non. Toute personne qui se déplace dans les communautés, emprunte nécessairement le transport aérien : administration, malades et professionnels de santé, sécurité publique, justice et d'une manière plus générale tous les services et toute la population. Le trafic aérien est donc stratégique et essentiel pour le développement social et économique des communautés du Nunavik. Maintenir les infrastructures dans des bonnes conditions de sécurité et de confort permet de désenclaver les villages et d'assurer la continuité du développement de la population ; cette dernière a augmenté d'au moins 60% entre 1986 et 2001.

A l'exception de Kuujuarapik et d'Umiujaq, toutes les communautés inuites sont établies dans des zones où le pergélisol est présent sur la plus grande proportion du territoire. Trois d'entre elles, Tasiujaq, Kuujuaq et Kangiqsualujuaq sont en zone de pergélisol discontinu étendu; on peut donc retrouver des zones de terrain non gelé. Pour les autres, le sol est gelé toute l'année. La construction d'infrastructures de transport dans des conditions de pergélisol affecte inmanquablement le régime thermique du sol gelé, ce qui peut causer une dégradation du pergélisol sur lequel est fondé l'ouvrage. Si le sol de fondation est constitué de pergélisol riche en glace, sa dégradation entraînera une perte importante des capacités structurale et fonctionnelle de l'infrastructure. Cette situation devient un important problème d'ingénierie pour les infrastructures nordiques. Les pistes d'aéroport sont particulièrement sensibles aux dégradations ; en effet, elles ne tolèrent que peu de déformations afin d'être utilisées en toute sécurité.

En plus des dégradations liées à la construction des infrastructures sur du pergélisol, ce dernier est affecté par le réchauffement climatique. Comme les données climatiques le démontrent, le climat s'est réchauffé de façon importante au Nunavik et continue de se réchauffer. A l'échelle locale, les premières manifestations du réchauffement climatique sont le réchauffement du profil de la température dans le sol et l'approfondissement du mollisol, c'est-à-dire de la couche superficielle qui dégèle chaque année. Ceci provoque la fonte de la glace contenue dans le sol, et entraîne alors des tassements de la surface du terrain. La présence de l'infrastructure et le

réchauffement climatique sont deux sources potentielles de dégradation du pergélisol ; leurs effets se combinent, entraînant une dégradation accélérée du pergélisol.

Durant la construction des infrastructures aéroportuaires, des études sur le pergélisol ont été menées par le ministère des transports du Québec (MTQ) et le Centre d'études nordiques (CEN). L'objectif de ces études était d'acquérir le maximum de connaissance sur le pergélisol du Québec nordique en vue de fournir de l'information nécessaire à la construction et à l'entretien à venir des pistes d'aviation et des routes d'accès. Lors de la construction, on n'envisageait pas alors le réchauffement climatique (Allard et coll., 2007). Alors que les dommages liés à la dégradation récente du pergélisol sont apparus sur certaines pistes au tournant des années 2000, il est devenu évident que les connaissances en matière de pergélisol, étaient trop fragmentaires. C'est pourquoi de nombreuses nouvelles études ont été démarrées ces dernières années à la demande du MTQ.

Chapitre 2.0

Revue de littérature

2.1. Le pergélisol

Plusieurs publications très complètes existant déjà sur le pergélisol : *Permafrost* (Osterkamp et Burn, 2003) ou *Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives* (Allard et K-Seguin, 1987), le concept de pergélisol ne sera décrit que brièvement dans ce document.

Le terme de pergélisol désigne un sol qui reste à une température égale ou inférieure à 0°C pendant au moins deux ans. Un cinquième des terres émergées du globe comporte aujourd'hui du pergélisol. Au Canada, environ la moitié du territoire est caractérisé par la présence de pergélisol. Un terrain qui contient du pergélisol, consiste en une couche supérieure, appelée couche active ou mollisol, qui gèle et dégèle chaque année sous l'effet des conditions climatiques extérieures, et d'une couche inférieure de pergélisol (cf. figure 2). L'épaisseur de la couche active pouvant varier entre les régions et selon les saisons, l'épaisseur de pergélisol sous-jacent est elle-aussi variable.

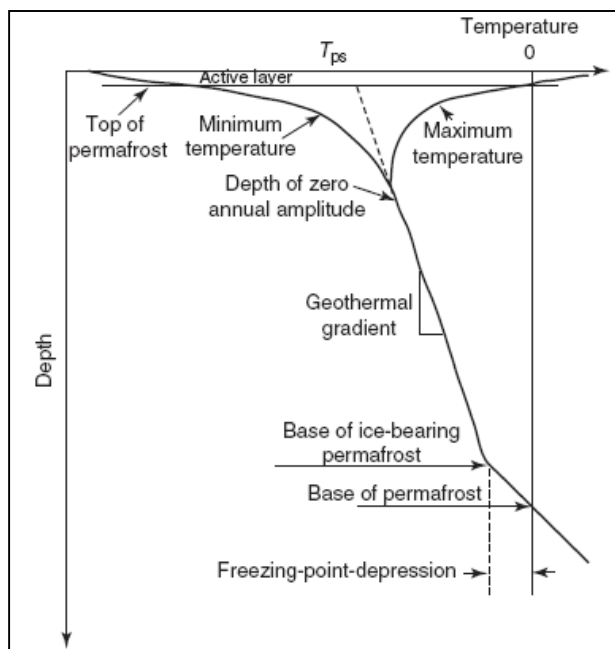


Figure 2. Schématisation des températures minimales et maximales d'un sol contenant du pergélisol (tiré de Osterkamp et Burn, 2003)

En fonction des régions, la quantité de pergélisol que l'on retrouve est variable. Ainsi, dans les zones de plus hautes latitudes où le climat est plus froid, on aura tendance à retrouver plus de pergélisol que dans des zones où les températures plus chaudes ne permettent pas d'avoir un sol suffisamment froid. Ainsi, la présence de pergélisol peut être cartographiée en fonction de son importance (cf. figure 3). Le pergélisol continu décrit un sol caractérisé par une présence massive de pergélisol, c'est-à-dire dans une proportion de 90 à 100% de la superficie (Dion, 2009). Vient ensuite le pergélisol discontinu étendu, entre 50 et 90%, puis le pergélisol discontinu sporadique, entre 10 et 50%. Enfin le pergélisol sporadique (îlots de pergélisol) désigne les zones avec des proportions encore inférieures.



Figure 3. Distribution des zones de pergélisol (tiré de Ressources naturelles Canada)

Le pergélisol est avant tout une considération thermique. Sa définition ne repose que sur le critère de température inférieure à 0°C . Or avec la salinité naturelle du sol, celui-ci peut ne pas être gelé à une telle température. S'intéresser au pergélisol revient donc à s'intéresser à une condition de température et non à un état gelé ou non du sol. Ainsi caractériser la présence de pergélisol nécessite de s'intéresser à la température du sol ; cette dernière étant directement liée aux échanges entre l'air extérieur et le sol.

2.2. Présence d'infrastructures et réchauffement du sol

La construction d'infrastructure perturbe l'équilibre thermique qui existait auparavant à la surface du sol naturel. Les différents échanges thermiques entre le sol et l'air sont changés, ce qui modifie le bilan thermique dans son intégralité et donc affecte le régime thermique du sol. D'autre part, le réchauffement climatique est avéré dans le nord du Québec. Cela perturbe aussi le régime thermique du sol. Ces différentes modifications du régime thermique du sol remettent en cause la stabilité des structures construites selon les mécanismes décrits dans cette partie.

2.2.1. Perturbation de l'équilibre thermique à la surface du sol

Lorsque l'on s'intéresse au régime thermique du sol, il convient de s'intéresser au bilan des échanges thermiques à l'interface sol / air. En effet, ce bilan décrit la totalité des transferts de chaleur entre le sol et l'air. Le signe de ce bilan permet alors de caractériser l'évolution de la température de surface du sol : si le signe est positif, le sol reçoit plus de chaleur qu'il n'en évacue donc il se réchauffe et si le signe est négatif, le sol se refroidit. Ce bilan ne permet de caractériser que le comportement de la partie supérieure du sol, c'est-à-dire celle qui se situe juste sous l'interface sol / air. Les transferts de chaleur décrivant le régime thermique du sol plus en profondeur, ne seront pas décrits dans cette partie.

2.2.1.1. Le bilan thermique à la surface du sol

Le bilan des échanges à la surface du sol est fonction des paramètres météorologiques, des paramètres géologiques et des paramètres géomorphologiques du lieu étudié. Le nombre de paramètres à prendre en compte étant élevé et tous ces paramètres étant interconnectés, il est difficile de caractériser l'influence d'un paramètre indépendamment des autres. Par exemple, la présence de végétation augmente l'humidité retenue en surface et donc l'évaporation qui en découle. D'autre part, la présence de végétation va faciliter l'accumulation de neige au pied des plantes, ce qui aura entre autre comme conséquence de limiter les radiations directes sur le sol

(Brown, 1966). Les différents mécanismes de transfert de chaleur (radiation, évaporation, convection,..) sont donc affectés par la variation d'un seul paramètre. Par ailleurs, ces paramètres varient en fonction du lieu d'étude mais aussi en fonction du temps : les variations peuvent être à l'échelle de la journée ou bien encore des saisons. La multitude et la complexité des différents éléments intervenant dans le bilan thermique, en font un problème difficile à décrire. « This is a formidable but, hopefully, not impossible task » (Brown, 1966*).

La formulation classique du bilan d'énergie (cf. figure 4) à l'interface sol / air s'écrit comme suit :

$$(1 - A)S + L - H + LE + G = 0$$

La radiation solaire S est multipliée par le facteur $(1 - A)$ pour tenir compte de la capacité du sol à réfléchir les ondes. Le bilan des radiations à ondes longues L , comprend la radiation atmosphérique ($L\downarrow$) et la radiation terrestre ($L\uparrow$). H et LE sont respectivement le flux de chaleur sensible (convection) et le flux de chaleur latente (évaporation). G est le flux de chaleur par conduction dans le sol.

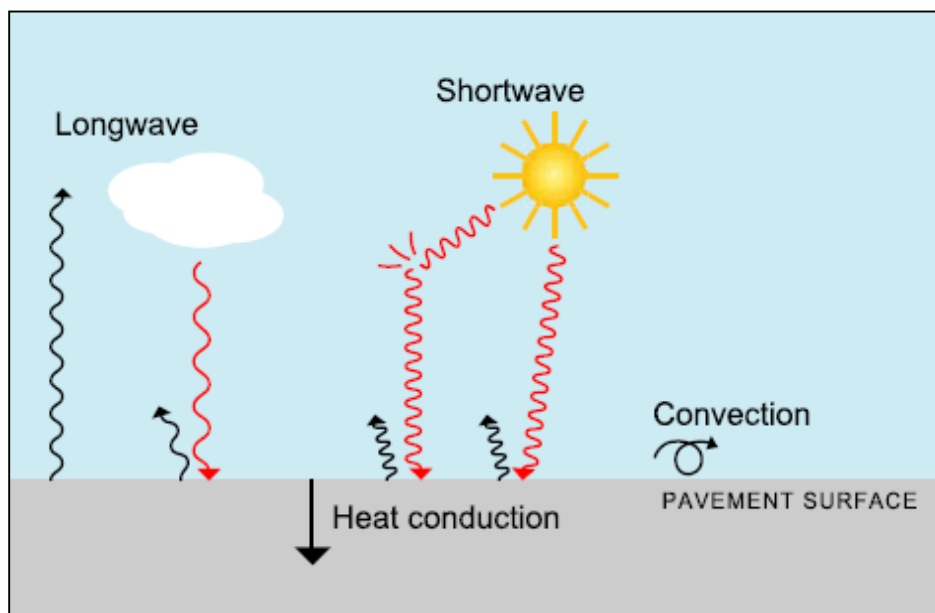


Figure 4. Schéma des échanges énergétiques entre le sol et l'atmosphère (tiré de Hermansson, 2004)

De nombreuses études ont comme objectifs la formulation mathématique de ces différents paramètres. Mais la variabilité des conditions d'études à travers le monde, fait que les modèles ne sont pas transférables à un autre emplacement. Ainsi un modèle développé pour une région montagneuse ne sera pas applicable à une région en bord de mer. Les éléments clefs du bilan thermique seront décrits dans ce qui suit.

2.2.1.2. Le type de couvert de surface

La surface du sol naturel et celle du remblai ont une grande influence sur le comportement thermique. La présence d'un couvert végétal, du sol nu ou bien encore d'un couvert neigeux ont des impacts différents sur les transferts thermiques. Les conséquences sont diverses et sont toutes interconnectés. Il est difficile d'étudier indépendamment les différentes facettes de l'influence des végétaux (Brown, 1966).

Tout d'abord, l'humidité de la surface du sol est directement reliée au type de couvert de surface. Ainsi un sol nu sera plus sec et conservera moins l'humidité qu'un sol recouvert de végétaux. L'humidité étant aussi variable en fonction du type de végétaux mais aussi des saisons ; les profils des plantes variant en fonction de l'année. En fonction du contexte, la végétation peut avoir des effets antagonistes sur le régime thermique : pour un même type de végétaux, le sol se refroidit dans certains cas et se réchauffe dans d'autres (Brown, 1966). La présence d'un couvert végétal gouverne aussi les mécanismes d'évaporation à la surface du sol.

L'accumulation de neige se trouve aussi facilitée lorsqu'il y a des végétaux car cela augmente les obstacles pour le vent. Or la présence d'un couvert nival a aussi un rôle très important dans le bilan thermique de surface ; la neige ayant un effet isolant considérable car sa conductivité thermique est très faible. D'un côté, cette neige empêche le froid de pénétrer au cours de l'hiver mais d'autre part, la fonte de la neige au cours de l'été, fait augmenter l'humidité du sol et contribue donc à baisser la température du sol au cours de cette saison (Brown, 1966). Différentes études portent sur l'épaisseur de neige critique au-delà de laquelle, le sol ne se refroidit plus : la valeur obtenue à Tasiujaq, 75 cm (Allard et coll., 2009) est assez proche de celles obtenues en

d'autres endroits (Nicholson, 1973). Selon les sites d'études, l'importance du couvert neigeux peut être considérée comme le facteur le plus important (Nicholson, 1973).

Enfin, les différents types de couverts que l'on retrouve à la surface du sol, ont une influence sur les radiations solaires. Les feuilles des végétaux diminuant la quantité de radiations atteignant directement le sol. De plus, l'albédo des végétaux est plus élevé que celui d'un sol nu. Par ailleurs, la neige a un albédo largement supérieur à celui d'un couvert végétal ou celui d'un remblai. En hiver, les radiations absorbées seront donc fortement diminuées.

L'influence du type de couvert à la surface du sol est donc très importante. Par exemple, la disparition d'une forêt en contexte de pergélisol a pour conséquence une dégradation massive du pergélisol (Burn, 1997). Ainsi le remplacement d'une forêt par un simple couvert herbacé est déjà très important. L'ajout d'une infrastructure, dont le matériau a une humidité faible et un albédo faible lui aussi, contribuera à dégrader d'autant plus l'équilibre thermique qui était présent auparavant à la surface du sol.

2.2.1.3. La présence d'eau

La présence d'infrastructure peut altérer l'écoulement libre de l'eau et causer alors des problèmes de drainage potentiellement très dommageables pour la structure. Le pergélisol étant comme une barrière pour l'écoulement d'eau, cette dernière ne pourra s'infiltrer dans le sol qu'avec beaucoup de difficultés. La majeure partie du drainage des précipitations se fera donc par des écoulements horizontaux au dessus du pergélisol. Un bon drainage de l'infrastructure est donc essentiel pour garantir sa stabilité (Kuo-Tung et coll., 1978). Lorsque la neige commence à fondre au début de l'été, cette eau ne peut pas s'infiltrer et reste alors à la surface du sol ou dans la couche active. Elle est alors exposée directement aux radiations solaires et se réchauffe rapidement. L'eau réchauffée continue de s'écouler horizontalement selon les voies de drainage naturelles et peut alors réchauffer massivement la partie supérieure du pergélisol (Esch, 1988). Si les fossés de drainage sont obstrués par l'infrastructure ou si le système de drainage est mal conçu, l'eau va s'accumuler et la dégradation du pergélisol sera accélérée par cet apport de chaleur.

2.2.1.4. Le vent

Le vent active les mécanismes d'échange de chaleur qui s'effectuent par convection. Ce mode de transfert est basé sur un déplacement macroscopique de la matière ; il ne concerne donc que les fluides. Ces mouvements ont pour origine des différences de pression et / ou des différences de température. Dans le cas présent, la convection intervient de plusieurs façons.

D'une part, la masse volumique de l'air varie en fonction de la température, donc on assiste à une stratification des couches d'air : l'air chaud, plus léger, se place au dessus de l'air froid, plus lourd. Deux périodes de ce phénomène sont à distinguer. En hiver, l'air extérieur est plus froid que le sol ; l'air chaud est proche du sol et a donc tendance à s'élever pour laisser sa place à l'air froid : le phénomène de stratification est actif. En été, l'air extérieur est chaud ; l'air plus froid se trouve donc déjà proche du sol : les phénomènes convectifs n'ont donc pas raison d'être. Ce mécanisme de convection est appelé convection libre.

D'autre part, la convection est liée au vent qui souffle sur la surface du sol. Ce mécanisme appelé convection forcée, peut augmenter les phénomènes d'échange de chaleur et d'évaporation à la surface du sol de manière considérable. Plus le vent sera fort, plus la température de surface aura tendance à suivre la température de l'air. L'importance des vents étant liée à la géographie du lieu : vitesse du vent, direction, vent d'air chaud ou d'air frais, chargé ou non en humidité,... Proche du sol, la rugosité de ce dernier fait varier la direction du vent et son intensité. Les formes concaves le font décélérer tandis que les formes convexes le font accélérer (Granberg, 1973). Ainsi, au cours de l'hiver, la neige est emportée par le vent et est déposée là où le vent est moins fort. C'est-à-dire dans les zones concaves, telles le pied de talus.

Dans les zones de latitude élevée, comme le nord du Canada, l'importance du vent est primordiale (Dysli, 1991). En effet, l'intensité du vent dans ces régions est très élevée, et le vent affecte tous les autres mécanismes. Le couvert neigeux est directement relié au vent, et l'influence de la température extérieure sur la température de surface peut être largement augmentée si la convection n'est plus libre mais forcée.

2.2.1.5. Les radiations solaires

Tout d'abord, il est nécessaire de rappeler le principe de ce type de transfert de chaleur. Il s'agit d'un échange thermique entre surfaces par ondes électromagnétiques. Dans le cas de notre étude, on s'intéresse au rayonnement solaire, qui est la principale source d'énergie de la terre, et au rayonnement terrestre. Chaque corps émet à différentes longueurs d'onde (λ). Celle pour laquelle, le rayonnement d'un corps à la température (T) est maximal, est donnée par la première loi de Wien

$$\lambda \times T = 2897 \mu m$$

Ainsi chaque élément rayonne majoritairement, à une longueur d'onde fonction de sa température. Lorsqu'un rayonnement atteint la surface d'un corps, une partie est réfléchie, une partie est transmise directement et enfin la dernière partie est absorbée dans la masse du récepteur. Seule cette dernière partie correspond à l'apport énergétique du corps. Le rayonnement principal est celui issu du soleil. Mais ce rayonnement n'atteint pas directement la surface de la terre. Il est potentiellement intercepté par l'atmosphère, puis par les nuages, puis par la végétation et enfin par la structure en elle-même. Connaître le rayonnement exact reçu par la surface du remblai nécessite beaucoup d'informations souvent indisponibles.

La présence d'une infrastructure ne fait varier que l'albédo et l'orientation de la surface au sol. Le rayonnement intercepté par l'atmosphère et les nuages n'étant pas dépendant de la présence de l'infrastructure, cette partie ne sera pas étudiée ici. De plus, la végétation étant basse dans le nord du Québec, elle fait peu d'ombre et ce sont en fait la différence d'albédo entre le matériau de remblai et la végétation qui sont importantes. La présence d'infrastructure étant souvent accompagnée d'accumulation de neige, l'albédo de surface est donc fortement affecté. En période hivernale, un couvert neigeux dense et épais peut intercepter la presque totalité du rayonnement. Tandis qu'en été, la majeure partie du rayonnement sera absorbé par le sol. La variation d'albédo est donc très grande au cours des saisons. Par ailleurs, plus la latitude est élevée, plus l'orientation des pentes devient importante (Kuo-Tung, 1978). Des différences notables de température sont alors observables entre le côté nord et le côté sud de l'infrastructure à cause du changement d'incidence du rayonnement (Ya-Ling et coll., 2008). Cette différence de régime

thermique entre les 2 faces d'une même structure peut causer de graves problèmes différentiels (Ma et coll., 2008). Ceux-ci seront décrits à la partie 2.2.3.

2.2.1.6. La température de l'air

« 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 » (Allard et coll., 2009). L'idée que la température de l'air est le facteur ayant le plus d'influence sur la température de surface, est largement répandue. C'est pourquoi de nombreuses études ont eu comme objectif de relier directement température du sol et température de l'air. Par exemple, plusieurs travaux ont porté sur la valeur minimale de la moyenne de la température de l'air extérieur (MAAT) qui est nécessaire pour avoir du pergélisol (Brown, 1966*). Beaucoup de valeurs différentes sont alors disponibles. Cette variabilité de température requise s'explique par la variabilité des conditions d'expérimentation. D'autres travaux ont portés sur l'exploitation de l'indice N afin de caractériser de manière simple le rapport entre température de l'air et température de surface (Carlson et coll., 1952) (Lunardini, 1978). L'indice a alors été tabulé en fonction du type de sol à la surface en de nombreux lieux à travers le monde. Encore une fois, la variabilité géographique, saisonnière voire même journalière est très grande (Hachem et coll., 2008) (Zarling et coll., 2008).

Il est difficile de caractériser de manière simple la relation entre les paramètres extérieurs et le régime thermique du sol. Tous les paramètres étant fortement dépendants les uns des autres, variant fortement entre différents lieux même proches géographiquement et variant fortement temporellement. De nombreuses études modélisent un des paramètres dans un contexte bien particulier en un temps donné, mais ces modèles ne sont pas transférables car les paramètres sont trop nombreux et trop variables. Certains mécanismes d'échange de chaleur deviennent prépondérants dans certains contextes mais cela ne doit pas être généralisé. Par exemple, le vent a beaucoup plus d'importance dans les zones de grandes latitudes tandis que les radiations sont prépondérantes dans les zones de hautes altitudes (Dysli, 1991). L'impact de la construction d'infrastructure sur le régime thermique est avéré mais l'ampleur du phénomène est dépendante

du contexte. Pour chaque contexte d'étude, il serait nécessaire d'analyser l'importance de chaque mécanisme d'échange de chaleur pour mitiger l'impact de la construction.

2.2.2. Les changements climatiques

Le réchauffement climatique global n'est plus depuis quelques années une hypothèse alarmiste mais une réalité à laquelle il faut s'adapter. «Il ne peut pas être arrêté mais seulement altéré » (Haeberli, 2008). Les données climatiques à travers le monde, et au Nunavik en particulier, le montrent clairement. De nombreux modèles s'attachent à prévoir ce que pourrait être la suite de ce réchauffement dans les années à venir. Ce qui nous intéresse ici, est l'influence de ce changement climatique sur le pergélisol. La question est très difficile car il s'agit à nouveau, de déterminer l'effet de la modification pour le régime thermique, d'un paramètre qui est corrélé avec tant d'autres (météorologie, hydrologie, géomorphologie,...).

2.2.2.1. Etat des changements climatiques

Lors de la construction des aéroports au Nunavik, c'est-à-dire à la fin des années 80 et début des années 90, la tendance climatique était légèrement à la baisse. Il n'y avait donc pas de raison de prévoir une hausse des températures qui pourrait affecter plus tard la stabilité des infrastructures (Allard et coll., 2009). Le climat a continué de se refroidir au Nunavik jusqu'au début des années 90; années à partir desquelles le climat a brusquement commencé à se réchauffer (cf. figure 5). La température en 2006, année particulièrement chaude, est 3°C plus élevée que ce qu'elle était au cours de la première moitié des années 90 dans la communauté de Kuujuaq. Cette ville est très proche de Tasiujaq donc reflète parfaitement la tendance de température que l'on y retrouve.

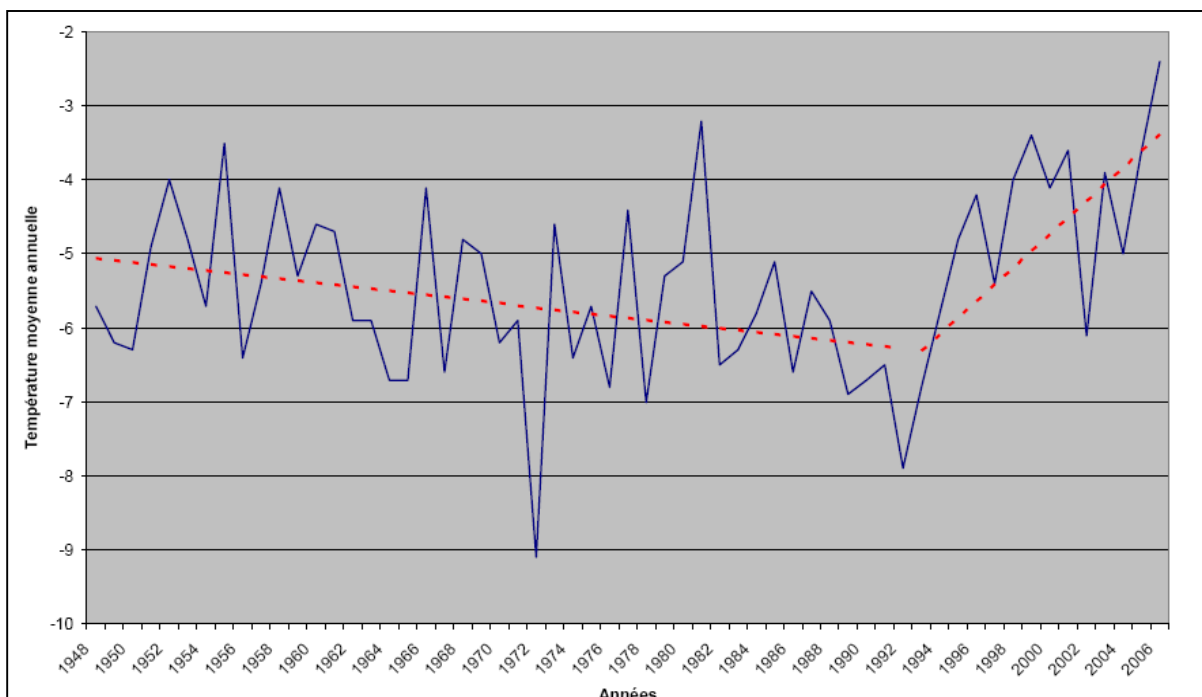


Figure 5. Tendances climatiques à Kuujjuaq entre 1948 et 2006 (tiré de Allard et coll., 2009)

A Umiujaq, une autre communauté du Nunavik, une étude basée sur l'étude comparative de photographies datant des 48 dernières années, a démontré une augmentation de 175% de l'importance des thermokarsts et une diminution de 40% de l'étendue du pergélisol (Fortier et coll., 2008). La température ayant augmenté de 3°C au cours des quinze dernières années pour ce même lieu.

De nombreux modèles, à l'échelle globale ou à l'échelle du Canada ont été développés afin de prédire l'évolution de la température au cours des prochaines années. La grande variabilité des données proposées, est justifiée par la multitude et la complexité des paramètres à prendre en compte. Le grand nombre de modèles climatiques et les grandes différences entre eux, ne pouvant pas être reportés ici, seules les tendances générales seront décrites ici. Selon plusieurs modèles, l'augmentation de température moyenne sera comprise entre 1,4°C et 5,8°C entre 1990 et 2100. Le réchauffement pour les hautes latitudes étant plus important que la moyenne (Instanes, 2003). Le réchauffement pour les régions nordiques sera plus marqué pour les périodes hivernales que pour les périodes estivales. Les changements climatiques modifieront aussi la

répartition des précipitations au cours de l'année : l'hiver verra ses précipitations augmenter tandis qu'elles seront diminuées au cours de l'été (Haeberli et coll., 2008). Les projections de plusieurs modèles nordiques indiquent qu'autour de 2050, les températures hivernales seront supérieures de plus de 4°C aux températures actuelles (Allard et coll., 2009). Ce différentiel étant plus élevé qu'une grande partie de la température du pergélisol à travers le Canada, ce dernier pourrait être grandement affecté par une hausse des températures (cf. figure 6). Il est en fait, d'ores et déjà dégradé à cause de la hausse des températures, et c'est le rythme de la dégradation qui reste variable selon les modèles.

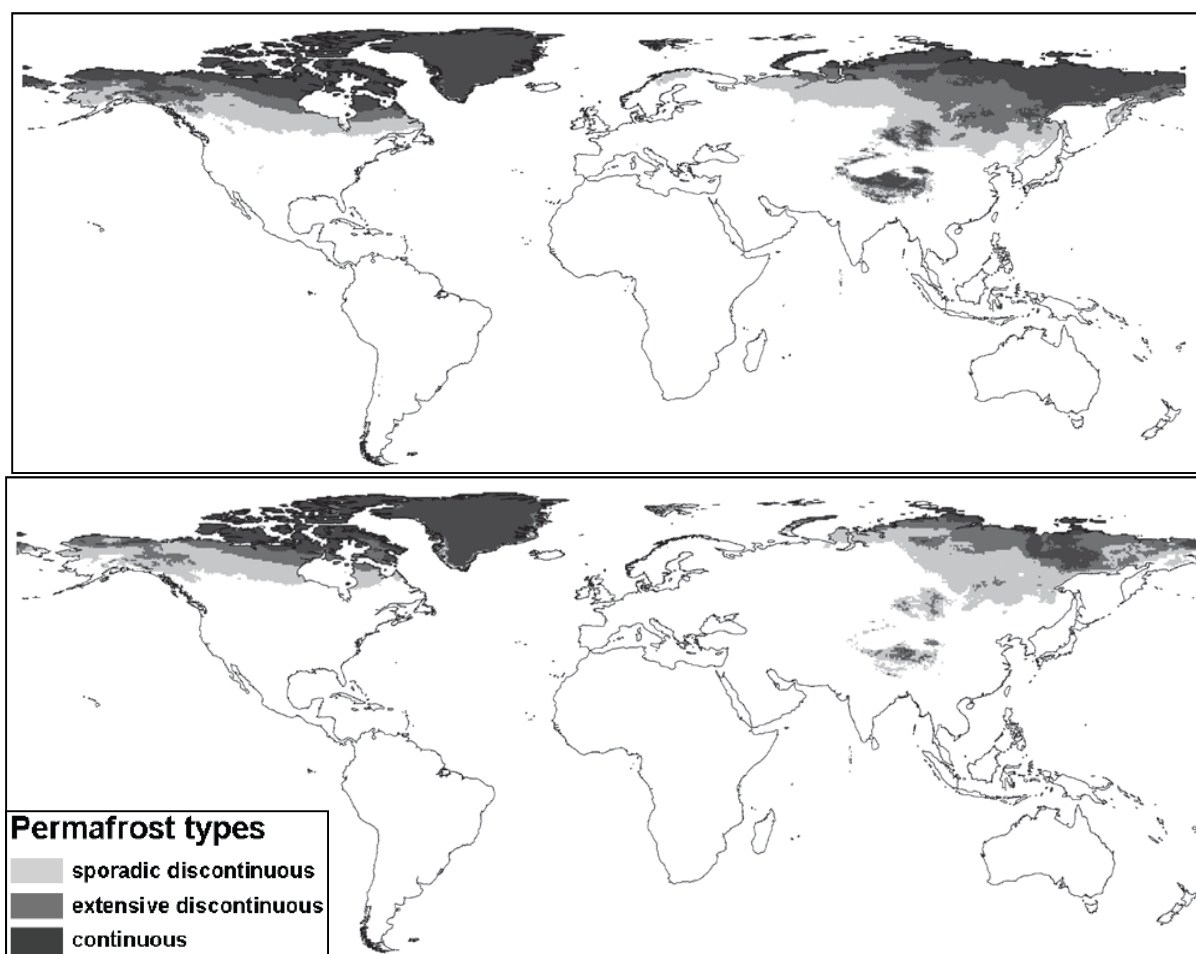


Figure 6. Evolution de la distribution du permafrost entre la période 1901-1930 (image du haut) et la période 2071-2100 selon le modèle B1, HadCM3 (image du bas) (tiré de Aus des Beek et coll., 2008)

2.2.2.2. Effets des changements climatiques

Les effets des changements climatiques sur le régime thermique du sol sont avérés. A Tasiujaq, un câble à thermistance est implanté à distance de toute infrastructure et enregistre depuis plusieurs années l'évolution de la température du sol. La température à 11 mètres de profondeur est passée de -5°C à $-2,8^{\circ}\text{C}$ entre les années 1993 et 2006 (cf. figure 7). A l'échelle du Nunavik, tous les sols instrumentés se sont réchauffés d'environ 2°C depuis 1992 (Allard et coll., 2009). L'influence des changements climatiques sur le régime thermique du sol est donc manifeste et réchauffe massivement le sol en profondeur.

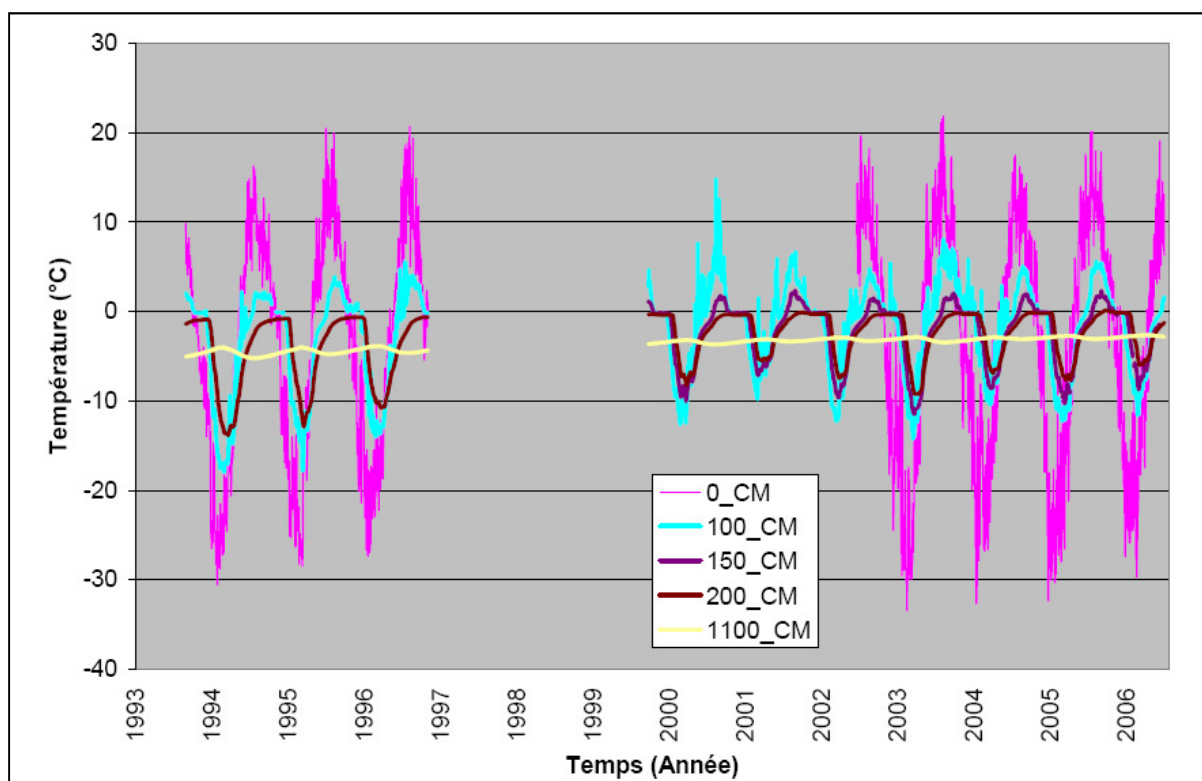


Figure 7. Evolution des températures à des profondeurs sélectionnées à Tasiujaq entre 1993 et 2006 (tiré de Allard et coll., 2009)

Le pergélisol est donc affecté mais on ne connaît pas vraiment les effets du réchauffement sur le sol. En effet, les modèles s'attachent plus particulièrement à décrire ce qui se passe dans l'atmosphère. Caractériser précisément l'effet du réchauffement climatique sur le sol, revient à s'intéresser au bilan thermique à l'interface sol / atmosphère. Mais cela est d'autant plus difficile

que beaucoup de paramètres sont modifiés par le réchauffement. Par exemple, le couvert neigeux va être modifié. Les précipitations seront plus nombreuses sur une période plus courte au cours de l'hiver (Walsh, 2008). L'effet isolant au cours de l'hiver sera donc très important et empêchera le sol de se refroidir. Le sol étant plus chaud, cela va aussi faciliter le développement de la végétation. Il est donc difficile de modéliser l'impact du réchauffement climatique sur le régime thermique du sol car il existe de nombreux effets connexes qui sont aussi capables de réchauffer le sol (Osterkamp, 2008). Par ailleurs, le pergélisol ne va pas seulement subir le réchauffement mais sera aussi acteur dans la mesure où des quantités de gaz, jusqu'alors emprisonnées dans le sol, seront libérées, ce qui accentuera alors d'autant plus les changements climatiques (Christensen et coll., 2008). De plus, la réponse du pergélisol au réchauffement climatique dépend de nombreux paramètres : scénario climatique, végétation, type de sol, teneur en eau,... De nombreux paramètres étant encore à ce jour peu compris, l'incertitude sur l'ampleur de la dégradation est grande (Anisimov et coll., 2003). La dégradation future du pergélisol est sûre, en particulier celle du pergélisol déjà fragile (Clarke et coll., 2008), c'est la vitesse et l'ampleur de la dégradation qui doivent être caractérisées.

2.2.3. Les mécanismes de dégradation

Toute modification, qu'elle soit liée à la construction de l'infrastructure ou qu'elle soit liée au réchauffement climatique, aura un effet sur le régime thermique du sol. En effet, toute modification aura un effet soit sur la composition du sol, soit sur les échanges thermiques de surface, soit sur les conditions de drainage, ou bien encore un effet combiné de ce qui vient d'être décrit. Tous ses paramètres déterminant le régime thermique du sol sous-jacent, ce dernier sera inévitablement perturbé. Il est donc impossible de construire une infrastructure sur du pergélisol sans affecter le régime thermique du sol (TAC, 2010). Le pergélisol qui était présent antérieurement de manière naturelle, réagit alors aux modifications.

2.2.3.1. Dégradation liées aux changements climatiques

Les modifications ayant comme conséquence principale une augmentation de la chaleur absorbée par le sol, celui-ci va donc voir son régime thermique perturbé. Cela a alors comme effet soit une

augmentation de la valeur moyenne de la température à la surface du sol (MAGT pour « mean annual ground temperature »), soit une augmentation de l'amplitude de température à ce même endroit. Dans le cas d'une augmentation de l'amplitude, c'est-à-dire passage de A_1 à A_2 sur la figure 8, la profondeur du pergélisol va augmenter de ξ_1 à ξ_2 , faisant ainsi augmenter l'épaisseur de la couche active. Dans le cas d'une augmentation de la valeur de MAGT de t_3 à t_4 , la profondeur du pergélisol va de nouveau augmenter, passant de ξ_3 à ξ_4 (Cheng et coll., 2004). Dans les régions de pergélisol froid, le dégel de la partie supérieure se traduira par une augmentation de la couche active. Dans les zones de pergélisol discontinu, le réchauffement du sol aura pour conséquence un dégel progressif jusqu'à la disparition totale du pergélisol (TAC, 2010).

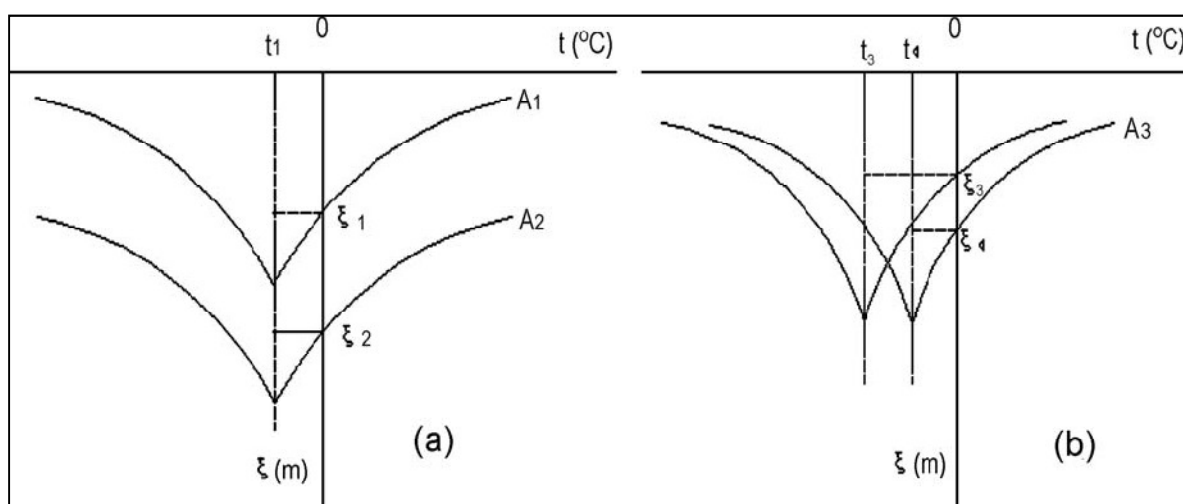


Figure 8. Relation entre la MAGT (t), l'amplitude des variations de température (A) et la profondeur du pergélisol (ξ) (tiré de Cheng et coll., 2004)

Certaines considérations pratiques doivent être prises en compte lors de la construction de l'infrastructure afin de minimiser la perturbation du pergélisol (TAC, 2010). Par exemple, limiter autant que possible les coupes franches dans le pergélisol qui sont d'habitude utilisées pour niveler le terrain. Car cette méthode met le pergélisol à nu et le met donc directement en contact avec l'air ambiant, ce qui le perturbe grandement. Un autre exemple est de laisser en place la couche organique sous l'infrastructure. Par sa forte humidité et sa faible conductivité thermique, cette couche protège le pergélisol sous-jacent.

2.2.3.2. Dégradations liées à l'infrastructure

La présence du remblai de l'infrastructure doit être considérée comme une couche de matériau qui est ajoutée au dessus d'un sol dont le régime thermique n'était alors pas perturbé. Deux effets distincts se manifestent alors. Tout d'abord, au centre du remblai, le matériau agit comme une couche isolante car son épaisseur y est importante. Ainsi, le pergélisol est mieux protégé et le front de pergélisol a tendance à remonter dans le matériau de remblai. Par ailleurs, dans l'épaulement du remblai, l'épaisseur est moindre. De plus, la géométrie nouvelle favorise l'accumulation de neige et / ou d'eau au pied des pentes. Il y a alors un réchauffement du sol au pied des talus et l'épaisseur de la couche active augmente. Sur la figure 9, qui est un relevé fait à Puvirnituk, la zone grisée représente le pergélisol. La remontée du front de pergélisol dans le remblai et le dégel en pied de pente, sont évidents sur cette image.

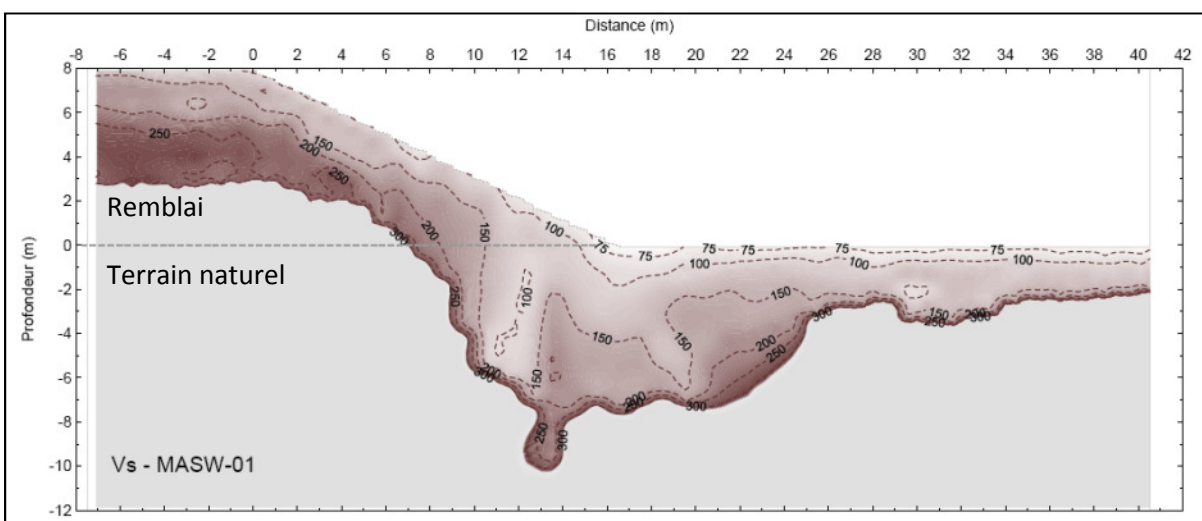


Figure 9. Profils des vitesses des ondes de cisaillement par une étude MASW à l'aéroport de Puvirnituk (tiré de Karray et coll., 2009).

Le dégel massif en pied de pente peut avoir des conséquences importantes pour la stabilité de l'infrastructure. En effet, l'augmentation de l'épaisseur de la couche active signifie qu'une épaisseur plus importante dégèle chaque année, libérant sous forme liquide la glace qu'elle contenait. La teneur en glace du sol sur lequel est construit l'infrastructure est donc un facteur très important, lorsque l'on s'intéresse aux dégradations potentielles futures.

Lorsque le sol dégèle, il se produit des tassements. Deux phénomènes sont alors en cause. D'une part, lorsque l'eau dégèle, son volume est diminué de 9% par rapport à l'état gelé. Le dégel provoque donc un tassement de 9% du volume occupé par la glace. Le second phénomène est la consolidation des sols. Comme l'eau libérée ne peut pas pénétrer car le sol est toujours gelé plus en profondeur et donc impénétrable, cette eau est drainée vers le haut ou latéralement dans la couche active. L'indice de vide du sol est alors diminué, et le sol subit des tassements sous son propre poids. Le phénomène de tassement ne serait pas un problème s'il n'était pas différentiel. C'est-à-dire qu'un tassement uniforme sur la totalité de l'infrastructure ne mettrait pas en péril la pérennité de cette dernière. Toute l'infrastructure s'enfoncerait peu à peu jusqu'à ce que la couche riche en glace ait dégelée entièrement. Or ce n'est pas le cas. Comme expliqué précédemment, le sol dégèle principalement en pied de talus ; c'est donc là que l'on retrouve les tassements les plus importants.

Suite aux premiers tassements en pied de pente, l'eau va avoir tendance à s'accumuler dans ces nouvelles cuvettes naturelles. Or la présence d'eau se traduit par un apport de chaleur conséquent, ce qui entraînera de nouveaux tassements. Par ailleurs, la géométrie de l'infrastructure favorise l'accumulation de neige en pied de pente. L'effet isolant de ce couvert neigeux réchauffe aussi le régime thermique. De plus, ce couvert neigeux qui conserve plus longtemps la chaleur dans le sol, va favoriser le développement de la végétation. Et cette végétation favorisera à son tour, une plus grande accumulation de neige lors de la saison suivante. Ainsi, les premiers tassements au pied de la pente, ne sont en fait que l'étape initiale d'un mécanisme de dégradation à plus long terme.

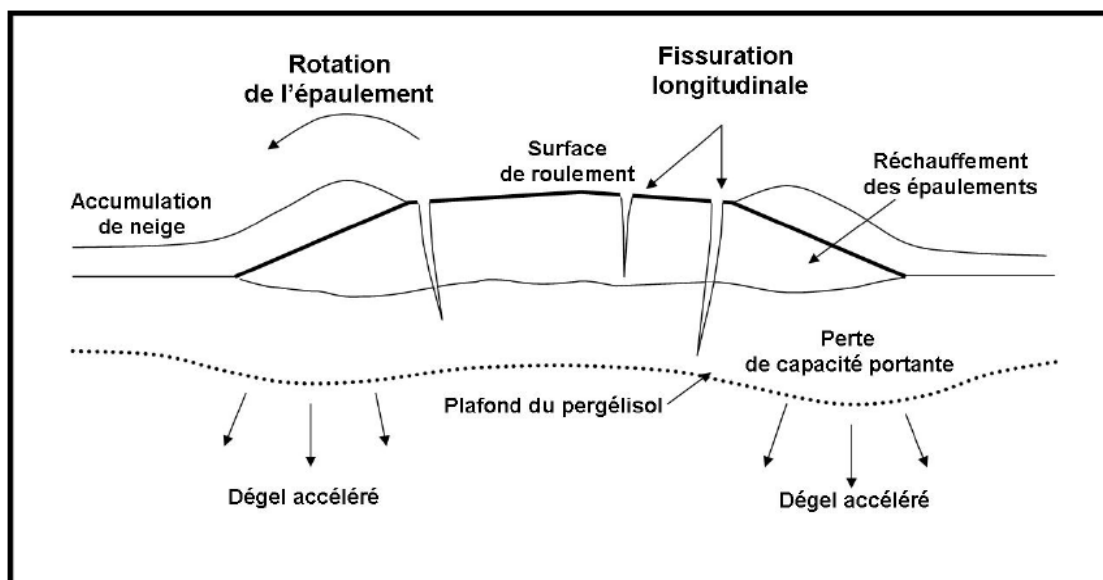


Figure 10. Mécanisme de dégradation (tiré de Doré et coll., 2007)

Suite aux tassements en pied de remblai, la résistance mécanique se trouve diminuée dans une zone très localisée. S'ensuit alors un mécanisme de rotation des épaulements, qui se traduit alors par des fissures longitudinales sur les côtés de la surface de roulement (cf. figure 10). La perte de capacité portante pouvant affecter toute la longueur de la structure, il est possible de retrouver les fissures longitudinales sur de grandes distances. Les travaux d'entretien qui consisteront à surfacer la zone de roulement, masqueront seulement les problèmes à cours termes. Ces derniers réapparaîtront alors peu de temps après.

2.3. Les méthodes de mitigation

Lors de la construction d'infrastructures linéaires telles les routes, les chemins de fer ou les pistes d'atterrissage dans des zones de pergélisol, l'étude du design optimal est souvent restreinte. En effet, la diversité des conditions de pergélisol est tellement grande sur des structures de cette étendue, qu'une analyse de la totalité de la structure serait extrêmement chère. Les analyses sont donc le plus souvent menées à posteriori lorsque les premiers dégâts apparaissent (Esch, 1984).

Il s'agit alors de choisir parmi les différentes possibilités d'intervention possibles. L'objectif est alors de conserver une structure viable en minimisant, autant que possible, les coûts nécessaires. Une liste non exhaustive des solutions envisageables pour résoudre les problèmes a été dressée par (Philleo, 1966).

- Déplacer : Il s'agit de relocaliser l'infrastructure pour réduire la zone de pergélisol traversée. Cela peut vouloir dire, faire un détour de plusieurs kilomètres pour une route. Le retour sur investissement peut s'avérer intéressant si les coûts de maintenance sont réduits de manière effective. Dans le cas d'un aéroport d'ores et déjà affecté par des dégradations, la relocalisation dans une zone sans pergélisol peut être envisagée.
- Séparer : Construire l'infrastructure séparée du sol permet de réduire l'influence de cette dernière sur le régime thermique du pergélisol. Cette méthode est largement employée pour la construction de bâtiments dans les régions nordiques. Pour les infrastructures linéaires, la construction de ponts sur pieux est envisageable sur les portions les plus problématiques, mais elle est difficilement applicable à plus grande échelle à cause de son coût.
- Éliminer : En retirant le pergélisol de la zone de construction, les causes potentielles de problèmes futurs sont réduites. Remplacer le sol ou alors faire fondre le pergélisol présent sont des possibilités.
- Isoler : Le pergélisol est parfaitement adapté à supporter des constructions dans l'hypothèse où il reste gelé continuellement. En l'isolant des conditions extérieures et des effets de la construction, il est possible de le conserver dans cet état gelé.
- Coopérer : Lorsque la construction sur le pergélisol sensible est inévitable, il s'agit de coopérer afin de limiter les dégâts. L'utilisation de méthodes qui permettent de conserver le pergélisol sous-jacent, est alors nécessaire.
- Créer : Il s'agit d'innover afin de développer, d'adapter ou bien encore de combiner des techniques qui permettront de garantir la viabilité de construction sur du pergélisol.

De nombreuses études (dans Cheng et coll., 2007) ont montré que le pergélisol est présent naturellement dans des régions où la valeur moyenne de la température de l'air (MAAT pour « mean annual air temperature ») est positive. C'est-à-dire que certaines configurations naturelles permettent d'avoir du sol à des températures inférieures à 0°C même lorsque l'air extérieur est

plus chaud. Par exemple, l'air froid que l'on retrouve piégé naturellement au fond des vallées est une explication possible. Il est donc possible de développer des méthodes qui permettront de conserver le pergélisol même si les conditions climatiques sont moins favorables. De nombreuses techniques ont été étudiées jusqu'à aujourd'hui que ce soit par des modélisations, par des essais en laboratoire ou des essais en conditions réelles. Dans cette partie, diverses méthodes étudiées seront présentées selon quatre axes de fonctionnement : celles basées sur la prévention de la pénétration de chaleur, celles basées sur l'extraction de chaleur, celles basées sur le renforcement du remblai et enfin les autres méthodes.

2.3.1. Méthodes basées sur la prévention de la pénétration de la chaleur

Ces méthodes ont pour objectif de limiter les transferts de chaleur dans le remblai et dans le sol naturel ; cela consiste en fait à mieux isoler l'infrastructure. Ces techniques ont alors deux effets antagonistes. D'une part, au cours de l'été, l'isolation résulte en une diminution de la chaleur qui pénètre dans le remblai. D'autre part, cette augmentation de l'isolation résulte aussi en une diminution de la chaleur évacuée par le remblai au cours de l'hiver. Pour que le bilan de la technique soit intéressant, il faut donc que la diminution de la chaleur reçue l'été soit plus grande que la diminution de la chaleur expulsée au cours de l'hiver. Les techniques de prévention de la pénétration de la chaleur peuvent donc ralentir la dégradation du pergélisol lorsqu'elles sont utilisées de manière appropriée. Mais ces techniques ne peuvent pas inverser la tendance de dégradation.

2.3.1.1. Augmentation de l'épaisseur du remblai

L'approche traditionnelle permettant d'augmenter l'isolation, consiste à augmenter l'épaisseur du remblai. Ceci a pour effet de remonter le niveau du pergélisol ; la couche active se retrouvant alors dans le remblai et non plus dans le sol naturel. Cependant, la réalisation n'est pas aussi simple. Les matériaux de remblai ayant des propriétés d'isolation relativement faibles, l'épaisseur requise peut être rapidement problématique. Dans le cas de pergélisol froid ($MAGT < -1^{\circ}C$), la hauteur requise peut être acceptable pour maintenir ou relever le niveau du pergélisol. Dans le cas

de pergélisol chaud ($-1^{\circ}\text{C} < \text{MAGT} < 0^{\circ}\text{C}$), la couche active peut être très épaisse et donc nécessiter des épaisseurs de remblai non envisageables (TAC, 2010). Par exemple, dans le cas du projet Qinghai-Tibet Railway, les hauteurs minimales et maximales du remblai ont été caractérisées en fonction de MAAT (cf. figure 11), définissant ainsi les plages d'application de cette méthode (Cheng et coll., 2004). Pour les pergélisols chauds, l'utilisation de cette méthode devenant alors inefficace (Cheng et coll., 2007). Par ailleurs, l'efficacité de cette technique étant directement reliée à l'épaisseur de remblai, cette méthode sera efficace au milieu du remblai et perdra en efficacité en s'éloignant du centre de la piste. L'épaisseur de remblai tendant vers zéro dans les bords de la piste, l'efficacité tend elle-aussi vers zéro (Zarling et coll., 1988). Cette méthode n'est donc, à priori, pas envisageable dans le contexte de Tasiujaq car le pergélisol y est chaud.

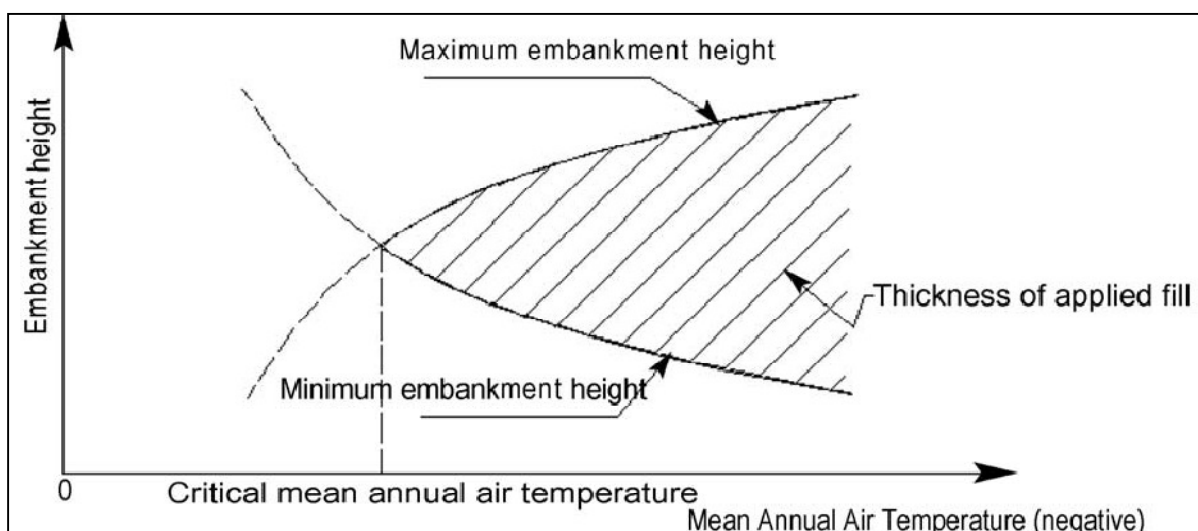


Figure 11. Taille critique de l'épaisseur du remblai en fonction du MAAT pour le projet du Qinghai-Tibet Railway (tiré de Cheng et coll., 2004)

2.3.1.2. Utilisation d'une couche de tourbe

La tourbe peut être utilisée comme matériau isolant sous les remblais. Comme elle contient beaucoup d'eau, la conductivité thermique de la tourbe varie selon les conditions d'utilisation gelée et dégelée. La conductivité gelée valant environ deux fois la valeur non gelée, la tourbe sera plus adaptée pour un maintenir un sol gelé qu'un sol dégelé. Elle agit comme un isolant l'été,

empêchant la chaleur de pénétrer, et permet au froid de mieux pénétrer au cours de l'hiver. Le bilan sur une année de cette technique est donc un refroidissement supposé du sol. L'utilisation d'une couche de tourbe comme isolant a démontré son efficacité principalement au centre du remblai, mais n'avait pas d'effet positif dans les pentes (McHattie et coll., 1984). Les effets de la présence d'une couche de tourbe sont maximisés lorsque cette dernière se trouve le plus haut possible dans la couche active et proche de la surface. Cependant, au moins 1 mètre de gravier est requis au dessus de la couche de tourbe afin de compenser le faible module élastique de cette dernière et donc de garantir la stabilité mécanique du remblai (Esch, 1988). D'un point de vue pratique, il est difficile de mettre en place et d'entretenir une telle technique. De plus, la compression de la couche de tourbe avec le temps, diminue les propriétés isolantes de cette technique (TAC, 2010).

2.3.1.3. Utilisation d'une couche d'isolant polystyrène / polyuréthane

Le polystyrène et le polyuréthane ont été utilisés à de nombreuses reprises afin d'isoler thermiquement des remblais. Ces deux matériaux possèdent des conductivités thermiques très faibles : $0,030 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ pour le polystyrène et $0,0197 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ pour le polyuréthane (valeurs issues de Wen et coll., 2007). Ils permettent donc d'isoler de manière efficace le remblai. Ils sont aussi avantageux car faciles à mettre en place et relativement peu coûteux comparés à d'autres techniques (Wen et coll., 2007). Plusieurs essais en conditions réelles d'utilisation ont été réalisés afin de caractériser la meilleure utilisation possible : positionnement dans le remblai, épaisseur, dégradation au cours du temps. Après 3 ans d'utilisation, les tassements enregistrés sur une section de référence étaient plus de 8 fois supérieurs à ceux enregistrés sur les sections isolées à l'aide de polystyrène, confirmant ainsi la bonne efficacité d'une telle technique (Esch, 1973). Dans l'étude réalisée dans (Wen et coll., 2007), deux tendances se sont dégagées pour les différents matériaux utilisés. Sous la face nord du remblai, la température est abaissée par rapport à la référence, alors que sous la face sud, la température est même plus élevée que la section sans isolation. L'utilisation de polystyrène ou de polyuréthane est donc déconseillée dans le contexte de cette étude, c'est-à-dire dans le cas de régions de pergélisol chaud avec des températures de surface élevée. D'un point de vue pratique, la couche isolante doit être placée le plus près possible de la surface pour optimiser son efficacité, cependant elle doit être suffisamment épaisse

(Smith et coll., 1973) et doit être recouverte d'une couche suffisamment épaisse de matériau afin de prévenir les dégradations liées au passage de véhicules en surface (TAC, 2010). Enfin, avec le temps, le matériau peut absorber de l'eau et donc voir ses capacités isolantes diminuer mais ce n'est pas la dégradation la plus importante. La principale perte de capacité venant du fait que les plaques de polystyrène ont tendance à s'écarter (cf. figure 12), ce qui augmente alors la conductivité thermique de la couche concernée (Gandhal, 1978). La période de mise en place et le procédé de mise en place sont donc essentiels à un bon fonctionnement de cette technique.



Figure 12. Photo du déplacement des plaques de polystyrène (tiré de Gandhal, 1978)

2.3.1.4. Utilisation de surfaces réfléchissantes

Le principe de cette méthode est d'augmenter l'albédo du revêtement de l'infrastructure en utilisant des peintures claires, ce qui permet d'augmenter la part de radiations solaires réfléchies et donc de réduire l'apport de chaleur par radiation. Elle sera d'autant plus efficace si les radiations ont une part importante dans le bilan énergétique à la surface. Cette technique a démontré son efficacité sur des routes en Alaska et sur des aéroports au Groenland. L'utilisation

de peinture blanche ou jaune permet de réduire de manière effective la température de surface (Berg, 1984) et permet aussi de relever le niveau du pergélisol (Jorgensen et coll., 2008*). Cependant, l'utilisation de peinture claire est sujette à plusieurs problèmes. Tout d'abord, la peinture diminue la rugosité de la route et peut donc s'avérer plus glissante qu'une section normale surtout en cas de pluie. De plus, le trafic important qui est présent sur une route dégrade rapidement la peinture, diminuant ainsi l'efficacité de la technique. Le trafic plus faible d'un aéroport devrait permettre de moins endommager la peinture : peinture tous les 7 ans contre tous les ans pour une route (Berg, 1984). Enfin, il s'est avéré que les sections peintes étaient plus facilement givrées en hiver que les sections classiques (Esch, 1988). L'utilisation de peinture pourrait être étendue aux surfaces non roulantes ; en recouvrant les pentes des remblais avec de la peinture par exemple. L'albédo des pentes serait alors augmenté.

2.3.1.5. Ecrans contre le soleil et la neige

L'utilisation d'écran sur les pentes des remblais a un double effet. Au cours de l'été, les panneaux de couleurs claires réfléchissent une grande partie des radiations solaires, ce qui diminue donc le réchauffement du remblai. Le second niveau de radiations, c'est-à-dire celles émises par l'écran vers le sol, est faible et est évacué par convection dans l'espace laissé libre entre l'écran et le sol. La chaleur qui s'évacue du sol profite aussi de cet espace laissé vacant pour s'évacuer. Au cours de l'hiver, le bouclier protège alors le sol de l'épaisseur de neige présente. La neige s'accumule sur l'écran et non plus sur le sol, permettant ainsi à l'air de continuer de circuler en contact avec le sol. Des expériences en conditions réelles d'exploitation ont été réalisées en Alaska et ont démontrées l'efficacité de la méthode. La MAGT a été diminuée de 3,9°C pour une section sans protection à -2,3°C pour une section protégée (Esch, 1988). Cette méthode permet aussi de réduire l'érosion liée à la pluie et le vent (Cheng et coll., 2007). Cependant, cette technique ne peut pas être appliquée dans tous les contextes. Dans le cas du Qinghai-Tibet railway, elle a un fort potentiel car les radiations y sont très élevées (cf. figure 13). Pourtant, l'installation d'écran n'est pas viable à cause des forts vents dans la région qui auraient pu endommager la structure (Wei et coll., 2009). Son utilisation a aussi été réduite malgré de bonnes performances en Alaska, car cette méthode présente un danger pour les utilisateurs en cas de sortie de route. Des glissières

de sécurité doivent donc être installées le long des zones protégées par les écrans. Ce qui augmente encore le prix d'une technique, certes efficace, mais déjà très coûteuse (TAC, 2010).



Figure 13. Ecran solaire / neige le long du projet Qinghai -Tibet Railway (modifié de Cheng et coll., 2007)

2.3.2. Méthodes basées sur l'extraction de chaleur

D'autres méthodes permettent aussi de modifier le bilan thermique du remblai. Ces méthodes ont pour but d'augmenter le flux de chaleur sortant de l'infrastructure.

2.3.2.1. Utilisation de thermosiphons

Les thermosiphons sont des tubes scellés qui contiennent les phases gazeuses et liquides d'un même élément. Ils fonctionnent lorsque la partie supérieure (appelée condenseur) est suffisamment froide pour permettre la condensation du gaz. Le liquide qui vient donc d'évacuer sa chaleur dans le condensateur, se trouve alors condensé et descend dans le tube. Il s'évapore à nouveau lorsque le sol en profondeur est suffisamment chaud, bouclant alors le cycle de

fonctionnement. En conditions d'utilisation optimales hivernales, l'intégralité du thermosiphon sera à la température de l'environnement du condensateur (Esch, 1988). C'est-à-dire qu'il sera à la température de l'air si la partie supérieure est à l'air libre, ou sera à la température de la couche de sol dans laquelle est situé le condensateur. Lorsque celui-ci est plus chaud que le reste du thermosiphon (en période estivale), ce dernier ne peut fonctionner et les échanges thermiques sont donc stoppés. Cette méthode est très couteuse donc elle n'a pas été utilisée beaucoup pour des constructions linéaires ; elle est principalement utilisée pour des constructions de bâtiments. Certaines sections ont cependant été équipées avec cette technique. Le long du Qinghai-Tibet Railway, une section équipée de thermosiphons, longue de 34 km, a été construite. Cette étude a montré une bonne efficacité de la méthode. Le rayon d'action des thermosiphons étant environ 1,8 m dans la configuration étudiée. Ils se sont avérés efficaces placés en pied de pente ou en milieu de pente. Une inclinaison des thermosiphons entre 25 et 30° donnant une meilleure efficacité à la technique (Wei et coll., 2009). L'utilisation de thermosiphons présente aussi un risque pour les utilisateurs de la route car le condensateur dépasse du remblai. C'est pourquoi une nouvelle approche est d'enfouir les thermosiphons dans leur intégralité (cf. figure 14). L'évaporateur et le condensateur sont alors placés avec une certaine inclinaison dans le sol ; le condensateur se trouve juste sous la chaussée. Cette nouvelle implantation a démontré son bon fonctionnement. La technique était alors associée à d'autres techniques sur cette zone d'étude (couche d'isolation et remblai à convection d'air).

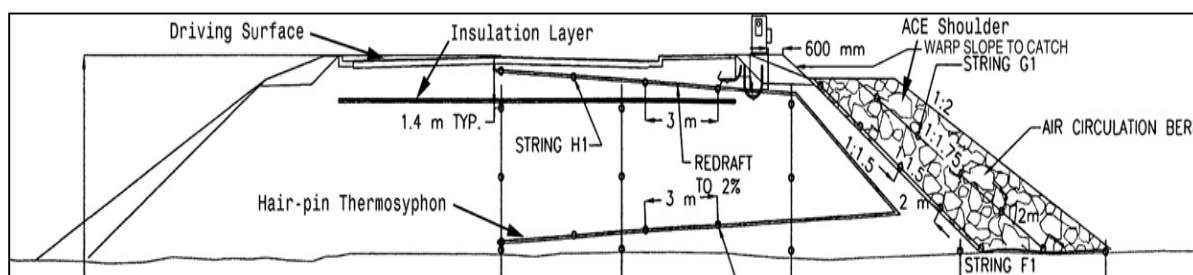


Figure 14. Schéma d'une section test avec thermosiphon enfoui complètement (adapté de Xu, 2007)

2.3.2.2. Dénéigement

Cette technique consiste à retirer la neige de la route et des épaulements des remblais. L'effet isolant du couvert neigeux est alors réduit, ce qui permet une meilleure évacuation de la chaleur contenue dans le sol au cours de l'hiver. Il s'agit d'une opération de maintenance et non pas d'un design particulier. L'efficacité de cette technique dépend de la fréquence de déneigement et du savoir-faire de l'opérateur. Si la neige est simplement déplacée vers le pied de la pente, le problème sera, lui-aussi, seulement déplacé.

2.3.2.3. Utilisation de conduits de ventilation

Lorsque la MAAT est nettement inférieure à la MAGT, cela signifie que le remblai ne profite pas suffisamment des faibles températures extérieures. Il devient alors intéressant d'utiliser l'air extérieur pour refroidir le remblai. De nombreuses méthodes sont alors possibles car plusieurs mécanismes de convection permettent de profiter de la faible MAAT. Les conduits de ventilation permettent de faire circuler l'air froid à une profondeur plus basse que la surface du remblai. Cela a donc comme effet d'abaisser la condition limite de température et donc de refroidir plus en profondeur le remblai en hiver (Dong et coll., 2010).

Cependant cela a aussi comme effet, d'abaisser la condition limite de température au cours de l'été ; c'est-à-dire augmenter l'effet de l'air chaud. C'est pourquoi des techniques comportant des bouchons sur les tuyaux de ventilation ont été testées. La fermeture des tuyaux est automatisée et s'effectue dès que la température extérieure dépasse une température préalablement fixée (cf. figure 15). Il est avéré que l'ajout de bouchons aux extrémités améliore grandement l'efficacité des sections. La présence de bouchons sur chaque extrémité est plus efficace que s'il n'y en a que sur une seule extrémité (Guoyu et coll., 2005). La zone d'action des tuyaux est évaluée à environ une fois son diamètre. Il faut donc les espacer d'une longueur égale à deux fois le diamètre lors de la construction (Yu et coll., 2005).



Figure 15. Installation de bouchons sur des conduits d'air transversaux le long du Qinghai-Tibet Railway (tiré de Guoyu et coll., 2005)

D'autres études ont été menées afin d'optimiser la méthode en fonction du type de matériau, du positionnement, des caractéristiques des tuyaux. Les tuyaux positionnés les plus bas dans le remblai ont la meilleure efficacité (Fujun et coll., 2006). L'utilisation de tuyaux perforés permet de faciliter les échanges avec le sol et donc d'augmenter l'efficacité (Dong et coll., 2010*). Lorsque cette méthode est utilisée dans des zones où le vent est conséquent, la convection se fait naturellement. Par exemple en hiver, le vent froid pénètre dans le tuyau puis se réchauffe au fur et à mesure qu'il le parcourt, permettant ainsi de refroidir le remblai. Cependant dans les zones où le vent n'est pas très important, la convection est moins importante, il faut alors trouver d'autres solutions. Les systèmes de ventilation ne sont alors plus positionnés en travers du remblai pour profiter de la convection forcée par le vent. Mais, ils sont positionnés parallèlement au remblai à fin de profiter de la convection naturelle dans le système de ventilation (cf. figure 16). Le mécanisme utilisé est dénommé effet cheminée. La différence de masse entre l'air chaud et l'air froid induit un mouvement naturel de convection entre deux points situés à deux altitudes différentes même lorsqu'il n'y a pas de vent. Cette méthode a prouvé son efficacité (Zhang et coll., 2008). Ainsi l'ajout de cheminées au système de ventilation est préconisé dans les zones de faible vent. Par ailleurs, en hiver, le couvert neigeux peut obstruer les conduits de ventilation, il est donc important d'y ajouter des cheminées. Cela permet de profiter de l'effet cheminée mais aussi de passer outre l'effet isolant de la neige si les cheminées sont suffisamment hautes.

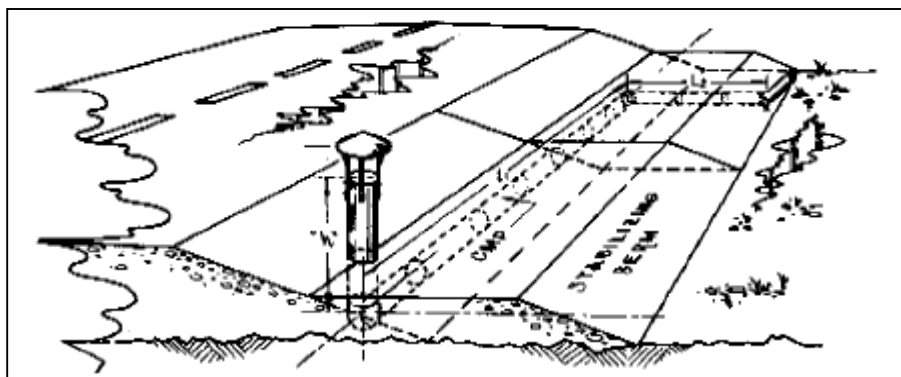


Figure 16. Installation de cheminées sur des systèmes de ventilation parallèles à la piste (Zarling et coll., 1984)

2.3.2.4. Remblai à convection d'air

Cette méthode nécessite l'utilisation d'un matériau grossier afin de créer des pores dans le remblai. La convection présente dans ces pores permet alors d'extraire la chaleur. Cette méthode a été largement étudiée du point de vue des principes en jeu, des différentes géométries possibles ou bien encore des caractéristiques des matériaux employés.

Le remblai à convection d'air requiert l'utilisation d'un matériau grossier dont le diamètre doit être uniforme et dont la teneur en fine doit être faible. Cela permet donc de créer des pores contenant de l'air au sein d'une matrice constituée par le matériau. Différents mécanismes de transferts de chaleur prennent alors place au sein du remblai en fonction des distributions de température. Au cours de l'hiver, l'air extérieur est plus froid que le sol. Or l'air froid a une masse volumique supérieure à l'air chaud. Il a donc tendance à descendre par gravité, obligeant l'air plus chaud à monter par conséquence. Ainsi, l'air se stratifie en fonction de sa température. Lorsque ce mécanisme a lieu dans un milieu poreux, il est dénommé convection d'Horton-Rogers-Lapwood (Cheng et coll., 2007). Si en plus de cela, les zones correspondant à l'air chaud et à l'air froid sont inclinées, la convection est aussi augmentée par effet cheminée. C'est le cas pour les remblais car la surface de la pente est inclinée. L'efficacité de cet effet est liée à l'épaisseur de matériau sur les pentes ; plus l'épaisseur est grande, plus l'effet sera important (Binxiang et coll., 2009). Au cours de l'été, l'air extérieur est plus chaud que le sol. Ainsi, l'air de masse volumique supérieure se trouve déjà en bas. Il n'y a alors pas de mouvement de convection

qui s'opère. Cette différence de comportement entre les périodes hivernales et estivales, appelée effet diode, permet de considérer que la convection est principalement active au cours de l'hiver (Goering et coll., 1995). Cependant, la convection n'est pas le seul mécanisme en jeu. Des transferts par conduction et par évaporation sont aussi présents. La conduction est un mécanisme de transfert de chaleur qui ne peut être aussi efficace que la convection l'hiver. Cependant l'été, la convection étant inefficace, c'est alors la conduction qui gouverne (Goering, 2003). Les contacts entre blocs étant faibles, la conductivité du remblai est faible elle-aussi. Dans le cas d'un remblai qui subit l'action du vent en été, ce qui est équivalent à un mécanisme de convection forcée, la stratification des couches d'air peut être affectée. C'est alors le vent qui gouverne les transferts thermiques (Li et coll., 2006). C'est pourquoi, il est préconisé de fermer les remblais à convection d'air. En ajoutant un géotextile recouvert d'une couche de matériau plus fin, l'air froid se retrouve piégé et ne subit plus l'effet du vent (Jorgensen et coll., 2008). Cependant, cela doit être modulé selon les contextes climatiques, car l'ajout de cette couche aura aussi pour effet de limiter la pénétration du froid (Quand et coll., 2006). L'importance du vent sur l'efficacité d'une section à convection est très importante. Le long du projet du Qinghai-Tibet Railway, des sections ouvertes se sont avérées plus efficaces que d'autres fermées (Cheng et coll., 2007). Le contexte climatique de chaque site doit donc être analysé avec précision.

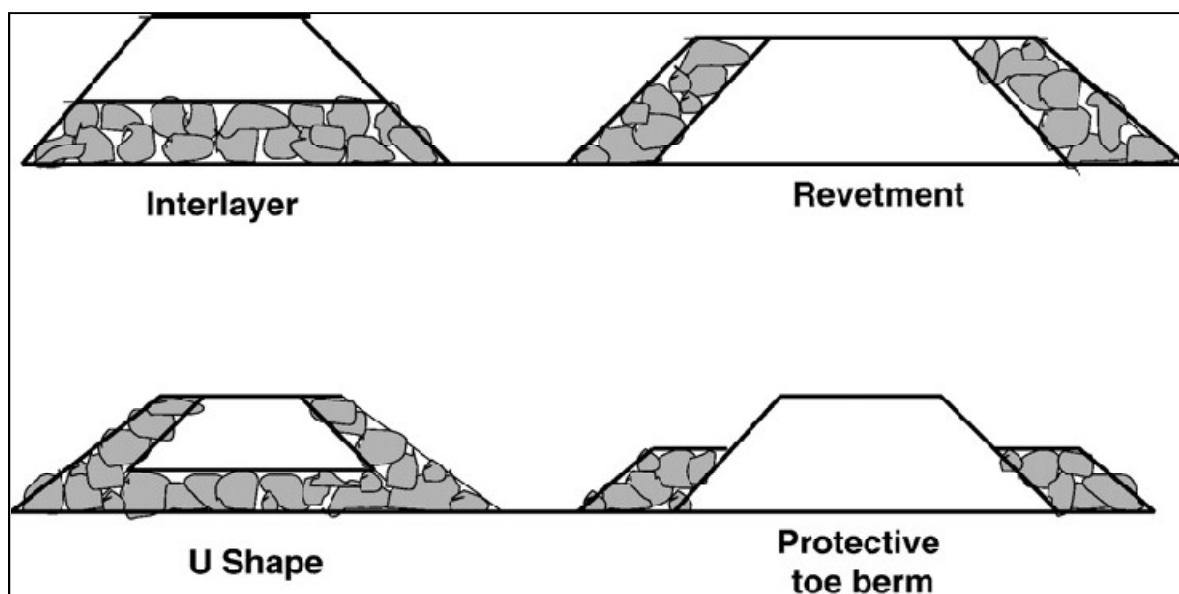


Figure 17. Différentes géométries de l'utilisation de remblai à convection d'air (tiré de Cheng et coll., 2007)

Différentes géométries de remblai à convection d'air ont été modélisées puis testées en conditions réelles d'exploitation. Les sections expérimentales se sont toujours révélées moins efficaces que les comportements modélisés. La présence de fines dans le matériau convectif est une explication possible de la baisse des performances (Wei et coll., 2009). Les différentes configurations sont justifiées par les mouvements d'air qui ont lieu. Ainsi au cours de l'hiver, l'air froid pénètre par le pied de pente puis se répand progressivement vers le milieu de la piste et le haut de la pente (Cheng et coll., 2007) (Binxiang et coll., 2006). Au cours de l'été, l'air chaud pénètre par la partie supérieure du remblai à convection d'air (Xu et coll., 2007). Ainsi, une géométrie qui ne comporte que du matériau convectif sur les pentes, verra la pénétration du froid limitée. En effet, le froid aura plus de mal à se diffuser par conduction au milieu de la piste. Au contraire, une géométrie qui comporte seulement une couche horizontale de matériau convectif, aura plus de difficultés à conserver le froid au cours de l'été suivant et ne profitera pas de l'effet cheminée présent dans les pentes. La configuration en U, telle que présentée sur la figure 17, semble combiner les effets positifs de chaque configuration.

Le diamètre du matériau utilisé a une importance notable. En effet, cela détermine directement la taille des pores du matériau convectif et sa pénétrabilité, ce qui fait alors varier l'efficacité du refroidissement. D'après les modélisations de (Yu et coll., 2003), les pierres de diamètre de 7 cm sont plus efficaces que les pierres de diamètre 20 cm. Cependant, des sections expérimentales avec des pierres de gros diamètres se sont révélées plus efficaces que des sections avec des pierres de petits diamètres (Cheng et coll., 2007). La perméabilité augmentant avec la taille des pierres (Ping et coll., 2006), cela confirme l'importance du vent dans les mécanismes de convection.

Enfin, ces techniques s'avèrent plus efficaces lorsque le pergélisol est chaud (Ma et coll., 2007). Les mécanismes de convection étant liés à la différence de température entre air extérieur et air du sol, un pergélisol plus froid, induit moins de convection. La technique peut même avoir un effet négatif en admettant plus de chaleur qu'elle n'en expulse. De plus, d'importantes différences de comportement sont observées entre les deux faces du remblai. L'exposition au soleil et la direction du vent ayant une influence non négligeable sur l'efficacité de la méthode (Mu et coll., 2010).

2.3.2.5. Drain thermique

La section à drain thermique est une technique développée à l'université Laval et qui est testée pour la première fois, en condition réelle d'exploitation, à l'aéroport de Tasiujaq au Québec. Des essais de terrain sont aussi en cours à Beaver Creek au Yukon. Elle a auparavant été modélisée et testée en laboratoire afin de l'optimiser. La technique a pour objectif de favoriser l'extraction de chaleur en plaçant un géocomposite à haute perméabilité dans le remblai. Le géocomposite, qui est d'une épaisseur de 25 mm, peut être placé sous la totalité du remblai ou seulement dans l'épaulement.



Figure 18. Drain thermique (tiré de Jorgensen et coll., 2008)

Une entrée d'air est installée à sa base pour permettre un mouvement d'air ascendant dans la membrane (cf. figure 19). Ce mouvement étant dû au réchauffement progressif de l'air lors de son parcours dans la membrane. Sa masse volumique diminue progressivement, ce qui produit cet effet ascendant. La chaleur du sol est d'abord transmise par conduction au drain. Elle est ensuite

évacuée par convection par l'air qui circule dans le drain, en direction de la sortie (Jorgensen et coll., 2008).

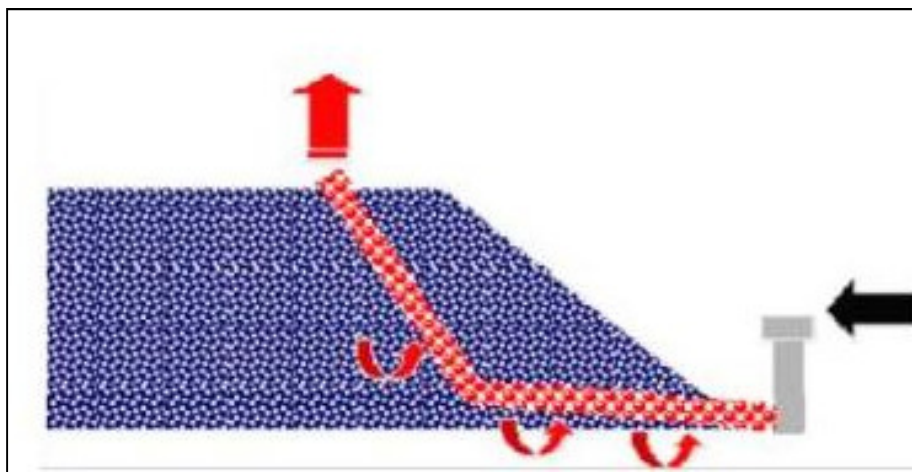


Figure 19. Schéma du fonctionnement de la section à drain thermique (Doré et coll., 2007)

La technique du drain thermique s'est avérée très efficace lors des essais en laboratoires ; son efficacité pouvant être augmentée en inclinant le drain (Chataignier et coll., 2009). Cependant, cela requiert alors une mise en place plus complexe et plus coûteuse. L'avantage de cette technique par rapport aux autres techniques qui utilisent la convection est sa continuité. Les techniques utilisant des tuyaux sont limitées par le rayon d'efficacité des tuyaux. Le drain thermique permet d'avoir une influence sur la totalité de la structure concernée.



Figure 20. Mise en place du géocomposite dans l'épaule du remblai de Tasiujaq (Lemelin et coll., 2008)

2.3.3. Méthodes basées sur le renforcement du remblai

Les techniques utilisées pour limiter les effets de la fonte du pergélisol, n'affectent pas uniquement le régime thermique du sol sous-jacent. Il est aussi possible de renforcer le remblai afin de le stabiliser mécaniquement.

2.3.3.1. Utilisation de géosynthétiques

Les géosynthétiques ont trois fonctions principales : la filtration, la séparation et le renforcement (Bell et coll., 1984). La fonction de séparation permet de maintenir l'intégrité d'un remblai placé sur une couche plus fragile, en empêchant le mélange des différents matériaux. La fonction de renforcement est utilisée pour prévenir les dommages en surface et pour limiter les dégradations sur les pentes. Les fissures et l'étalement du remblai peuvent donc être limités (Esch, 1988).

L'utilisation de géosynthétique est largement répandue à travers le monde mais l'utilisation dans les contextes de pergélisol reste faible. Leurs propriétés mécaniques ne sont pourtant que peu affectées par les cycles de gel / dégel (Bell, 1984).

2.3.3.2. Bermes et pentes douce

L'utilisation de bermes et de pentes douces est une autre solution qui permet de traiter le comportement mécanique et le régime thermique du remblai (TAC, 2010). Les bermes offrent une protection supplémentaire contre les variations de l'air extérieur et permettent donc de moduler les effets des cycles. En plus, cette technique a un effet de stabilisation mécanique qui empêche ou réduit les mouvements de rotation des épaulements. Ces bermes peuvent être réalisées en matériau convectif afin de profiter des effets de cette technique décrite précédemment. La section à pente douce consiste en un nouveau design du remblai. Une pente 1V : 6H est requis pour avoir l'effet escompté (TAC, 2010). L'objectif est de réduire la prise au vent du remblai et ainsi de diminuer l'accumulation de neige. Le vent est alors plus apte à souffler la neige loin du remblai. L'effet isolant de la neige se trouve alors réduit et l'évacuation de chaleur est facilitée. La section à pente douce confère elle-aussi une stabilisation mécanique car elle nécessite un ajout de matériau en pied de pente. Cette méthode aura d'autant plus d'efficacité si le couvert neigeux initial était important.



Figure 21. Adoucissement de la pente 1V : 8H sur le site de Tasiujaq (Lemelin et coll., 2008)

2.3.4. Autres méthodes

2.3.4.1. Dégel provoqué

Cette méthode consiste à faire dégeler le sol dans sa partie supérieure afin de prévenir des tassements futurs. Cette technique peut s'appliquer pour des sols riches en glace, lorsque la durée de construction n'est pas un problème. En effet, cette méthode nécessite la mise en place d'un dégel sur une ou deux saisons avant la mise en place de l'infrastructure (Esch, 1988). La végétation est d'abord retirée, avant d'être recouverte d'une fine couche de gravier puis d'une couche de surface noire afin de maximiser l'exposition aux radiations solaires et donc accélérer le dégel. Lorsqu'il s'agit de construire des infrastructures de type bâtiment, c'est-à-dire d'envergure plus réduite, l'utilisation d'électrodes plantées dans le sol permettent de réduire le temps de dégel du sol (Rzhanitsin et coll., 1966).

2.3.4.2. Excavation/ remplacement

Lorsque le sol est très riche en glace, il peut tout simplement être excavé et être remplacé par un sol non susceptible au gel. Cette technique est très coûteuse mais est seulement effective dans le cas de glace massive à faible profondeur (Esch, 1988).

2.3.4.3. Entretien

Dans ce cas, la dégradation du pergélisol et ses effets ne sont pas combattus. Les tassements et autres dégradations sont acceptés et traités lorsqu'ils apparaissent. Les coûts d'entretien peuvent alors être très importants pour le gestionnaire.

2.3.4.4. Couvert végétal

Cette méthode a pour objectif de réimplanter un couvert végétal sur les pentes du remblai. La présence de végétaux modifie alors le bilan thermique à l'interface entre le remblai et l'air extérieur. La température de surface est alors diminuée par la présence de cette couche humide.

Cependant, cette technique est assez longue car il ne suffit pas d'une couche végétale humide avec quelques végétaux. Il s'agit de recréer une couche organique épaisse telle quelle pouvait l'être avant la construction de l'infrastructure.

2.3.5. Combinaisons de techniques

Parmi les nombreuses techniques proposées précédemment, certaines ont des principes de fonctionnement qui peuvent être utilisés en même temps. Chaque technique ayant un coût propre, une section qui combine plusieurs techniques de mitigation peut s'avérer très coûteuse. D'après (Esch, 1988), la solution idéale serait un remblai avec des pentes verticales où la neige ne pourrait s'accumuler, les pentes seraient protégées par des écrans contre le soleil. La chaussée serait autant que possible séparée thermiquement du sol par une isolation ou par des conduits de ventilation. Le remblai serait aussi renforcé par des géosynthétiques. Or cela n'étant pas réalisable pour des raisons de coût, il convient d'optimiser les méthodes ou de les combiner dans la mesure du raisonnable.

Deux combinaisons de méthodes fréquemment utilisées sont la combinaison couche isolante/thermosiphons et la combinaison remblai à convection d'air/ système de ventilation. Dans le premier cas, les échanges thermiques sont diminués par la couche isolante, tandis que le thermosiphon ne fait qu'évacuer la chaleur (Zhi et coll., 2005). La seconde combinaison permet elle-aussi de combiner les effets positifs de chacune des techniques. Le remblai à convection d'air sur les pentes permet de refroidir ces dernières tandis que le système de ventilation refroidit plus le centre du remblai (Zhang et coll., 2009). De nombreuses autres combinaisons peuvent être développées et optimisées.

Chapitre 3.0

Pertinence du projet

3.1. Lacunes des connaissances par rapport à la problématique

Comme nous avons pu le voir dans la revue de littérature, de nombreuses expériences s'intéressant aux techniques de mitigation ont été menées partout à travers le monde. Certaines techniques s'avérant efficaces, d'autres non ; plusieurs recommandations de mise en place étant conseillées. Mais chaque contexte d'étude n'est pas transférable à un autre lieu géographique. Le contexte géologique, le contexte géographique, le contexte climatique sont autant de facteurs qui déterminent l'efficacité d'une méthode en un lieu donné. Ainsi une méthode jugée très efficace dans le contexte des hautes plaines chinoises par exemple, peut s'avérer totalement inefficace dans le contexte du Nunavik, et inversement. Ainsi il est essentiel de tester certaines techniques prometteuses en conditions réelles d'utilisation dans le nord du Québec.

D'autre part, certaines techniques ont été développées à l'université Laval et n'avaient encore été testées en conditions réelles. Par exemple, la section à drain thermique, a été le sujet de plusieurs études en laboratoires et autres modélisations numériques mais n'a pas été testée in situ. La construction en conditions réelles d'exploitation est la suite logique aux bonnes performances démontrées en laboratoire, cette technique ayant un potentiel certain. Cependant cette technique doit démontrer son bon fonctionnement dans le contexte météorologique particulier du Nunavik. D'autres techniques ont été optimisées pour le contexte du nord du Québec ; ainsi un système de ventilation a été rajouté à la section à remblai à convection d'air pour permettre à l'air froid de circuler sous la neige et ainsi compenser l'effet isolant du couvert neigeux. Ces nouvelles techniques et nouvelles configurations de techniques doivent donc être expérimentées en contexte réel.

Enfin, l'aspect bénéfice technique et économique de telles techniques n'a pas été étudié. Malgré un coût de construction initiale plus élevé qu'une section classique de remblai, les techniques ne sont pas pour autant, économiquement non viables. En effet, en réduisant les coûts d'entretien sur le long terme, elles peuvent devenir plus avantageuses que les sections classiques. Ce critère

technique d'efficacité devient alors un critère économique de réalisation. Il n'est pas encore étudié de manière approfondie dans la littérature.

3.2. Objectifs du projet

Le Nunavik dispose de 14 aéroports dont 13 sous la responsabilité du MTQ ; celui de Kuujuaq étant sous la responsabilité fédérale. La valeur à neuf de l'actif du MTQ pour ses infrastructures aéroportuaires était évalué à 140 millions \$ en 2006 (Ministère des transports du Québec, 2006). Le constat récent des dommages aux infrastructures et l'augmentation des frais d'entretien qui en résulte, a amené le MTQ à se pencher sur les techniques d'adaptations aux impacts du réchauffement climatique. Le présent projet porte sur la mise en place et l'instrumentation de quatre planches d'essais en bordure de la piste de l'aéroport de Tasiujaq à l'été 2007. L'objectif de ce site d'essais est de vérifier la performance de trois techniques de protection du pergélisol en conditions réelles d'utilisation et évaluer la faisabilité de leur mise en place. Les trois techniques d'adaptation mises en place sont : 1) adoucissement de la pente, 2) remblai à convection d'air et 3) remblai à drain thermique. Les techniques, installées dans l'épaule du remblai chacune sur une longueur de 50 mètres, visent essentiellement à protéger cette portion particulièrement vulnérable du remblai afin d'éviter une propagation de la dégradation vers le centre de la piste.

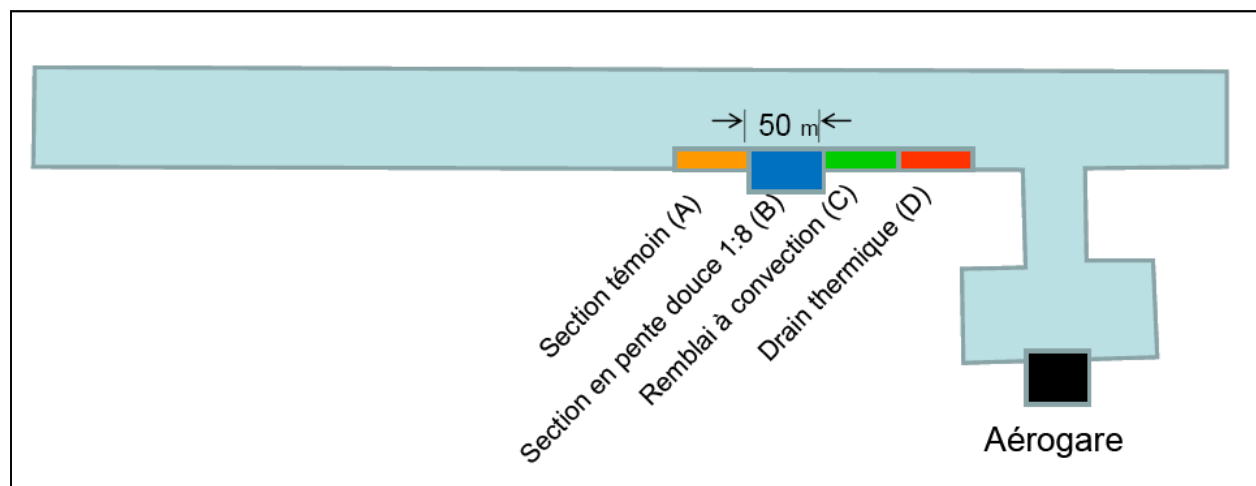


Figure 22. Plan de la zone des sections (Lemelin et coll., 2008)

Le projet est très important pour le MTQ dans le contexte où l'intégrité structurale et fonctionnelle de certaines de ces infrastructures de transport est menacée. Le présent projet de recherche est la suite logique de deux projets précédents. Le premier : *Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier du MTQ au Nunavik et adaptation* (Doré et coll., 2007), a permis d'identifier les infrastructures de transports instables au Nunavik. Le second projet : *Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik : aéroport de Tasiujaq* (Doré et coll., 2009) a permis d'ébaucher un modèle numérique qui permettra de prévoir l'évolution du comportement d'un remblai donné selon divers scénarios climatiques.

L'objectif est de déterminer quelles sont les techniques de protection qui ont le potentiel pour une application à plus grande échelle dans le contexte du Nunavik, en les caractérisant par une approche coût / bénéfice technique. L'aéroport de Tasiujaq est l'un des plus affectés du Nunavik ; de nombreux autres aéroports nécessiteraient la mise en place de telles techniques de mitigation. A plus long terme, le projet permettra au MTQ de faire des économies appréciables au niveau de l'entretien et de la réhabilitation des infrastructures de transport dans cette région.

3.3. Organisation du document

Le présent document se divise en différents chapitres afin de bien exposer la problématique, l'état des connaissances et la recherche réalisée. Le document se divise en 9 chapitres :

Le chapitre 1.0 introduit le contexte de ce projet de recherche.

Le chapitre 2.0 est une revue de l'état des connaissances sur les différents sujets abordés dans ce document : définition du concept de pergélisol, impact de la construction d'infrastructures en milieu nordique, méthodes d'adaptations expérimentables ou expérimentées. Ce chapitre permet de comprendre les problématiques liées à la mise en place des sections expérimentales.

Le chapitre 3.0 présente les lacunes des connaissances sur le sujet et en justifie les objectifs. De plus, l'organisation du présent document y est annoncée.

Le chapitre 4.0 décrit le site d'essai de Tasiujaq : conditions géologiques et météorologiques, descriptions des sections et de l'instrumentation mise en place.

Le chapitre 5.0 décrit les données thermiques issues des quatre sections pendant toute la période de suivi. Les données thermiques seront présentées et analysées selon différentes approches : analyse à certaines profondeurs déterminantes, à certaines saisons critiques, analyse des gradients thermiques ou bien encore des mouvements d'air dans les cheminées.

Le chapitre 6.0 présente les simulations numériques qui ont été nécessaires afin de traiter la section de référence. Cette section est perturbée par un écoulement d'eau qui la réchauffe massivement. L'objectif de cette modélisation est de simuler ce que pourrait être le régime thermique de cette section sans l'écoulement d'eau. De plus, ce chapitre décrit tous les paramètres utilisés pour cette simulation.

Le chapitre 7.0 analyse la faisabilité économique de chacune des sections. Les sections devant être effectives d'un point de vue technique mais aussi acceptables d'un point de vue économique. La durée de vie et les coûts d'entretien sont présentés pour chaque section.

Le chapitre 8.0 présente une discussion sur les données thermiques obtenues au chapitre 5.0 et une discussion sur la modélisation réalisée au chapitre 6.0. De plus, les critères coûts / bénéfice des différentes sections seront discutés.

Le chapitre 9.0 présente la conclusion de ce document à la lumière des objectifs qui étaient fixés.

Chapitre 4.0

Site d'essai de Tasiujaq

4.1. Localisation

Le village de Tasiujaq est situé dans la partie sud-est de la baie d'Ungava ($58^{\circ}71'N$ et $69^{\circ}82'W$), juste quelques kilomètres au nord de la limite des arbres dans une zone de permafrost continu. Le village est situé sur la rive nord de la rivière Bérard, à son embouchure. La communauté, qui compte 237 habitants est constituée en village depuis 1971. Achievé en 1990, l'aéroport est situé environ 30 mètres au dessus du niveau actuel de la mer. La piste d'atterrissage, qui est orientée dans un axe nord-est/sud-ouest, possède une longueur totale de 1190 mètres du chaînage 4+940m au chaînage 6+130m et une largeur de 44 mètres (32 mètres d'altitude à son extrémité nord-est et 37 mètres à l'extrémité sud-ouest).

Parmi les villages du Nunavik, la piste de Tasiujaq a été évaluée comme étant l'une des plus critiques d'un point de vue dégel du pergélisol (Doré et coll., 2007). C'est pourquoi ce village a été choisi afin de tester en conditions réelles d'exploitation, les techniques de mitigation proposées.



Figure 23. Photo du village de Tasiujaq

4.2. Détérioration de la piste

Au Nunavik, l'entretien des aéroports relève du Ministère des transports du Québec (MTQ) et de l'administration régionale Kativik (ARK). Depuis le début des années 2000, de nombreuses dégradations ont été observées le long des infrastructures. Les épaisseurs de MG-20 indiquent qu'il y a eu peu de tassement au centre de la piste, mais que les bordures ont été plus touchées par les processus de dégradation (Doré et coll., 2007). Ces dégradations se trouvent principalement entre les lumières de circulation et l'accotement de la piste. Tasiujaq a été visité à de nombreuses reprises par les membres de l'université Laval, du CEN et du MTQ au cours des dernières années. Les affaissements les plus notables se situent au chainage 5+225. Des fissures de tension accompagnent la dépression. La plus remarquable faisait 35 m de longueur, atteignant le centre de la piste et faisant jusqu'à 50 cm de profondeur (Allard et coll., 2009). D'autres tassements accompagnés de fissuration ont été observés tout au long de la piste.

A cause du profil thermique qui se réchauffe, la profondeur de dégel augmente et le sol continue de tasser. Le taux d'évolution des tassements est jugé très élevé : entre 20 et 70 mm/an avec une moyenne de 35 mm/an (Doré et coll., 2007). Des tassements importants sont donc à prévoir (Allard et coll., 2007). Suite à ces tassements, on retrouve également de nombreuses accumulations d'eau en pied de remblai. En 2004, la piste a été rechargée partiellement en granulat ; les principales dégradations étant donc réparées ou masquées. Par ailleurs, on retrouve beaucoup de MG-20 sur les talus de la piste et dans le champ avoisinant ; ceci est dû au déneigement par la gratte et la souffleuse pendant l'hiver (Allard et coll., 2009).

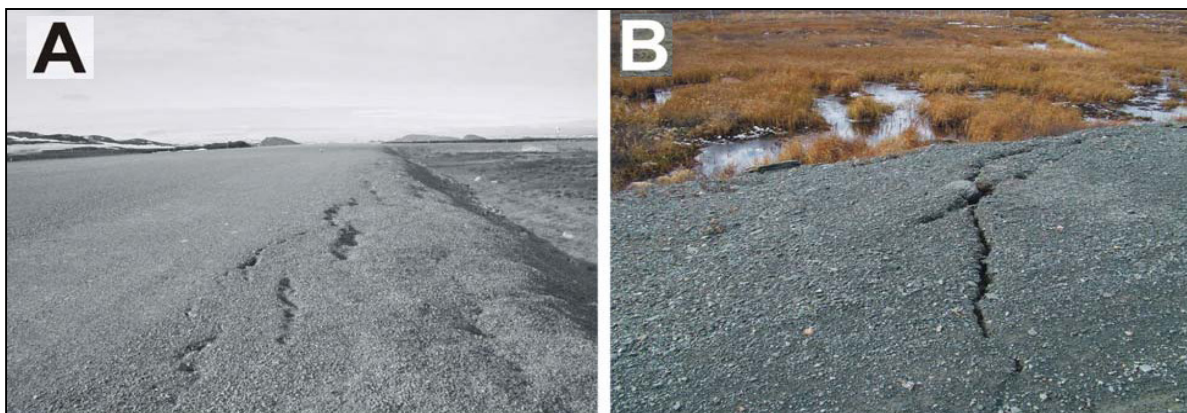


Figure 24. Diverses formes de dégradation sur la piste de Tasiujaq (modifié de Allard et coll., 2009)

A- Fissures de tension

B-Mare d'eau et dégradation

4.3. Caractéristiques locales

Lorsque l'on implante des sections d'essai sur un site, il est essentiel de disposer du maximum d'informations sur les facteurs pouvant influencer les résultats. Ainsi, dans cette partie, seront décrits brièvement certains paramètres importants : la géologie du site d'essai, le drainage du site et l'enneigement. Les deux derniers paramètres ayant été identifiés comme les principaux problèmes de la piste de Tasiujaq. Les données de température extérieure seront présentées à la partie 5.2.4.1.

4.3.1. Géologie du site

Le sol de l'aéroport de Tasiujaq et de ses environs a été documenté sous différents aspects. Tout d'abord, la géologie de surface a été étudiée par le CEN par une dizaine de coupes stratigraphiques creusées à la pelle dans le mollisol et par plusieurs dizaines de trous à la tarière. Les dépôts de surface sont donc cartographiés (cf. figure 25). L'aéroport est construit sur une terrasse d'origine fluviale donc la surface est recouverte par endroits d'un placage de dépôts fluviaux anciens et d'alluvions récents (Allard et coll., 2009). La piste traverse un méandre abandonné, aujourd'hui remplacé par un lac peu profond, entre les chaînages 5+810m et 5+860m.

Le drainage se fait par un ruisseau parallèle à la piste, en direction de la rivière Bérard. Les terrains à proximité de la piste sont plats et peu accidentés.

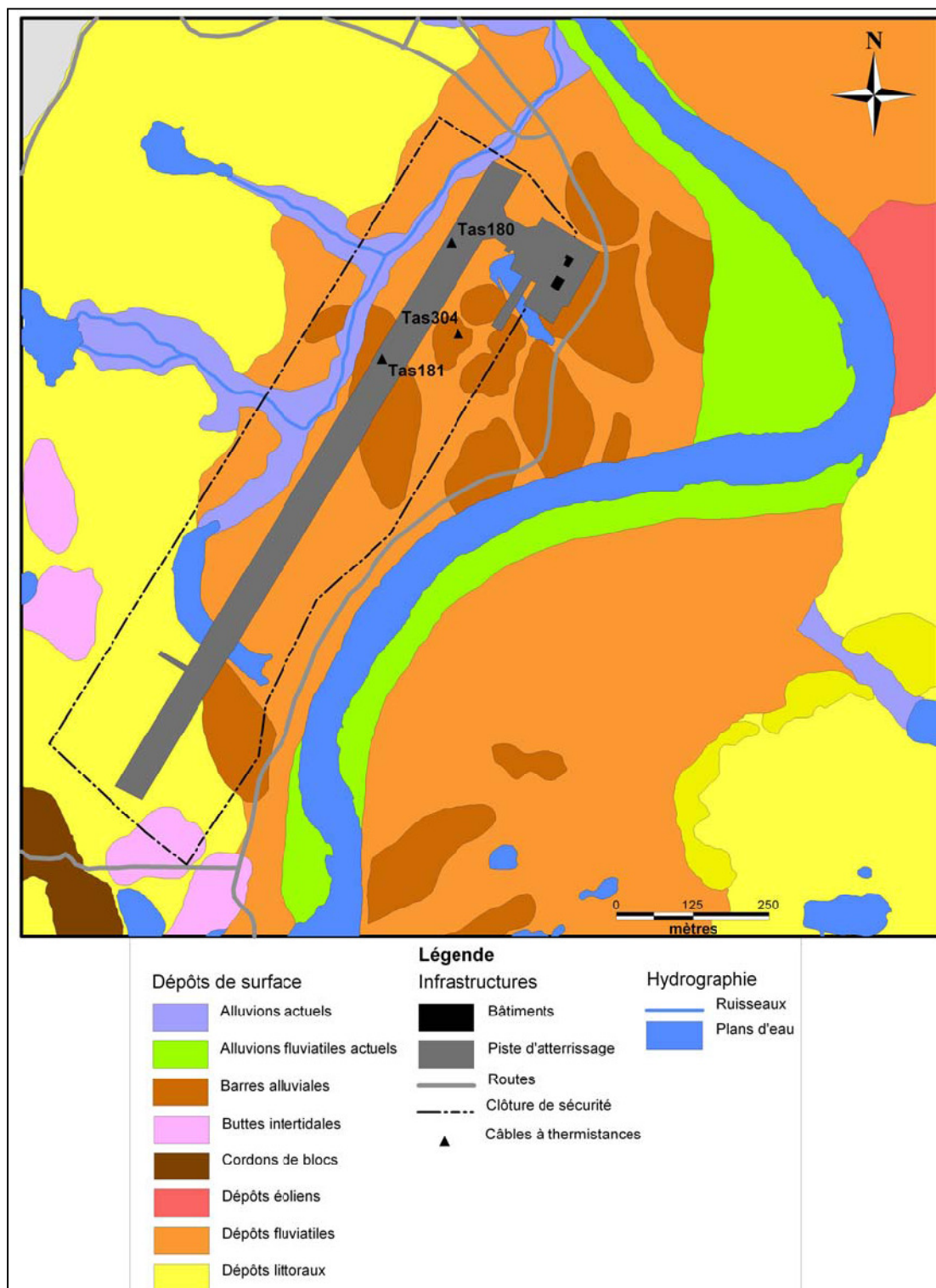


Figure 25. Carte des dépôts de surface de l'aéroport de Tasiujaq (Allard et coll., 2009)

Ensuite des relevés géophysiques, des forages mécaniques et une coupe stratigraphique de 11 mètres de hauteur le long de la berge de la rivière ont été réalisés (cette coupe étant située à 150 mètre de la piste d'aéroport). Ces relevés ont mis en évidence que les dépôts sont disposés selon quatre couches stratigraphiques. Une de ces couches, un diamicton situé entre 0,7 mètre et 3 mètres de profondeur, contient une fraction importante de silt et d'argile avec une teneur importante en glace disposés en fines lentilles. De plus, l'eau et la glace de ce sédiment ont une salinité moyenne de 8 grammes par litre, ce qui abaisse son point de fusion d'un demi-degré environ (salinité comprise entre 4,6g/L et 18,2 g/L ce qui correspond à un abaissement du point de fusion compris entre $-0,29^{\circ}\text{C}$ et $-1,11^{\circ}\text{C}$). Les autres couches, entre 3 et 11 mètres de profondeur, sont constituées de sables, de graviers et de blocs avec une faible teneur en eau interstitielle. Elles ne tassent donc pas au dégel (Allard et coll., 2009).

Enfin une campagne de forage réalisée au cours de l'été 2009, a documenté 4 forages profonds en bordure de piste de l'aéroport de Tasiujaq (profondeurs comprises entre 16,95 mètres et 25,20 mètres). Au cours de ces forages, un fluide composé d'eau et de glycol permettant d'abaisser la température jusqu'à des températures inférieures à -15°C , refroidissait les boues de forage et permettait généralement une bonne récupération des carottes de sol. Ces dernières étaient alors ramenées à Québec pour des analyses en laboratoire. (Allard, Investigation). Ces forages ont permis de documenter beaucoup plus précisément le sol proche de la zone d'essai des techniques de mitigation car un des forages (TAS_F3 : côté est, chainage 5+105) se situe à 16 mètres du pied des sections (tableau 1).

Profondeur	stratigraphie
0 à 0,20	Matière organique en surface avec sable fin à moyen brunâtre et trace de gravier pluri millimétrique subanguleux et de racines
0,20 à 1,32	Sable moyen à grossier avec gravier centimétrique et un peu de silt grisâtre. Le front de dégel a été rencontré dans cette unité à 0,74 de profondeur
1,32 à 1,80	Sable fin grisâtre avec un peu de silt et trace de gravier. Sol gelé, présence de glace interstitielle
1,80 à 6,02	Dépôt hétérométrique grisâtre composé de sable et gravier grossier et un peu de silt. Présence de roches noirâtres (matière organiques enfouies) et de fragments de coquillages. Présence de glace interstitielles et de nombreuses lentilles de glace millimétriques faiblement espacées (<1cm)
6,02 à 10,8m	Sable grossier et gravier grossier avec fragments de coquillages et plusieurs cailloux décimétriques. Présence de glace interstitielle
10,8 à 17m	Dépôt grisâtre à granulométrie fine composé de silt et d'argile. Présence d'un réseau de lentilles de glace millimétriques réticulées entrecoupées par quelques lentilles de glace centimétriques subhorizontales localisées
17,0 à 25,2m	Dépôt de sable fin à moyen silteux grisâtre très compact entrecoupé de couches minces de silt argileux. Présence de glace interstitielle et de quelques lentilles de glace centimétriques subhorizontales localisées exclusivement dans les couches de silt argileux.
	Le substrat rocheux n'a pas été atteint.

Tableau 1. Stratigraphie du sondage TAS_F3

Dans le sol situé juste sous l'aéroport et plus particulièrement sous les sections d'essai, le pergélisol peut être considéré comme sensible au dégel puisque les différentes couches stratigraphiques présentent des contenus en glace assez importants. Il n'y a pas seulement une couche riche en glace mais le sol dans sa totalité est riche en glace. On retrouve de nombreuses lentilles de glace millimétriques et centimétriques sur toute la profondeur de forage. De plus, la salinité mesurée dans l'eau interstitielle peut influencer significativement le pergélisol. En

abaissant le point de congélation de $0,5^{\circ}\text{C}$ en moyenne, des tassements du pergélisol peuvent apparaître avant que celui-ci n'atteigne 0°C . Le risque de mauvais comportement à long terme est donc avéré.

4.3.2. Enneigement

Les conditions d'enneigement du site de Tasiujaq sont particulièrement importantes à cause de l'orientation de ce dernier par rapport aux vents dominants. Comme le montre les figures 26 et 27, l'orientation principale du vent diffère selon les saisons. En hiver, le vent vient principalement de la direction 290° soit un angle de 80° avec la piste qui est orientée selon l'axe 30° - 210° (cf. figures 26 et 27). En été, le vent vient principalement de la direction 40° soit un angle de 10° avec la piste. Ce qui nous intéresse ici dans le cadre de l'enneigement est, bien entendu, la direction du vent au cours de l'hiver. Le fait que le vent arrive presque perpendiculairement à la piste, a comme conséquence une accumulation de neige derrière la piste. La piste constituant un parfait obstacle au vent de surface, la neige s'accumule alors sur le côté sud-est de la piste. Du côté ouest, le vent est suffisamment fort pour la balayer ; elle s'accumule donc moins. Un autre facteur qui accentue cet enneigement différentiel est le déneigement de la piste. La neige qui s'accumule sur la piste, est soufflée dans le sens du vent, pour des raisons de facilité, donc du côté est. Ainsi l'enneigement différentiel est accentué par les opérations d'entretien.

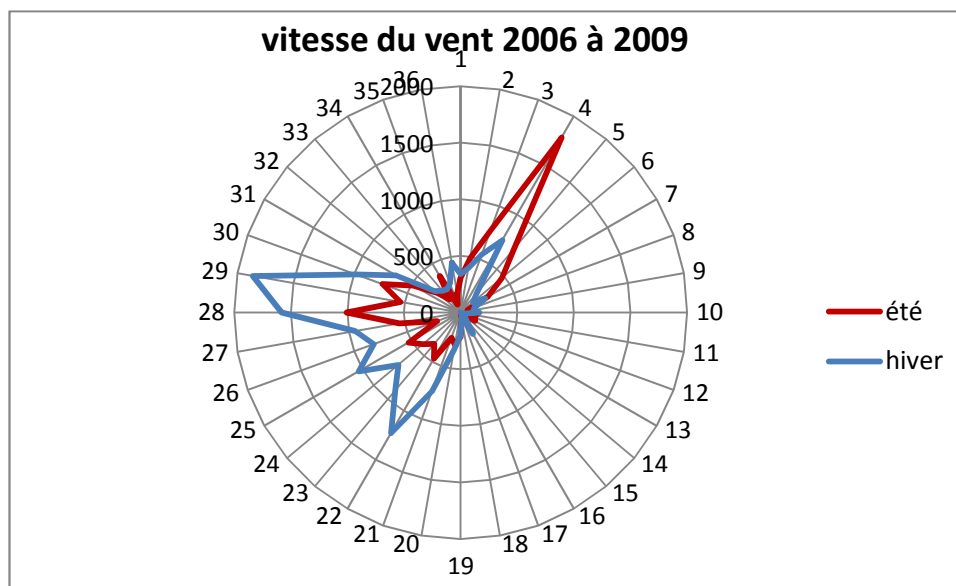


Figure 26. Vitesse cumulée du vent au cours de la période 2006 / 2009 en fonction de son orientation

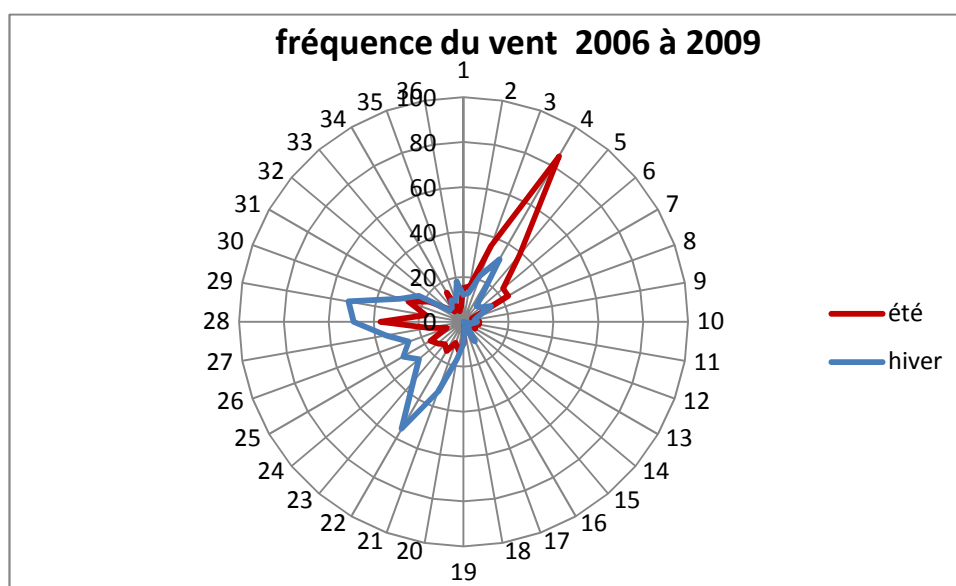


Figure 27. Fréquence cumulée du vent au cours de la période 2006/2009 en fonction de son orientation

Des mesures du couvert neigeux ont été réalisées sur le terrain en avril 2005 (cf. figure 28). La hauteur du banc de neige dépassait alors la hauteur du remblai sur le côté est. (Allard et coll.,

2009). Les épaisseurs de neige mesurées mettent clairement en évidence une accumulation plus importante du côté est (entre 60 et 175 cm) que du côté ouest (entre 25 et 105 cm). La neige agissant comme une couche isolante sur le sol, l'épaisseur de neige a été mise en relation avec la température du sol sous la neige. Il a été déterminé qu'au-delà d'une épaisseur d'environ 75 cm de neige, le sol a un bilan thermique positif et ne peut donc plus se refroidir. L'impact thermique est majeur pour l'aéroport car, comme le montre la figure 29, la zone recouverte par plus de 75 cm de neige, est vraiment importante. On retrouve avec ce critère que la partie est de la piste est affectée dans son intégralité par un couvert neigeux problématique. Du côté ouest, la zone affectée est beaucoup plus réduite.

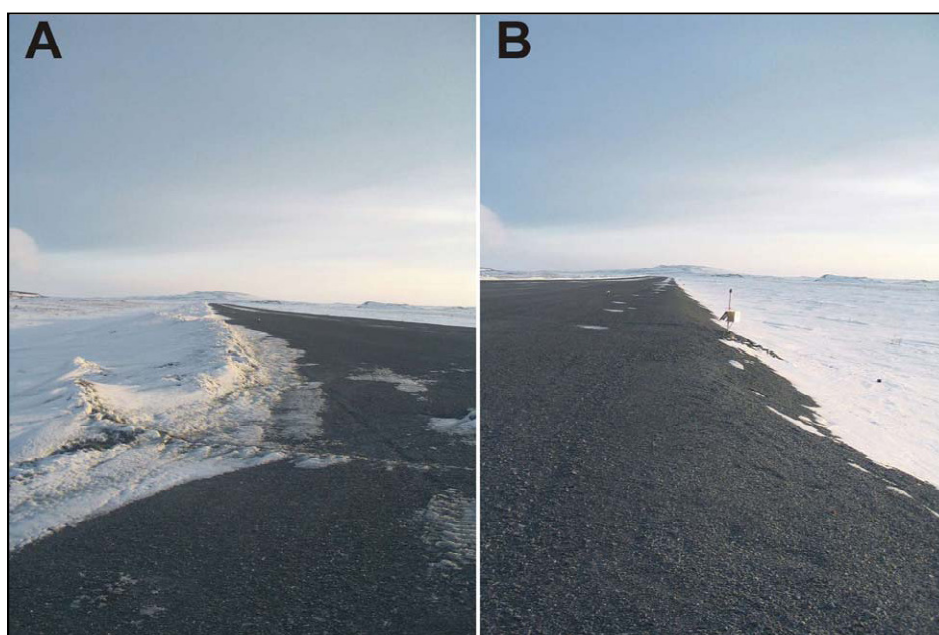


Figure 28. Etat du couvert neigeux en avril 2005 A-côté est, B-côté ouest (Allard et coll., 2009)

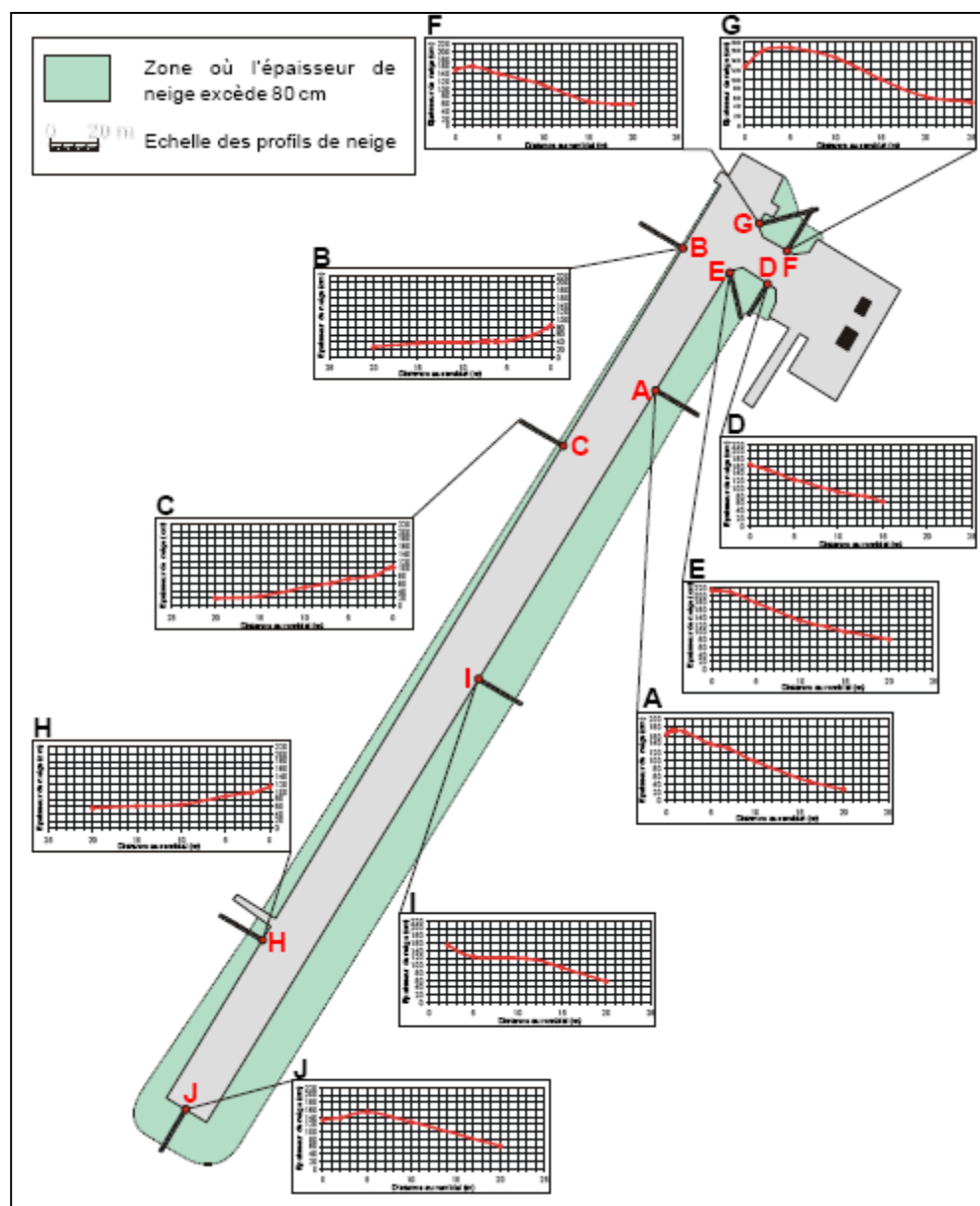


Figure 29. Zone où l'enneigement dépasse 80 cm le long de la piste de Tasiujaq (Allard et coll., 2009)

4.3.3. 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. Cependant les accumulations d'eau sont nombreuses autour de la piste

de l'aéroport. Tout d'abord, la piste enjambe un ancien méandre abandonné entre les chaînages 5+810 et 5+860 qui est aujourd'hui un lac d'environ 50 cm de profondeur. Ensuite, dès le début de la fonte des neiges, de nombreuses accumulations d'eau apparaissent tout autour de la piste. A de nombreux endroits, des ornières causées par la circulation de la machinerie sur le terrain naturel ont provoquées des accumulations d'eau supplémentaires. Lors des visites de terrain en juillet 2009 et août 2010, le sol au pied des sections de référence était gorgé d'eau. Du point de vue de l'emplacement des sections expérimentales, une accumulation d'eau d'environ 20 cm de profondeur est présente au pied de la section de référence (cf. figure 30). Résultant possiblement de la fonte des neiges, cette présence d'eau en quantité peut affecter la section.



Figure 30. Accumulation d'eau au pied de la section de référence en juillet 2009.

4.4. Sections expérimentales

L'aéroport de Tasiujaq est sujet à de nombreuses dégradations de par son implantation. Tout d'abord, le pergélisol sous-jacent est très riche en glace et très sensible. Ensuite, l'enneigement différentiel et le mauvais drainage du site affecte le régime thermique. Enfin ces facteurs se combinent au réchauffement climatique, tout ceci résultant en un dégel accéléré du pergélisol et donc une dégradation de la piste. Ainsi l'aéroport de Tasiujaq a été jugé hautement sensible dans la campagne d'identification des infrastructures problématiques du Nunavik (Doré et coll., 2007).

Ce bilan de la condition des infrastructures a été mené en parallèle avec une détermination des techniques de mitigation de la fonte de pergélisol, ayant un potentiel d'application au Nunavik. Le Groupe de Recherche en Ingénierie des Chaussées (GRINCH) de l'université Laval a alors reçu le mandat de développer et d'expérimenter les techniques choisies. Ainsi le site d'essai a été construit à l'été 2007, le long de l'accotement de la piste d'atterrissage de l'aéroport de Tasiujaq (cf. figure 31). D'une longueur de 200 mètres, il se décompose en quatre sections indépendantes : section témoin (A), section à adoucissement de pente (B), section à remblai à convection d'air (C) et section à drain thermique (D) (cf. figures 22 et 32). Chaque section, d'une longueur de 50 mètres, est instrumentée à l'aide de thermistances afin de suivre leur régime thermique. Ces capteurs sont situés dans des trous de forage, placés en milieu de pente, au milieu de chaque section. Les thermistances permettent un suivi continu de la température pendant toute la période d'étude. Les sections seront décrites brièvement dans cette section, l'instrumentation sera détaillée dans la section 4.5.



Figure 31. Localisation des planches d'essai le long de l'aéroport de Tasiujaq

La section de référence est une section de l'épaule existant qui a été instrumentée afin de servir de référence lors de la comparaison des efficacités respectives de chaque technique. Les schémas des sections sont présentés en annexe 1.

La section à adoucissement de pente consiste en un remblai de pente 1V : 8H. Cette section, dont le principe de fonctionnement est décrit dans la revue de littérature, permet de limiter l'accumulation de neige et donc l'effet isolant de cette dernière.

La section à remblai à convection d'air a elle-aussi été décrite dans la revue de littérature. Cependant plusieurs versions de cette technique existent. La section de Tasiujaq est une section à remblai à convection d'air dite fermée ; seule la convection libre interne peut donc exister dans cette section. Un système de ventilation a en plus été ajouté. En effet, le couvert neigeux étant particulièrement important sur le côté est de la piste, des cheminées ont été ajoutées afin de passer outre l'effet isolant de la neige. Ainsi la section à remblai à convection d'air possède deux cheminées d'entrée d'air et deux cheminées de sortie d'air. Ce système doit permettre de prolonger la circulation de l'air même pendant la période où le couvert neigeux est très important. Ce design particulier de cette technique est sensé être mieux adapté aux endroits qui ont un fort couvert neigeux.

Enfin la dernière section possède un drain thermique, dont le principe est lui-aussi décrit dans la revue de littérature. Cette section possède aussi un système de ventilation constitué de deux cheminées d'entrée d'air et de deux cheminées de sortie d'air. Grâce à cet ajout, le mouvement d'air convectif dans le drain est potentiellement actif tout au long de l'hiver.

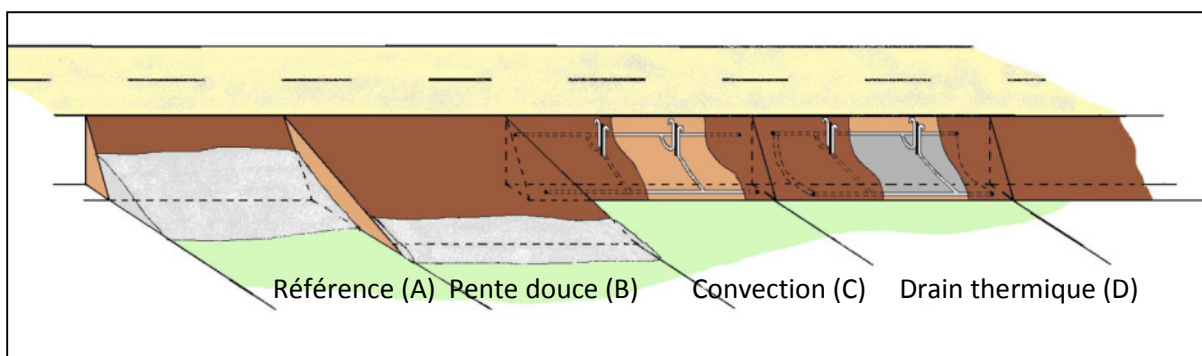


Figure 32. Schéma des quatre sections de la planche d'essai de Tasiujaq

La mise en place et l'instrumentation des quatre sections a été réalisée dans le délai le plus court possible (entre 29 août 2009 et le 15 septembre 2009). Ceci afin de limiter l'exposition du sol directement à l'air libre et donc de diminuer les perturbations thermiques liées à la construction.

4.5. Instrumentation

Dans chaque section, un forage a été réalisé afin de placer l'instrumentation au cours de la mise en place des sections.

4.5.1. Emplacement de l'instrumentation

Dans chaque forage d'instrumentation, on retrouve deux chapelets de thermistances. Chaque chapelet est composé de 8 thermistances espacées de 60 centimètres chacune. Les 2 chapelets sont alors insérés dans le même trou de forage en quinconce. Chaque section dispose donc de 16 thermistances espacées de 30 centimètres. Le type de thermistance utilisé est le modèle YSI 44033. Ce modèle de thermistance a une précision de $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ à 0°C . Chaque thermistance est soudée à un câble Belden 88761. L'alternance des chapelets de thermistances permet de s'assurer de posséder de données même dans le cas d'un bris de câble. Sans cette précaution, un bris de câble aurait engendré la perte de la totalité de l'information. Avec les 2 chapelets placés en quinconce, le bris de câble entraîne seulement la perte de la moitié de l'information. La température est alors disponible à chaque intervalle de 60 centimètres.

D'autres thermistances sont placées sur les cheminées de ventilation des sections à remblai à convection d'air (C) et à drain thermique (D). Chaque section dispose de 2 cheminées d'entrée d'air et 2 cheminées de sortie d'air ; chaque cheminée est instrumentée avec une thermistance. Ces dernières sont placées à l'intérieur des cheminées afin de mesurer la température de l'air qui traverse effectivement la cheminée et ne pas être affecté par l'air libre extérieur. Enfin, 2 thermistances sont installées afin d'enregistrer les variations de température de l'air extérieur à environ 1,5 mètre au-dessus du niveau du sol. Les thermistances sont désignées par une lettre et un chiffre. La lettre indique à quelle section elle se rattache : (A) pour la section de référence, (B) pour la section à adoucissement de pente, (C) pour la section à remblai à convection d'air et (D) pour la section à drain thermique. Le chiffre désigne alors l'ordre de la thermistance dans le positionnement vertical. La numéro 1 étant la plus proche de la surface et la numéro 16, celle qui se trouve le plus en profondeur. L'installation des thermistances en 2 chapelets fait que toutes les thermistances impaires (idem pour les thermistances paires) sont reliées à un même chapelet ; d'où la désignation « chapelet paire » et « chapelet impaire ». Pour les thermistances installées

dans les cheminées, la première lettre désigne la section concernée (section (C) ou section (D)). La seconde lettre désigne s'il s'agit d'une cheminée d'entrée d'air (lettre Y) ou d'une cheminée de sortie d'air (lettre X). Enfin le chiffre désigne de quelle cheminée il s'agit : première ou deuxième cheminée de la section (chiffre 1 ou 2 respectivement). Ainsi la thermistance CY1 désigne la thermistance placée dans l'entrée (Y) de la première cheminée (1) de la section à remblai d'air (C). Les schémas de l'implantation de l'instrumentation sont présentés à l'annexe 2.

4.5.2. Acquisition des données

Toutes les thermistances installées sur l'aéroport de Tasiujaq sont reliées à des systèmes d'acquisition (cf. figure 33). Ces systèmes sont placés dans deux boîtiers plastiques situés sur deux tumulus placés entre les sections A et C ainsi que C et D. Chaque boîtier recueille les données de 2 sections ; il est composé de deux enregistreurs de données automatisées (Datalogger-CR800Series), de prises de courant, d'un système de chauffage et d'un ventilateur. Le chauffage et le ventilateur permettent d'assurer une température et une circulation de l'air, conformes aux conditions de fonctionnement des enregistreurs. Deux ouvertures, une de chaque côté de chaque boîte, permettent d'expulser l'humidité et de changer l'air. Les 2 boîtiers sont reliés au système électrique du garage de l'aéroport par des fils mis sous terre. En cas de panne électrique, chacun des quatre systèmes d'acquisition des données (SAD) possède une batterie lui permettant de continuer à fonctionner normalement pour une durée dépendante de la température de la batterie.

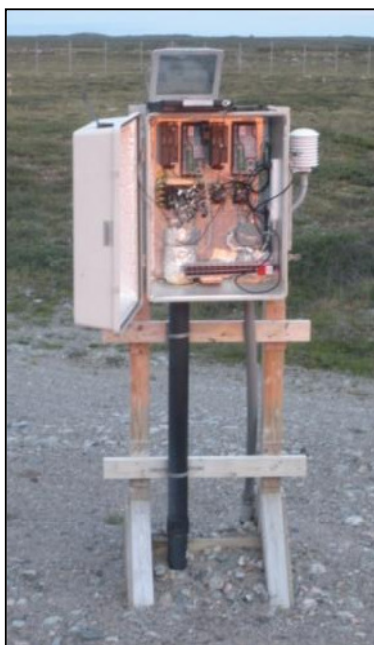


Figure 33. Intérieur d'une des deux boîtes contenant deux SAD

Chaque SAD peut être relié à un maximum de 20 thermistances. Les branchements ont donc été réalisés de manière à minimiser l'effet d'un bri de câble ou d'un dysfonctionnement d'enregistreur de données. Par exemple, les 2 chapelets de thermistances de la section (D) sont reliés séparément aux enregistreurs SAD#3 et SAD#4. Ainsi si un système d'acquisition des données brise, l'information d'un seul chapelet de chaque section est perdue. Les données sont néanmoins toujours disponibles tous les 60 cm.

Les données de températures sont relevées toutes les 6 heures et mémorisées dans chacun des systèmes d'acquisition des données. Elles sont ensuite recueillies lors du passage d'un technicien sur le site. Le téléchargement des données nécessite un ordinateur et le logiciel informatique PC200W. Les relevés ont été effectués 2 fois par an pendant la période de suivi.

Chapitre 5.0

Analyse des données thermiques

5.1. Correction des données

Suite à leur mise en place, seules 4 des 70 thermistances installées n'ont pas fonctionné. Elles n'ont jamais donné aucune mesure : la valeur renvoyée était la valeur par défaut (-58°C). Au cours de la période de suivi, il n'y a pas d'autres dysfonctionnement des thermistances à noter. Cependant un des systèmes d'acquisition des données a posé problème.

5.1.1. Défectuosité du SAD#3

Le système d'acquisition des données SAD#3 a rencontré des difficultés de fonctionnement ; celui-ci est relié à un chapelet de thermistances de la section (C), un chapelet de la section (D) ainsi qu'aux cheminées numérotées 1 de chacune de ces deux sections. Donc les données de la moitié des thermistances des sections à remblai à convection d'air et à drain thermique sont potentiellement affectées. Cependant, la défectuosité du système d'acquisition des données n'est pas constante. Le problème apparaît pendant une certaine période puis disparaît, avant de réapparaître quelques temps plus tard.

Le repérage de cette défectuosité est assez évident car les données sont alors complètement aberrantes. Le chapelet qui fonctionne normalement et celui qui dysfonctionne, étant intercalés, les températures relevées ne concordent pas. Lorsque le SAD pose problème, les valeurs indiquées ne concordent ni avec les valeurs adjacentes temporellement ni avec les valeurs adjacentes en profondeur. De plus, les plages de défectuosité du chapelet de thermistances impaires de la section (C) et du chapelet de thermistances impaires de la section (D), sont communes. Il est donc clair qu'il ne s'agit pas d'une défectuosité du câble électrique mais du système d'acquisition des données. Les raisons de cette défectuosité peuvent être nombreuses (humidité, surchauffe, mauvais contact électrique,...) mais restent incomprises pour le moment.

La défectuosité est donc clairement avérée. La difficulté est alors de déterminer le moment où il se produit. Certaines plages temporelles de valeurs aberrantes sont bien définies et immanquables. Cependant, on ne peut assurer qu'il n'y ait pas d'autres défectuosités moins flagrantes.

5.1.2. Traitement des données

L'idée première du tri des données, était de l'automatiser par l'intermédiaire d'un algorithme. Cependant, il s'est avéré qu'il était plus rapide et plus efficace d'effectuer ce traitement des données manuellement. En effet, il s'agissait non seulement de repérer les plages de défectuosité du SAD#3 mais aussi de les distinguer par rapport à d'autres perturbations telles un écoulement d'eau qui modifie les données thermiques par exemple. De plus, le tri manuel nécessite un certain temps mais cela reste comparable à l'automatisation du filtrage. Le suivi des données devant s'effectuer seulement pendant une plage de 3 ans, l'algorithme de tri a été abandonné. Le filtrage a donc été effectué manuellement de la façon suivante :

- Les données de la section (C) et de la section (D) sont analysées séparément afin de faire ressortir les plages pour lesquelles le SAD#3 semble poser problème. A l'aide des mises en forme conditionnelle proposées sous Excel, les centiles sont distingués. Les discontinuités de température apparaissent alors comme des discontinuités de couleurs et sont donc plus facilement repérables. Le filtrage est alors raffiné afin de délimiter les plages problématiques. Sur la figure suivante, le temps est en ordonnée et la profondeur en abscisse, la couleur indiquant la valeur de la température (bleu = froid, rouge = chaud). Il est donc très net que pendant certaines périodes, une thermistance sur deux donne des valeurs incohérentes.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
2	Date	Heure	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16
95	22 juin 2010	12:00	5,803	4,13	3,589	1,203	0,127	-0,137	0,127	-0,202	-0,055	-0,359	-0,146	-0,569	-0,315	-0,621	-0,333	-0,791
96	22 juin 2010	18:00	27,56	4,136	25,03	1,209	20,4	-0,143	20,33	-0,195	20,07	-0,365	19,87	-0,588	19,66	-0,601	19,55	-0,81
97	22 juin 2010	00:00	26,15	4,165	23,59	1,238	19	-0,154	19	-0,219	18,76	-0,337	18,55	-0,599	18,35	-0,612	18,14	-0,808
98	22 juin 2010	06:00	26,13	4,154	23,55	1,226	19,01	-0,139	19,01	-0,231	18,74	-0,348	18,63	-0,571	18,47	-0,61	18,26	-0,793
99	22 juin 2010	12:00	25,99	4,163	23,32	1,262	18,81	-0,129	18,84	-0,208	18,54	-0,339	18,33	-0,601	18,28	-0,601	18,11	-0,794
100	22 juin 2010	18:00	30,73	4,216	28,06	1,289	23,12	-0,142	23,16	-0,234	22,72	-0,362	22,53	-0,6	22,25	-0,6	22,16	-0,81
101	23 juin 2010	00:00	5,851	4,209	3,89	1,255	0,31	-0,163	0,31	-0,203	0,101	-0,334	-0,003	-0,608	-0,146	-0,608	-0,253	-0,752
102	23 juin 2010	06:00	5,851	4,277	3,827	1,295	0,232	-0,149	0,219	-0,215	0,01	-0,319	-0,068	-0,607	-0,211	-0,594	-0,202	-0,804
103	23 juin 2010	12:00	5,945	4,33	3,841	1,308	0,258	-0,123	0,232	-0,229	0,036	-0,32	-0,055	-0,595	-0,211	-0,569	-0,263	-0,804
104	23 juin 2010	18:00	5,985	4,374	3,907	1,312	0,258	-0,146	0,271	-0,211	0,036	-0,342	-0,055	-0,591	-0,198	-0,591	-0,302	-0,8
105	24 juin 2010	00:00	24,11	4,397	21,31	1,308	16,63	-0,123	16,72	-0,228	16,34	-0,346	16,37	-0,595	16,05	-0,608	15,96	-0,778
106	24 juin 2010	06:00	24,15	4,423	21,48	1,347	16,84	-0,137	16,75	-0,202	16,46	-0,372	16,34	-0,582	16,16	-0,582	16,07	-0,778
107	24 juin 2010	12:00	24,02	4,49	21,28	1,387	16,7	-0,137	16,66	-0,228	16,41	-0,346	16,29	-0,569	16,1	-0,634	16,01	-0,791
108	24 juin 2010	18:00	24,03	4,498	21,46	1,383	16,79	-0,14	16,75	-0,219	16,47	-0,363	16,37	-0,598	16,23	-0,611	16,11	-0,792
109	25 juin 2010	00:00	24,04	4,503	21,4	1,387	16,72	-0,137	16,7	-0,202	16,38	-0,359	16,28	-0,595	16,1	-0,602	15,99	-0,778
110	25 juin 2010	06:00	23,86	4,501	21,33	1,45	16,64	-0,139	16,57	-0,204	16,37	-0,335	16,25	-0,584	16,07	-0,571	15,96	-0,819
111	25 juin 2010	12:00	24,06	4,53	21,62	1,44	16,92	-0,124	16,82	-0,202	16,61	-0,372	16,44	-0,608	16,29	-0,582	16,17	-0,791
112	25 juin 2010	18:00	24,11	4,497	21,69	1,46	16,93	-0,143	16,86	-0,208	16,61	-0,365	16,49	-0,575	16,28	-0,588	16,23	-0,784
113	26 juin 2010	00:00	24,06	4,515	21,67	1,451	16,86	-0,102	16,82	-0,23	16,57	-0,335	16,41	-0,583	16,28	-0,596	16,17	-0,832
114	26 juin 2010	06:00	24,08	4,494	21,63	1,496	16,9	-0,12	16,82	-0,238	16,6	-0,343	16,49	-0,565	16,32	-0,591	16,19	-0,774
115	26 juin 2010	12:00	24,08	4,518	21,57	1,52	16,9	-0,135	16,72	-0,214	16,54	-0,345	16,44	-0,607	16,22	-0,594	16,13	-0,79
116	26 juin 2010	18:00	24	4,53	21,53	1,532	16,81	-0,123	16,72	-0,215	16,47	-0,32	16,41	-0,582	16,23	-0,608	16,11	-0,785
117	27 juin 2010	00:00	24,08	4,545	21,62	1,533	16,87	-0,11	16,75	-0,214	16,44	-0,345	16,44	-0,594	16,25	-0,591	16,05	-0,79
118	27 juin 2010	06:00	24,24	4,548	21,75	1,535	17,04	-0,146	16,92	-0,212	16,66	-0,356	16,55	-0,604	16,34	-0,604	16,23	-0,788
119	27 juin 2010	12:00	24,51	4,57	22,22	1,545	17,33	-0,137	17,33	-0,215	17,01	-0,346	16,87	-0,569	16,73	-0,595	16,58	-0,765
120	27 juin 2010	18:00	24,61	4,537	22,24	1,539	17,43	-0,156	17,26	-0,208	17,09	-0,339	16,94	-0,601	16,79	-0,601	16,6	-0,784
121	28 juin 2010	00:00	24,39	4,55	22,29	1,564	17,42	-0,131	17,27	-0,222	16,98	-0,34	16,9	-0,576	16,72	-0,589	16,63	-0,812
122	28 juin 2010	06:00	24,68	4,535	22,44	1,589	17,58	-0,132	17,47	-0,224	17,22	-0,342	17,04	-0,591	16,82	-0,617	16,75	-0,774
123	28 juin 2010	12:00	24,79	4,543	22,49	1,571	17,6	-0,16	17,46	-0,189	17,29	-0,32	17,15	-0,582	16,96	-0,582	16,82	-0,805
124	28 juin 2010	18:00	24,83	4,509	22,51	1,629	17,64	-0,145	17,47	-0,21	17,26	-0,341	17,12	-0,577	16,96	-0,603	16,87	-0,796
125	29 juin 2010	00:00	24,77	4,53	22,43	1,611	17,67	-0,137	17,38	-0,215	17,12	-0,32	16,99	-0,595	16,84	-0,621	16,76	-0,785
126	29 juin 2010	06:00	24,85	4,53	22,56	1,624	17,75	-0,123	17,63	-0,215	17,3	-0,346	17,24	-0,595	17,07	-0,595	16,95	-0,778
127	29 juin 2010	12:00	25,07	4,542	22,69	1,61	17,92	-0,125	17,8	-0,216	17,55	-0,347	17,41	-0,583	17,25	-0,583	17,05	-0,779
128	29 juin 2010	18:00	6,146	4,517	4,45	1,637	0,623	-0,137	0,605	-0,202	0,297	-0,333	0,219	-0,595	0,062	-0,595	-0,023	-0,817
129	30 juin 2010	00:00	6,159	4,523	4,464	1,656	0,688	-0,131	0,571	-0,197	0,375	-0,341	0,245	-0,537	0,127	-0,59	0,023	-0,789
130	30 juin 2010	06:00	6,267	4,499	4,587	1,647	0,78	-0,167	0,619	-0,232	0,453	-0,349	0,249	-0,585	0,18	-0,609	0,104	-0,785
131	30 juin 2010	12:00	6,168	4,487	4,473	1,621	0,659	-0,153	0,541	-0,218	0,332	-0,375	0,215	-0,598	0,046	-0,611	0,02	-0,807
132	30 juin 2010	18:00	6,338	4,511	4,561	1,645	0,837	-0,142	0,654	-0,22	0,459	-0,351	0,341	-0,6	0,211	-0,613	0,133	-0,783
133	01 juil 2010	00:00																
134	01 juil 2010	06:00																

Figure 34. Capture d'écran Excel de la mise en forme conditionnelle des températures de la section à drain thermique pour la période allant du 22 au 30 juin 2010

- Dans un deuxième temps, les plages qui ont été délimitées séparément pour les sections (C) et (D) sont comparées. Ainsi, la période de données aberrantes relevée pour la section (C), est mise en relation avec les données de la section (D). Comme les deux sections sont reliées au même SAD défectueux, les périodes identifiées doivent être identiques. Les différences sont alors analysées et de nouveau affinées. Après cette deuxième analyse, on possède alors les plages temporelles problématiques qui sont communes aux différentes sections.

N.B. : Le tri ne peut se faire à l'aide des thermistances installées dans les cheminées pour deux raisons. Tout d'abord, on dispose de très peu de thermistances dans les cheminées donc il est plus difficile de les comparer entre elles. D'autre part, la température des cheminées est plus sensible aux variations de la température extérieure qu'une thermistance placée en profondeur dans le sol. Ainsi, les fluctuations horaires de la température se confondent avec les possibles défauts du système d'acquisition des données #3.

- Pour finir, toutes les données thermiques aberrantes se trouvant dans les périodes de défectuosité sont supprimées ; pour les sections (C) et (D) ainsi que pour les thermistances des cheminées correspondantes (cf. figures 35 et 36).

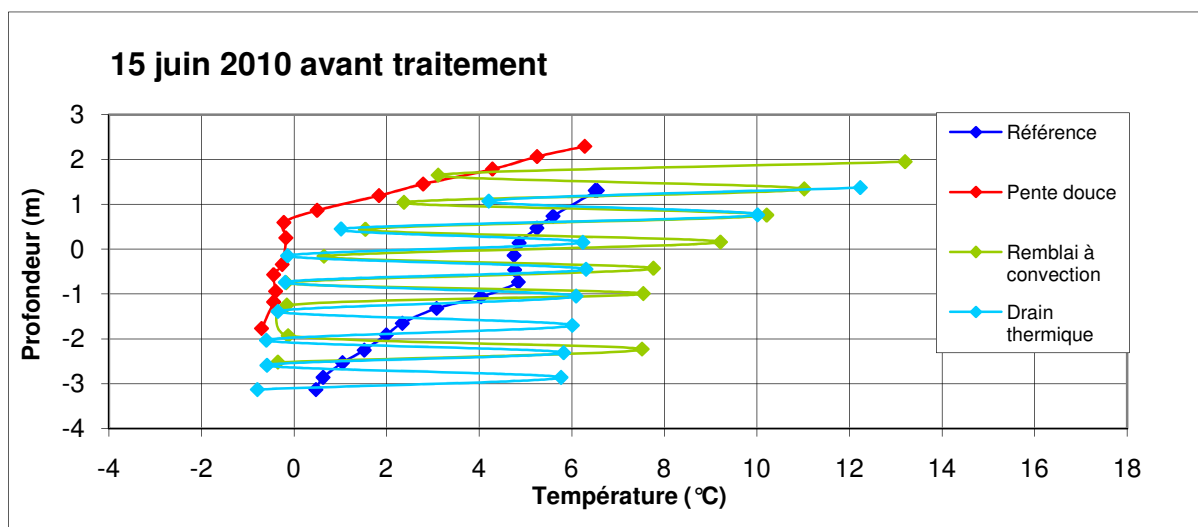


Figure 35. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juin 2010 avant traitement des données non concordantes

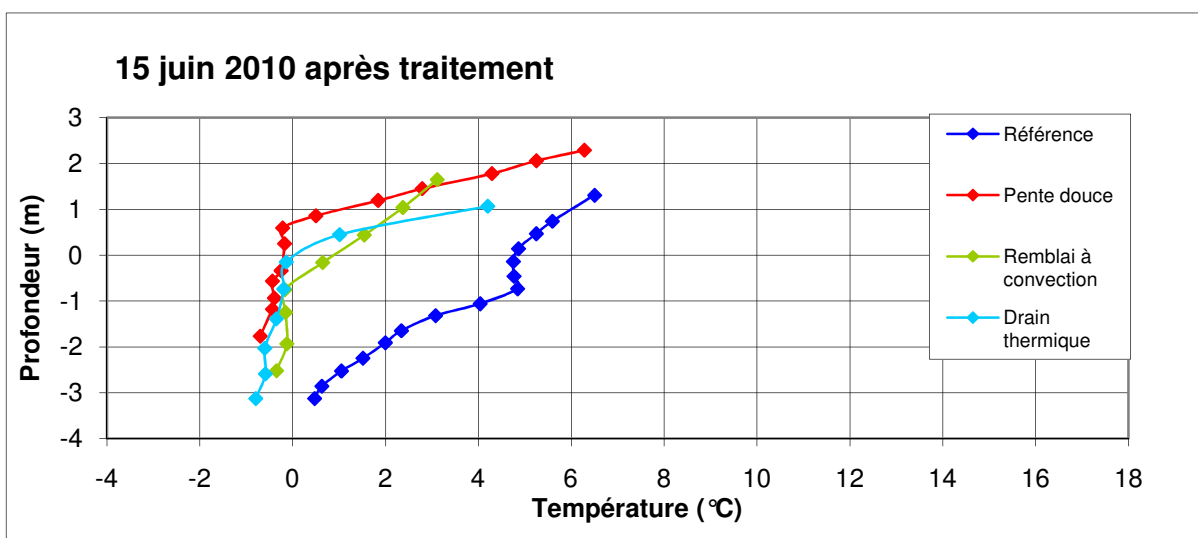


Figure 36. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juin 2010 après traitement des données non concordantes

La plupart des analyses de données, pour les sections à remblai à convection d'air (C) et à drain thermique (D) sont alors réalisées à partir du seul chapelet qui fonctionne correctement. L'installation des thermistances en 2 chapelets distincts a donc permis de ne perdre que la moitié de l'information. Cependant pour certains graphiques qui nécessitent de connaître la température à une profondeur précise (par exemple: régime thermique à la profondeur de l'interface remblai / sol naturel), les températures manquantes ont alors été approximées à l'aide des températures les plus proches. Ainsi la température de la thermistance C7 a été interpolée à partir des températures des thermistances les plus proches : C6 et C8. Les coefficients de pondération ont été déterminés à partir des périodes de fonctionnement normal. Sur l'ensemble des trois années de suivi, environ 20% des données thermiques des sections (C) et (D) sont perturbées. Le nombre de jours perturbés était faible la première année et n'a cessé d'augmenter (0,1% en 2007 ; 6% en 2008 ; 25% en 2009 ; 41% en 2010). Entre le 29 mars 2010 et la fin de la période de suivi, le SAD#3 n'a plus fonctionné correctement. Le remplacement du système d'acquisition des données #3 sera nécessaire si l'on souhaite un suivi à plus long terme.

5.2. Données thermiques

Dans la suite du document, seules les données traitées seront présentées. Les données liées à la défectuosité du SAD#3 n'apparaissent donc plus. En premier lieu, l'évolution des données thermiques des différentes sections seront présentées en fonction du temps. Dans un deuxième temps, les données des différentes sections seront comparées à plusieurs profondeurs données. Ensuite, nous analyserons les courbes trompettes des différentes sections ; ces courbes permettent de comprendre le fonctionnement des sections à certaines périodes charnières telles l'hiver et l'été. Puis nous nous attarderons à décrire les données issues des thermistances installées dans les cheminées des différentes sections. Enfin, nous synthétiserons toutes ces informations afin de caractériser l'efficacité de chacune des sections.

Toutes les sections ne sont pas instrumentées à des profondeurs rigoureusement identiques. Ainsi, dans un souci de lisibilité, les différentes thermistances des sections ont été calées par rapport à une référence. Cette référence commune est le contact remblai / sol naturel qui sera désigné par la suite comme étant la profondeur zéro. Ainsi les valeurs positives de profondeur correspondent à

la hauteur dans le remblai, et les valeurs négatives correspondent à la profondeur dans le sol naturel.

5.2.1. Données en fonction du temps

Toutes les données thermiques des sections ont été analysées sur la plage de suivi, soit entre septembre 2007 et octobre 2010. Le tracé et l'analyse des régimes thermiques a été fait au 1^{er} jour et au 15^{ème} jour de chaque mois. Cette analyse se trouve en annexe 3.

Les graphiques de la figure 37, représentant l'évolution de la température en fonction du temps et de la profondeur, ont été tracés à l'aide du logiciel Surfer. Comme les quatre sections ne sont pas instrumentées sur les mêmes plages de profondeur, tous les graphiques ont été calés sur le contact remblai / sol naturel qui est figuré par un trait noir à la profondeur 0. De plus, la totalité de l'information a été conservée et les zones exemptes de données ont été grisées.

L'interpolation des données de température a été effectuée à partir des données journalières à midi. La fonction de Krigage du logiciel Surfer a été utilisée. Cette méthode d'interpolation permet d'évaluer la valeur du variable en un point où elle n'a pas été mesurée à partir de valeurs observées à proximité. La valeur est une combinaison linéaire des données ponctuelles adjacentes. Les poids de chaque donnée sont choisis de manière à minimiser la variance.

Cette interpolation permet d'avoir un très bon aperçu du comportement global des sections mais ne permet pas une analyse directe. En effet, l'erreur liée n'a pas été mesurée et peut être importante. L'avantage d'une telle représentation étant sa facilité de compréhension et sa lisibilité.

En annexe 3 figure l'analyse détaillée des comportements thermiques. Pour résumer, les grandes lignes seront présentées dans ce qui suit. La section de référence est la plus chaude des sections : son front de dégel est largement plus profond que les autres sections et dépasse la profondeur instrumentée. Cette section se réchauffe massivement l'été tandis qu'elle est réfractaire à la pénétration du froid en hiver. De plus, elle est affectée par un écoulement qui la réchauffe massivement en profondeur.

Du point de vue du comportement, vient ensuite la section à remblai à convection. Cette section dégèle aussi au-delà de la profondeur instrumentée. Les températures atteintes sont cependant inférieures à celle de la section de référence. De plus, le dégel brutal d'une épaisse couche de sol dans la deuxième moitié de l'été, laisse penser qu'une couche de glace se trouve à la profondeur concernée. On se retrouve ce phénomène pour la section à drain thermique. Pour la section à remblai à convection d'air, on note une accumulation de chaleur sous la surface du remblai. Ceci est possiblement dû à un mauvais fonctionnement du système de ventilation de cette section.

Ensuite, la section à drain thermique a un comportement très prometteur. La profondeur de dégel reste faible comparée aux deux sections citées précédemment. Cette section se distingue par une bonne résistance à la pénétration de la vague de chaleur en été, ce qui lui permet de ne pas trop se réchauffer pendant cette période cruciale.

Enfin, la section à pente douce est celle qui donne les meilleurs résultats. Comme elle supprime l'effet isolant de la neige, la pénétration du froid en hiver est comparable à la pénétration de la chaleur en été. Ainsi, le bilan de ces deux mécanismes antagonistes, permet à cette section de proposer la profondeur de dégel la plus faible.

Les comportements de toutes les sections s'améliorent entre les deux premières années puis se dégradent entre les deux suivantes ; ceci est dû au fait que la troisième année est anormalement chaude comparée aux deux précédentes. Ainsi, même si les techniques mises en place sont efficaces, le réchauffement massif de l'air extérieur affecte leurs régimes thermiques.

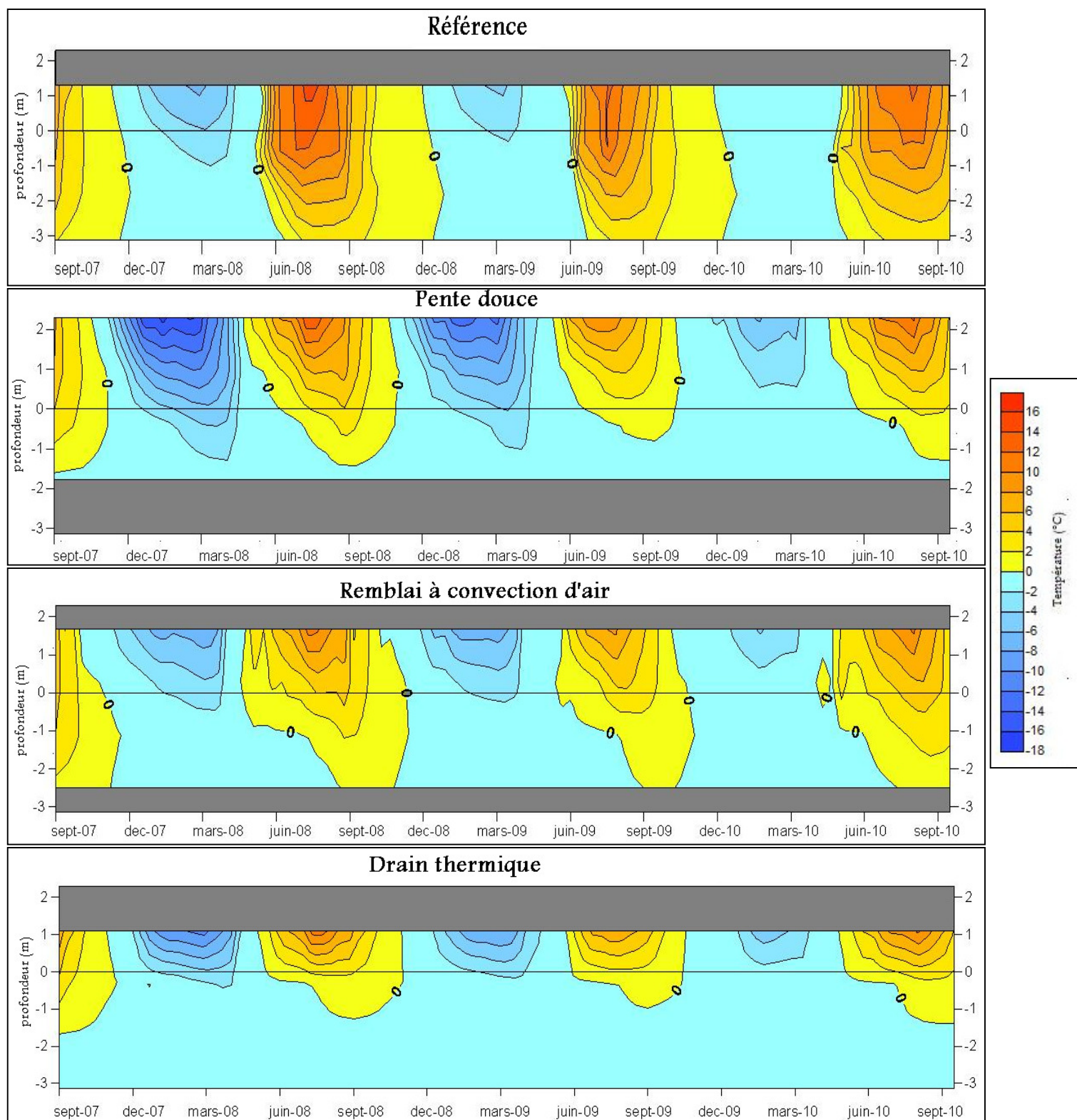


Figure 37. Evolution de la température en fonction de la profondeur et du temps pour les quatre sections

5.2.2. Données par profondeur

Les figures de cette partie représentent l'évolution de la température pour les différentes sections à une profondeur donnée au cours de toute la période de suivi (septembre 2007 à octobre 2010). Ne disposant pas de thermistances à chaque profondeur, les thermistances les plus proches spatialement ont été utilisées. D'autre part, seules les valeurs à midi ont été figurées dans le but de gagner en lisibilité. De plus, on retrouve sur chaque graphique, l'évolution de la température extérieure afin de pouvoir mettre en relation le comportement des sections en profondeur avec les conditions de température extérieure. Pour les données de l'air extérieur, une moyenne mobile sur 9 jours a été effectuée dans le but de lisser la courbe et donc de gagner en lisibilité sur l'ensemble des graphiques.

Sur la période de suivi, on dispose des données de trois années complètes (septembre 2007 à septembre 2010). Les comportements des sections peuvent donc être analysés avec un certain recul. Cependant, les conditions météorologiques extérieures varient d'une année sur l'autre ; l'enneigement, l'ensoleillement, le vent, les précipitations affectent directement les sections. Ainsi, il n'est pas possible de comparer les différentes années d'une même section sans prendre en compte l'évolution des conditions extérieures. La variation des paramètres météorologiques peut donc être vue comme un frein pour dégager une évolution ou une tendance dans le comportement des sections. Mais elle peut aussi être vue comme une diversité de conditions d'essai pour les sections ; quelle section refroidira le plus efficacement dans le cas d'un hiver particulièrement rude ou bien encore quelle section subira fortement les effets d'un important couvert neigeux ?

5.2.2.1. En dessous du contact remblai / sol naturel

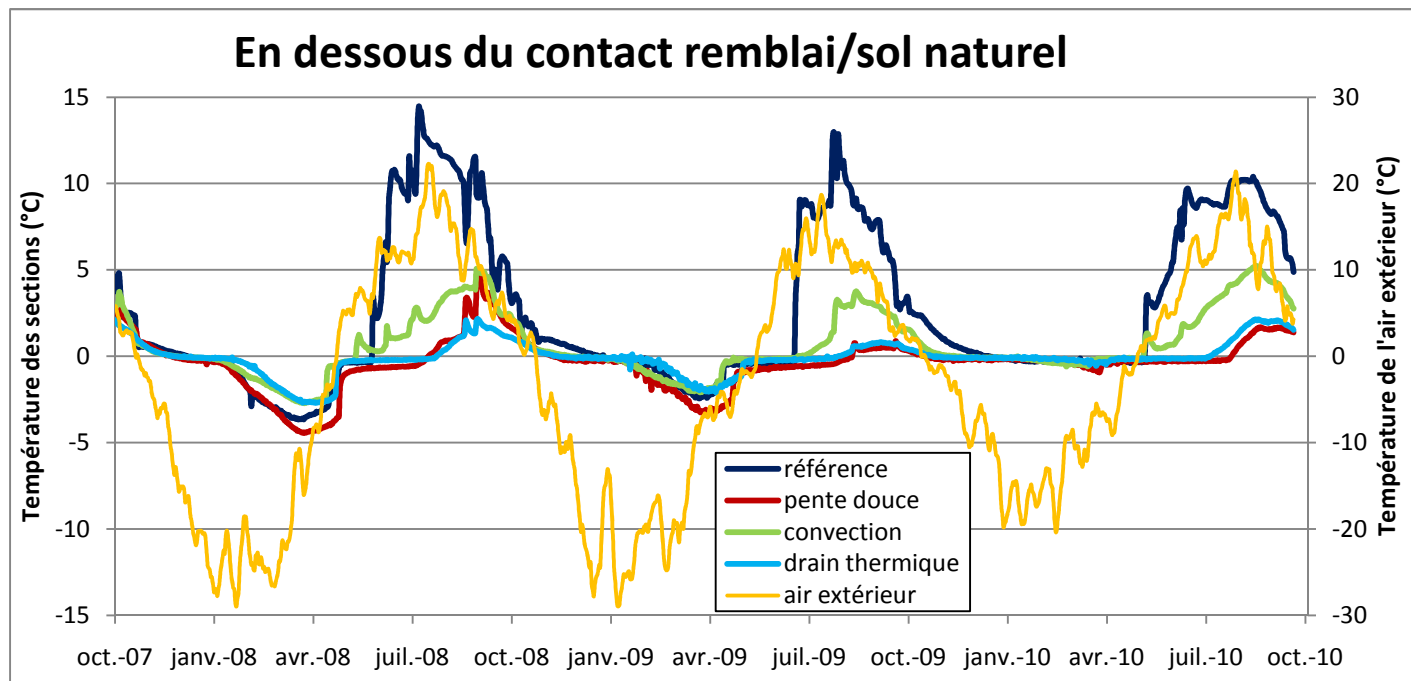


Figure 38. Evolution des températures mesurées par les thermistances localisées sous le contact remblai / sol naturel sous les quatre sections soit A6 (située à -0,14m du contact), B11 (située à -0,34m du contact), C8 (située à -0,16m du contact) et D6 (située à -0,15m du contact).

Le graphique de la figure 38 décrit l'évolution des régimes thermiques au niveau du contact remblai /sol naturel, ou plus exactement juste en dessous de ce contact. Les températures des sections se réfèrent aux graduations de l'axe de gauche tandis que la température de l'air se réfère à l'axe de droite.

On note tout d'abord que les conditions de température extérieures ont été assez variables au cours des trois années de suivi des sections. Le second hiver a été légèrement moins rigoureux et le troisième nettement moins rigoureux que celui de la première année. Sur la période 15 octobre / 15 avril, la température moyenne était de -16,2°C la première année, -14,8°C la seconde année et -9,3°C la troisième année. Soit encore, en nombre de degrés cumulés sur cette même période : -2971°C le premier hiver, -2716°C le second hiver et -1710°C le troisième hiver.

Les étés ont, par contre, été plus stables d'une année sur l'autre. L'été de la première année a débuté un peu plus tôt dans l'année et était plus chaud, mais la différence est moins notable que pour les hivers. Le troisième été étant incomplet. Lorsque l'on compare les évolutions des températures d'une année à l'autre, on note que les amplitudes vont en diminuant ; que ce soit pour les températures d'hiver ou les températures d'été. Cela correspond à la baisse d'amplitude des températures extérieures par rapport à la première année.

Lorsque l'on compare les sections les unes par rapport aux autres, il est intéressant de distinguer les comportements hivernaux et les comportements estivaux. En hiver, la section à adoucissement de pente se distingue car elle est celle qui refroidit le plus. Ensuite vient la section de référence et finalement, les deux autres sections. Lors du troisième hiver, toutes les sections ont des régimes thermiques très proches à cette profondeur. À la fin des deux premiers hivers, la température augmente brusquement vers une valeur fixe proche de $-0,4^{\circ}\text{C}$.

Au début de l'été, les différentes sections restent à un palier de température proche de $-0,4^{\circ}\text{C}$. Un écoulement d'eau correspondant à la première fonte des neiges peut expliquer cette valeur seuil de température. Ensuite, elles se réchauffent plus ou moins selon les sections et les étés. La section de référence connaît alors un saut de température ; cela correspond à l'effet de l'écoulement d'eau qui la réchauffe brusquement et massivement.

En période estivale, la section de référence se démarque clairement des autres sections car elle connaît des températures beaucoup plus chaudes que les autres sections. La section à remblai à convection réchauffe aussi de manière importante l'été mais avec une amplitude plus faible que la section de référence. Enfin, les deux autres sections se réchauffent au cours de l'été mais uniquement au cours de la première année de suivi. Le réchauffement au cours des deux hivers suivant étant très faible.

5.2.2.2. 1 mètre sous le contact remblai / sol naturel

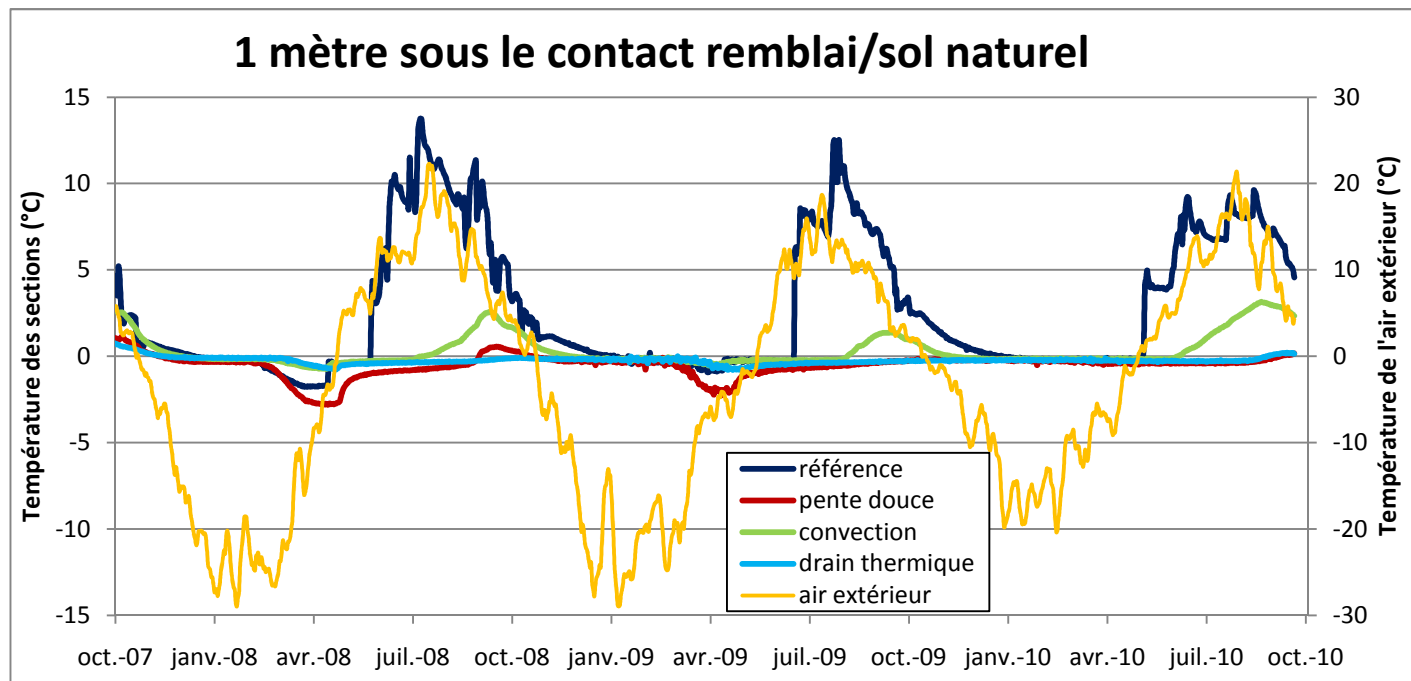


Figure 39. Évolution des températures mesurées par les thermistances localisées à 1 mètre sous le contact entre le remblai et le sol naturel sous les quatre sections soit A9 (située à -1,06m du contact), B13 (située à -0,94m du contact), la moyenne de C10 et C12 (situées à -0,75m et -1,25 du contact), et la moyenne de D8 et D10 (situées à -0,74m et -1,39m du contact).

Le graphique de la figure 39 représente l'évolution des régimes thermiques plus en profondeur. Les effets des variations de température extérieure sont donc atténués. On retrouve ainsi les mêmes comportements que décrits précédemment mais avec moins d'amplitude. La section de référence restant toujours particulièrement affectée par l'écoulement d'eau. La profondeur étudiée ici se trouve juste en dessous de la localisation de l'écoulement. On note de plus, qu'à cette profondeur, le régime thermique de la section à drain thermique est le plus stable : la température de cette section restant très proche de $-0,3^{\circ}\text{C}$.

5.2.2.3. 1,7 mètre sous le contact remblai / sol naturel

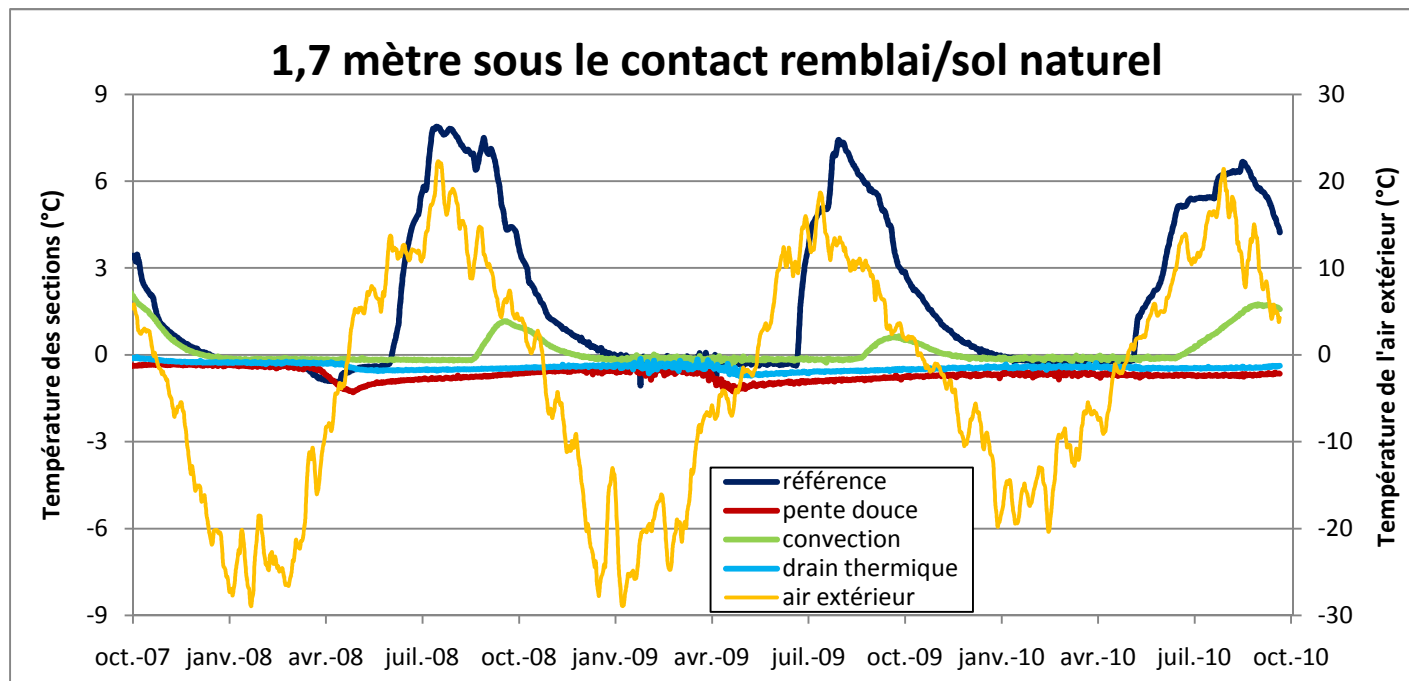


Figure 40. Évolution des températures mesurées par les thermistances localisées à 1,7 mètre sous le contact entre le remblai et le sol naturel sous les quatre sections soit A11 (située à -1,65m du contact), B16 (située à -1,77m du contact), C14 (située à -1,93m du contact), et la moyenne de D10 et D12 (situées à -1,39m et -2,03m du contact).

Le graphique de la figure 40 représente l'évolution des régimes thermiques à la dernière profondeur où des thermistances sont installées dans toutes les sections. Encore une fois, les différences de comportement sont notables même à cette profondeur. La section de référence a un comportement d'une amplitude non comparable avec les autres sections et connaît des températures principalement positives à l'inverse des autres sections. Les sections à drain thermique et à pente douce étant continuellement négatives à cette profondeur. La section à remblai à convection d'air est affectée par les températures positives de l'été ; même à cette profondeur, elle connaît des températures positives autour des mois de septembre et octobre. De plus, les comportements décrits précédemment sont connus avec du retard à cette profondeur. Par exemple, l'effet de la vague de chaleur affecte la section à remblai lorsque l'hiver est proche

d'être amorcé. Ainsi la diffusion de la chaleur dans le sol se poursuit au-delà des périodes estivales.

5.2.3. Données trompettes

Les courbes dites trompettes figurent l'évolution de la température en fonction de la profondeur à un moment donné et permettent de visualiser la profondeur de la couche active. Deux types de courbes seront présentés dans cette partie. Tout d'abord, des courbes trompettes qui permettent de caractériser les comportements en hiver et en été de chacune des sections étudiées. Puis les courbes trompettes des extremums de température rencontrés au cours de la période de suivi.

5.2.3.1. Comportements saisonniers

Dans le but de caractériser les comportements de chaque section au cours de l'hiver et au cours de l'été, les températures de certains mois particuliers sont représentées. Les mois de mars et septembre ont été choisis pour figurer le comportement hivernal et le comportement estival. Ces deux mois correspondent en effet, à des périodes de plus grande stabilité thermique et permettent donc de s'affranchir des grandes variations transitoires. Bien entendu, d'une année à l'autre, les conditions météorologiques variant, les périodes de stabilité thermique ne sont pas présentes aux mêmes dates exactement. De plus, ces mêmes périodes fluctuent aussi en fonction des sections. La section de référence étant par exemple plus réactive aux variations de l'air extérieur que la section à pente douce, elle atteindra sa période de stabilité thermique plus tôt. Cependant, malgré les variations interannuelles et les variations entre sections, les mois de mars et septembre sont les meilleurs compromis pour comparer les différentes sections. Les températures de chaque section sont moyennées sur la totalité du mois.

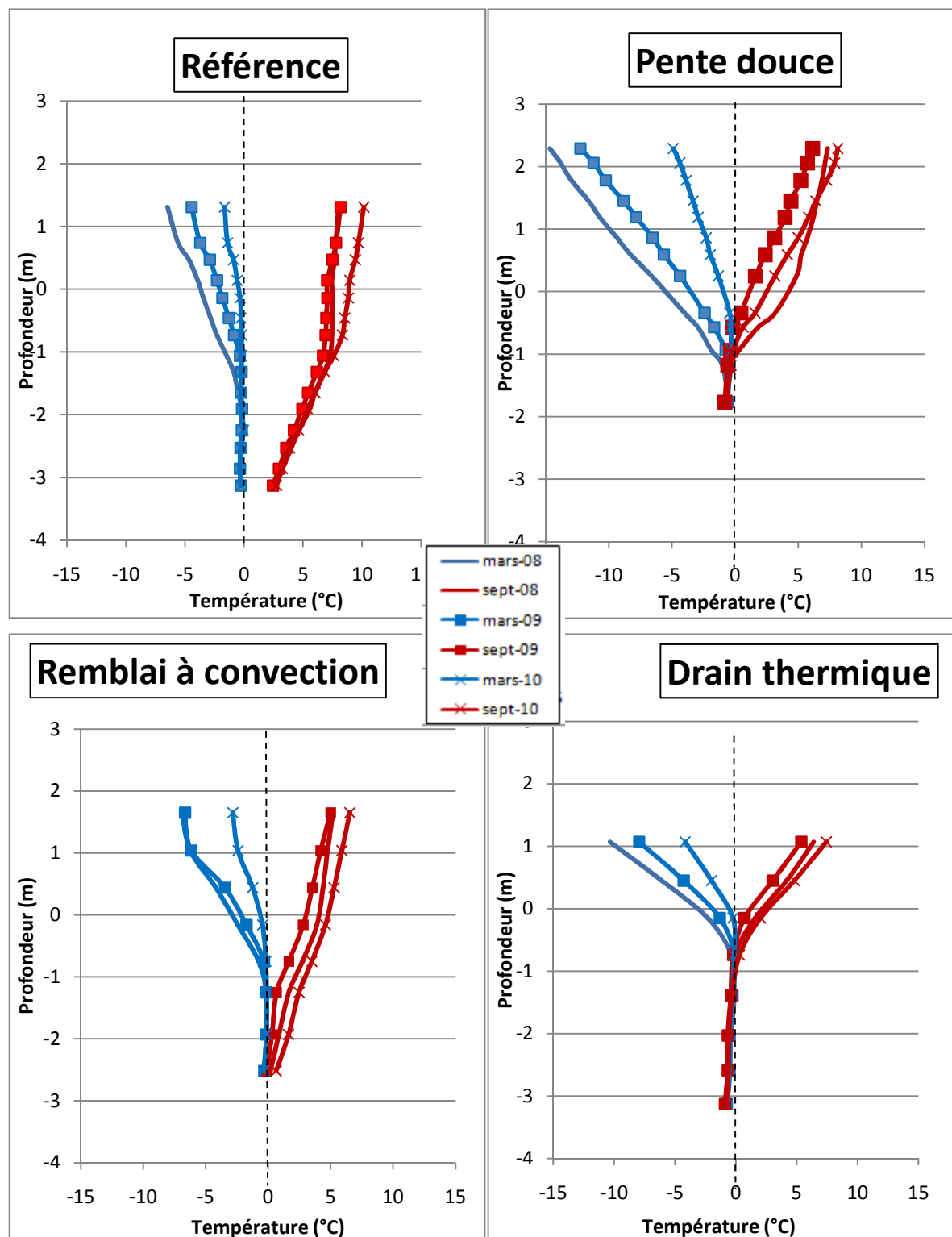


Figure 41. Régimes thermiques moyens des quatre sections pour les mois de mars 2008, septembre 2008, mars 2009, septembre 2009, mars 2010 et septembre 2010

On retrouve sur les graphiques de la figure 41 les comportements de trois hivers et de trois étés. Le comportement du mois de septembre 2007 n'a pas été figuré car il est largement perturbé par les suites de la mise en place des sections. On note tout d'abord que, les hivers ayant été de moins en moins froids et les étés semblables d'une année à l'autre, les courbes trompettes ont tendance à se refermer ; l'amplitude des variations de température diminuant.

La section de référence refroidit jusqu'à 1 m de profondeur dans le sol naturel. Avec les hivers moins rigoureux, ce refroidissement perd de son importance et affecte seulement le remblai sans atteindre le terrain naturel en mars 2010. Le comportement estival est lui stable malgré les variations des conditions extérieures. Le réchauffement est massif et global, la section dégelant sur une profondeur largement supérieure à la profondeur instrumentée. En été, la section semble ne pas avoir changé de régime thermique malgré les variations de conditions climatiques. Elle y est sensible mais le facteur primordial est l'écoulement d'eau qui la réchauffe dès le début de l'été. Les effets de la variation de la température extérieure sont donc masqués par les effets de l'écoulement d'eau en profondeur.

La section à pente douce est très réactive aux variations de la température extérieure. Suite à la perte de rigueur des hivers, la diminution du refroidissement de la section est flagrante. A l'hiver 2008, la section refroidissait une couche de plus d'un mètre d'épaisseur dans le sol naturel. Au cours de l'hiver 2010, moins de 50 cm de ce même sol ont été refroidit. La diminution de l'importance des températures de l'été, a elle-aussi, été suivie par une diminution de la profondeur de dégel. Alors que la section dégelait sur près d'un mètre en septembre 2008, seuls 50 cm sont dégelés en septembre 2009. Cette section est la plus efficace en hiver. Cependant, elle est affectée de manière non négligeable en été.

La section à remblai à convection d'air refroidit le sol naturel de manière effective en hiver. Avec les hivers moins rigoureux, le refroidissement perd de son importance. Alors que près d'un mètre de sol naturel était refroidit au cours des mois de mars 2008 et mars 2009, seulement une trentaine de centimètres est refroidit en mars 2010. Les fluctuations liées aux variations des conditions d'été sont moins conséquentes. Le dégel reste très important au cours des deux étés figurés : jusqu'à 2 m de sol dégelés en septembre 2008 et presque autant pour l'été moins

rigoureux en septembre 2009. Cette section est donc particulièrement fragile en été et dégèle de manière très importante.

La section à drain thermique est plus sensible à la perte de vigueur de l'hiver qu'à la perte d'intensité de l'été. En hiver, la section se refroidit moins ; l'épaisseur de sol naturel refroidi diminuant de 20 cm environ entre mars 2008 et mars 2010. Au cours de l'été, la section protège de manière conséquente le sol naturel d'un réchauffement excessif. En dessous de 0,70 m de profondeur dans le sol naturel, la température ne semble pas être affectée ni par un refroidissement en hiver ni par un réchauffement en été. La présence du drain thermique a pour effet d'empêcher les variations de température à cette profondeur. La section à drain thermique propose la plus grande stabilité thermique dans le sol naturel.

5.2.3.2. Comportements extrêmes

Dans cette section, les courbes trompettes représentant les extremums de températures à chaque profondeur sont présentées (cf. figure 42). Les maximums et minimums de température à chaque profondeur sont déterminés sur la période comprise entre le 1^{er} janvier 2008 et le 10 octobre 2010. Cette période ne prend pas en compte le laps de temps pendant lequel les sections ont été perturbées par la mise en place des sections, et s'étend jusqu'à la fin de la durée du suivi. Représenter les extremums de température sur une telle plage de temps, permet de faire ressortir les perturbations présentes. En effet, une perturbation du sol par un écoulement sera masquée lorsque l'on représente les valeurs moyennes. Ainsi, dans les graphiques précédents, l'écoulement affectant la section de référence n'est pas flagrant. Néanmoins, représenter les extremums de température, ne permet que de voir les perturbations extrêmes. Un écoulement lié au début de la fonte des neiges, sa température étant alors proche de 0°C, sera absent dans ce type de représentation.

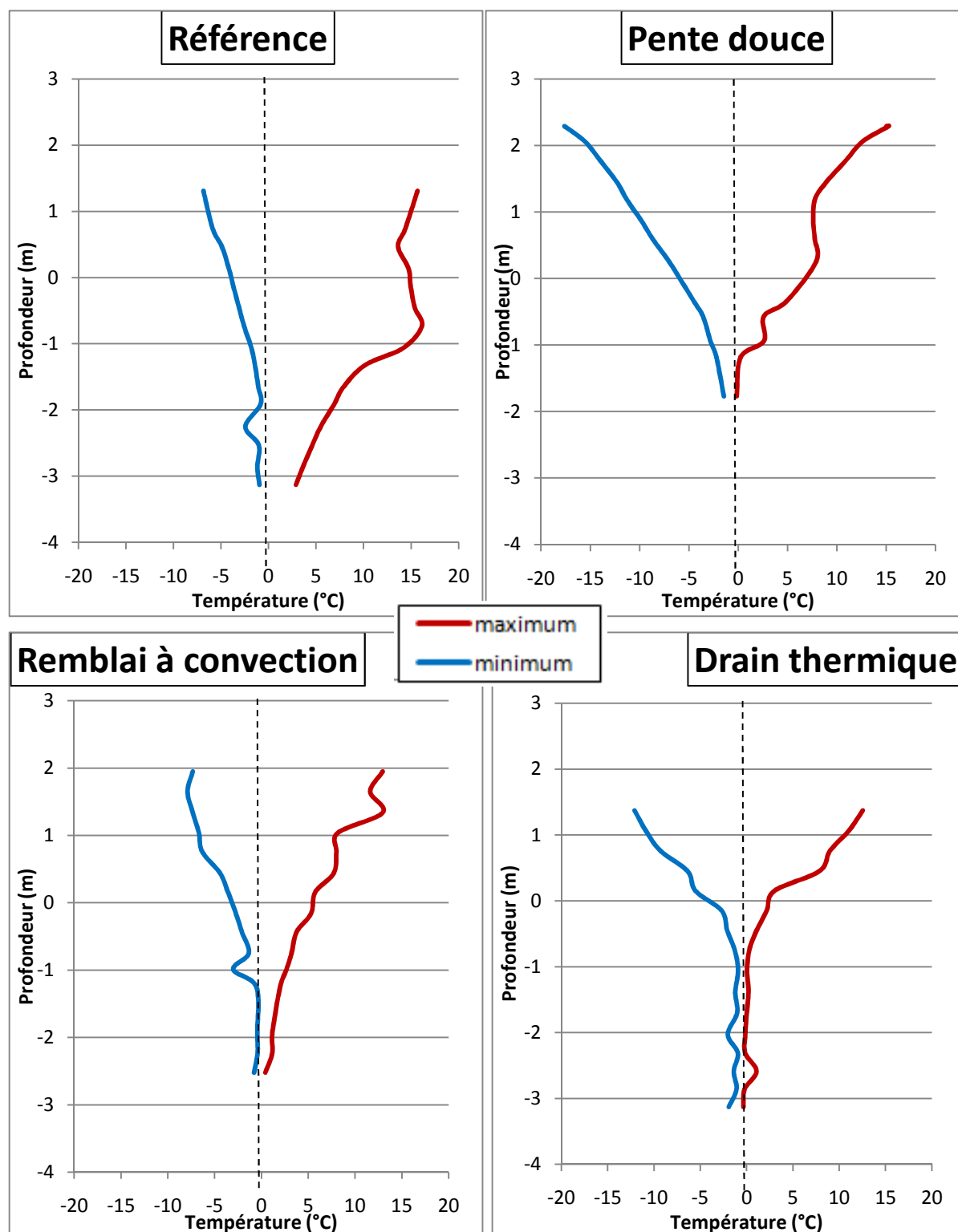


Figure 42. Maximum et minimum de température à chaque profondeur des quatre sections entre le 1er janvier 2008 et le 10 octobre 2010

On note tout d'abord que la perturbation due à l'écoulement de l'eau affectant la section de référence est flagrante sur ce graphique. Proche de 1 m de profondeur dans le sol naturel, la température de cet écoulement atteint 16°C au maximum. La perturbation de la section par cet écoulement est alors très importante. De petites perturbations pour les autres sections sont présentes mais ne sont pas de la même envergure. Par ailleurs, on note que les sections à adoucissement de pente et à drain thermique sont très efficaces pour protéger le sol naturel en dessous d'un mètre de profondeur. La section à remblai à convection d'air et plus particulièrement la section de référence rencontrent des températures jusqu'à des profondeurs très importantes. En hiver, la section à pente douce est celle qui propose les minimums de température les plus faibles au dessus de 1 m de profondeur dans le sol naturel.

5.2.4. Températures issues des systèmes de ventilation et température de l'air extérieur

La section à remblai à convection d'air et la section à drain thermique disposent toutes les deux de systèmes de ventilation. Ces cheminées ont pour objectif de permettre de prolonger les mouvements de convection dans les sections malgré le couvert neigeux. Ce dernier agit comme une véritable couche isolante et empêche la chaleur de s'évacuer des sections en hiver. L'ajout des cheminées doit permettre d'amener de l'air frais et d'extraire l'air chaud des sections. Afin de mesurer l'efficacité de ces systèmes de ventilation, des thermistances sont installées dans chacune des cheminées. Ces thermistances doivent être prises en compte par couple : une thermistance mesurant la température de l'air entrant et la seconde mesurant la température de l'air sortant à cette même position. Malheureusement, la thermistance CX1 n'a jamais fonctionné. De plus, les thermistances CY1, DX1 et DY1 sont reliées au système d'acquisition des données SAD#3 défectueux, donc elles ne fournissent pas de données cohérentes pendant de longues périodes. Ainsi, les seules paires de thermistances exploitables sont les couples CX2 / CY2 et DX2 / DY2. Ainsi on dispose seulement des données d'une unique cheminée pour chaque section. En outre, deux thermistances sont installées pour enregistrer les variations de température de l'air extérieur.

Lorsque l'on s'intéresse aux données d'un ordre général, on remarque que les minimums de température mesurés par les cheminées sont parfois inférieurs aux températures de l'air extérieur. Par exemple, le minimum mesuré pour l'air extérieur est -37,5°C alors qu'il varie entre -38,2°C

et $-39,3^{\circ}\text{C}$ pour les cheminées. La configuration de l'installation des thermistances destinées à suivre la température de l'air extérieur est donc problématique. Ces thermistances sont installées sur les boîtiers dans lesquels on retrouve les systèmes d'acquisition des données. Or ces systèmes ne fonctionnent pas à des températures inférieures à -5°C . C'est pourquoi un chauffage est installé dans chacun des boîtiers. La chaleur dégagée vient alors fausser les données enregistrées par les thermistances qui mesurent la température de l'air extérieur. Les données doivent donc être analysées avec discernement.

Les thermistances nous fournissent des données sur la température de l'air traversant les systèmes de ventilation. Mais cette information est incomplète. Il est nécessaire de connaître les volumes d'air qui traversent les cheminées afin de pouvoir quantifier l'échange énergétique. Sans cela, l'analyse se limite à commenter les différences de températures entre cheminée d'entrée d'air et cheminée de sortie d'air. Le signe de la différence entre entrée et sortie fournit une information non négligeable; il permet de déterminer le sens de circulation de l'air.

5.2.4.1. Température de l'air extérieur

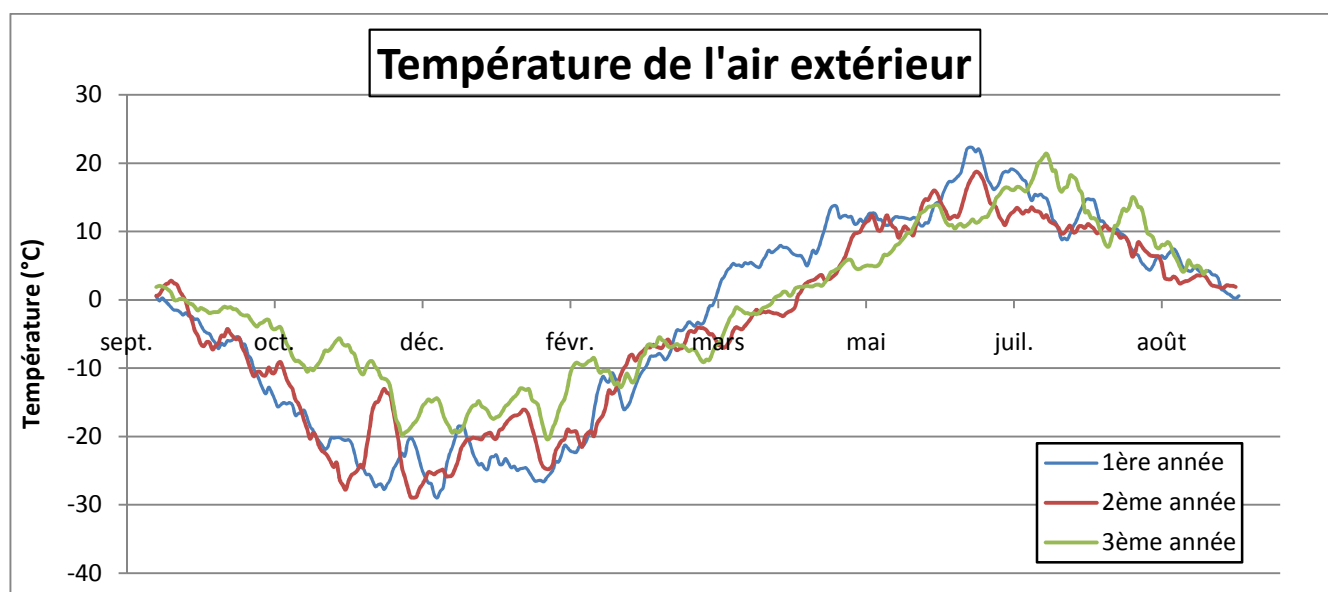


Figure 43. Evolution de la moyenne sur 9 jours des températures à midi de l'air extérieur au cours des 3 années de suivi

Dans le graphique de la figure 43, « 1^{ère} année » désigne la période comprise entre le 15 septembre 2007 et le 14 septembre 2008, « 2^{ème} année » désigne la période comprise entre le 15 septembre 2008 et le 14 septembre 2009 et « 3^{ème} année » désigne la période comprise entre le 15 septembre 2009 et le 14 septembre 2010. Si l'on prend la première année comme référence, on note que la température moyenne de l'air atteint 0°C 4 semaines plus tard à la fin du deuxième hiver et 3 semaines plus tard à la fin du troisième. Pendant les périodes de températures négatives, la moyenne était de -16,15°C pour un cumul de -3003°C la première année, moyenne de -13,95°C pour un cumul de -2887°C la seconde année et enfin une moyenne de -9,38°C pour un cumul de -1866°C la troisième année. Alors que les deux premiers hivers étaient comparables, le troisième fut nettement moins rigoureux. Les deux premières années ont des valeurs de températures normales pour de telles latitudes au Québec. Par contre, la troisième année n'est pas très représentative des conditions météorologiques que l'on est sensé observer.

Lorsque l'on compare les périodes de températures positives, le second et troisième été ont tous les deux commencés avec le retard du aux hivers plus longs. Cependant la date à laquelle les premières températures négatives apparaissent varie peu. La première année, la moyenne était de 9,82°C pour un cumul de 1835°C alors que la seconde année la moyenne était de 8,58°C pour un total de 1355°C. La troisième année n'est pas encore complète mais semble être proche de la seconde année. Le premier été a donc été le plus chaud mais la différence avec les autres étés n'est pas aussi importante que la différence entre les hivers successifs.

5.2.4.2. Différences de température entre cheminée d'entrée et cheminée de sortie

Dans cette partie sont présentés les différentiels de température entre les cheminées d'entrée et les cheminées de sortie pour chaque section. Cet élément d'analyse permet de juger du bon fonctionnement des techniques de ventilation même si l'on ne dispose pas de données sur les débits. En effet, durant l'hiver le captage de la chaleur du sol par les systèmes de convection (matériau convectif du remblai à convection d'air et drain de chaleur de la section à drain thermique) entraîne une circulation d'air dans les systèmes de ventilation. L'air qui pénètre par la bouche d'entrée a approximativement la température de l'air extérieur. L'air se réchauffe durant sa circulation dans les systèmes à convection et est expulsé par la bouche de sortie à une

température normalement supérieure à la température extérieure. Le signe du différentiel de température permet de valider le sens de circulation de l'air dans les systèmes de ventilation. Des valeurs négatives du différentiel indiquent que l'air est plus froid dans la bouche d'entrée que dans la bouche de sortie. Ce qui valide alors une circulation de l'air telle que souhaitée.

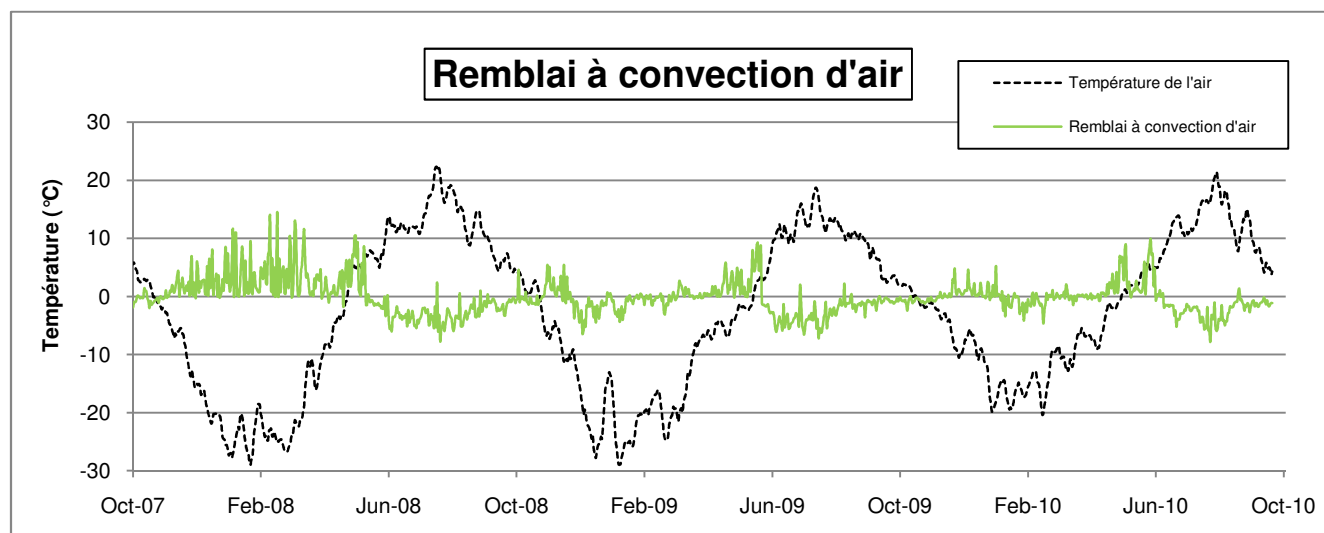


Figure 44. Evolution du différentiel de température entre la cheminée d'entrée (CY2) et la cheminée de sortie (CX2) de la section à remblai à convection d'air pendant toute la période de suivi, et moyenne sur 9 jours de la température de l'air extérieur

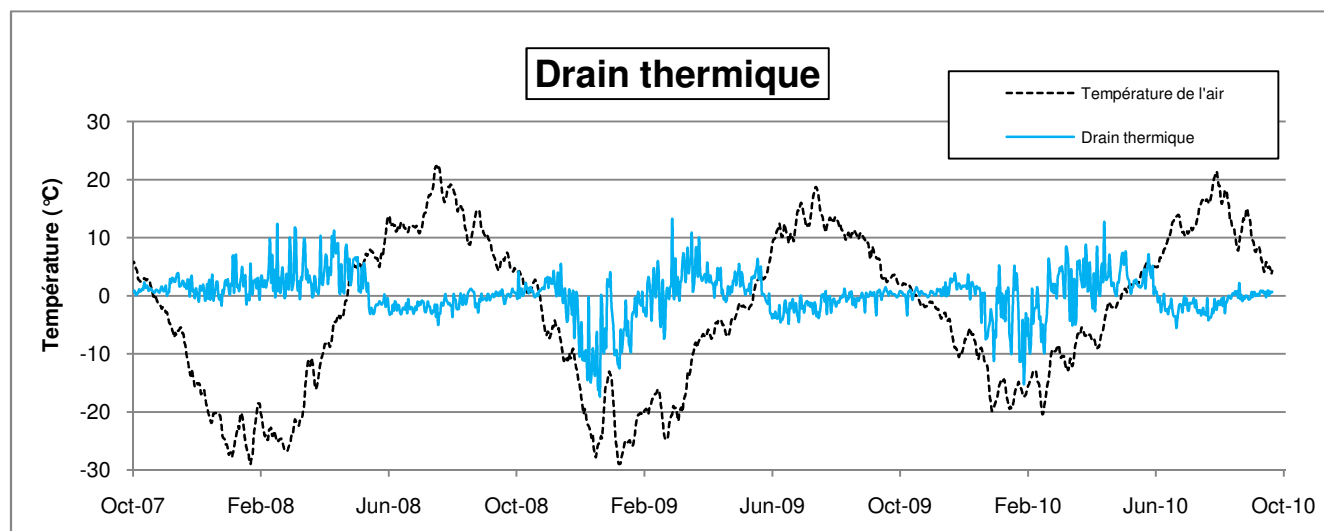


Figure 45. Evolution du différentiel de température entre la cheminée d'entrée (CY2) et la cheminée de sortie (CX2) de la section à remblai à convection d'air pendant toute la période de suivi, et moyenne sur 9 jours de la température de l'air extérieur.

Dans l'analyse des graphiques présentés aux figures 44 et 45, il faut prendre soin de distinguer deux phases dans les mécanismes de convection. Lors de l'été, le froid est contenu dans le sol et le chaud arrive par l'intermédiaire de l'air extérieur. Ainsi, le mouvement de convection, qui est normalement provoqué par la présence de couches plus lourdes (froides) au dessus de couches plus légères (chaudes), n'est pas particulièrement important. On peut donc supposer que les débits seront plus faibles à cette période donc que cette dernière sera moins fondamentale dans notre étude. Lors de l'hiver, le sol joue alors le rôle de masse chaude et l'air extérieur joue le rôle de masse froide. Les mécanismes de convection sont donc importants et l'on peut supposer des débits plus conséquents qu'en été. Ainsi la phase d'hiver et les mouvements de convection associés sont plus importants dans notre cas.

Lors du premier hiver, les différentiels de température des deux sections concernées sont tous les deux positifs. Cela correspond donc à un réchauffement de l'air de la sortie vers l'entrée. Cependant, comme il s'agit de la période qui suit juste après la mise en place des sections, on peut supposer les débits faibles et cette phase correspondant simplement à la stabilisation des masses d'air dans les remblais. Dès le début de l'été suivant, les différentiels vont devenir

principalement négatifs. Pour la section à remblai à convection d'air, le différentiel est généralement négatif à part pour quelques semaines au moment des phases de transition entre hiver et été. Ce signe négatif est particulièrement intéressant pendant les phases d'hiver. Cela confirme que la circulation de l'air s'effectue dans le sens souhaité pendant les phases où la convection prend toute son importance. Pour la section à drain thermique, le différentiel est fortement négatif pendant la première moitié de l'hiver puis ce signe s'inverse, devenant positif. Ainsi le système de ventilation semble fonctionner comme souhaité uniquement pendant la première moitié de l'hiver.

5.2.4.3. Analyse des températures des entrées et sorties d'air

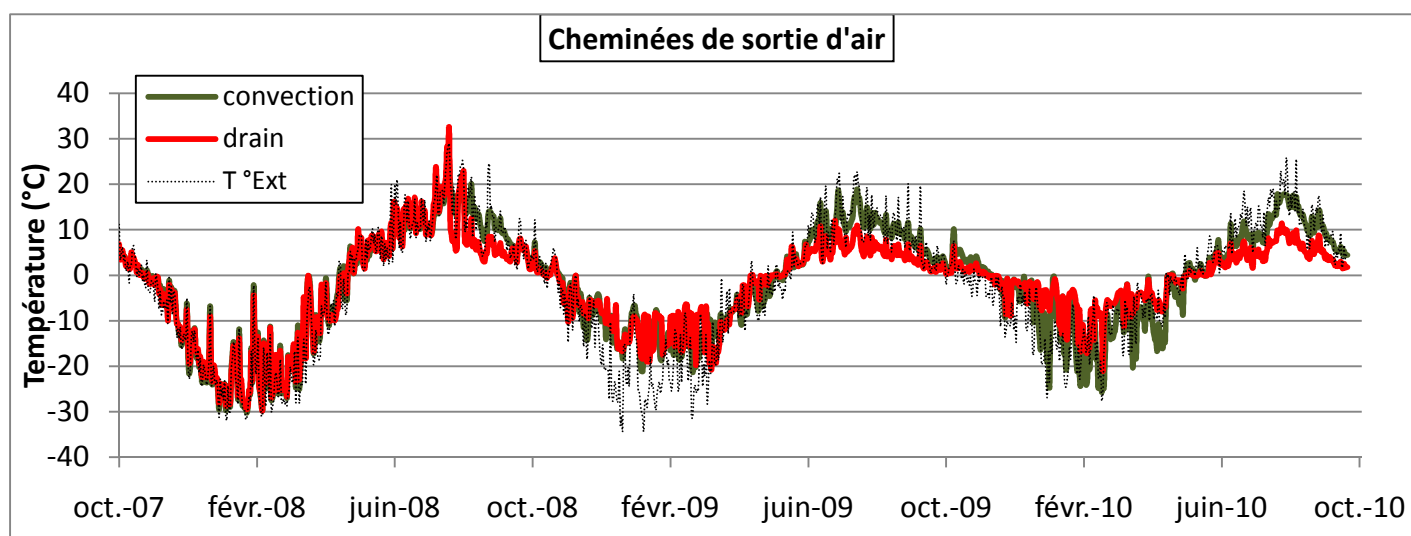


Figure 46. Evolution des températures des cheminées de sortie d'air des sections à remblai à convection d'air et à drain thermique, ainsi que la température extérieure au cours de la période de suivi

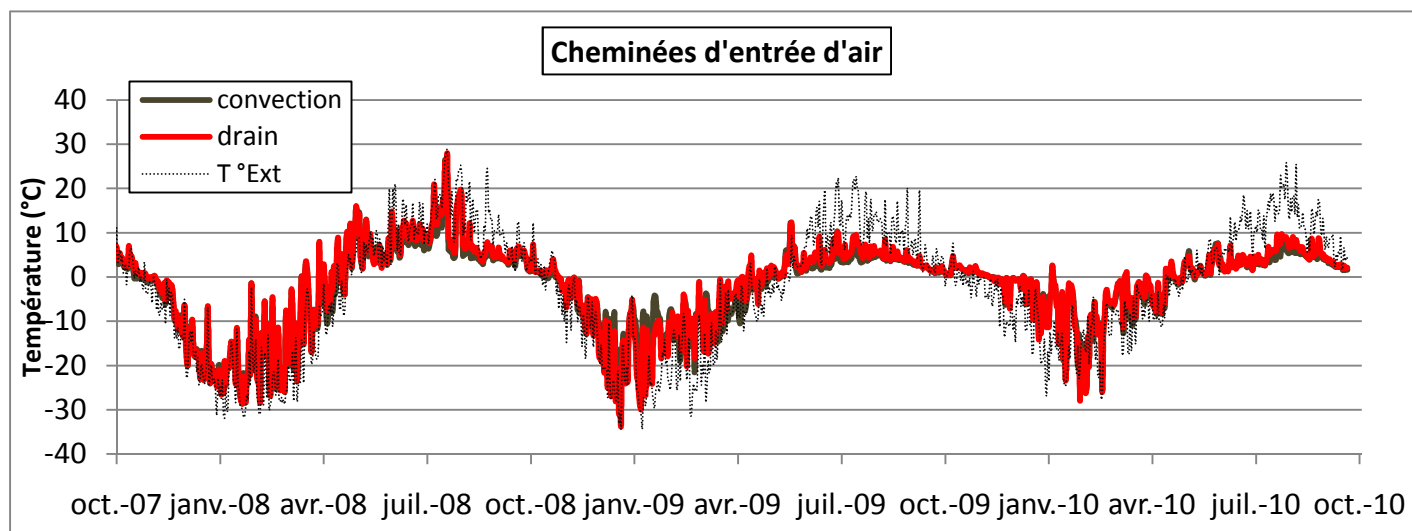


Figure 47. Evolution des températures des cheminées d'entrée d'air des sections à remblai à convection d'air et à drain thermique, ainsi que la température extérieure au cours de la période de suivi

Les graphiques des figures 46 et 47 de cette partie présentent l'évolution des températures des cheminées ainsi que la température de l'air extérieur. On note, en premier lieu, que les températures des différentes cheminées suivent de près les variations de l'air extérieur. Les thermistances étant situées proches de la sortie des cheminées, il est normal de retrouver des températures similaires. On remarque de plus que pour les cheminées d'entrée d'air, l'amplitude thermique est diminuée par rapport à l'air extérieur. Ces cheminées sont reliées à l'air qui se trouve au fond du remblai et qui est donc moins sensible aux fluctuations extérieures. Pour les cheminées de sortie d'air, les températures mesurées sont plus élevées que celle de l'air extérieur au cours de l'hiver. Cela correspond à l'évacuation de la chaleur contenue dans le sol au cours de l'hiver.

Ainsi, l'air est plus froid dans les cheminées d'entrée au cours de l'été, et l'air est plus chaud dans les cheminées de sortie au cours de l'hiver. Ce comportement est plus ou moins marqué selon les conditions météorologiques de chaque année mais correspond à ce qui est souhaité. L'air froid pénètre au cours de l'hiver, se réchauffe puis est expulsé par la cheminée de sortie. Au cours de l'été suivant, l'air froid reste piégé dans le remblai et empêche la pénétration de l'air chaud.

5.3. Efficacité des sections

5.3.1. Efficacité évaluée selon la température à l'interface remblai / sol naturel

Afin de comparer les sections entre elles, les moyennes annuelles et les moyennes saisonnières de température ont été calculées pour chaque section à l'interface remblai / sol naturel. Cela fournit un élément de comparaison simple et facile à suivre. Les données des années 2007 et 2010 ne sont pas complètes à cause de la durée de la période de suivi.

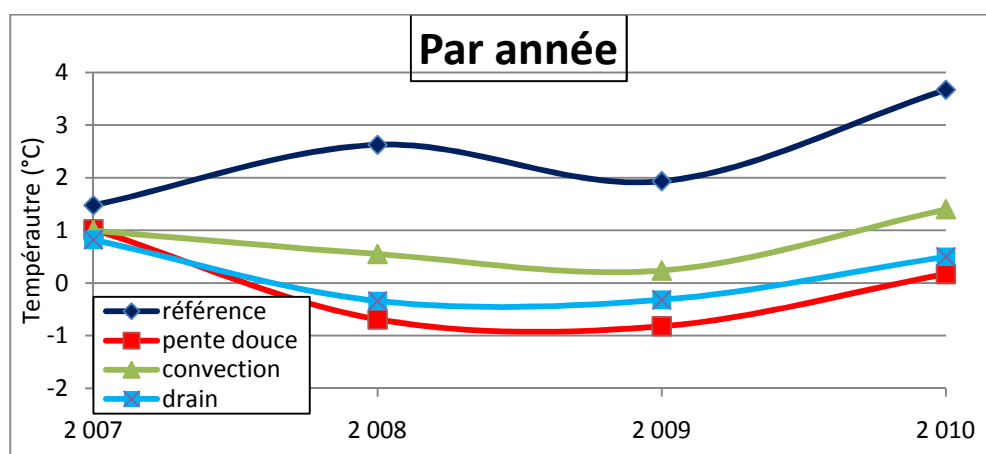


Figure 48. Evolution de la moyenne annuelle de la température à l'interface remblai / sol naturel pour les quatre sections.

Lors de la mise en place des sections (année 2007), les sections avaient des températures similaires à cette profondeur (cf. figure 48). Seule la section de référence était plus chaude que les autres : 1,5°C contre environ 1°C pour les trois autres sections. Au cours de l'année 2008, les différences entre les sections se sont fortement accentuées. La température moyenne de la section de référence est alors de 2,62°C, celle de la section à remblai à convection d'air est de 0,55°C, celle de la section à drain thermique est de -0,27°C et enfin la température moyenne est de -0,69°C pour la section à pente douce. Les moyennes évoluent ensuite au cours des années 2009 et 2010 mais la différence de température avec la section de référence reste pratiquement constante. La section de référence est plus chaude d'environ 3°C par rapport à la section à pente douce, 2,6°C plus chaude que la section à drain thermique et 1,9°C plus chaude que la section à remblai à convection d'air.

Les moyennes annuelles de température ont ensuite été affinées. Les moyennes ont été séparées en deux saisons : été et hiver (cf. figure 49). Séparation arbitraire en deux périodes continues, de durées presque identiques, pendant lesquelles les températures étaient principalement négatives pour la période d'hiver et respectivement positives pour l'été. Cela permet de dégager des tendances de comportement en fonction des saisons.

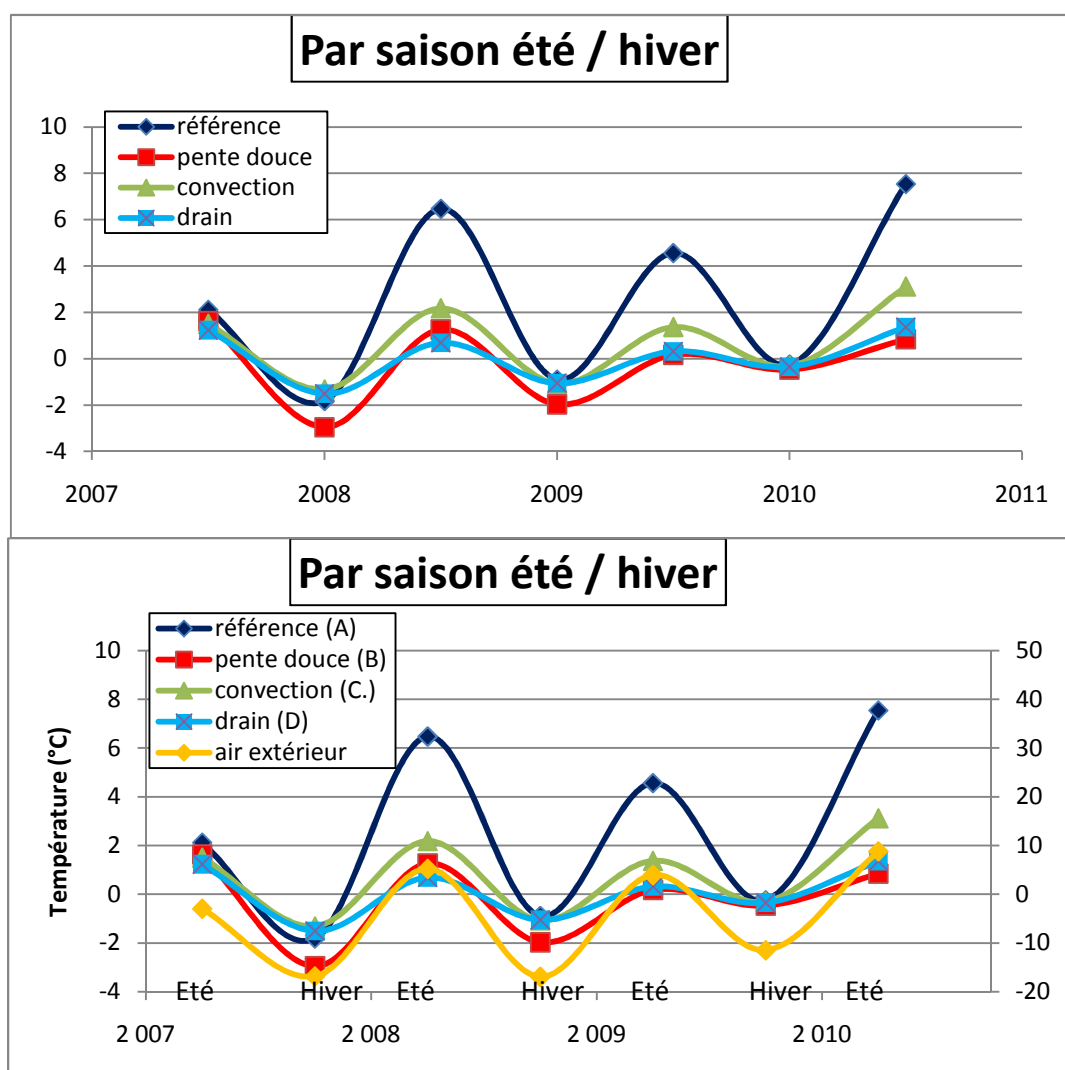


Figure 49. Evolution de la moyenne hivernale et estivale de la température à l'interface remblai / sol naturel pour les quatre sections

Les valeurs qui ont comme abscisse un nombre entier correspondent aux périodes d'hiver. Ainsi, les différences de comportement entre les quatre sections sont faibles l'hiver. Seule la section à

adoucissement de pente se distingue des trois autres sections au cours des deux premiers hivers ; elle est alors plus froide ($-1,95^{\circ}\text{C}$ contre environ -1°C pour les autres sections à l'hiver 2009). Au cours de l'hiver 2010, toutes les sections ont une température moyenne comprise entre $-0,3^{\circ}\text{C}$ et $-0,5^{\circ}\text{C}$. La différence d'efficacité entre les sections s'opère donc au cours des périodes d'été. Et en effet, les différences sont notables. La section de référence est celle qui se réchauffe le plus massivement, suivie de la section à remblai à convection d'air. La section à pente douce qui se réchauffait plus que la section à drain au cours du premier été, connaît des températures plus faibles que cette dernière dès le deuxième été. A l'été 2009, la température moyenne de la section (A) est $4,56^{\circ}\text{C}$, celle de la section (C) est $1,29^{\circ}\text{C}$, celle de la section (D) est $0,48^{\circ}\text{C}$ et celle de la section (B) est $0,17^{\circ}\text{C}$.

La section de référence pose toujours problème. En effet, elle est massivement perturbée par un écoulement d'eau qui la réchauffe dans son intégralité. Son régime thermique étant altéré, elle ne remplit donc plus son rôle de référence. Les comparaisons de température avec cette section réchauffée ne peuvent alors que surestimer l'efficacité des sections d'essai. Il est donc nécessaire d'analyser cette perturbation plus en détail afin de caractériser l'effet qu'elle a sur le comportement de la section de référence.

5.3.2. Efficacité évaluée selon l'indice d'extraction de chaleur

Afin de caractériser l'efficacité de chacune des sections autrement que par une seule valeur de température à une profondeur donnée, un autre critère est utilisé. Sous l'hypothèse que seule la conduction régit les transferts de chaleur dans le sol naturel, un flux de chaleur simplifié permet de caractériser les échanges thermiques. Mais la connaissance du flux nécessite de connaître la conductivité thermique des sols, or elle est inconnue. Les sections étant juxtaposées, on peut supposer que les valeurs de conductivité thermique pour le sol placé sous chacune des sections, doivent avoir des valeurs proches. La conductivité thermique sera alors fixée à $1,99 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ en condition dégelée et $2,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ en condition gelée pour le sol de Tasiujaq, considérant qu'il s'agit d'un sable graveleux (valeurs issues de Goering et coll., 1995). Sous l'hypothèse d'une conductivité uniforme dans la partie supérieure du sol sous les sections, le flux de chaleur s'exprime alors comme suit :

$$q = k_{sol} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = k_{sol} \cdot \frac{T_z - T_{z=0}}{\Delta_z}$$

Avec :

q : Flux de chaleur, [W.m⁻²]

k_{sol} : Conductivité du sol, [W.m⁻¹.K⁻¹]

T : Température à la profondeur définie par l'indice, [K]

z : Profondeur, [m]

Afin de calculer ce flux, une régression polynomiale a été effectuée sur les moyennes bimensuelles des régimes thermiques de chaque section. L'intervalle de temps de quinze jours permet de lisser en partie les régimes thermiques et ainsi d'avoir un meilleur coefficient de détermination pour les régressions. En utilisant des polynômes de degré 6, le coefficient de détermination R^2 était toujours supérieur à 0,96 ; il était d'ailleurs supérieur à 0,99 dans 99% des cas. Les valeurs des gradients de température ont alors été calculées sur la plage de profondeur comprise entre 0 et 0,5 mètre dans le sol naturel. Cette plage d'étude permettant ainsi de caractériser le flux juste sous l'interface avec le remblai (cf. figure 50). Les valeurs positives et négatives ont alors été distinguées afin de caractériser respectivement les périodes pendant lesquelles le sol absorbe de la chaleur et les périodes pendant lesquelles il évacue de la chaleur.

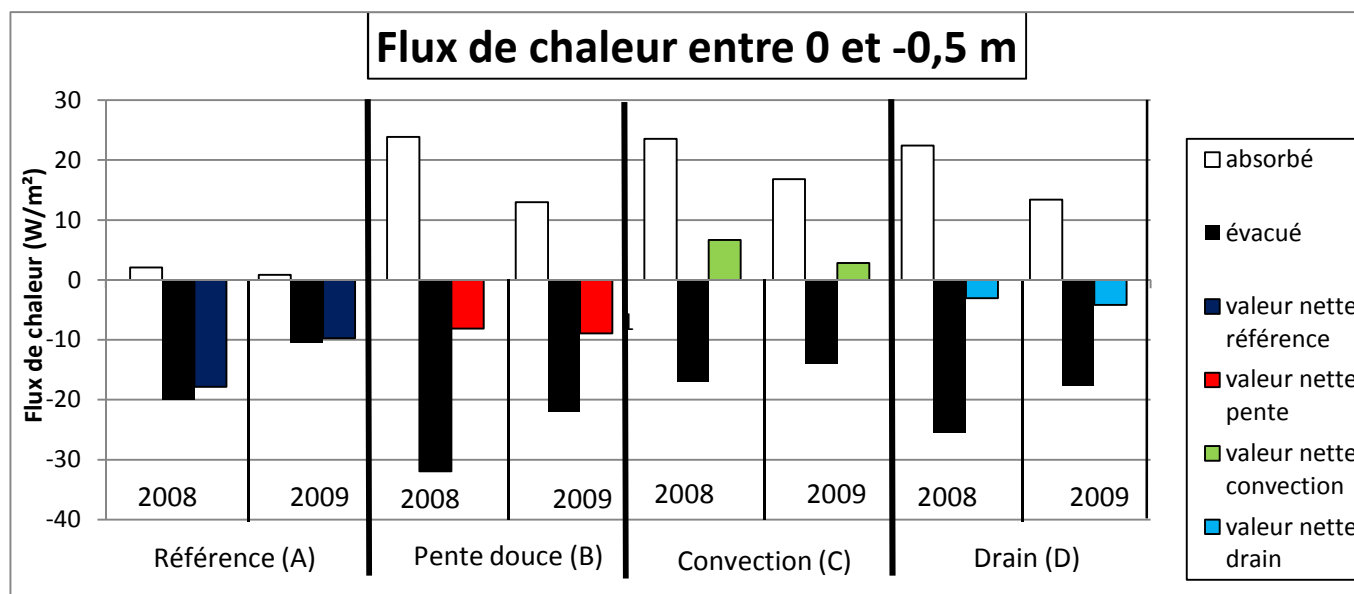


Figure 50. Flux de chaleur par année et par section entre les profondeurs 0 mètre et -0,5 mètre

Hormis la section de référence, les différentes sections absorbent des quantités comparatives de chaleur. Le flux de chaleur absorbé décroît nettement entre les années 2008 et 2009. Ceci doit être relié au fait que l'été 2009 a été moins intense que celui de 2008. Cette diminution étant plus grande pour les sections (B) et (D) que pour la section (C). Tel qu'il est calculé ici, le flux de chaleur absorbé par la section de référence dans la partie supérieure du sol naturel semble être presque nul. Cependant cette valeur est faussée par la méthode de calcul en elle-même ; les raisons seront données plus loin.

Les trois techniques ont des valeurs nettes qui diffèrent malgré des flux absorbés très proches. La différence de comportement s'opère donc principalement au cours de l'évacuation de la chaleur. On retrouve, là encore, une diminution du flux évacué par les sections entre 2008 et 2009. Cette diminution affectant plus les sections à pente douce et à drain thermique que la section à remblai à convection d'air. Cependant, la diminution du flux évacué est plus faible que la diminution du flux absorbé pour les techniques testées. Ainsi entre 2008 et 2009, les valeurs nettes des trois sections diminuent. Un hiver moins froid et un été moins chaud ont donc eu comme conséquence, une meilleure performance nette pour les 3 sections. A cette profondeur, la section à pente douce évacue plus efficacement la chaleur (-8,9 W/m² en 2009), suivie de la section à drain thermique (-

4,2 W/m² en 2009), puis de la section à remblai à convection (2,8 W/m² en 2009) qui absorbe de la chaleur. La section (C) est donc la seule qui réchauffe le sol naturel dans sa partie supérieure.

La méthode de calcul présentée ici, laisse donc penser que la section de référence est la plus apte à évacuer la chaleur du sol naturel. On note clairement que la chaleur absorbée par la section semble être nulle alors que ce n'est pas du tout le cas. La présence d'un écoulement dans la section de référence est la raison pour laquelle la méthode de calcul du flux de chaleur est faussée. En effet, cet écoulement est localisé à environ 1 mètre de profondeur dans le sol naturel mais il affecte tout le régime thermique.

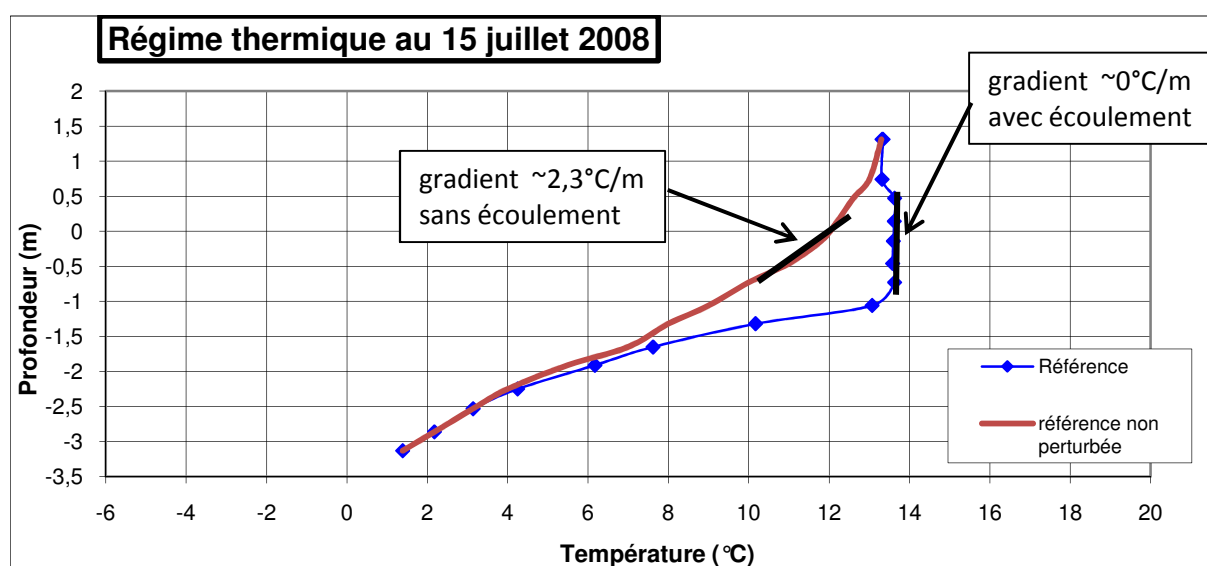


Figure 51. Effet de l'écoulement d'eau sur le calcul des gradients thermiques entre 0 et 0,5 mètre de profondeur dans le sol naturel

Ainsi, comme le montre la figure 51, l'écoulement perturbe beaucoup le flux thermique tel qu'il est calculé ici. Dès que l'écoulement est présent, c'est-à-dire tout au long de l'été, soit encore pendant toute la période où les sections absorbent de l'énergie, le gradient de la section de référence est nettement diminué. C'est pourquoi, le flux de chaleur absorbé par cette section semble être très faible. Ce qui lui donne la meilleure efficacité parmi les sections.

La méthode de calcul n'est donc pas adaptée à la présence d'un écoulement. Pour passer outre, les flux thermiques ont été calculés sur une autre plage de profondeur : entre 0 et 2 m (cf. figure

52). Cette nouvelle zone de calcul est plus large donc aura une précision moindre mais permettra de comparer des données moins faussées.

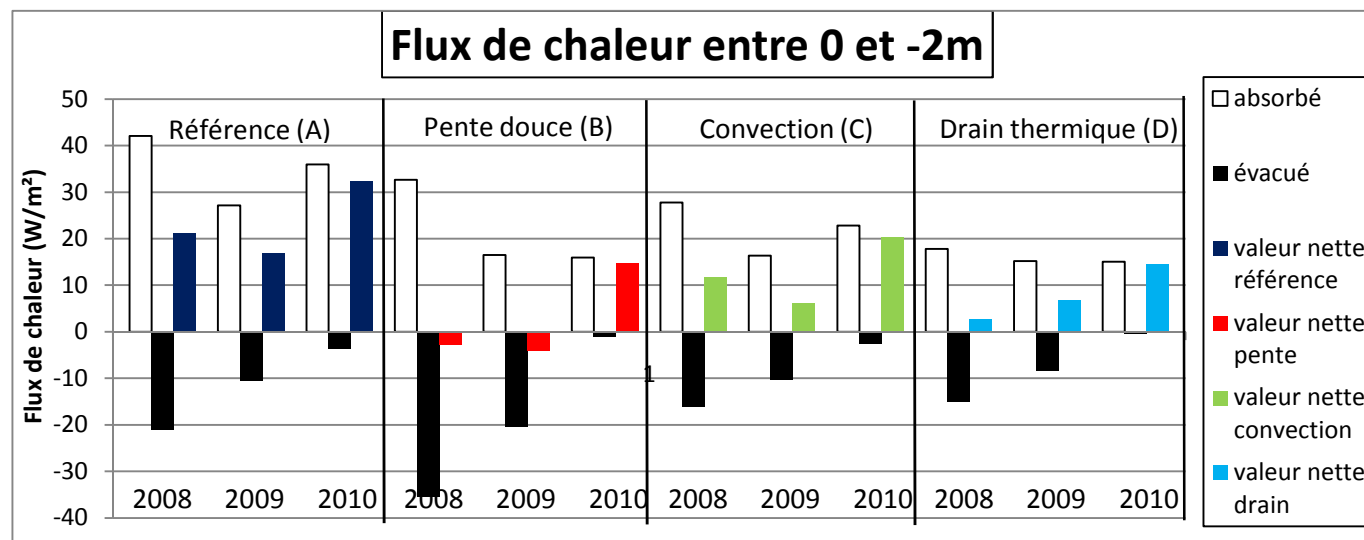


Figure 52. Flux de chaleur par année et par section entre les profondeurs 0 et -2 mètres

Avec ce nouveau critère de comparaison, la section de référence retrouve une efficacité plus faible que les autres sections. Contrairement à la section à drain thermique, les autres sections connaissent toutes une amélioration de leurs efficacités entre 2008 et 2009 sur cette profondeur de calcul. La section à pente douce étant la seule qui a une valeur nette négative, ce qui traduit une évacuation de chaleur sur l'année.

Lorsque l'on regarde la chaleur évacuée chaque année, on remarque que les sections (C) et (D) évacuent moins que la section de référence. Mais cela est compensé par le fait qu'elles absorbent nettement moins de chaleur. Le bilan annuel de chaque section étant inférieur à celui de la section de référence. Les valeurs nettes du flux de chaleur en 2009 sont respectivement : +16,8 W /m² pour la référence, -4 W /m² pour la pente et +6 W /m² pour la section à remblai à convection et +6,8 W/m² pour la section à drain thermique.

L'année 2010 a aussi été figurée ici. L'été 2010 étant incomplet, il faut donc s'attendre à ce que le flux absorbé en 2010 soit encore plus élevé. Cependant, ce n'est pas tant l'été 2010 qui a été plus chaud que les étés 2008 et 2009, mais c'est l'hiver qui a été beaucoup moins froid que les

précédents. La réduction de la chaleur évacuée est flagrante pour toutes les sections en 2010 ; la valeur étant très proche de la valeur nulle. Le comportement des sections au cours de l'été qui suit un hiver chaud est intéressant. En effet, les modèles de réchauffement climatiques prévoient des hivers plus chauds et des étés moins affectés. On note que les sections à pente douce et à drain thermique sont celles qui subissent moins les conséquences de l'hiver plus chaud, en limitant le réchauffement au cours de l'été qui suit.

Il est aussi intéressant de regarder l'évolution du flux de chaleur en fonction du temps. Les tendances générales des comportements des différentes sections étant proches, seule la section à pente douce sera présentée ici. Sur la figure 53, la courbe bleue représente l'évolution du flux et se réfère à l'axe des ordonnées de gauche, la courbe jaune figure l'évolution de la température extérieure et se réfère à l'axe des ordonnées de droite.

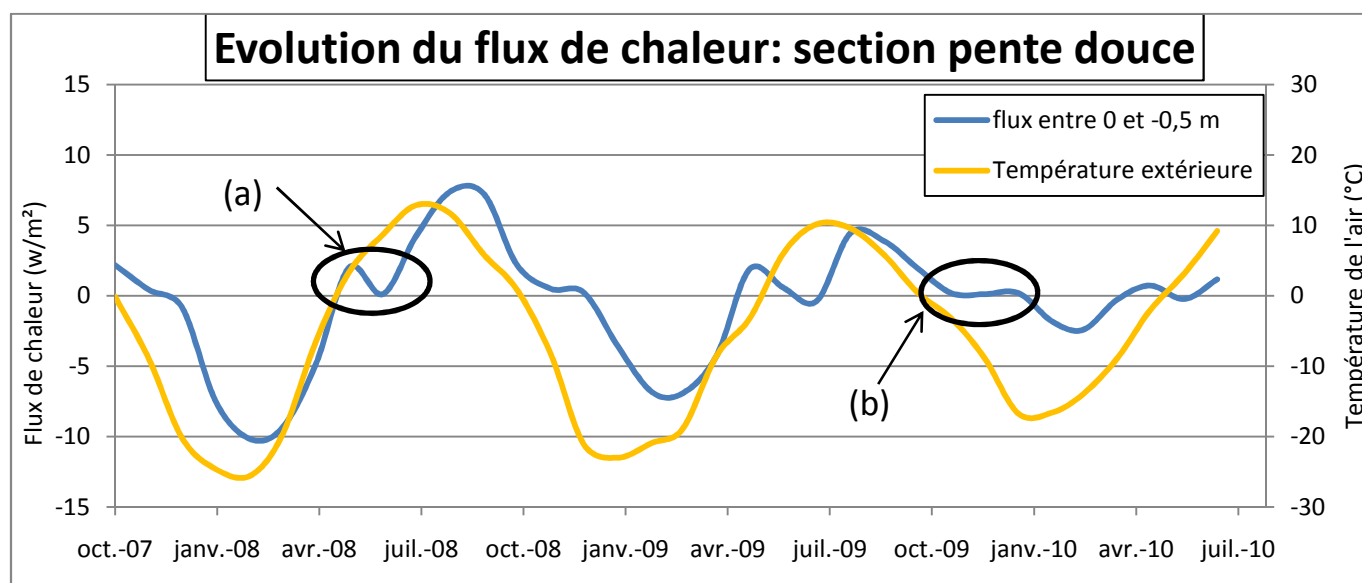


Figure 53. Evolution de la valeur mensuelle du flux de chaleur entre 0 et -0,5 mètre de la section à pente douce et évolution de la moyenne mensuelle température extérieure

Deux éléments intéressants doivent être décrits sur ce graphique. Tout d'abord, au début de chaque période d'été, le flux connaît lui aussi des valeurs positives ; c'est-à-dire que le sol se réchauffe sous l'action de la température extérieure. Puis, alors que la température extérieure continue d'augmenter, le flux diminue vers des valeurs proches de zéro (repère (a) sur la figure

53). Quelques temps après, le flux augmente de nouveau, le sol continuant ainsi de se réchauffer. Ce décrochement dans l'évolution du flux est dû à la présence d'un écoulement dans la section. Ce dernier, qui correspond au début de la fonte de la neige, fait suite aux premières températures positives de l'air extérieur. Ainsi, cet écoulement diminue le flux au niveau de la profondeur zéro, comme cela a été montré pour la section de référence à la figure 51. Cet écoulement affecte toutes les sections, mais seule la section de référence est affectée par un écoulement bien plus important.

Le deuxième élément est signalé par le repère (b) sur la figure 53. Il se produit au début de l'hiver lorsque les températures redeviennent négatives. Le flux entre les profondeurs 0 et -0,5 mètre connaît alors un palier à la valeur 0. Ce palier correspond en fait à l'effet de chaleur latente lorsque le sol regèle. Il est alors nécessaire de mobiliser une certaine quantité d'énergie afin de faire regeler le sol. La chaleur ne circule donc plus mais est utilisée pour faire geler le sol. Ce palier s'étend jusqu'à ce qu'il y ait assez d'énergie mobilisée.

Chapitre 6.0

Simulations numériques

Comme vu dans l'analyse thermique, la section de référence est perturbée par un écoulement d'eau qui la réchauffe massivement sur la totalité de la profondeur instrumentée. Comparer les trois sections expérimentales avec cette référence perturbée fausse donc les résultats. C'est pourquoi il est nécessaire de s'intéresser plus particulièrement à cet écoulement. L'objectif de cette simulation numérique est de modéliser ce que pourrait être le régime thermique de la section de référence si l'écoulement n'était pas présent. Dans ce cas, on disposerait alors d'une véritable section de référence et les efficacités des autres sections ne seraient plus surestimées.

6.1. Logiciel utilisé

La réalisation des simulations numériques s'effectue à l'aide du volet TEMP/W du logiciel Géostudio. Ce volet du logiciel permet de simuler les changements thermiques dans le sol dus à des changements d'environnement, à des constructions tels des bâtiments ou des pipelines. TEMP/W rend possible la modélisation de transferts thermiques dans tout matériau poreux ou solide. La puissance de ce logiciel permet d'étudier les transferts de chaleur dans un milieu poreux qui contient à la fois du sol, de l'eau, de la glace et de l'eau. Une hypothèse de l'analyse dans TEMP/W est que la teneur en eau ne varie pas au cours de l'étude. Les cas courants d'application de ce logiciel sont le design de routes et d'aéroports dans des conditions hivernales ou bien encore l'utilisation d'isolation pour contrôler la profondeur de pénétration du gel.

Comme expliqué dans le manuel accompagnant le logiciel (Krahn, 2004), modéliser les flux de chaleur dans le sol par une solution numérique peut être très complexe. En effet, les couches de sol sont souvent hétérogènes et anisotropes. De plus, les conditions limites varient et ne peuvent pas forcément être connues. A cause de cela, modéliser le problème revient souvent à un processus itératif d'affinage du problème.

Afin de modéliser les transferts de chaleur, qui se font principalement par conduction dans les sols, le logiciel utilise une méthode d'analyse par éléments finis en deux dimensions. L'équation différentielle suivante est utilisée :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Où :

T = Température, [K]

k_x = Conductivité thermique dans la direction des x, [W.m⁻¹.K⁻¹]

k_y = Conductivité thermique dans la direction des y, [W.m⁻¹.K⁻¹]

Q = Flux thermique appliqué aux frontières, [W.m⁻³]

λ = Capacité à absorber la chaleur, [J.K⁻¹.m⁻³]

t = Temps, [s]

L'équation précédente montre que la différence entre le flux de chaleur entrant et sortant pour le volume d'un élément à un point précis dans le temps, est équivalente à la variation de la quantité de chaleur accumulée. En régime permanent, le flux entrant étant égal au flux sortant en tout temps, le membre de droite de cette équation est nulle.

La capacité d'un corps à absorber la chaleur est définie par deux termes. Le premier correspond à la capacité de chaleur volumique (gelée ou non) alors que le deuxième correspond à la chaleur latente du matériau lié au changement de phase. L'équation suivante définit la capacité à absorber la chaleur λ :

$$\lambda = c_v + L\theta \frac{\partial \theta_u}{\partial T}$$

Où :

c_v = Capacité de chaleur volumique, [J.K⁻¹.m⁻³]

L = Chaleur latente de l'eau, [J.m⁻³]

θ = Teneur en eau volumique

θ_u = Teneur en eau volumique non gelée

Le terme c_v caractérise la variation d'énergie dans le sol et le terme $L\theta \frac{\partial \theta_u}{\partial T}$ décrit la variation de chaleur latente.

La substitution de λ dans la première équation permet d'obtenir l'équation différentielle complète. Cette formule est alors appliquée à tous les nœuds du domaine d'étude pour déterminer les données souhaitées :

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

6.2. Le modèle

6.2.1. Principe du modèle

L'objectif de cette modélisation est de caractériser ce que serait le régime thermique de la section de référence sans l'écoulement qui la réchauffe. Cet écoulement n'est pas continu ; il apparaît dès la fin de l'hiver et disparaît avant la fin de l'été. Sa température elle-aussi varie au cours de l'été. De plus, comme il est beaucoup plus chaud que le sol environnant, il a un effet important sur la totalité du sol. La chaleur apportée par cet écoulement se transmet par conduction aux couches de sol avoisinantes. Ainsi, en peu de temps, la totalité de la section se trouve affectée, avec plus ou moins d'intensité.

Cet écoulement a été présent à chaque été de la période de suivi. Il est donc impossible de savoir depuis combien de temps cet écoulement perturbe la section ; est-ce seulement apparu depuis la mise en place des sections ou est-ce un écoulement beaucoup plus ancien ? Dans tous les cas, on ne dispose pas de données non perturbées. L'idée est donc d'utiliser une autre section non perturbée pour modéliser le comportement de la section de référence. La section à adoucissement de pente est constituée des mêmes matériaux que la section de référence. Les deux sections étant adjacentes, on peut supposer que les différentes couches de sol se trouvent aux mêmes profondeurs. La seule différence entre ces deux sections réside dans la différence de géométries des remblais. L'objectif est donc de modéliser la section à adoucissement de pente à l'aide du volet TEMP/W. Les paramètres manquants sont les caractéristiques du sol. Il faut donc réaliser des itérations faisant varier les caractéristiques des différentes couches de sol. Lorsque la

modélisation numérique coïncidera avec les données expérimentales, cela signifiera que les caractéristiques du sol utilisées dans le logiciel sont proches de la réalité. En modifiant alors la géométrie du modèle, c'est-à-dire en modélisant alors la géométrie de la section de référence tout en conservant les paramètres du sol, on disposera alors d'une représentation numérique de la section de référence. Cette section modélisée n'étant pas affectée par un quelconque écoulement en profondeur.

6.2.2. Paramètres du modèle

6.2.2.1. Géométrie du modèle

La géométrie des deux sections est très simple. On ne s'intéresse qu'aux côtés de la piste d'atterrissage. Il s'agit d'une pente 1 vertical / 3 horizontal pour la section de référence et d'une pente 1 vertical / 8 horizontal pour la section à pente douce. La hauteur du remblai est environ de 2,4 mètres pour les 2 sections. Le contact avec le sol naturel est à une profondeur zéro. On ne distingue donc que deux types de sol différents. La première couche correspond au remblai qui se trouve au dessus de la profondeur 0, la deuxième couche est le sol naturel qui se trouve en dessous de la profondeur 0.

La présence du couvert neigeux n'est pas prise en compte dans cette étude. Etant approximativement nulle pour la section à pente douce, elle pourrait être modélisée dans le cas de la section de référence. Mais on dispose des températures de surface pour les deux sections. Ces températures serviront comme conditions limites en dessous du couvert neigeux. On suppose en effet que les températures de surface de la section de référence sont peu ou pas affectées par l'écoulement donc qu'elles pourront être exploitées. Cela est justifié par la distance qui sépare la surface de l'écoulement et car, de part sa position plus élevée, la surface n'est pas sujette à un écoulement par gravité. Enfin, les conditions météorologiques extérieures influent à priori de manière beaucoup plus importante par convection que ne peut le faire cet écoulement lointain par conduction.

Les températures qui serviront de conditions limites pour ce modèle sont réparties le long d'un chapelet. L'information disponible correspond donc à une ligne verticale de température. Ne

disposant que de cette information rectiligne, il n'est pas possible de modéliser la totalité des côtés de la piste d'aéroport. En effet, modéliser la totalité de la géométrie nécessiterait soit des conditions initiales de températures sur tout le modèle soit des conditions limites plus étendues. Cela reviendrait à fournir très peu d'informations à un modèle trop large. De plus, l'information requise se trouve elle aussi sur cette même ligne de thermistances. Obtenir des températures fiables ou non, à d'autres emplacements que la vraie instrumentation n'est pas utile. La géométrie des deux sections a donc été réduite à ce qu'il y a de plus simple : une colonne de sol composée de deux couches (cf. figure 54). L'épaisseur du remblai variant avec l'inclinaison de la pente, cette couche a une épaisseur dépendante de la section. La couche de sol naturel se situe en dessous de la profondeur zéro et s'étend suffisamment pour qu'une température stable puisse être associée à son pied.

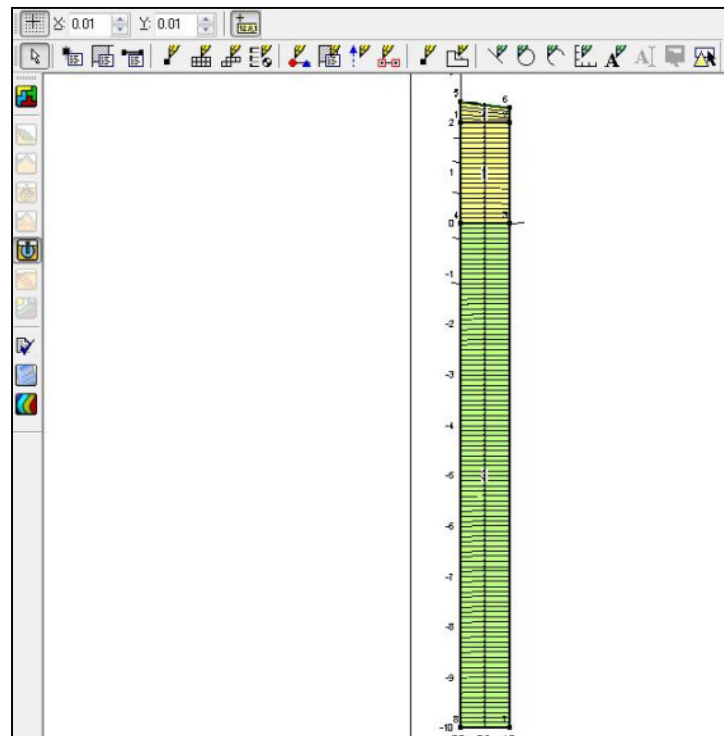


Figure 54. Capture d'écran de la géométrie de la colonne de sol modélisée sous GEOSTUDIO

6.2.2.2. Maillage du modèle

Le maillage est une étape importante pour le développement d'un modèle par analyse par élément finis. En effet, à chaque nœud correspond une résolution du système d'équation. Pour des systèmes complexes, il convient donc de choisir avec discernement le maillage, et donc le nombre d'équations à résoudre car cela influe sur le temps de calcul. Dans le cas présent, il ne s'agit pas de comprendre le fonctionnement thermique global d'un problème quelconque mais il s'agit de calculer en certains points précis des températures. C'est-à-dire que l'on sait déjà à quels endroits le suivi de la température doit être effectué. L'évolution de la température en tout autre point n'est pas intéressante. Le maillage a donc été construit de manière à ce que les points de calcul du modèle numérique correspondent exactement avec les profondeurs instrumentées. Cela nous donne donc une ossature pour le maillage. Raffiner ce maillage, c'est-à-dire rajouter des éléments en conservant l'ossature, n'est pas utile non plus. En effet, le modèle d'éléments finis a comme données d'entrée, les températures de cette ossature. Lui demander de calculer des températures sur d'autres nœuds reviendrait à faire l'équivalent d'une interpolation entre les données de départ. Cela n'ayant pas d'utilité dans notre cas d'étude, seule l'ossature décrite précédemment constitue le maillage du modèle.

6.2.2.3. Propriété des sols

Les propriétés caractéristiques des sols présents sont l'inconnue de cette modélisation. L'objectif étant de faire varier ces paramètres de manière à faire concorder les températures du modèle numérique et les températures mesurées sur le terrain. Quand les données concorderont, les propriétés du sol pourront être considérées comme presque déterminées (le modèle ne pouvant être totalement exact). Afin de commencer les itérations pour affiner le modèle, des valeurs des différents paramètres ont été extraits de plusieurs publications.

6.1.1.1.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre. C'est-à-dire la capacité à

transmettre la chaleur par conduction. Le volet TEMP/W prend en considération la conductivité thermique d'un sol (k) en fonction de son état. En effet, pour un sol gelé, la conductivité thermique est fortement dépendante de la teneur en eau non gelée du sol. Or cette teneur est fonction de la température. Comme la conductivité thermique de la glace est largement plus élevée que celle de l'eau, la conductivité thermique du sol augmente lorsque le sol gèle. (Krahn, 2004).

6.1.1.1.2. Teneur en eau

La teneur en eau (w) (gelée ou non gelée) de chaque couche de sol doit aussi être spécifiée dans le logiciel TEMP/W. Le logiciel TEMP/W effectue ses calculs à partir de la teneur en eau volumique. Ce paramètre est fondamental car il détermine l'importance des effets de chaleur latente dans le sol.

6.1.1.1.3. Capacité thermique

La capacité thermique d'un corps (c) permet de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. Il s'agit de l'énergie qu'il faut apporter à 1 kg d'un corps pour augmenter sa température de 1° Kelvin. Le logiciel TEMP/W requiert les données des capacités thermiques en condition gelée et en condition non gelée. En effet, la valeur de la capacité thermique est dépendante de la température car les changements de phase de l'eau comprise dans le sol, requièrent de l'énergie. Le changement de phase ne s'effectuant pas totalement à une température donnée mais plutôt dans une plage de température, la capacité thermique sera approximée par une fonction affine de la température (Krahn, 2004).

6.2.2.4. Conditions initiales et limites

Les simulations avec Géostudio nécessitent la mise en place de conditions limites sur le système étudié. Les conditions initiales permettent de définir l'état du système au temps $t=0$. Quant aux

conditions limites, elles définissent les conditions qui seront présentes pendant toute la durée de la simulation.

Plusieurs conditions initiales ont été prises en compte dans cette modélisation. Tout d'abord, les températures de toutes les thermistances disponibles pour la section à adoucissement de pente au moment du début de la période de modélisation, ont été établies comme conditions limites. De plus, la température mesurée par la thermistance placée la plus proche de la surface (thermistance B1) a été attribuée à la totalité de la surface de la section. Le couvert neigeux étant pratiquement nul, l'erreur associée à cette hypothèse est faible sur la courte distance modélisée ici.

Plusieurs types de conditions limites ont été posés pour ce modèle. Tout d'abord, le flux est considéré nul sur les parois verticales de la section. Cela revient à considérer qu'il n'y a pas d'échange latéral de chaleur. Ensuite une température fixe a été posée à la base de la section modélisée. Cette température correspond aux valeurs enregistrées par les câbles à thermistances à Tasiujaq ($-2,8^{\circ}\text{C}$ à 10 mètres de profondeur).

L'année 2008 a été utilisée dans le modèle. Il s'agissait de la première année disponible qui n'était plus perturbée par la construction des sections. De plus, la section de référence était massivement affectée par l'écoulement au cours de cette année. Les conditions initiales ont donc été les conditions de température du 1^{er} janvier 2008. Cette date étant en hiver, cela permet de caler le modèle au cours d'une période où les données ne sont pas perturbées par un quelconque écoulement.

Les données qui ont été utilisées comme condition limite variable, c'est-à-dire la condition limite qui permet de modéliser la variation au cours du temps, est la température de la thermistance la plus proche de la surface. Ainsi les variations de température des thermistances B1 (pour la pente douce) et A1 (pour la référence) ont été incluses dans le modèle. La plage de temps étudiée est l'année 2008 au complet.

6.3. Résultat des simulations

Les paramètres ont d'abord été affinés pour que le profil de température du modèle de la section à pente douce soit le plus proche possible des températures du terrain. Lorsque cette étape a été finalisée, les paramètres du sol ont été appliqués au modèle de la section de référence. Et le modèle a été étudié sur la totalité de l'année 2008. Les paramètres de convergence utilisés sont une variation à chaque étape inférieure à 0,1% de la température en moins de 100 itérations. Le modèle étant très simple et les variations des conditions limites de température étant proches d'une sinusoïde, le modèle a souvent besoin d'une ou deux itérations pour remplir cette condition. La température étant calculée chaque jour pour l'ensemble du modèle (cf. figure 55).

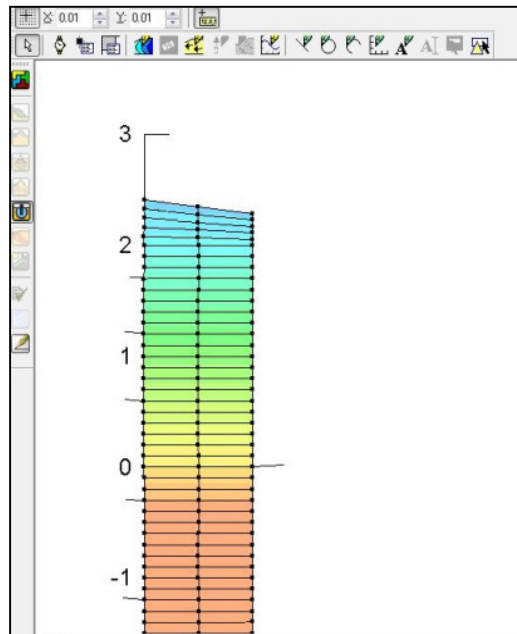


Figure 55. Résultat de la modélisation de la section à pente douce à la fin du mois de février 2008.

6.3.1. Modèle de la section à pente douce

Les paramètres obtenus après itérations pour les différentes couches de matériau sont présentés dans le tableau 2.

	Capacité thermique volumique ($\text{kJ.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)		Conductivité thermique ($\text{kJ.jour}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		Teneur en eau volumique (%)
	Gelée	Dégelée	Gelée	Dégelée	
Remblai	1700	2000	150	140	6
Sol naturel	1900	2100	105	95	16

Tableau 2. Paramètres du modèle pour les 2 couches de sol

Ces paramètres sont très proches de ceux que l'on peut retrouver dans le papier de Binxiang et coll. (2006), dans lequel il s'intéresse à modéliser le remblai du Qinghai-Tibet Railway. Les teneurs en eau sont elles issues de Wen et coll. (2007). Les paramètres proposés sont alors ceux du tableau 3. L'ordre de grandeur pour les différents paramètres convient donc.

	Capacité thermique volumique ($\text{kJ.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)		Conductivité thermique ($\text{kJ.jour}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		Teneur en eau volumique (%)
	Gelée	Dégelée	Gelée	Dégelée	
Graded sand gravel	1612	2025	210	155	6-8
Active layer	1900	2183	78	82	15-17

Tableau 3. Données caractéristiques des paramètres considérés (tiré de (Binxiang et coll., 2007) et (Wen et coll., 2007))

Les profils de température obtenus avec le modèle ainsi paramétré, ont été tracés à la fin de chaque mois de l'année 2008. L'évolution comparative entre le modèle et le site d'essai est alors possible (cf. figures 56 et 57).

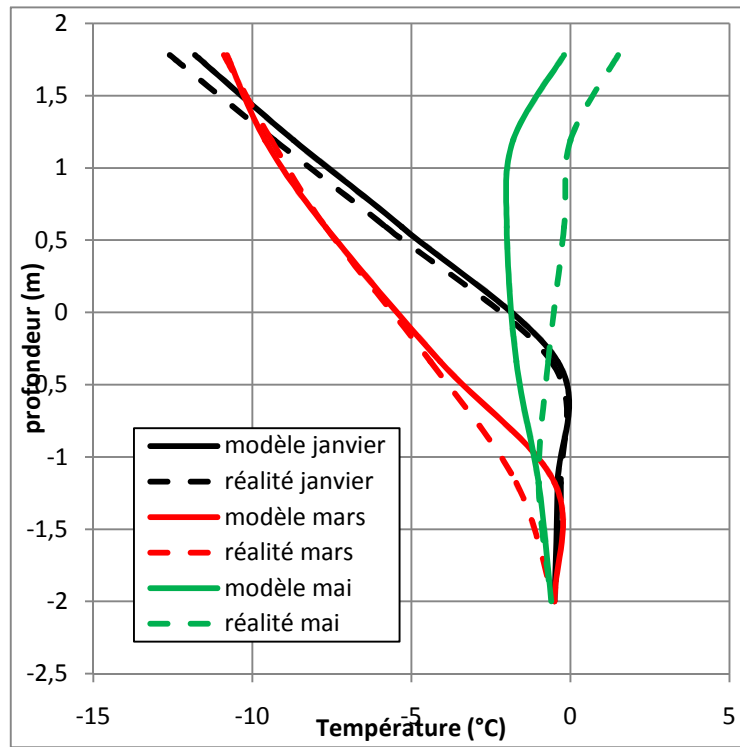


Figure 56. Comparatif entre les profils thermiques du modèle et du site d'essai à la fin des mois de janvier, de mars et de mai 2008 pour la section à pente douce

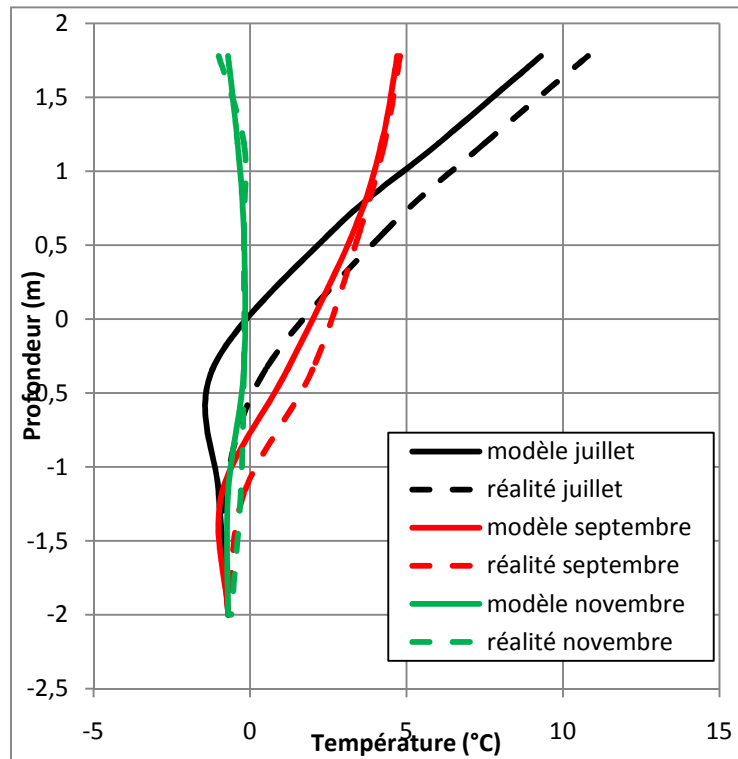


Figure 57. Comparatif entre les profils thermiques du modèle et du site d'essai à la fin des mois de juillet, de septembre et de novembre 2008 pour la section à pente douce

On note tout d'abord une bonne corrélation entre le modèle et la réalité. Cette corrélation est particulièrement bonne dans le cas des mois de plus grande stabilité thermique : janvier, mars, septembre et novembre. Lors des phases transitoires, juillet et mai, une différence plus grande est notable entre les 2 profils. Le modèle restant plus chaud sur la profondeur considérée. Pour le mois de janvier, la moyenne de la différence de température entre le modèle et le site d'essai est de $0,3^{\circ}\text{C}$ pour les 5 profondeurs qui ont été utilisées ici (B4, B6, B8, B11 et B14). Pour le mois de juillet, ce différentiel vaut $-1,1^{\circ}\text{C}$. Donc même lorsque le modèle et la réalité se distinguent, la différence reste d'un ordre de grandeur acceptable. Les valeurs caractéristiques des couches de sol peuvent donc être utilisées pour modéliser la section de référence.

6.3.2. Modèle de la section de référence

Le modèle de la section de référence est très proche géométriquement de celui de la pente douce. D'un point de vue pratique, les 2 sections se distinguent car la section de référence est affectée

par un couvert neigeux important. Mais cela ne pose pas de problème dans la modélisation car la température sous le couvert neigeux, est utilisée. Cela permet de s'abstenir de modéliser une couche neigeuse sur laquelle on ne dispose d'aucune information. Mais cela revient aussi à supposer que la thermistance la plus haute n'est peu ou pas perturbée par l'écoulement. Ce dernier se faisant par gravité à des profondeurs plus basses, l'hypothèse est justifiée.

De la même manière que pour le modèle de la pente douce, les profils thermiques à la fin des différents mois de l'année 2008 sont présentés dans les figures 58 et 59. On note tout d'abord, que l'on retrouve bien la différence entre les profils pour le mois de mai et juillet ; c'est-à-dire pour la période où l'écoulement est très important. La différence étant moins notable pour les autres mois. La moyenne du différentiel entre les 2 profils pour les thermistances considérées (A4, A7, A9, A12 et A15) vaut $0,1^{\circ}\text{C}$ pour le mois de janvier. Il s'agit de la plus faible valeur rencontrée au cours de l'année. La valeur maximale étant rencontrée à la fin du mois de juillet ; la différence vaut alors $6,3^{\circ}\text{C}$. On note cependant que malgré le fait que le modèle ne soit pas perturbé, le profil de température est plus chaud que la section d'essai à la fin de l'année, c'est-à-dire vers novembre. Ainsi, bien que le modèle n'ait pas l'apport thermique dû à l'écoulement, il est cependant plus chaud à la fin de l'année. Malgré le fait que la section de référence reçoive beaucoup de chaleur à cause de l'écoulement, toute cette chaleur est évacuée efficacement et il n'y a pas de chaleur rémanente. Le modèle est $0,9^{\circ}\text{C}$ plus chaud en moyenne sur les thermistances listées précédemment à la fin du mois de novembre.

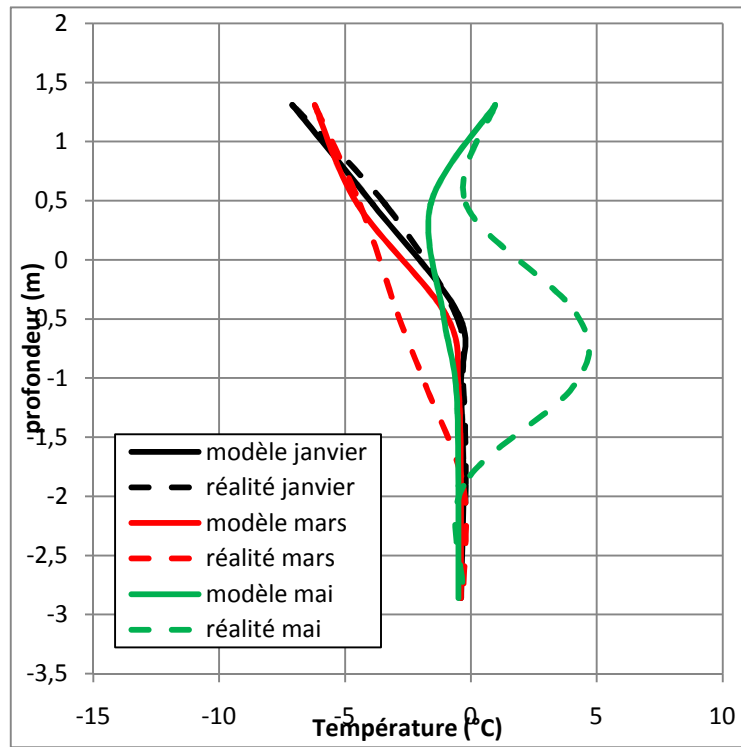


Figure 58. Comparatif entre les profils thermiques du modèle et du site d'essai à la fin des mois de janvier, de mars et de mai 2008 pour la section à pente douce

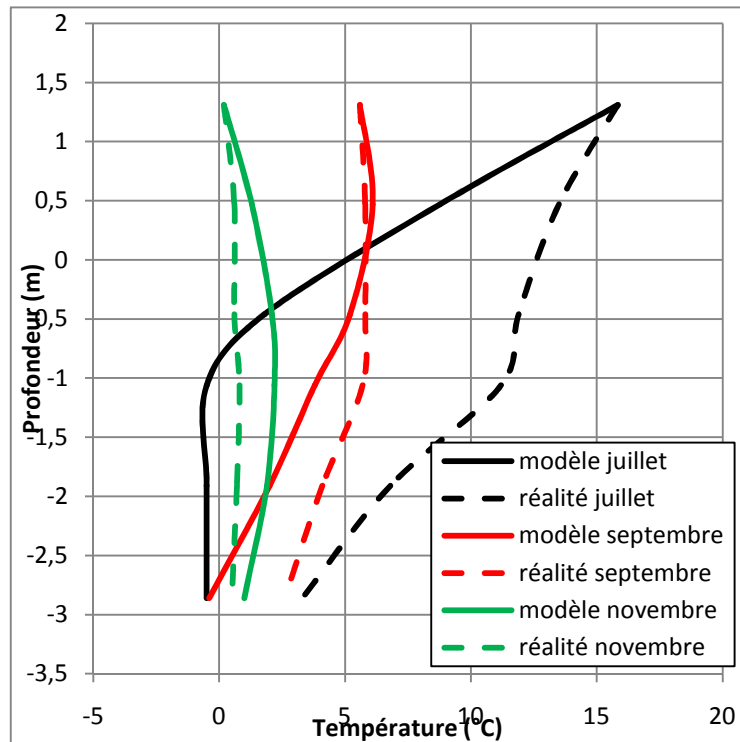


Figure 59. Comparatif entre les profils thermiques du modèle et du site d'essai à la fin des mois de juillet, de septembre et de novembre 2008 pour la section de référence

6.3.3. Correction des efficacités

6.3.3.1. Correction de la température à l'interface remblai / sol naturel

Par l'intermédiaire du modèle établi pour les sections à pente douce et de référence, les profils thermiques de l'année 2008 ont pu être établis. On dispose donc de données issues du modèle ; c'est-à-dire qu'elles correspondent à ce que pourrait être le profil thermique si l'écoulement n'était présent dans la section de référence. L'objectif premier de cette modélisation était de comparer les efficacités des sections avec une section de référence non perturbée. Cela est maintenant possible en exploitant le modèle.

Les températures à l'interface remblai / sol naturel du modèle, ont été analysées pour les deux sections qui nous intéressent. L'analyse du modèle de la section de référence est faite dans le but de connaître une efficacité corrigée. L'analyse du modèle de la section à pente douce est faite dans le but de la comparer avec la section expérimentale correspondante afin de valider le

modèle. L'évolution de la température à l'interface a été analysée sur toute la plage de temps modélisée, c'est-à-dire au cours de l'année 2008 (cf. figure 60).

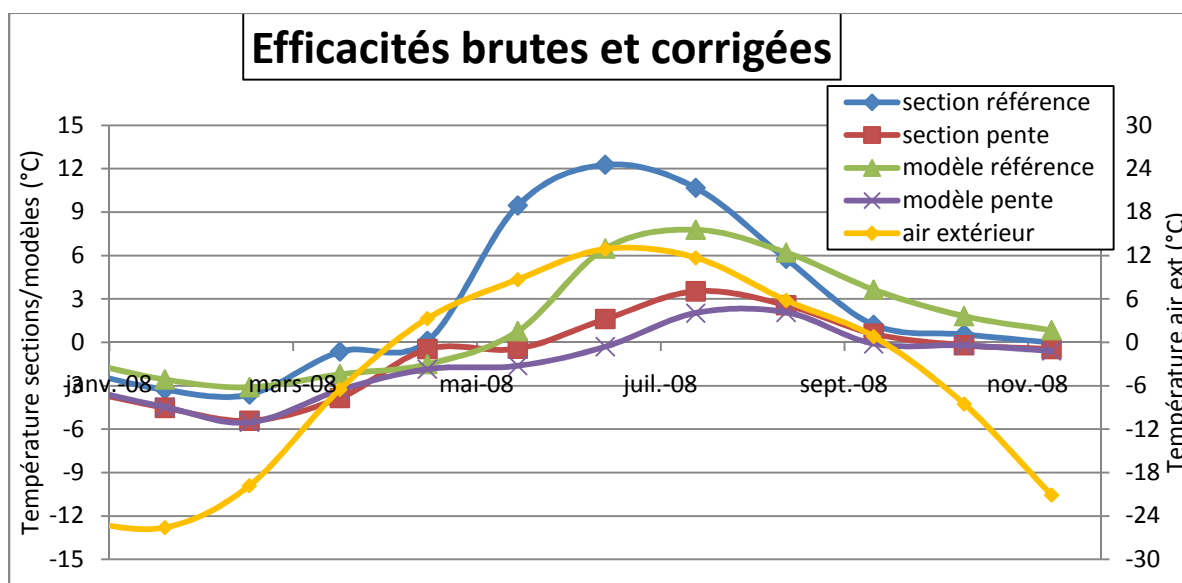


Figure 60. Température à l'interface remblai / sol naturel au cours de l'année 2008 pour les sections d'essai et les modèles de la section de référence et de la pente douce, ainsi que la moyenne mensuelle de la température de l'air extérieur

On note tout d'abord que les températures du modèle de la pente douce et de la section expérimentale correspondante sont proches. Ainsi l'utilisation des valeurs de température à l'interface du modèle, se justifie. Pour le modèle de la section de référence, le réchauffement au cours de l'été ne se fait plus en avance temporellement à cause de l'écoulement mais à peu près en même temps que la section à pente douce. De plus, la température du modèle est moins élevée que celle de la section expérimentale jusqu'au mois de septembre. Elle devient alors légèrement plus élevée au cours de la fin de l'année. Il s'agit alors de savoir de combien de degrés, il faut corriger l'efficacité de la section de référence. En effet, sans écoulement, cette section serait plus froide et la différence de température avec les autres sections serait moins élevée.

Afin de déterminer cette valeur, la différence moyenne de température entre le modèle de la section de référence et le modèle de la section à pente douce, a été calculée au cours de l'année 2008. Cette efficacité corrigée vaut 2,8°C. Sans la correction, cette même efficacité valait 3,3°C

en 2008. D'après le modèle qui a donc été élaboré, la température à l'interface de la section de référence serait 0,5°C plus basse. Il s'agit alors de corriger les efficacités calculées pour les autres sections et les autres années (tableau 4). Cette valeur de 0,5°C correspond d'ailleurs à la différence de température qui était observée en 2007 entre les 3 techniques et la référence. Or en 2007, c'est-à-dire juste après la construction, il est envisageable que les 4 sections aient des températures égales ou très proches du moins.

	2007 (année incomplète)		2008		2009		2010 (année incomplète)	
	Données brutes	Données corrigées	Données brutes	Données corrigées	Données brutes	Données corrigées	Données brutes	Données corrigées
Pente	0,5	0	3,3	2,8	2,8	2,3	3,5	3
Remblai à convection	0,5	0	2,1	1,6	1,7	1,2	2,3	1,8
Drain thermique	0,6	0,1	2,9	2,4	2,2	1,7	3,2	2,7

Tableau 4. Différentiel de température à l'interface remblai / sol naturel entre les différentes sections et la section de référence tout au long de la période de suivi

Même avec cette correction des efficacités, qui permet de tenir compte de l'écoulement d'eau, les 3 sections étudiées proposent toujours des températures nettement plus basses. Le résultat est bien sûr moindre car l'écoulement d'eau surestimait les valeurs, mais les techniques restent toujours très efficaces.

6.3.3.2. Correction des indices d'extraction

Connaissant l'évolution de la température dans la section de référence corrigée par le modèle au cours de l'année 2008, les indices d'extraction de chaleur ont été recalculés pendant cette même période. Les indices positifs et négatifs ainsi que le bilan sont donc réévalués. Sous l'hypothèse

que l'écoulement perturbant la section de référence est d'ampleur similaire chaque année, les variations d'indice observées en 2008, ont été appliquées aux autres années. Ainsi, on dispose des indices d'extraction de chaleur pour la section de référence corrigée pendant toute la période de suivi.

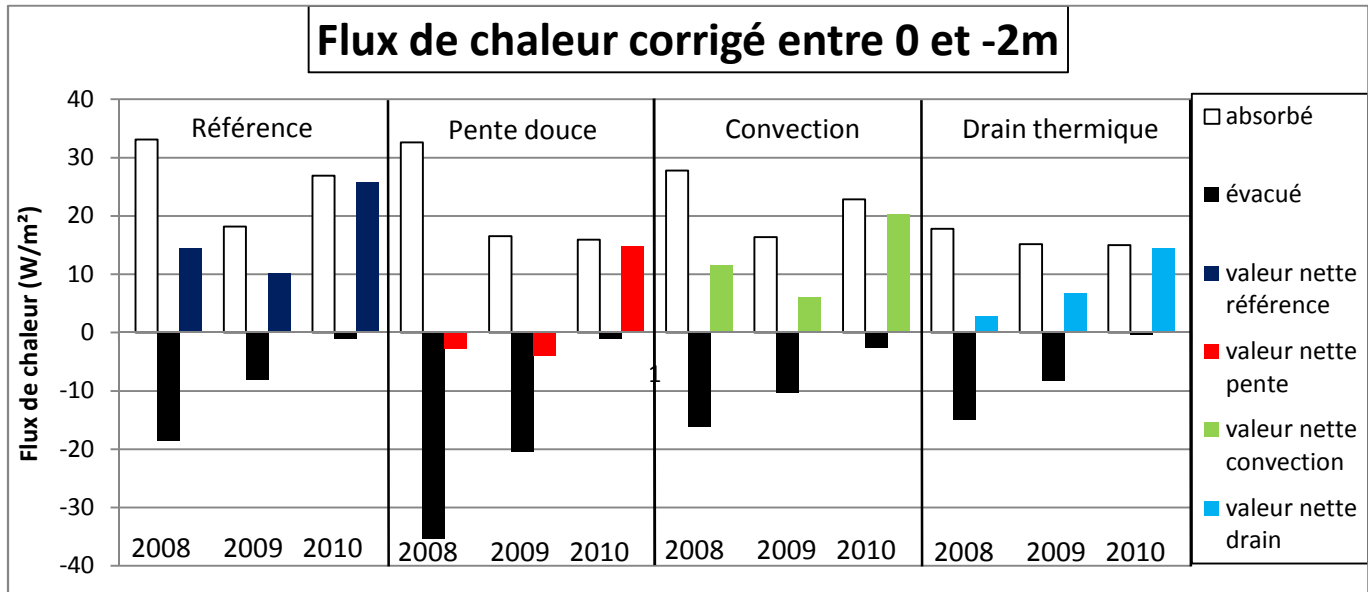


Figure 61. Flux de chaleur par année et par section entre les profondeurs 0 et -2 mètres, avec correction pour la section de référence

Cette correction diminue principalement le flux de chaleur absorbé au cours de l'été (cf. figure 61). En effet l'absence de l'écoulement permet de diminuer la pente du profil thermique aux profondeurs concernées (cf. figure 51). Le flux de chaleur évacué, c'est-à-dire le flux qui est présent au cours de l'hiver, n'est pas beaucoup modifié. En effet, l'écoulement est présent au cours de l'été ; le supprimer par la modélisation affecte donc principalement ce qui se passe au cours de l'été. Des variations de l'indice sont ressenties pendant le reste de l'année mais rien de comparable avec les changements au cours de l'été.

Après cette correction, l'ordre des sections d'un point de vue efficacité est conservé mais la référence rattrape une partie de son retard. En 2009, les flux de chaleurs nets sont -4 W/m^2 pour la section à pente douce, $+6 \text{ W/m}^2$ pour la section à remblai à convection d'air, $+6,8 \text{ W/m}^2$ pour la section à drain thermique et $+10,2 \text{ W/m}^2$ pour la section de référence.

Chapitre 7.0

Coûts des différentes techniques

7.1. Introduction

L'objectif de ce projet est de déterminer la faisabilité technique et l'efficacité des différentes sections expérimentées. Les sections d'essais satisfaisants les critères fixés, pourront alors être installées à plus grande échelle le long des infrastructures dans le nord du Québec. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte l'aspect économique de telles installations. Le rapport coût / bénéfice technique est-il satisfaisant ?

Actuellement, les pistes d'aéroport ainsi que les routes d'accès se dégradent massivement dans les villages nordiques. De nombreux tassements et fissures longitudinales apparaissent le long des infrastructures. Les coûts d'entretien qui permettent de maintenir la sécurité et le confort des usagers a un prix ; ces coûts ne cessant d'augmenter, des techniques sont actuellement expérimentées. L'objectif n'est pas de supprimer les frais relatifs à l'entretien mais de mieux les répartir dans le temps. En effet, même les infrastructures qui ne sont pas construites sur du pergélisol se dégradent et doivent être entretenues. Les sections expérimentales doivent permettre de ralentir les dégradations et donc de diminuer les coûts associés.

Afin d'établir un critère coût / bénéfice qui permet de distinguer les viabilités des différentes sections, il est nécessaire de prendre en compte : le refroidissement proposé par chaque section, la durée de vie et le coût de mise en place de chaque technique. Ce critère doit alors être comparé aux différentes autres solutions possibles pour l'aéroport. L'aéroport peut continuer d'être exploité tel quel, c'est-à-dire sans l'ajout de techniques de mitigation ; seuls les frais d'entretien sont alors à prendre en compte. Une autre solution est la relocalisation de l'aéroport à un autre endroit ; sur un socle rocheux qui offrirait plus de stabilité par exemple. Toutes ces solutions ont un coût et il convient de les comparer.

Les techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sont aujourd'hui testées le long de la piste d'atterrissage de l'aéroport de Tasiujaq. Ce village avait été choisi car il était l'un des

plus critiques d'un point de vue endommagement des infrastructures. Cependant les résultats de ces planches d'essais vont servir pour l'ensemble des villages nordiques. La difficulté réside dans le fait que dans chaque communauté, les conditions météorologiques, les sols, les infrastructures de transports sont différents. Tous ces paramètres ayant une influence non négligeable, l'efficacité de chaque section va donc possiblement varier en fonction des localisations. De plus, selon la configuration et selon les moyens que possède chaque village, les prix de construction des sections et des moyens d'entretien varient. Les coûts et les efficacités présentés dans cette partie ne s'appliquent qu'au seul village de Tasiujaq. Le rapport coût / bénéfice doit alors être reconsidéré lorsque l'on s'intéresse à l'application pour une autre communauté.

7.2. Coûts de construction des sections

Tous les frais présentés ici sont relatifs à la piste de l'aéroport de Tasiujaq. Cela correspond à une configuration particulière de remblai (hauteur, largeur). Cela correspond aussi à des frais particuliers d'acheminement de certains matériaux par bateau. Les coûts indiqués sont issus du devis de construction réalisé par l'entrepreneur Construction Gely Inc (tableau 5).

Adoucissement de pente				Remblai à convection d'air				Drain thermique			
Description	Quantité (m/ m³/ nbre)	Prix unitaire (\$)	Prix total (\$)	Description	Quantité (m/ m³/ nbre)	Prix unitaire (\$)	Prix total (\$)	Description	Quantité (m/ m³/ nbre)	Prix unitaire (\$)	Prix total (\$)
Elargissement de la piste : talus de pente 1V :5H	50	700	35000	Déblai	848	20	16960	Déblai	848	20	16960
Matériau granulaire pour l'adoucisseme nt du talus, pente 1V :8H	535	75	40125	Pierre calibre 150-300 mm	1234	55	67870	Matériau granulaire 0-150 mm pour sous- fondation	154	75	11550
				Coussin de support en matériau granulaire (MG-20)	215	78	16770	Coussin support en matériau granulaire (MG-20)	215	78	16770
				Cheminée ventilation	2	1900	3800	Cheminée de ventilation	2	1900	3800
				Géotextile	830	2	1660	Drain thermique	810	26	21060
				Conduite rigide en thermoplast ique (150mm de diamètre)	100	55	5500	Conduite flexible perforée en polyéthylèn e (150mm de diamètre)	100	40	4000
Total (\$)			75125	Total (\$)			112560	Total (\$)			74140

Tableau 5. Liste des coûts associés à la construction de chaque section sur une largeur de 50 mètres à Tasiujaq en septembre 2007

Les coûts totaux indiqués dans ce tableau comprennent les prix de tous les matériaux requis ainsi que la main d'œuvre requise pour la mise en place. La section de référence n'y figure pas car elle représente un coût de construction nul car elle est déjà en place. Sur le site d'essai de Beaver Creek au Yukon, de telles planches d'essai ont été construites. Les coûts de réalisation des sections à remblai à convection d'air et à drain thermique sont disponibles (Reimchen et coll., 2009). Cependant, les conditions ne sont pas les mêmes. La hauteur de remblai au Yukon est beaucoup plus grande que celle de l'aéroport de Tasiujaq. Les quantités de matériaux requises sont donc largement supérieures. D'autre part, la localisation de la communauté de Tasiujaq fait que, certains matériaux doivent être apportés par bateau (le drain thermique par exemple), les coûts sont donc modifiés. Les coûts de construction de Beaver Creek peuvent donc être utilisés

uniquement pour comparer l'ordre de grandeur. A Tasiujaq, les coûts de construction de la section à remblai à convection d'air sont environ 1,5 fois plus élevés que ceux de la section à drain thermique (112560 \$ contre 74140 \$). On retrouve à peu près ce même ratio sur le site de Beaver Creek ; le prix de la section à remblai à convection d'air est 1,7 fois plus élevé (195000 \$ contre 115000\$). Cela confirme donc les prix relatifs de ces deux sections.

Pour ce qui est des sections de référence et adoucissement de pente, on ne dispose pas des coûts pour les différents sites d'étude. Le prix de la section à pente douce est connu pour Tasiujaq, le prix de la section de référence est connu à Beaver Creek. Ces deux techniques ne nécessitant pas de matériaux particuliers ou de mise en œuvre complexe, les prix peuvent être déduits grâce aux données disponibles. La section à pente n'étant finalement qu'une section de référence avec un supplément de matériau de construction.

Ainsi en utilisant le prix d'un m^3 de matériau placé à Tasiujaq (55 \$/m³), et sachant que la section de référence a une pente de 1V : 3H, le prix de construction de cette section sur une largeur de 50 m peut être calculé. Ce coût est de 46640 \$ (pour 848 m³). Ce chiffre permet d'avoir un ordre de grandeur pour comparer avec les autres sections (tableau 6).

	Référence	Adoucissement de pente	Remblai à convection d'air	Drain thermique
Coût de construction (\$)	46640	75125	112560	74140

Tableau 6. Coût de construction des quatre sections sur une largeur de 50 mètres à Tasiujaq en septembre 2007

On note que la section de référence est nettement moins chère que les autres. Ne nécessitant pas de mise en œuvre spécifique ni de matériau spécifique, son prix est normalement plus faible. Les sections à adoucissement de pente et drain thermique ont des coûts identiques, un peu plus élevés que la section de référence. Enfin la section à remblai à convection d'air est la plus chère à

construire. La difficulté à obtenir du matériau granulaire d'un diamètre inhabituel pour le village de Tasiujaq est une raison de ce prix élevé.

7.3. Durées de vie et coûts d'entretien des sections

La comparaison des prix de chaque section doit prendre en compte la durée de vie de chaque section afin d'être complète (tableau 7). Les sections de référence et à pente douce ne nécessitant strictement aucune maintenance, leur durée de vie est évaluée à 40 ans. Pour les sections à remblai à convection et à drain thermique, on peut supposer que la présence de systèmes de ventilation diminue la durée de vie de ces sections. Cependant ne disposant pas de retour d'expérience sur la durée de vie de telles techniques, la longévité de ces sections a été fixée arbitrairement à 30 ans.

	Référence	Adoucissement de pente	Remblai à convection d'air	Drain thermique
Coût de construction (\$)	46640	75125	112560	74140
Durée de vie (années)	40	40	30	30
Coût par an (\$)	1166	1878	3752	2471

Tableau 7. Coût de construction et durée de vie des quatre sections sur une largeur de 50 m à Tasiujaq

On note que la section à drain thermique et la section à remblai à convection d'air deviennent beaucoup plus coûteuses que les deux autres lorsque l'on prend en compte leurs durées de vies respectives. La section de référence étant manifestement moins chère ; la section à pente douce coûte plus cher. Pour pouvoir analyser le rapport coût / bénéfice sur une durée de 40 ans, il est nécessaire de distinguer les différents coûts qui interviennent dans la gestion de la piste. Cela nécessite alors de différencier les différents types d'entretien de la piste. Une partie de l'entretien est réalisée fréquemment (plusieurs fois par an) par du personnel de chaque village ; cet entretien consiste à recharger grossièrement les premières formations de tassement. Cet entretien est réalisé à intervalles fixes et sera présent quel que soit l'état de la piste. Seul le volume de matériau sera alors variable en fonction de l'intensité des dégradations. D'autre part, un entretien beaucoup plus conséquent est effectué tous les 10 à 15 ans. Celui-ci consiste en un rechargement complet de la piste et un repositionnement des lumières. Cet entretien est beaucoup plus coûteux car il nécessite la mobilisation d'un entrepreneur et de matériels. Le fait que la dégradation de la piste soit importante ou non, pourrait éventuellement influencer sur la fréquence de cet entretien. Une intervention tous les 5 ans ou tous les 10 ans pourrait faire une grosse différence sur le montant total après 40 ans d'utilisation. Il n'est donc pas aisé de caractériser précisément le bénéfice

financier de telle ou telle section. L'analyse sera effectuée au mieux, à la lumière des informations disponibles.

7.4. Graphiques de rentabilité

L'objectif de ces graphiques est d'obtenir un outil de décision afin de décider de l'implantation ou non, d'une technique de mitigation le long d'un aéroport. Et si l'implantation est envisagée, quelles sont alors, les techniques qui seront rentables ?

On s'intéresse ici à calculer les coûts des différentes techniques sur une longueur unitaire d'un mètre. Lorsqu'aucune technique n'est installée, les coûts seront uniquement les coûts d'entretien liés aux tassements. Ce dernier coût est calculé à l'aide des volumes de matériaux requis qui sont multipliés par le coût d'un mètre cube de matériau placé : 100 \$/m³ (donnée issue du devis de Gely construction Inc.). Lorsqu'une technique est installée, les coûts seront le prix de construction de la technique concernée auquel s'ajoutent une partie des coûts d'entretien liés aux tassements. En effet, chaque technique ayant refroidit le sol sous-jacent, les tassements seront diminués. La comparaison des coûts des deux solutions (laisser la section de référence ou installer une technique), permet de caractériser la rentabilité des différentes méthodes en fonction de l'importance des tassements.

Pour calculer les coûts d'entretien, les données requises sont le tassement annuel et la surface affectée. On s'intéresse ici à une longueur de 1 mètre donc seule la largeur sera variable. D'après les relevés de tassements faits par le MTQ, la largeur est souvent de l'ordre de la distance comprise entre l'épaulement et les lumières de la piste. Ce qui équivaut à 7 m dans la plupart des aéroports du Nunavik. Comme la largeur est néanmoins variable, plusieurs valeurs sont étudiées ici : 3,5 m, 7 m et 14 m. Connaissant cette donnée, le volume de matériau requis est alors calculé en approximant la dépression par le volume d'un pavé.

Les trois techniques envisageables ayant démontrées qu'elles refroidissent le sol avec efficacité, les tassements associés seront diminués. L'importance de la réduction des tassements est quantifiée à l'aide des efficacités calculées au chapitre 5 et des corrections calculées au chapitre 6. Tenant compte du fait que les sections à pente douce et à drain thermique maintiennent

approximativement la température stable à 1,7 m de profondeur, l'hypothèse d'une réduction des tassements de 90% est faite. La réduction des tassements de la section à remblai à convection d'air est alors obtenue par proportionnalité ; elle s'élève à 50% environ. Les coûts totaux, c'est-à-dire coût de construction plus frais d'entretien, sont alors calculés tenant compte de la mitigation des tassements par les techniques pour les différentes largeurs affectées (cf. figures 62 à 64).

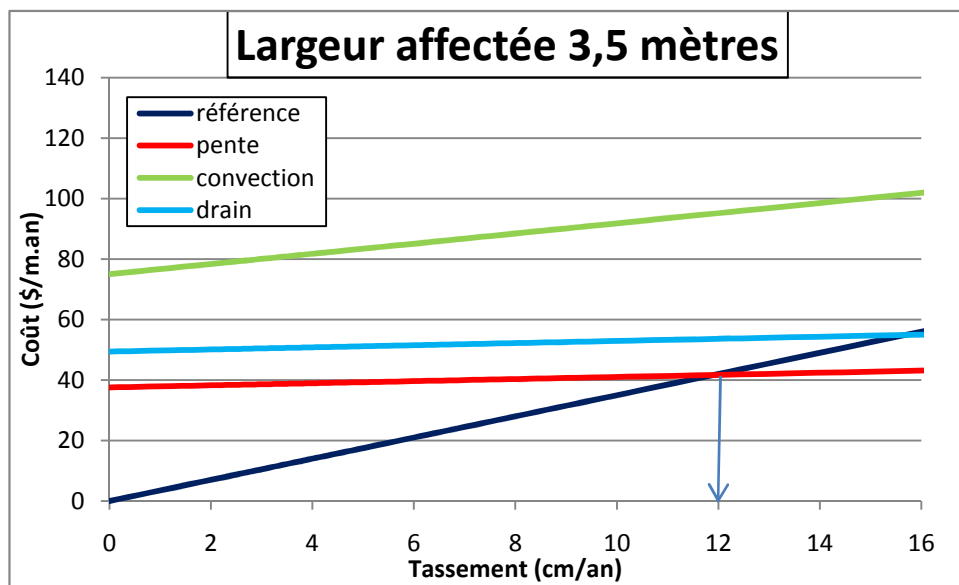


Figure 62. Evolution des coûts totaux annuels pour les différentes techniques en fonction du tassement annuel pour une largeur affectée de 3,5 m

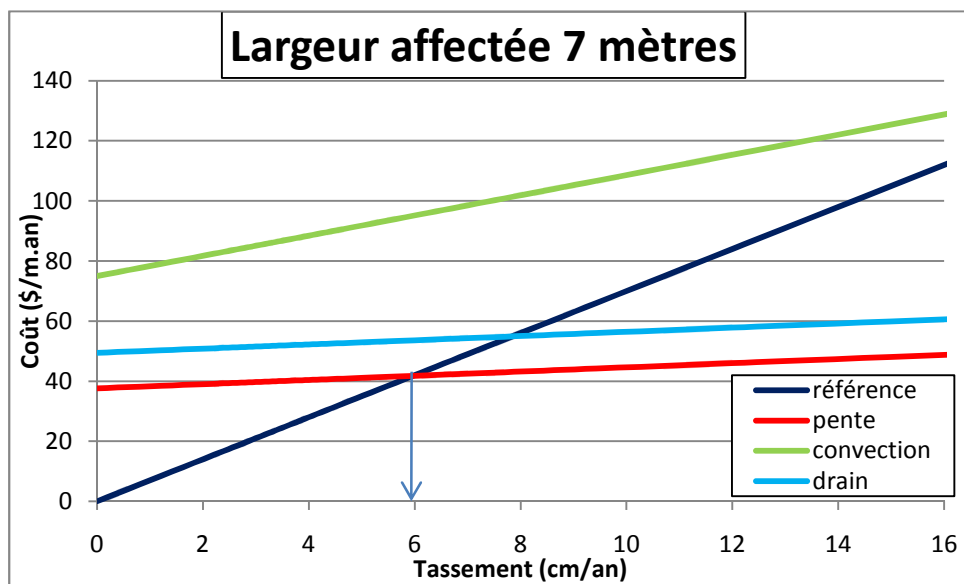


Figure 63. Evolution des coûts totaux annuels pour les différentes techniques en fonction du tassement annuel pour une largeur affectée de 7 m

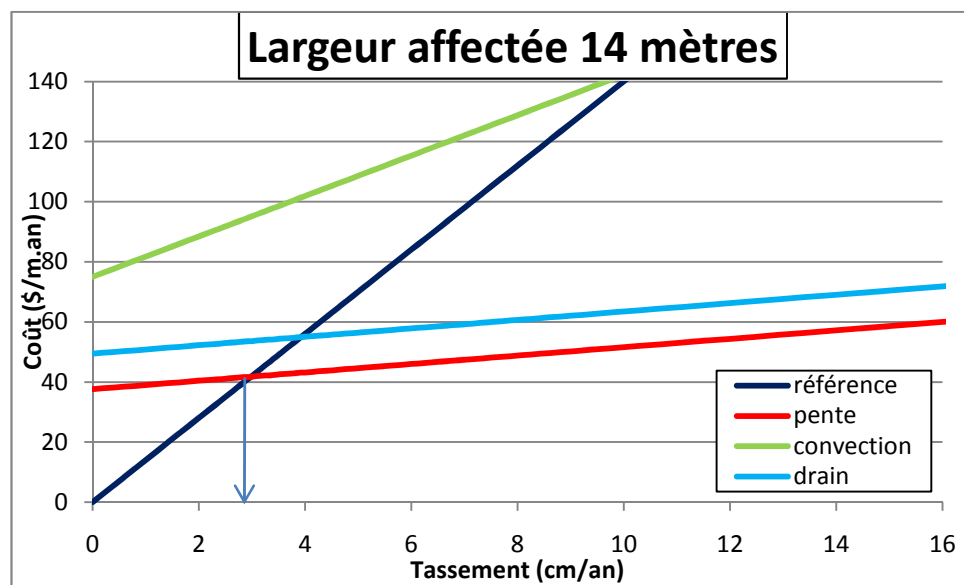


Figure 64. Evolution des coûts totaux annuels pour les différentes techniques en fonction du tassement annuel pour une largeur affectée de 14 mètres

On note tout d'abord que la section à remblai à convection d'air n'est pas rentable pour des tassements raisonnables dans le contexte de Tasiujaq. La section à drain thermique n'est rentable que dans des cas de forts tassements sur de grandes largeurs : 8cm/an pour une largeur de 7 m ou 4 cm/an pour une largeur de 14 m. Ces valeurs de tassements ne sont jamais observées dans les villages du Québec nordique. La section à adoucissement de pente a, contrairement aux autres, une rentabilité même pour des tassements de plus faibles envergures : 12 cm/an pour une largeur de 3,5 m, 6 cm/ an pour une largeur de 7 m ou 3 cm/an pour une largeur de 14 m. Ces valeurs de tassement (6 cm/an pour une largeur de 7 m) sont nettement plus élevées que les valeurs observées fréquemment dans les aéroports du Nunavik. De nombreuses dépressions de l'ordre de 2,5 cm/an sur une largeur de 7 m sont par contre rencontrées dans les aéroports de Tasiujaq, Salluit, Akulivik ou bien encore Inukjuak par exemple.

Selon l'étude de rentabilité effectuée, aucune des techniques ne semble acceptable d'un point de vue rapport coût / bénéfice technique. Il est vrai que les techniques sont chères à mettre en œuvre mais cette étude ne tient pas compte de tous les éléments. Tout d'abord, l'augmentation de la fréquence de l'entretien massif de l'aéroport (avec rechargement de la totalité de la piste et repositionnement des lumières) n'est pas prise en compte ici. Il n'est pas encore possible de prendre en compte cet élément d'analyse car le retour sur expérience est encore trop court. Il s'agit d'un entretien qui ne sera plus effectué tous les quinze ans mais tous les 8 ans seulement par exemple. Les aéroports sont encore trop jeunes pour que des conclusions puissent être tirées de ce phénomène. De plus, il est important de noter qu'un tassement excessif aura pour effet de créer une cuvette sous la piste qui empêchera son drainage et pourra éventuellement rendre la piste non-opérationnelle. La capacité du sol d'infrastructure à porter le remblai de la piste, sera alors perdue et obligerait à relocaliser l'ouvrage.

Par ailleurs, l'aspect sécurité ne peut être quantifié d'un point de vue de coût mais il est fondamental. Il serait en effet impensable de se limiter seulement à une étude coût / bénéfice lorsque les conséquences possibles vont au-delà d'un aspect financier. Il faut donc garder à l'esprit que l'avantage coût / bénéfice technique de ces solutions est pour l'instant sous estimé par cette étude de rentabilité et que ce n'est pas le seul élément à prendre en compte.

Chapitre 8

Discussion

La construction d'infrastructures en conditions nordiques est souvent problématique. En effet, la présence d'une infrastructure modifie inévitablement le bilan énergétique qui était présent à l'interface sol / air. En ajoutant une couche de matériau, en modifiant l'albédo de surface, en détruisant la végétation présente ou bien encore en perturbant les conditions de drainage, tous les différents mécanismes de transfert de chaleur sont altérés. La conséquence est alors une modification de la température de surface du sol et du flux de chaleur entrant. Le sol se réchauffe, modifiant ainsi le profil thermique du sol plus en profondeur. Or ce sol est riche en glace et se trouve à des températures justes en dessous du point de congélation. Un faible apport de chaleur peut alors le faire dégeler, faisant alors fondre l'eau qu'il contenait. Le sol se tasse et des dégradations apparaissent en surface. Que ce soit des dépressions ou des fissures, ces dégradations sont très dommageables pour la piste de l'aéroport. En effet, la tolérance sur les endommagements est faible car la sécurité des passagers est en jeu.

Par ailleurs le réchauffement climatique est avéré dans le nord du Québec. Les suivis de température démontrent un réchauffement depuis le début des années 90. La poursuite de la hausse des températures et du volume de précipitation est anticipée par de nombreux modèles. Encore une fois, cela agit sur le bilan thermique à l'interface sol / air, modifiant alors le régime thermique du sol sous-jacent. Les effets de la présence de l'infrastructure et du réchauffement climatique s'additionnent, ce qui dégrade d'autant plus le pergélisol et augmente ainsi les tassements.

Dans le cadre du projet de Tasiujaq, les dégradations telles les dépressions et les fissures, sont observées depuis quelques années le long de la piste de l'aéroport. Il convient donc de développer des méthodes qui permettront de limiter la poursuite de l'endommagement. Dans de nombreux sites à travers le monde, des techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol ont prouvé leurs efficacités. Mais il est avéré que l'efficacité d'une méthode donnée, est extrêmement variable selon le contexte. Le vent, le couvert neigeux, le type de sol, sont autant de paramètres qui peuvent faire perdre toute efficacité à la méthode. Il convient donc de tester des méthodes

nouvelles et des méthodes adaptées au contexte particulier du Nunavik, en condition réelle d'exploitation. Les essais sont menés sur le site de Tasiujaq dans le but d'une application à plus grande échelle au Québec. Mais il faudra considérer que, de la même manière que les conditions sont différentes entre les hauts plateaux chinois et le Québec, les conditions sont différentes entre les différents villages du nord du Québec. Le transfert de la technique qui fonctionne à Tasiujaq vers un autre village, devra être fait en considérant ce fait.

8.1. Discussion sur les données thermiques

La période de suivi des données thermiques est comprise entre le 15 septembre 2007 et le 10 octobre 2010. Un peu plus de trois années de données sont donc disponibles et exploitables. Même si cette période peut sembler conséquente, elle n'est en fait pas suffisante pour tirer des conséquences à long terme. Un suivi plus long sera nécessaire pour caractériser avec plus de recul, les efficacités des différentes techniques instrumentées. Cependant, il n'est pas envisageable d'analyser ces données seulement après de nombreuses années, alors que la problématique des dégradations est déjà présente depuis longtemps. Il s'agit donc de caractériser au mieux les différentes méthodes en tenant compte que seules trois années d'exploitation sont disponibles. Par ailleurs, dans le but d'un suivi à plus long terme, le remplacement du système d'acquisition des données SAD#3 sera nécessaire. En effet, étant continuellement défectueux depuis plusieurs mois, il engendre la perte de la moitié des données issues des sections à remblai à convection d'air et à drain thermique.

Les trois années ont été variables d'un point de vue des conditions climatiques extérieures. Alors que les deux premières années de suivi étaient dans la moyenne des conditions observées à ces latitudes élevées, la 3^{ème} année fut nettement plus chaude. A cause de son hiver relativement plus chaud, le nombre de degrés jours observés était plus représentatif de latitudes plus basses. D'un côté, cette année plus chaude peut être vue comme un élément empêchant de commenter une tendance sur trois années semblables consécutives. D'un autre côté, un hiver plus chaud que la normale et un été sans grand changement, correspondent à ce que de nombreux modèles climatiques anticipent. Ainsi, cette 3^{ème} année permet de caractériser quels pourront être les comportements des différentes techniques dans le futur proche.

8.1.1. La section de référence

La section de référence est largement perturbée par un écoulement d'eau qui la réchauffe massivement. Ne remplissant plus son rôle de référence à proprement parler, une solution devait être trouvée pour passer outre cette perturbation. C'est la raison qui a motivé la modélisation sous GEOSTUDIO.

8.1.2. La section à pente douce

La section à pente douce est celle qui présente le plus d'avantages. Tout d'abord, d'un point de vue pratique, cette section consiste seulement en un apport de matériau. Il n'y a donc pas besoin d'excaver le remblai en place, ce qui permet de ne pas exposer directement le pergélisol à l'air libre lors de la construction. Un apport thermique est donc évité par ce biais. De plus, elle ne requiert pas de matériaux tels les cheminées ou les géotextiles, ce qui la rend facile à mettre en place. Seule une certaine quantité de remblai est nécessaire pour la concevoir. D'un point de vue thermique, cette section présente la meilleure efficacité parmi les sections testées à Tasiujaq. Elle a permis de diminuer l'épaisseur de la couche active de manière effective et d'abaisser la température du sol. Le principe de fonctionnement de cette section étant d'éliminer l'accumulation de neige et donc l'effet isolant qui en découle. Or à Tasiujaq, l'accumulation de neige est une des principales causes de dégradation du pergélisol, car le vent est perpendiculaire à la piste en hiver et donc la neige s'accumule en quantité. La section à pente douce a donc une bonne efficacité dans le contexte de Tasiujaq. Par contre, la pente douce n'est pas la technique optimale pour les aéroports où il y a peu d'accumulations de neige au pied de la piste, ou dans les aéroports où le vent n'est pas suffisant pour balayer la neige ou bien encore du côté de la piste qui est au vent. En effet, dans ces différents cas de figure, même la géométrie de la section à pente douce ne permettrait pas d'éliminer l'accumulation de neige. Toutefois, la mise en place d'une pente douce implique l'éloignement du fossé de drainage en pied de remblai se qui éloigne l'apport en chaleur par les accumulations d'eau. Il convient donc d'analyser le contexte particulier à chaque village pour déterminer si cette technique très efficace dans certains cas pourra développer sa pleine efficacité.

Il est essentiel que la pente douce soit mise en place sur toute la hauteur du remblai. Si la technique est installée uniquement sur la partie inférieure du remblai, une zone d'accumulation potentielle pour la neige est créée à l'endroit du changement de pente. L'effet isolant de la neige sera toujours présent et la technique perdra en efficacité. Par ailleurs, pour des remblais plus hauts qu'à Tasiujaq, cette technique deviendra beaucoup plus coûteuse car le volume de matériau nécessaire sera fortement augmenté. Le rapport coût / bénéfice technique sera alors diminué. Pour chaque aéroport étudié, la configuration locale est à analyser à la vue de tous ces paramètres, afin de déterminer si l'implantation de la technique est stratégique.

8.1.3. La section à remblai à convection d'air

La section à remblai à convection d'air a été largement étudiée à travers le monde et depuis de nombreuses années. Cependant, les conclusions sur sa mise en œuvre sont contradictoires selon les sites d'études. Par exemple, les conclusions sont diverses sur le fait que le remblai doit être ouvert ou fermé ; encore une fois, la variabilité selon les sites d'essais est un facteur capital. L'exploitation de cette méthode en conditions réelles à Tasiujaq, nécessite de repenser son design en fonction des conditions locales. C'est pour cela que des cheminées ont été ajoutées pour passer outre l'effet du couvert neigeux. C'est aussi pour cela que le remblai a été fermé pour limiter l'effet du vent qui est conséquent à Tasiujaq. La faible hauteur du remblai a alors pour conséquence que les mécanismes de convection se limitent à de la convection libre dans un faible volume. L'effet cheminée, qui était recherché dans cette section, serait possiblement plus efficace lorsque les hauteurs de remblai seront plus élevées. Par ailleurs dans le contexte de Tasiujaq, les vents d'été sont parallèles à la piste alors que les vent d'hiver lui sont perpendiculaires et sont plus importants. Les vents d'hiver ont donc bien plus d'influence que ceux d'été. Or, la section, telle qu'elle est conçue, ne profite pas des effets du vent car elle est fermée. La convection forcée par le vent étant beaucoup plus efficace que la convection libre interne, il est dommage de ne pas en profiter. Ainsi à Tasiujaq, il pourrait être envisagé de repenser la section à remblai à convection d'air. C'est-à-dire passer d'un remblai à convection libre interne (remblai fermé avec un matériau fin) à un remblai à convection forcée externe, en ouvrant le remblai. Cela permettrait alors de profiter principalement de l'effet du vent froid d'hiver pour refroidir la section en profondeur. Mais cela ne serait possible que si le couvert neigeux permettait au vent de refroidir

la section. Il faudrait alors soit l'implanter du côté de la piste qui est au vent, soit adoucir sa pente pour limiter l'accumulation de neige. Ces hypothèses doivent encore prouver leur validité et ont aussi le désavantage d'augmenter encore le prix d'une technique déjà très coûteuse.

La section à remblai à convection a aujourd'hui une efficacité amoindrie par le fait que le système de ventilation est sous dimensionné. Une solution raisonnable pour augmenter son efficacité serait le remplacement du système de cheminée. En augmentant le débit capable de traverser ce système, l'extraction de chaleur sera augmentée et le sol mieux refroidit. D'après les données thermiques de Tasiujaq, elle a un retard important par rapport aux autres sections. Et elle est en plus d'un coût plus élevé. Le principal élément qui fait augmenter son coût de construction à Tasiujaq est la difficulté à obtenir du matériel de remblai du bon calibre. En effet, ce diamètre particulier nécessite la présence d'un concasseur dans la communauté pendant la durée des travaux, et la fabrication du matériau n'est pas évidente. La modification du diamètre souhaité, comme le suggère certaines études, ou la modification du procédé de fabrication permettraient de réduire ce coût.

8.1.4. La section à drain thermique

La section à drain thermique est testée pour la première fois en conditions réelles d'exploitation à Tasiujaq. Après avoir prouvée son efficacité par des essais en laboratoire, la suite logique était de l'expérimenter sur le terrain. D'un coût finalement pas si élevé malgré le transport du drain thermique jusqu'au le site, cette technique a démontré une bonne efficacité au cours de la période de suivi. En réduisant l'épaisseur de la couche active et en abaissant la température dans le sol, cette technique devrait limiter les tassements futurs. Cependant, comme il s'agit d'une technique nouvelle, tous les facteurs influençant son bon fonctionnement ne sont pas identifiés pour l'instant. Certaines considérations pratiques concernant son installation sont connues mais il est difficile de se prononcer sur l'influence des paramètres météorologiques à part l'existence d'un différentiel de température important entre le MAGT et le MAAT. Plus ce différentiel est grand, plus l'efficacité de la section est augmentée. Les conditions de vent et de neige d'un autre village du Nunavik peuvent diminuer ou bien augmenter l'efficacité de cette technique. Elle reste à

priori, moins dépendante des paramètres météorologiques que ne le sont les sections à pente douce et à remblai à convection d'air.

D'un point de vue efficacité thermique, la section à drain thermique et celle à adoucissement de pente ont été les moins sujettes à un réchauffement massif au cours de l'été qui a suivi l'hiver anormalement chaud. Ces deux techniques, qui ont d'ailleurs la meilleure efficacité en temps normal, apparaissent comme étant les plus aptes à lutter contre le réchauffement du sol.

8.2. Discussion sur les modélisations

L'objectif de cette modélisation est de rendre à la section de référence son rôle de référence. Elle est perturbée par un écoulement qui la réchauffe et qui amène à une surestimation des efficacités des sections testées. Il s'agit donc de pouvoir quantifier au mieux cet effet de surestimation. Ne disposant que de quelques données thermiques pour les différentes sections, le modèle a été conçu aussi simple que possible à partir de ces données. En n'utilisant que les données de température de la section à pente douce et les données de température d'une thermistance de la section de référence pour recréer une colonne de sol, de nombreux paramètres sont bien entendus négligés. Cependant les résultats de cette modélisation simpliste sont très satisfaisants. La corrélation entre les données expérimentales et les données du modèle pour la section à pente douce est acceptable. Après avoir appliqué ce modèle à la section de référence, il en ressort que le refroidissement des techniques à l'interface remblai / sol naturel est surestimé d'environ 0,5°C. Cette valeur est d'un ordre de grandeur acceptable et correspond à la différence de température observée directement après les travaux. C'est donc avec cette valeur qu'ont été corrigées les efficacités calculées.

D'après les données thermiques de la section à adoucissement de pente, cette section s'est avérée elle-aussi perturbée par un écoulement. Comme les données thermiques de cette technique sont utilisées pour corriger la référence, cela pourrait être problématique mais ce n'est pas le cas. Contrairement à la section de référence qui est perturbée par un apport de chaleur dû vraisemblablement à un écoulement d'eau important, la section à pente douce est seulement affectée par un écoulement d'eau de fonte. Cet écoulement d'intensité beaucoup moindre est d'ailleurs observé pour les autres techniques implantées, et correspond à l'écoulement à la

surface du sol, de l'eau de la fonte des neiges. Utiliser la section à pente douce avec cet écoulement dans le modèle, revient alors à supposer la présence d'un écoulement similaire pour la section de référence. A priori, celui est présent mais ne peut être observé car il est masqué par l'effet de l'écoulement massif en profondeur. Ainsi ce modèle a été réduit à ce qu'il y a de plus simple et a cependant répondu aux attentes placées en lui, soit en permettant de quantifier avec une certaine réserve l'efficacité des différentes techniques d'adaptation expérimentées.

8.3. Discussion sur l'étude de rentabilité

L'actif que représente les aéroports du Nunavik est conséquent : 140 millions de \$ en 2006. Il s'agit donc d'entretenir ces biens sans que les coûts ne soient trop élevés. Or avec l'augmentation des dégradations des pistes, le budget de l'entretien devient très important. Il convient donc de limiter les dégradations en utilisant des techniques de mitigation des effets de la fonte du pergélisol. Mais cela ne doit pas se faire à n'importe quel prix. Il est donc essentiel de prendre en compte le prix des sections comme paramètre de décision. Ce prix devant être mis en relation avec l'efficacité de la technique. L'objectif de l'analyse économique est de caractériser l'importance des dégradations à partir de laquelle l'utilisation de la technique est justifiée. Cela permet alors d'avoir un outil d'aide à la décision pour le choix de l'implantation d'une technique.

Malheureusement tous les éléments permettant une analyse détaillée des coûts ne sont pas disponibles. Par exemple, la réduction de l'épaisseur de la couche active est démontrée pour les différentes techniques étudiées à Tasiujaq, mais le lien n'est pas fait avec la réduction des tassements qui en découle. Comparer les tassements observés là où est implantée une technique, avec ceux observés sous une section de référence adjacente, ne permet pas d'en tirer plus d'informations. En effet, dans la pratique les tassements sont très localisés. Il se peut donc très bien que l'on associe la différence de tassement à la présence de la technique alors que ce n'est pas le cas. Par définition, là où est implanté une technique, il n'y a pas de section de référence, il est donc très difficile de quantifier la réduction des tassements. Augmenter la taille de la zone étudiée, c'est-à-dire ne plus s'intéresser à des longueurs de 50 m mais à des longueurs bien plus grandes, permettrait de s'affranchir des effets de localisation des tassements. Mais cette méthode

a un coup beaucoup trop élevé. La quantification de la réduction des tassements est donc, par défaut, fixée arbitrairement en tenant compte des efficacités des sections.

De plus, l'implantation des techniques se fait lorsque les dégradations sont d'ores et déjà présentes. Il s'agit donc d'une implantation curative et non pas préventive. Lors de la construction de la technique de protection du pergélisol, les tassements de la majeure partie de la couche sensible sont déjà présents. La mise en place de la technique peut alors seulement limiter la poursuite des tassements. Or dans notre étude, on considère un taux de tassement constant en fonction du temps, cela revient à considérer que la technique était présente dès la construction de l'infrastructure. Il y a donc une approximation faite ici qui surestime la réduction des coûts liés aux tassements. Il n'est pas possible d'équiper la totalité de l'infrastructure avec des techniques dès le début de la construction. Cela nécessiterait des budgets bien trop élevés et utilisés à mauvais escient. D'après l'étude de rentabilité, seule certaines techniques sont rentables lorsque les tassements sont élevés.

Dans cette étude de rentabilité, la section à pente douce est la seule qui justifie son implantation. Cependant, la réduction des coûts qui découle du refroidissement lié à la présence de la technique est sous estimé. En effet, il existe deux types d'entretien or un seul est pris en compte ici car il n'y a pas de données pour le second. La réduction du volume de matériau utilisé pour les entretiens fréquents de la piste est prise en compte, mais la diminution plausible de la fréquence de l'entretien global ne l'est pas. Cet entretien qui s'effectue tous les 10 à 15 ans, consiste en un rechargement de la totalité de la piste et un repositionnement des systèmes d'éclairage. Il est donc très coûteux même si il n'est pas fréquent. Même si l'augmentation de l'entretien global n'est pas encore une conséquence établie de la dégradation des infrastructures suite au dégel du pergélisol, elle pourrait éventuellement devenir un élément clef dans l'analyse des coûts. La perte possible de l'infrastructure, à cause de la formation d'une cuvette non drainable, est aussi difficilement quantifiable. On peut donc supposer à juste titre, que la prise en compte de ce paramètre permettrait alors d'abaisser les conditions d'utilisation des techniques.

Un élément supplémentaire qui doit être pris en compte pour décider de l'implantation d'une technique est la longueur d'application. L'étude de rentabilité a été réalisée pour une longueur unitaire d'un mètre. Or d'un point de vue pratique, il n'est pas envisageable de construire

seulement quelques mètres d'une technique. D'une part, les effets de bord seraient très élevés et diminueraient donc l'efficacité de la technique employée. D'autre part, la mobilisation de l'équipement et de l'équipe pour une si petite longueur, augmenterait indéniablement les coûts de construction. Le rapport coût / bénéfice technique serait alors largement abaissé.

Chapitre 9

Conclusion

Les objectifs de ce projet étaient d'expérimenter, dans le cadre du Nunavik, de nouvelles techniques de mitigation telles le drain thermique et des techniques déjà utilisées à d'autres endroits du globe. De plus, il s'agissait de caractériser l'aspect économique de telles méthodes avec pour objectif une application à d'autres aéroports que celui de Tasiujaq.

L'analyse thermique a permis de démontrer que les méthodes utilisées avaient toutes un effet positif sur le régime thermique du sol. Elles permettent au mieux de refroidir le sol et au pire, de limiter le réchauffement. Certaines techniques, comme la pente douce, fonctionnent particulièrement bien car leur principe actif correspond exactement aux problématiques de Tasiujaq ; c'est-à-dire présence d'un fort vent et de problèmes d'enneigement différentiel. Les techniques remblai à convection d'air et drain thermique sont plus dépendantes du différentiel de température entre le sol et l'air. Elles pourront avoir une efficacité beaucoup plus grande dans des villages où ce différentiel est plus grand.

De plus, suite à l'analyse des profils thermiques, la problématique de la perturbation de la section de référence par un écoulement s'est posée. La modélisation a permis de développer une section de référence non perturbée. Cependant, beaucoup de zones restent floues autour de cette question de réchauffement par un écoulement d'eau. La quantification exacte de l'apport énergétique et l'analyse des mécanismes de transferts de chaleur sont deux pistes à approfondir.

L'analyse économique qui a été faite ne permet pas de prouver la rentabilité financière des techniques de mitigation. Cependant, les méthodes réduisent nettement le régime thermique, limitant ainsi les dégradations en surface de la piste, et améliore donc la viabilité de l'infrastructure. L'aspect sécurité des passagers est directement lié à l'état de la piste, et peut à lui seul, justifier l'utilisation de ces méthodes.

Le potentiel d'applicabilité des techniques dans d'autres aéroports requiert un approfondissement. En effet, les efficacités des méthodes sont dépendantes des contextes climatiques. En 45 années

de travaux depuis la première conférence internationale sur le pergélisol, aucune méthode universelle n'a été dégagée. Il existe seulement des méthodes adaptées à chaque situation. Ainsi toute future implantation devra être analysée à la lumière des conditions locales.

De nombreux axes d'études peuvent être poursuivis afin de continuer la documentation sur les techniques de mitigation. Tout d'abord, du point de vue des données thermiques, il serait judicieux de poursuivre l'analyse des données issues des sections en place. La construction d'une nouvelle section de référence, le remplacement du système de ventilation et le remplacement du SAD#3 permettraient de profiter pleinement d'un site d'essai complètement opérationnel, qui est encore très jeune et qui n'a pas encore livré tout son potentiel. Les mécanismes thermiques devant être analysés sur une période plus longue que 3 années. Par ailleurs, du point de vue des modélisations, de nombreux axes d'études sont à approfondir. Les modèles, déjà réalisés, peuvent être affinés en tenant compte de l'écoulement dû à la fonte des neiges. Le modèle de la section de référence pourrait être amélioré en imposant comme condition limite la température extérieure au-dessus d'une certaine épaisseur de neige, au lieu de la température à la surface du sol. Enfin, les modèles qui s'attachent à décrire les prévisions climatiques, pourraient être appliqués comme condition limite caractérisant l'air extérieur. Cela permettrait alors de prévoir le comportement futur des sections étudiées ici. Ainsi de nombreuses suites peuvent être données à ce projet.

Bibliographie

- Allard, M., Fortier, R., Savard, C., Guimond, A., Tarussov, A., (2007), *L'évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur la stabilité des pistes d'atterrissage au Nunavik : première étape vers une stratégie d'entretien*, 20 p.
- Allard, M., K-Seguin, M., (1987), *Le pergélisol au Québec nordique : bilan et perspectives*, Géographie physique et Quaternaire, vol 41, n° 1, p. 141-152.
- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Fortier, D., Chaumont, D., Savard, J.P., Tarrussov, A., (2009), *L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes*, Rapport de recherche, Centre d'études Nordiques, Université Laval, 198 p.
- Anisimov, O.A., Poliakov, V.Y., (2003), *GIS assessment of climate-change impacts in permafrost regions*, 8th international conference on permafrost, proceedings, Zurich Switzerland 2003, p. 9-14.
- Aus des Beek, T., Teichert, E., (2008), *Global simulation of permafrost distribution in the past, present and future using the frost number method*, 9th international conference on permafrost, vol. 1, Fairbanks Alaska 2008, p. 71-76.
- Berg, R.L., (1984), *Status of numerical models for heat and mass transfer in frost-susceptible soils*, 4th international conference on permafrost, 2 volumes final proceedings, Washington 1984, p. 67-71.
- Bell, J.R., Allen, T., Vinson, T.S., (1984), *Properties of geotextiles in cold regions application*, 4th international conference on permafrost, proceedings, Washington 1984, p. 51-56.
- Binxiang, S., Lijun, Y., Xuezu, X., (2006), *Onset and evaluation on winter-time natural convection cooling effectiveness of crushed-rock highway embankment*, Cold Regions Science and Technology, 48, p. 218-231.
- Binxiang, S., Yang, L., Liu, Q., Wang, W., Xu, X., (2009), *Numerical analysis for critical thickness of crushed rock revetment layer on Qinghai-Tibet Railway*, Cold Regions Science and Technology, 57, p. 131-138.
- Burn, C.R., (1997), *The response (1958-1997) of permafrost and near-surface ground temperatures to forest fire, Takhini River valley, southern Yukon territory*, Can. J. Earth Sci., 35, p. 184-199.
- Brown, R.J.E., (1966), *Influence of vegetation on permafrost*, 1st international conference on permafrost, proceedings, Lafayette Indiana 1966, p. 20-25.
- Brown, R.J.E., (1966*), *Relation between mean annual air and ground temperature in the permafrost region of Canada*, 1st international conference on permafrost, proceedings, Lafayette Indiana 1966, p. 241-247.
- Carlson, H., Kersten, M.S., (1952), *Calculation of depth of freezing and thawing under pavements*, Highway res. Board bull.
- Chataignier, Y., Gosselin, L., Doré, G., (2009), *Optimization of embedded inclined open-ended channel in natural convection used as heat drain*, International Journal of thermal sciences, 48, p. 1151-1160.
- Cheng, G., Zhang, J., Sheng, Y., Chen, J., (2004), *Principle of thermal insulation for permafrost protection*, Cold Regions Science and Technology, 40, p. 71-79.
- Cheng, G., Sun, Z., Niu, F., (2007), *Application of the roadbed cooling approach in Qinghai-Tibet railway engineering*, Cold Regions Science and Technology, 53, p. 241-258.

- Christensen, J.H., Stendel, M., Kuhry, P., Romanovsky, V., Walsh, J., (2008), *Does permafrost deserve attention in comprehensive climate models?*, 9th international conference on permafrost, vol. 1, Fairbanks Alaska 2008, p. 247-250.
- Clarke, J., Fenton, C., Gens, A., (2008), *A multi-disciplinary approach to assess the impact of global climate change on infrastructure in cold regions*, 9th international conference on permafrost, vol. 1, Fairbanks Alaska 2008, p. 279-284.
- Dion, S., (2009), *Analyse du comportement d'un remblai ferroviaire sur pergélisol*, Mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'Université Laval, Université Laval, Québec.
- Dong, Y., Lai, Y., Li, J., Yang, Y., (2010), *Laboratory investigation on the cooling effect of crushed-rock interlayer embankment with ventilated ducts in permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, 61, p. 136-142.
- Dong, Y., Lai, Y., Xu, X., Zhang, S., (2010*), *Using perforated ventilation ducts to enhance the cooling effect of crushed-rock interlayer on embankments in permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, 62, p. 76-82.
- Doré, G., Beaulac, I., (2007), *Impact de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport aérien et routier au Nunavik et adaptation*, Rapport de l'université Laval, remis au ministère des transports du Québec, Novembre 2007.
- Doré, G., Sthur-Jorgensen, A., (2009), *Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures du Nunavik : aéroport de Tasiujaq*, Rapport d'étape n° 2, rapport GCT-2008-08, université Laval, 46 p.
- Dysli, M., (1991), *Le gel et son action sur les sols et les fondations*, Complément au traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Esch, D.C., (1973), *Control of permafrost degradation beneath a roadway by subgrade isolation*, 2nd international conference on permafrost, North American contributions, Washington DC 1973, p. 608-622.
- Esch, D.C., (1984), *Design and performance of road and railway embankments on permafrost*, 4th international conference on permafrost, 2 volumes final proceedings, Washington 1984, p. 25-30.
- Esch, D., (1988), *Roadway embankments on warm permafrost problems and remedial treatments*, 5th international conference on permafrost, 2 volumes, Norway 1988, p. 1223-1228.
- Fortier, R., Aubé-Maurice, B., (2008), *Fast permafrost degradation near Umiujaq in Nunavik (Canada) since 1957 assessed from time-lapse aerial and satellite photographs*, 9th international conference on permafrost, vol. 1, Fairbanks Alaska 2008, p. 457-462.
- Fujun, N., Guodong, C., Lifeng, M., (2006), *Field experiment study on effects of duct-ventilated railway embankment on protecting the underlying permafrost*, Cold Regions Science and Technology, 45, p. 178-192.
- Gandhal, R., (1978), *Some aspects on the design of roads with boards of plastic foam*, 3rd international conference on permafrost, proceedings 1 volume, Ottawa 1978, p. 792-797.
- Goering, D.J., (2003), *Passively cooled railway embankments for use in permafrost area*, Journal of Cold Regions Engineering, Vol. 17, N°. 3, September 2003, p. 119-133.
- Goering, D.J., Kumar, P., (1995), *Winter-time convection in open-graded embankments*, Cold Regions Science and Technology, 24, p. 57-74.
- Granberg, H.B., (1973), *Indirect mapping of the snowcover for permafrost prediction at Schefferville Québec*, 2nd international conference on permafrost, North American contributions, Washington DC 1973, p. 113-120.

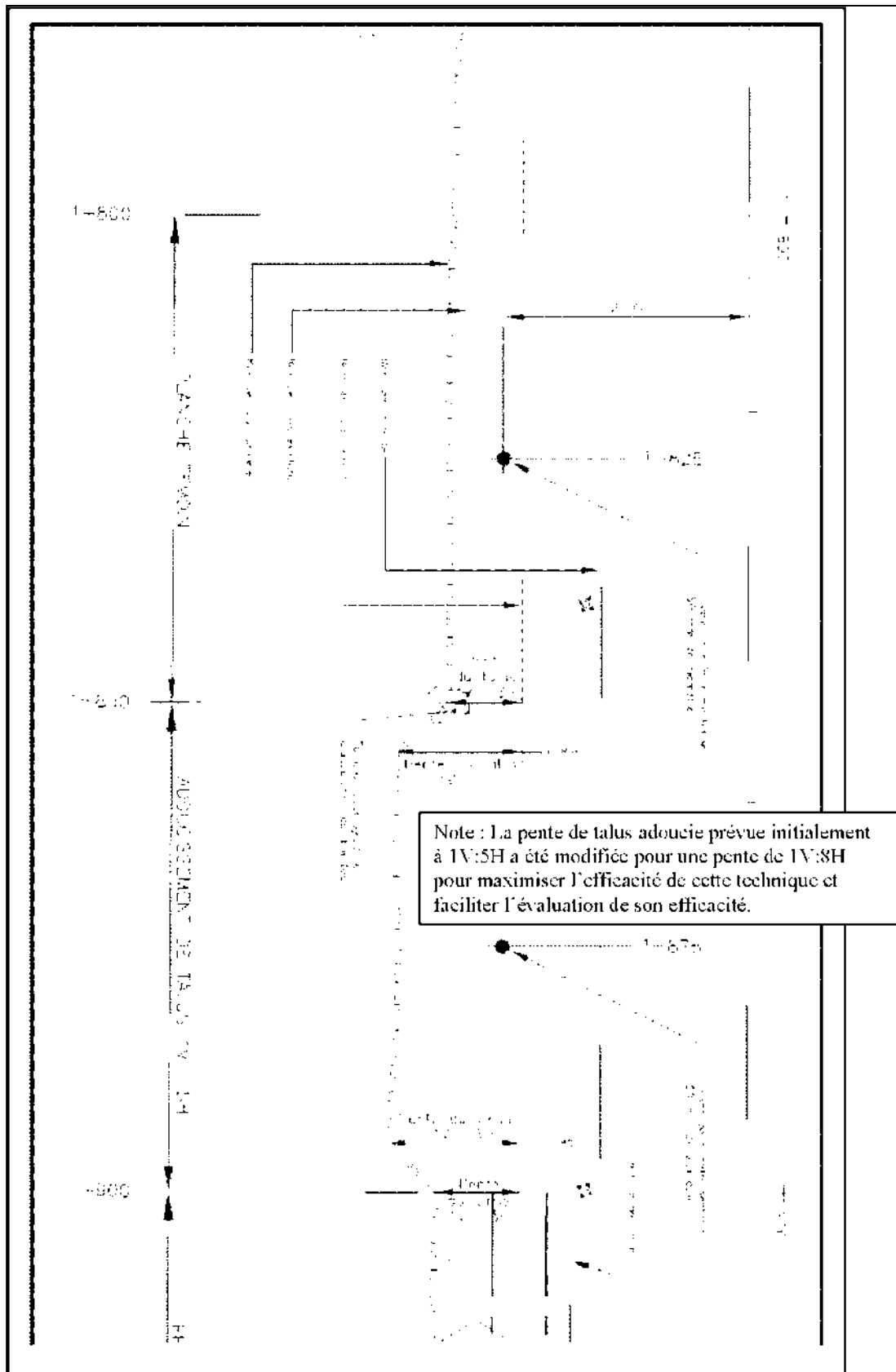
- Guoyu, L., Ning, L., Xiaojuan, Q., (2005), *The temperature features for different ventilated-duct embankments with adjustable shutters in the Qinghai-Tibet railway*, Cold Regions and Technology, 44, p. 99-110.
- Hachem, S., Allard, M., Duguay, C., (2008), *A new permafrost map of Quebec-Labrador derived from near-surface temperature data of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, 9th international conference on permafrost, vol. 1, Fairbanks Alaska 2008, p. 591-596.
- Haerberli, W., Hohmann, R., (2008), *Climate, glaciers and permafrost in the Swiss Alps 2050: scenarios, consequences and recommendations*, 9th international conference, vol. 1, Fairbanks Alaska 2008, p. 607-612.
- Hermansson, A., (2004), *Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: comparison of calculated and measured temperatures*, Cold Regions Science and Technology, 40, p. 1-17.
- Instanes, A., (2003), *Climate change and possible impact on Arctic infrastructure*, 8th international conference on permafrost, proceedings, Zurich Switzerland 2003, p. 461-466.
- Jorgensen, A.S., Doré, G., Voyer, E., Chataignier, Y., Gosselin, L., (2008), *Assessment of the effectiveness of two heat removal techniques for permafrost protection*, Cold Regions Science and Technology, 53, p. 179-192.
- Jorgensen, A.S., Ingeman-Nielsen, T., (2008*), *The impact of light-colored pavements on active layer dynamics revealed by ground-penetrating radar monitoring*, 9th international conference on permafrost, Fairbanks Alaska 2008, p. 865-868.
- Karray, M., Ethier, Y., Lefebvre, G., (2009), *Relevés MASW au site de l'aéroport de Puvirnituq*, Rapport présenté à l'Université Laval, dossier ULAG-09-01S.
- Krahn, J., (2004), *Thermal modeling with TEMP/W*, GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, 282 p.
- Kuo-Tung, C., Tung, P.L., (1978), *Experimental research on an embankment in an area with massive ground ice at the lower limit of alpine permafrost*, 3rd international conference on permafrost, proceedings 2 volumes, Ottawa 1978, p. 199-221.
- Lemelin, J-C., Doré, G., Pierre, P., Juneau, S., (2008), *Expérimentation de méthodes de mitigation des effets de la fonte du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik-aéroport de Tasiujaq*, Rapport d'étape n°1, rapport GCT-2008-04, Université Laval, 43 p.
- Li, G., Li, N., Kang, J., (2006), *Preliminary study on cooling effect mechanisms of Qinghai-Tibet railway embankment with open crushed-stone side slope in permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, 45, p. 193-201.
- Lunardini, V.J., (1978), *Theory of n-factors and correlation of data*, Proceeding of 3rd international conference on permafrost, vol. 1, Edmonton, Canada, p. 41-46.
- Ma, W., Feng, G., Wu, Q., Wu, J., (2007), *Analyses of temperature fields under the embankment with crushed-rock structures along the Qinghai-Tibet Railway*, Cold Regions Science and Technology, 53, p. 259-270.
- Ma, W., Zhang, L., Wu, Q., (2008), *Control of asymmetrical subgrade temperature with crushed-rock embankments along the permafrost region of the Qinghai-Tibet railway*, 9th international conference on permafrost, vol. 2, Fairbanks Alaska 2008, p. 1099-1104.
- McHattie, R.L., Esch, D.C., (1984), *Benefits of a peat underlay used in road construction on permafrost*, 4th international conference on permafrost, proceedings, Washington 1984, p. 826-831.

- Ministère des transports du Québec, (2006), *L'impact du réchauffement climatique dans le nord du Québec*, Mémoire à la commission parlementaire des transports et de l'environnement, 31p.
- Mu, Y., Ma, W., Liu, Y., Sun, Z., (2010), *Monitoring investigation on thermal stability of air-convection crushed-rock embankment*, Cold Regions Science and Technology, 62, p. 160-172.
- Nicholson, F.H., Granberg, H.B., (1973), *Permafrost and snowcover relationships near Schefferville*, 2nd international conference on permafrost, North American contributions, Washington DC 1973, p. 151-158
- Osterkamp, T.E., (2008), *Thermal state of permafrost in Alaska during the fourth quarter of the twentieth century*, 9th international conference on permafrost, vol. 2, Fairbanks Alaska 2008, p. 1333-1338.
- Osterkamp, T.E., Burn, C.R., (2003), *Permafrost*, Elsevier Science
- Philleo, E.S., (1966), *Guides for engineering projects on permafrost*, 1st international conference on permafrost, proceedings, Lafayette Indiana 1966, p. 508-512
- Ping, H., Zhao, Z., Guodong, C., Hui, B., (2006), *Ventilation properties of blocky stones embankments*, Cold Regions Science and Technology, 47, p. 271-275.
- Quan, X., Li, N., Li, G., (2006), *A new ripraped-rock slope for high temperature permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, 45, p. 42-50.
- Reimchen, D., Doré, G., Fortier, D., Stanley, B., Walsh, R., (2009) *Cost and constructability of permafrost test sections along the Alaska highway, Yukon*, 2009 annual conference transportation association of Canada, Vancouver British Columbia, 20 p.
- Ressources naturelles Canada, Transports Québec, Service de la géomatique
- Rzhanitsin, B.A., Zhukov, V.F., Kuryachin, A.N., (1966), *Thawing and consolidation of permafrost prior to construction*, 1st international conference on permafrost, proceedings, Lafayette Indiana 1966, p. 538-541.
- Smith, N., Berg, R., Muller, L., (1973), *The use of polyurethane foam plastics in the construction of expedient roads on permafrost in central Alaska*, 2nd international conference on permafrost, North American contributions, Washington DC 1973, p. 736-745.
- TAC, (2010), *Guidelines for development and management of transportation infrastructure in permafrost regions*, Transportation association of Canada, Ottawa, Canada, 2010
- Walsh, J.E., (2008), *Simulations of present climate and future regional projections*, 9th international conference on permafrost, vol. 2, Fairbanks Alaska 2008, p. 1911-1916.
- Wei, M., Guodong, C., Qingbai, W., (2009), *Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai-Tibet railroad*, Cold Regions Science and Technology, 59, p. 3-11.
- Wen, Z., Sheng, Y., Ma, W., Qi, J., (2007), *In situ experimental study on thermal protection effects of the insulation method on warm permafrost*, Cold Regions Science and Technology, 53, p. 369-381.
- Xu, J., Goering, D.J., (2007), *Experimental validation of passive permafrost cooling systems*, Cold Regions Science and Technology, 53, p. 283-297.
- Ya-Ling, C., Yu, S., Zhen-ming, W., Wei, M., (2008), *Calculation of temperature differences between the sunny slopes and the shady slopes along railways in permafrost regions on Qinghai-Tibet plateau*, Cold Regions Science and Technology, 53, p. 346-354.
- Yu, W., Lai, Y., Zhang, X., Niu, F., (2005), *Experimental study on the ventiduct embankment in permafrost regions of the Qinghai-Tibet railroad*, Journal of cold regions engineering, Vol. 19, N° 2, June 2005, p. 52-60.

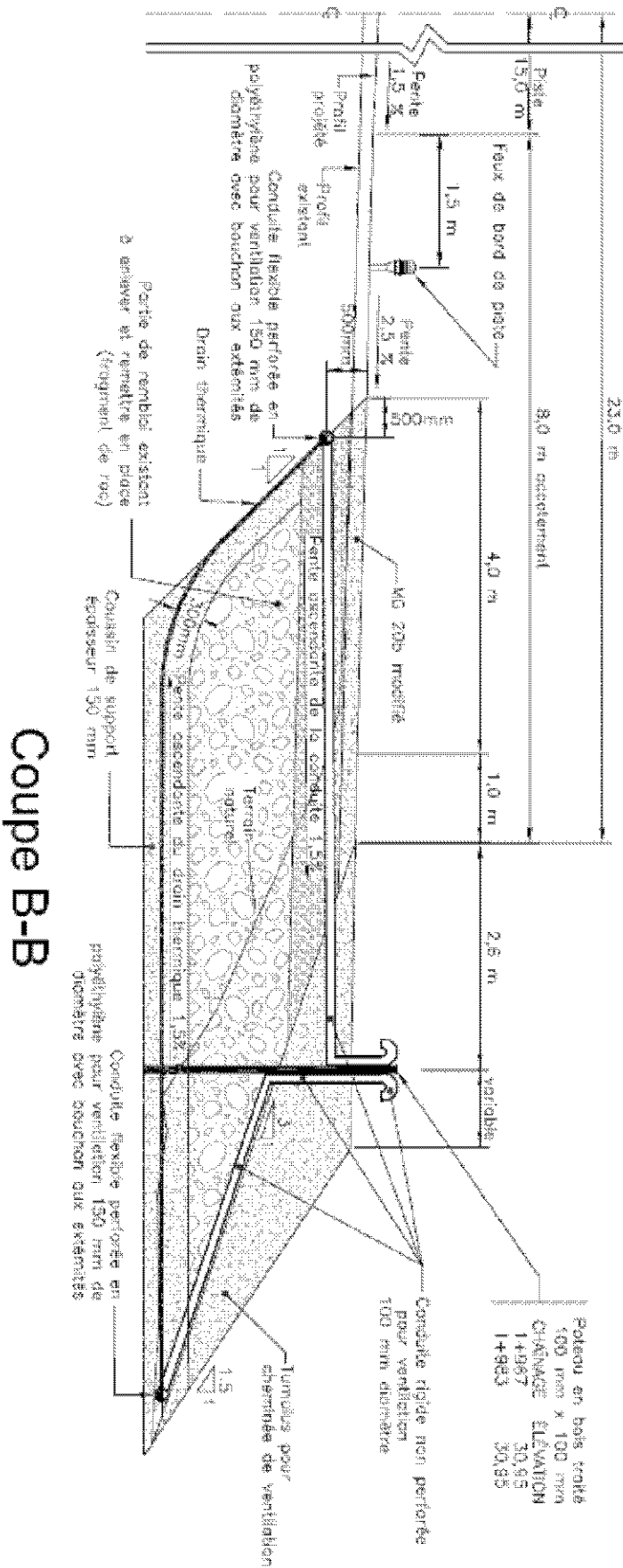
- Yu, W., Lai, Y., Zhang, X., Zhang, S., Xiao, J., (2003), *Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, 38, p. 31-42.
- Zarling, J.P., Braley, W.A., Esch, D.C., (1988), *Thaw stabilization of roadway embankments*, 5th international conference on permafrost, 2 volumes, Norway 1988, p. 1352-1357.
- Zarling, J.P., Connor, B., Goering, D.J., (1984), *Air duct system for roadway stabilization over permafrost areas*, 4th international conference on permafrost, proceedings, Washington 1984, p. 1463-1468.
- Zarling, J.P., Sorensen, S., Shangin, M., (2008), *N-factors and soil temperatures adjacent to the vertical support members on the Trans Alaska pipeline system*, 9th international conference on permafrost, vol. 2, Fairbanks Alaska 2008, p. 2027-2032.
- Zhang, M., Lai, Y., Dong, Y., (2009), *Numerical study on temperature characteristics of expressway embankment with crushed-rock revetment and ventilated ducts in warm permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, 59, p. 19-24.
- Zhang, M., Lai, Y., Dong, Y., Li, S., (2008), *Laboratory investigation on cooling effect of duct-ventilated embankment with a chimney in permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, 54, p. 115-119.
- Zhi, W., Yu, S., Wei, M., Jilin, Q., Wu, J., (2005), *Analysis on effect of permafrost protection by two-phase closed thermosyphon and insulation jointly in permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, 43, p. 150-163.

Annexe 1 :

Sections types des remblais d'essais



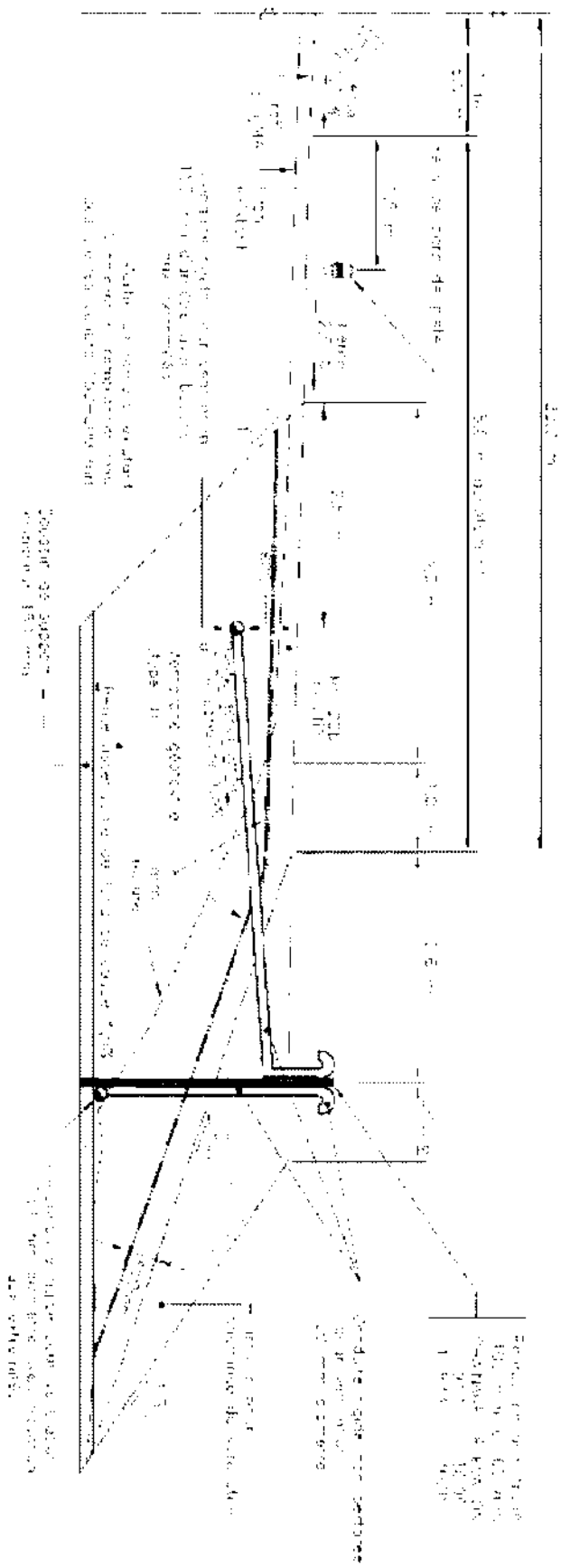
Coupe type du drain thermique
Chainages 1+950 à 2+000



Coupe B-B

Lettre d'accompagnement		Description		Particularités	
Direction Générale de Montréal et de l'Ouest		Transports Québec		2006	
Direction de l'Abitibi-Témiscamie-Nord-du-Québec		Service des Projets		MMA-MN-41	
				Établi par	
				, 21.0.	
				M000/06 par	
				, 1/2.	

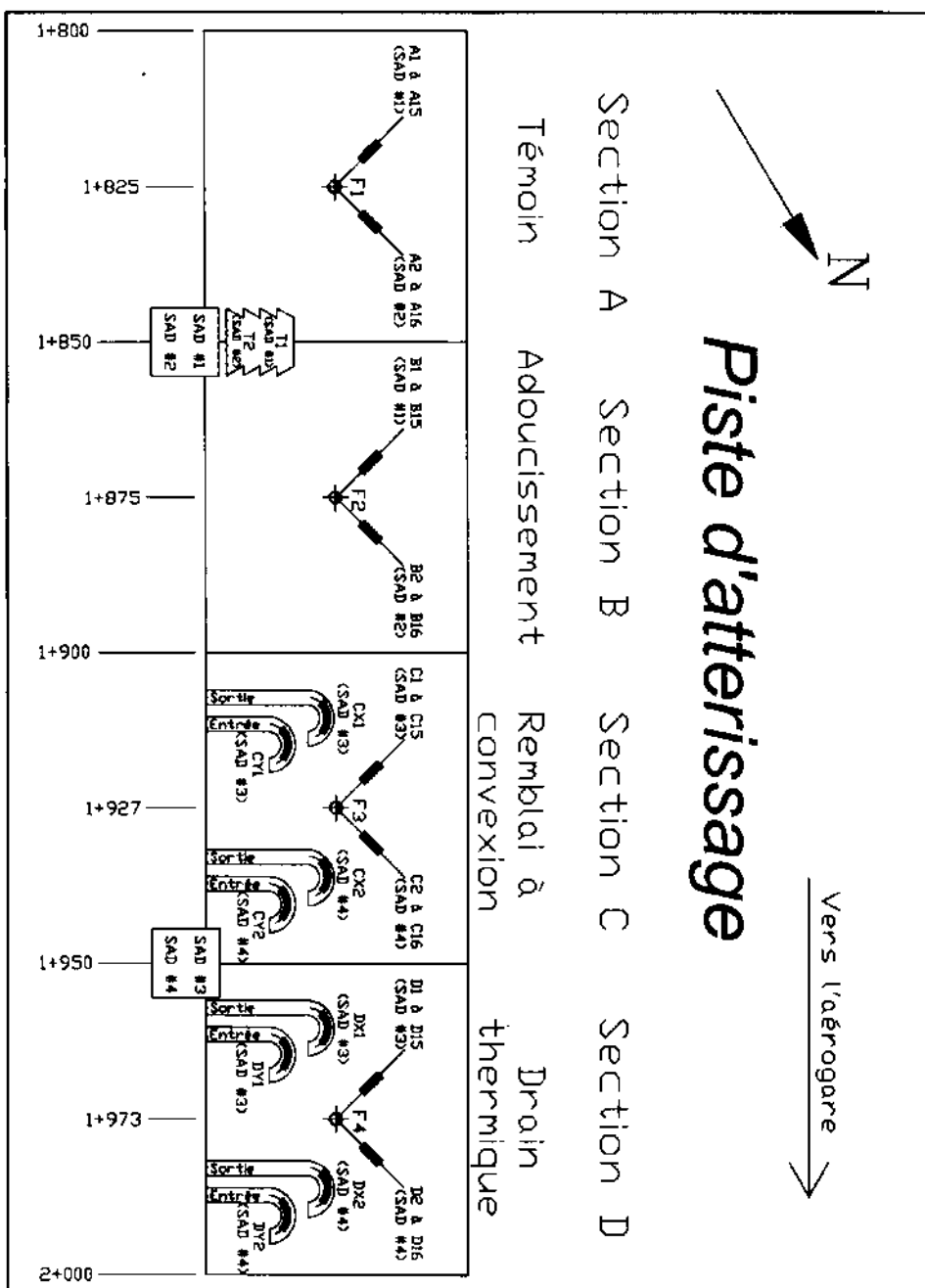
Coupe type du remblai à convection Chainages 1+900 à 1+950



Annexe 2 :

Disposition de l'instrumentation dans les sections

Tasujag-Plan



Tasiujaq-Coupes (sec. A et B)

Section A

Témoïn

A1 à A15 A2 à A16
(SAD #1) (SAD #2)

(m)	Elevation surface: 29,68m	
30,00		
29,75		
29,50		
29,25	A1 0,61m	
29,00		A2 0,61m
28,75		
28,50	A3 1,18m	
28,25		A4 1,45m
28,00	A5 1,78m	
27,75	Terrain naturel à 19,8m	
27,50		A6 2,06m
27,25	A7 2,38m	
27,00		A8 2,65m
26,75		
26,50	A9 2,98m	
26,25		A10 3,24m
26,00	A11 3,57m	
25,75		A12 3,83m
25,50	A13 4,17m	
25,25		A14 4,45m
25,00	A15 4,78m	
24,75		A16 5,05m
24,50		
24,25		
24,00		

Section B

Adoucissement

B1 à B15 B2 à B16
(SAD #1) (SAD #2)

(m)	Elevation surface: 29,96m	
30,00		
29,75	B1 0,06m	B2 0,06m
29,50	B3 0,29m	
29,25		B4 0,57m
29,00	B5 0,90m	
28,75		B6 1,16m
28,50	B7 1,49m	
28,25		B8 1,76m
28,00	B9 2,10m	
27,75		B10 2,35m
27,50	Terrain naturel à 2,5m	
27,25	B11 2,69m	B12 2,92m
27,00		
26,75	B13 3,29m	
26,50		B14 3,53m
26,25	B15 3,88m	
26,00		B16 4,12m
25,75		
25,50		
25,25		
25,00		
24,75		
24,50		
24,25		
24,00		

Tasiujaq-Coupes (sec. C et D)

Section C

Remblai à convection

C1 à C15
(SAD #3) C2 à C16
(SAD #4)

(m)	Élévation surface: 29,79m	
30,00		
29,75		
29,50		
29,25	C1 ■ 0,63m	
29,00		C2 ■ 0,93m
28,75	C3 ■ 1,24m	
28,50		C4 ■ 1,54m
28,25	C5 ■ 1,82m	
28,00		C6 ■ 2,14m
27,75		C7 ■ 2,42m
27,50		C8 ■ 2,74m
27,25	Terrain naturel à 258m	
27,00	C9 ■ 3,01m	
26,75		C10 ■ 3,33m
26,50		C11 ■ 3,57m
26,25		C12 ■ 3,83m
26,00		C13 ■ 4,22m
25,75		C14 ■ 4,51m
25,50		C15 ■ 4,81m
25,25		C16 ■ 5,10m
25,00		
24,75		
24,50		
24,25		
24,00		

Section D

Drain thermique

D1 à D15
(SAD #3) D2 à D16
(SAD #4)

(m)	Élévation surface: 29,79m	
30,00		
29,75		
29,50		
29,25	D1 ■ 0,76m	
29,00		D2 ■ 1,06m
28,75		D3 ■ 1,37m
28,50		D4 ■ 1,68m
28,25		D5 ■ 1,98m
28,00		D6 ■ 2,28m
27,75		D7 ■ 2,58m
27,50		D8 ■ 2,87m
27,25	Terrain naturel à 258m	
27,00		D9 ■ 3,18m
26,75		D10 ■ 3,52m
26,50		D11 ■ 3,83m
26,25		D12 ■ 4,16m
26,00		D13 ■ 4,44m
25,75		D14 ■ 4,72m
25,50		D15 ■ 4,99m
25,25		D16 ■ 5,26m
25,00		
24,75		
24,50		
24,25		
24,00		

Annexe 3 :

Analyse des données mensuelles

Dans cette annexe, les données thermiques sont présentées de manière à caractériser l'évolution au cours de la période de suivi. Pour chaque mois sont figurées les températures à midi le 1^{er} et le 15^{ème} jour du chaque mois en fonction de la profondeur. Chaque section est identifiée par une couleur que l'on retrouvera dans tout le document.

A.1. Septembre 2007

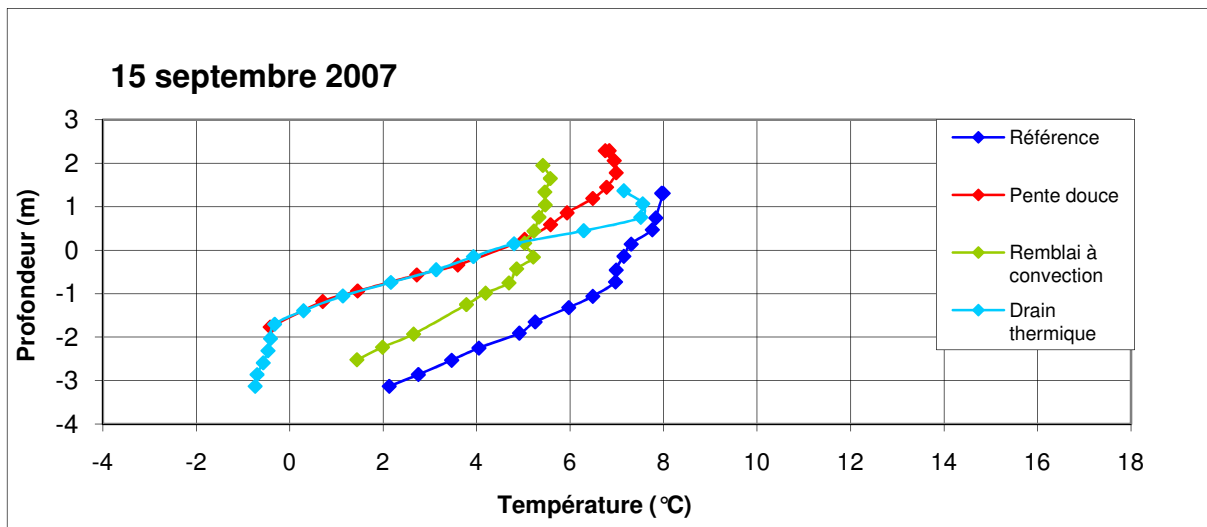


Figure A-1. Régimes thermiques des quatre sections le 15 septembre 2007.

La période du 15 septembre 2007 fait directement suite à la mise en place des sections. Les travaux ayant été achevés la veille. L'entrepreneur a fait au mieux afin de limiter les perturbations thermiques. Les sections qui ont dues être excavées, ont été laissées un minimum de temps à l'air libre. Cependant, toutes les sections ont été affectées par un réchauffement suite à la mise en place.

A.2. Octobre 2007

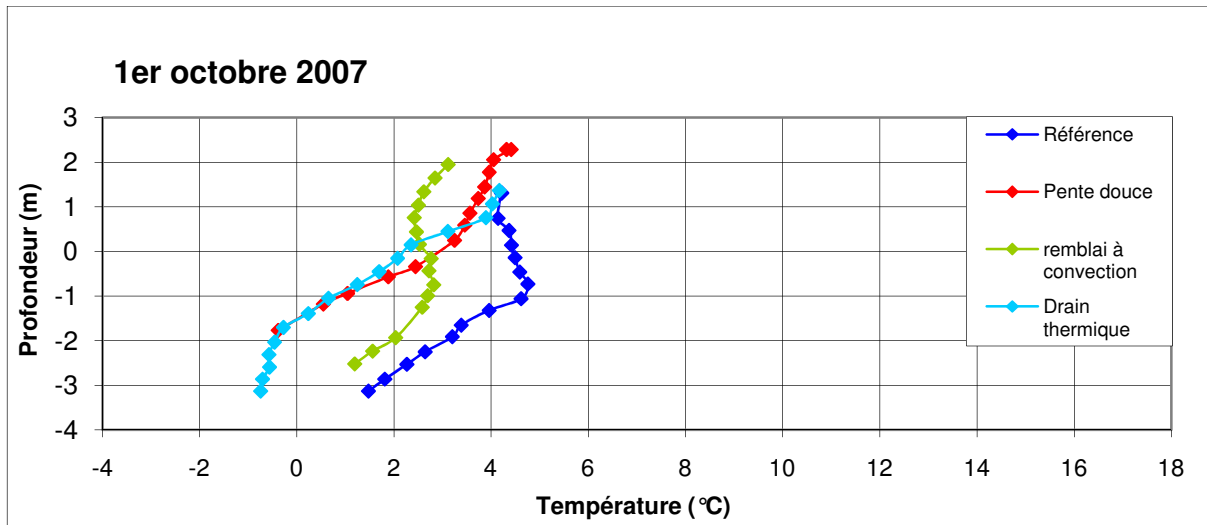


Figure A-2. Régimes thermiques des quatre sections le 1er octobre 2007.

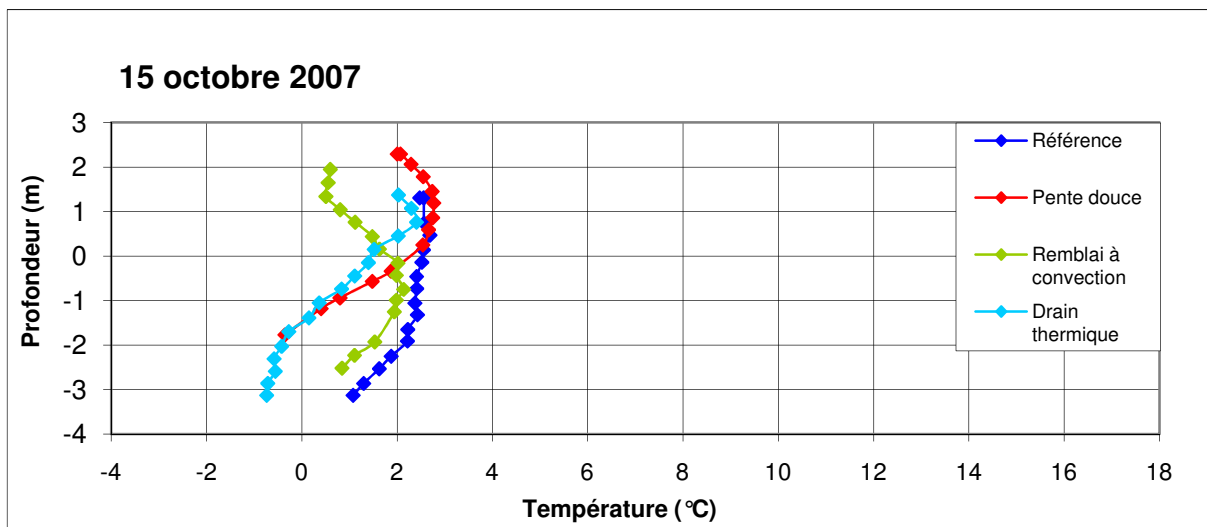


Figure A-3. Régimes thermiques des quatre sections au 15 octobre 2007

Au mois d'octobre 2007, les sections sont toujours perturbées par les conséquences de la construction. Les sections de référence et à remblai à convection d'air sont celles qui sont le plus affectées. La perturbation est ressentie jusque dans le sol naturel. A 2 mètres de profondeur sous le contact remblai/sol naturel, ces deux sections sont nettement plus chaudes : 3,5°C pour la section de référence, 2°C pour la section à remblai à convection d'air et seulement -0,5°C pour la section à drain thermique. Cependant, dans le remblai, la section (C) est la plus froide. Cela n'est

pas très significatif car les sections ne sont pas encore dans leur période de fonctionnement normal.

A.3. Novembre 2007

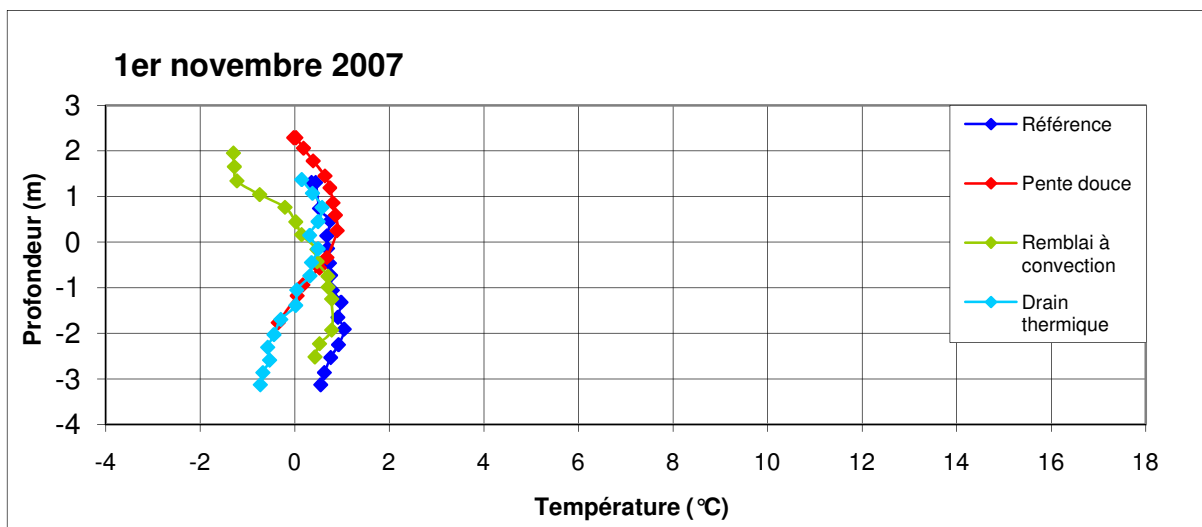


Figure A-4. Régimes thermiques des quatre sections au 1er novembre 2007

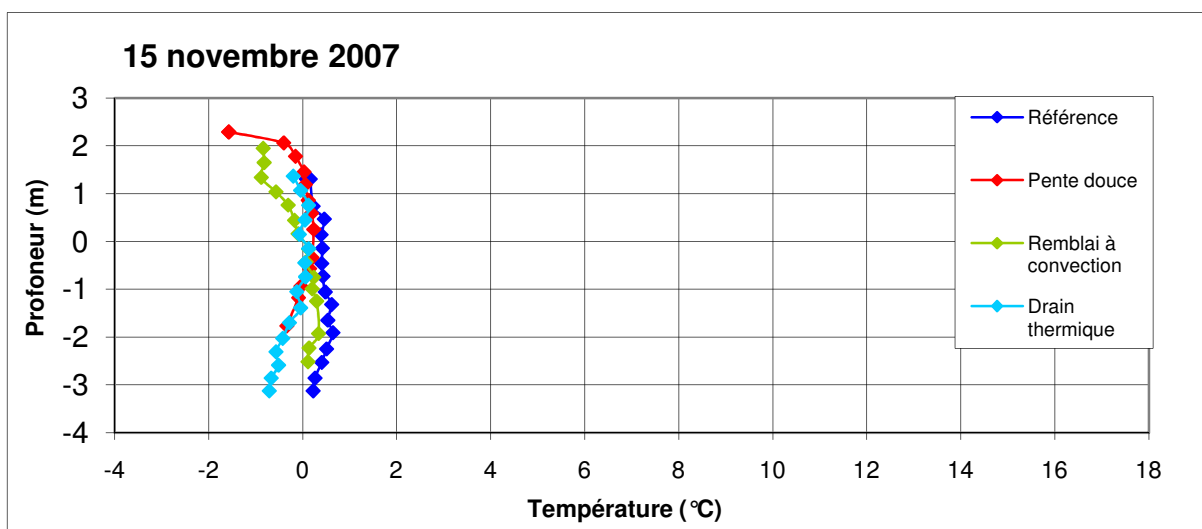


Figure A-5. Régimes thermiques des quatre sections au 15 novembre 2007

Le mois de novembre 2007 correspond à la fin des perturbations pour les différentes sections. Au 15 novembre, les différentes sections connaissent des régimes thermiques similaires. A l'interface remblai / sol naturel et dans le mètre situé en dessous, les températures sont très proches pour les

différentes sections ; elles sont comprises entre $-0,2$ et $0,4^{\circ}\text{C}$. Les températures froides de l'hiver apparaissent donc en surface à un moment où les perturbations se terminent.

A.4. Décembre 2007

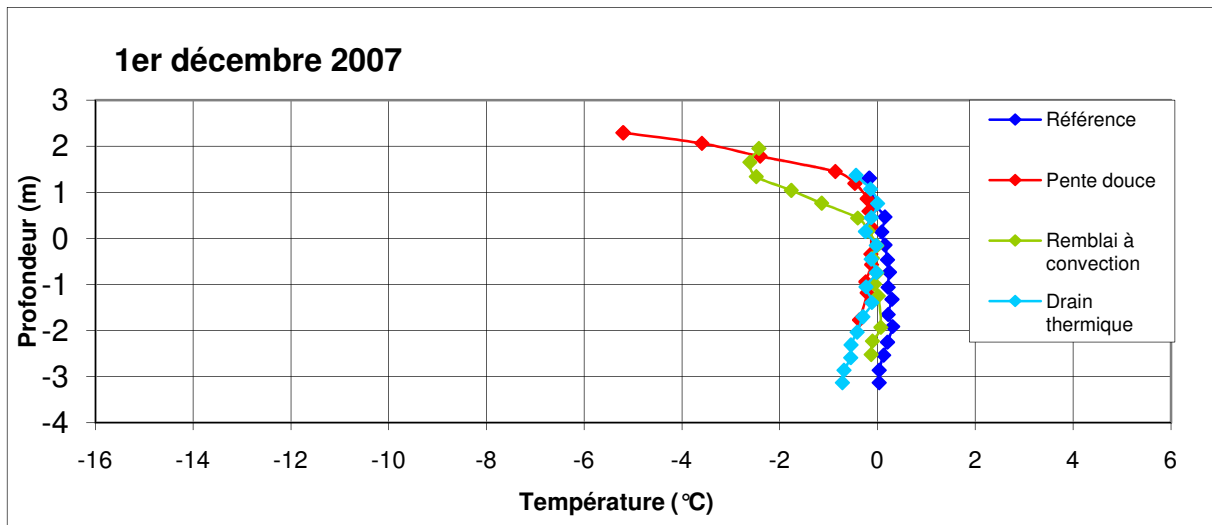


Figure A-6. Régimes thermiques des quatre sections au 1er décembre 2007

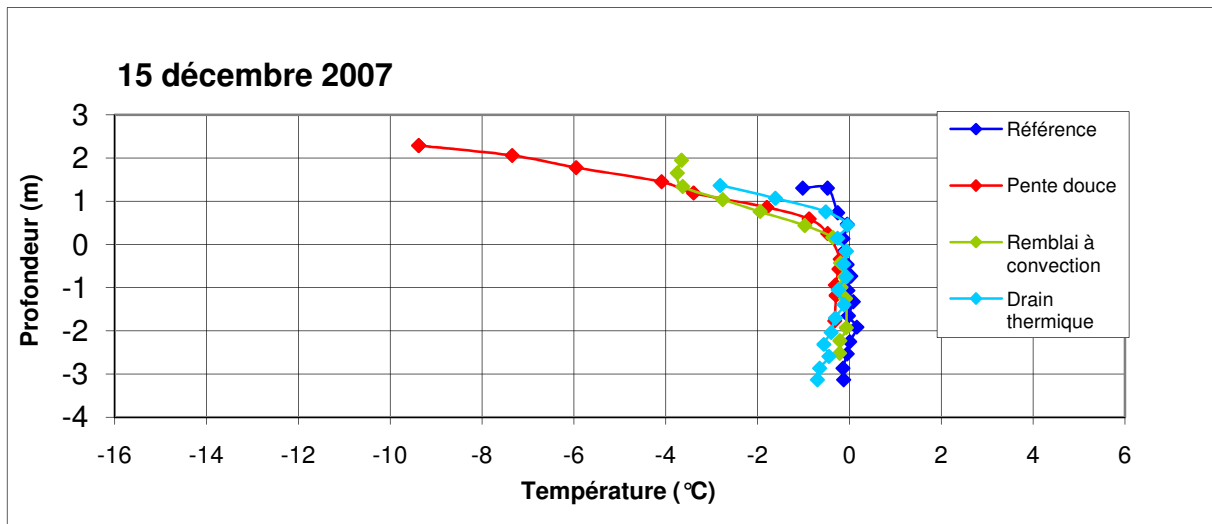


Figure A-7. Régimes thermiques des quatre sections au 15 décembre 2007

A partir de ce moment, les températures extérieures tombent nettement sous le point de congélation. On note que les trois techniques de mitigation refroidissent efficacement le remblai

comparativement à la section de référence. Au 15 décembre, à 1 mètre de hauteur dans le remblai, la section de référence est $2,3^{\circ}\text{C}$ plus chaude que les sections (B) et (C), et $1,2^{\circ}\text{C}$ plus chaude que la section (D).

A.5. Janvier 2008

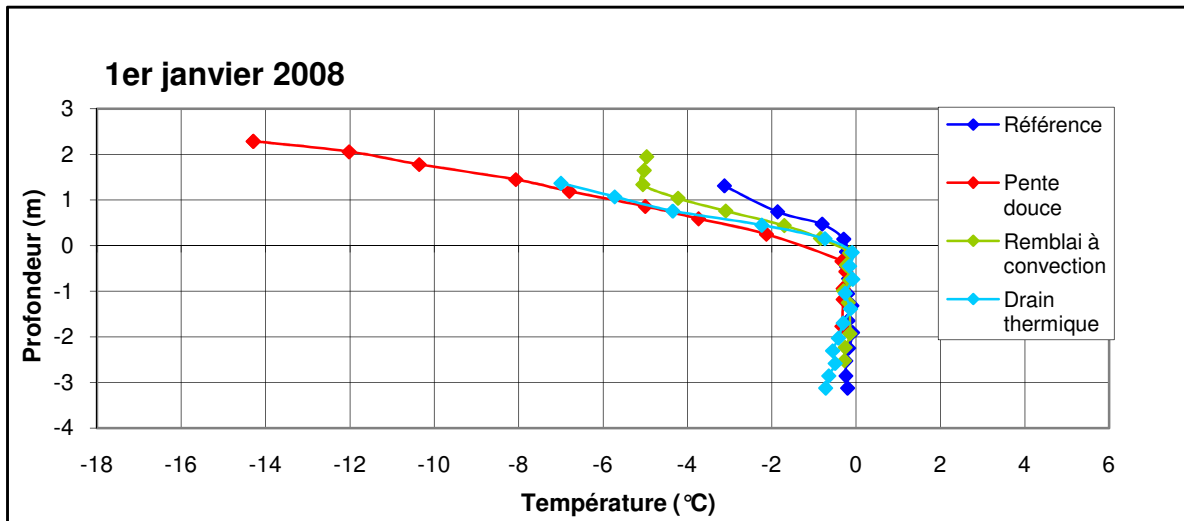


Figure A-8. Régimes thermiques des quatre sections au 1er janvier 2008

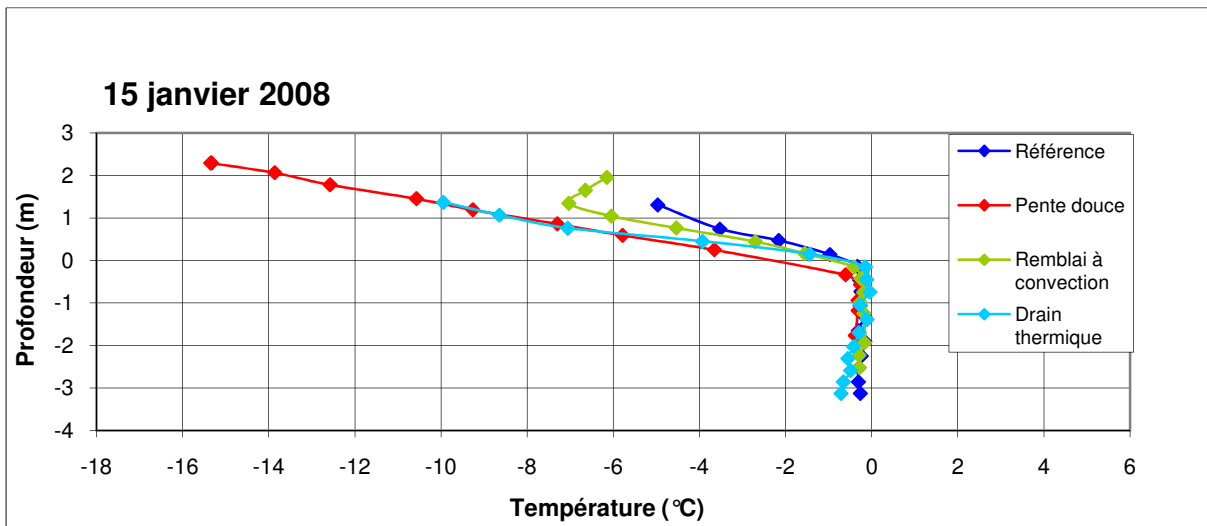


Figure A-9. Régimes thermiques des quatre sections au 15 janvier 2008

Au cours du mois de janvier, le refroidissement est massif pour les différentes sections. Les sections à pente douce et à drain thermique se distinguent par un refroidissement encore plus prononcé que les autres sections : à 1 mètre de hauteur dans le remblai, la température est $-8,3^{\circ}\text{C}$ pour ces deux sections, -6°C pour la section à convection et -4°C pour la section de référence. Le refroidissement affecte seulement le sol naturel de la section (B). On note de plus, une inversion du refroidissement proche de la surface de la section à remblai à convection d'air. Les

thermistances enregistrent ici une accumulation de chaleur dans la partie haute du remblai. Cette section étant « fermée » par un géotextile et une couche de matériau moins conducteur que le matériau de remblai. La chaleur se déplace par convection dans le remblai et s'accumule par gravité dans la partie haute de la section. Arrivée dans la partie haute, la chaleur a deux possibilités pour s'évacuer. Soit elle s'évacue à travers le géotextile et la couche de matériau mais cela se fait par conduction et ce mécanisme est beaucoup plus lent que la convection. Soit la chaleur est expulsée par le système de ventilation. La mauvaise évacuation de la chaleur laisse penser que le système de ventilation n'est pas suffisamment efficace. Le faible nombre de trou dans les conduites de ventilation est une cause plausible au mauvais fonctionnement.

A.6. Février 2008

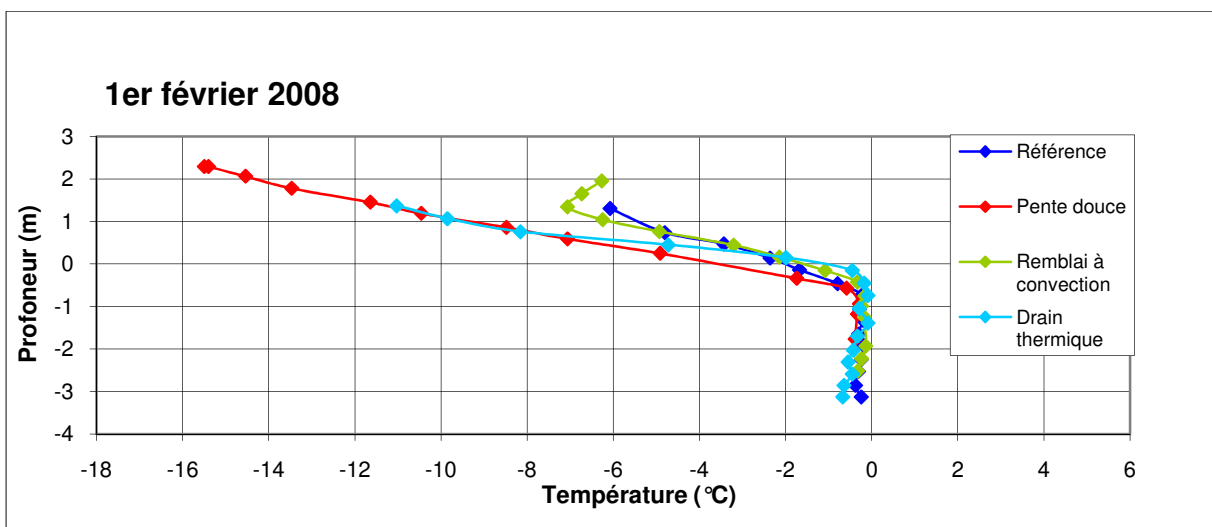


Figure A-10. Régimes thermiques des quatre sections au 1er février 2008

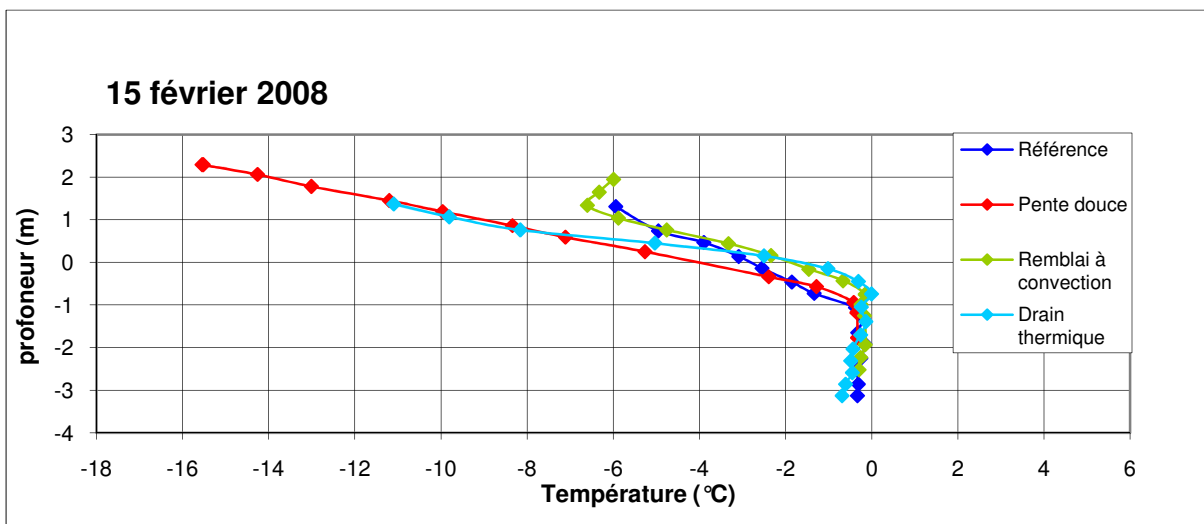


Figure A-11. Régimes thermiques des quatre sections au 15 février 2008

Au cours du mois de février 2008, les températures à la surface des sections évoluent peu. Cependant, le froid pénètre en profondeur ; entre 0 et 1 mètre de profondeur, les comportements des sections doivent être détaillés. Juste sous le contact remblai / sol naturel, la section à pente douce est la plus efficace, suivi de la section de référence puis des deux autres sections. Proche de 1 mètre de profondeur, la section de référence est la plus froide. Les techniques de mitigation refroidissent avec force le remblai mais sont moins efficaces que la section de référence proche de 1 mètre de profondeur. En dessous de cette profondeur, les comportements sont semblables.

A.7. Mars 2008

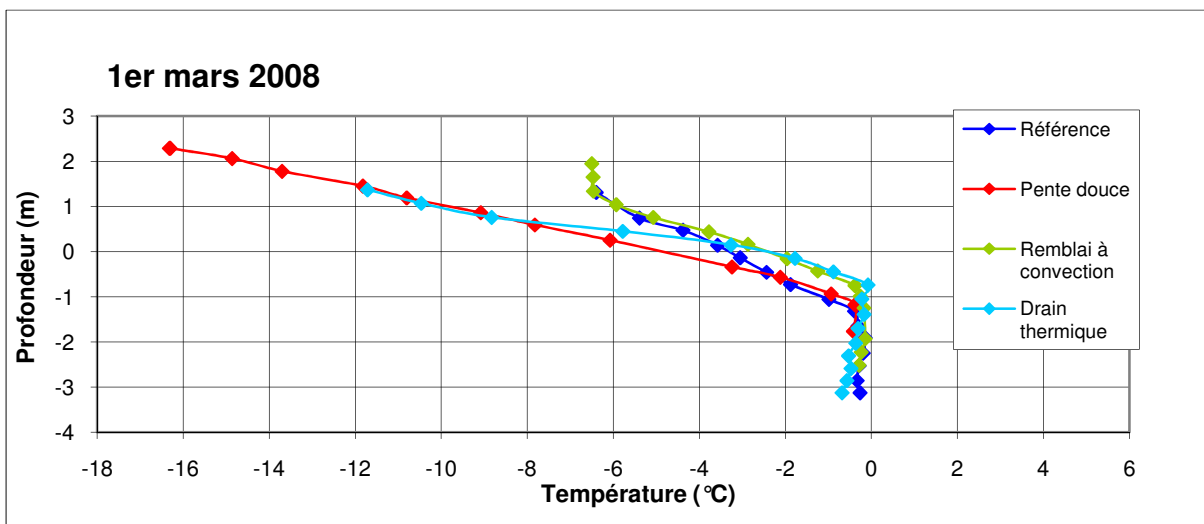


Figure A-12. Régimes thermiques des quatre sections au 1 er mars 2008

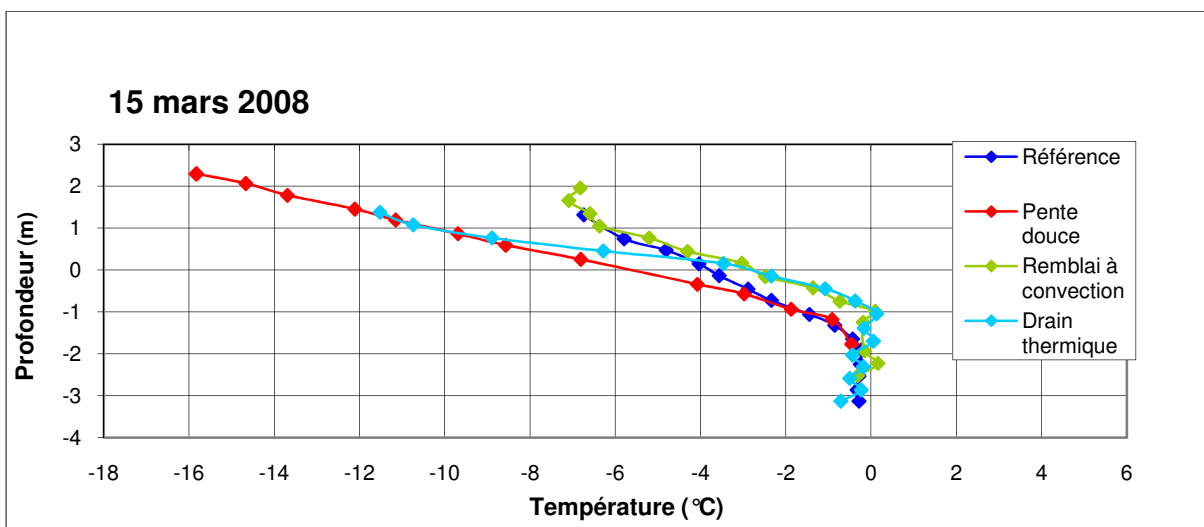


Figure A-13. Régime thermique des quatre sections au 15 mars 2008

Le mois de mars correspond aux températures les plus froides rencontrées au cours de l'hiver 2008. A 1 mètre de hauteur dans le remblai, les sections à pente douce et à drain thermique sont environ 4°C plus froides que les sections de référence et à remblai à convection d'air. Dans le sol naturel, la section à drain thermique perd de son efficacité alors que la section de référence en gagne. A 1 mètre de profondeur dans le sol naturel, les sections (A) et (B) sont plus froides d'environ 1,4°C que les deux autres sections.

A.8. Avril 2008

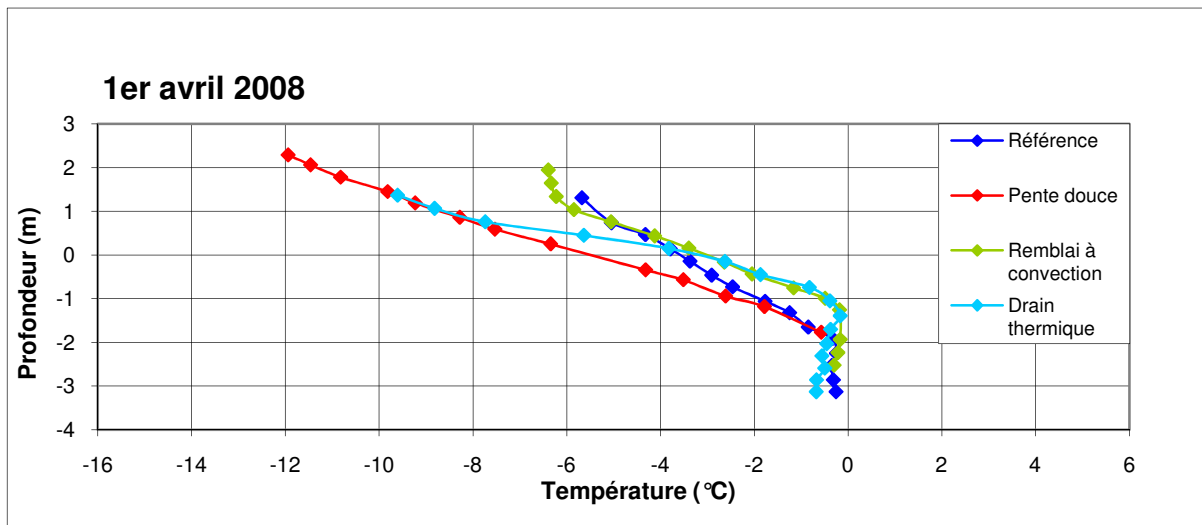


Figure A-14. Régimes thermiques des quatre sections au 1er avril 2008

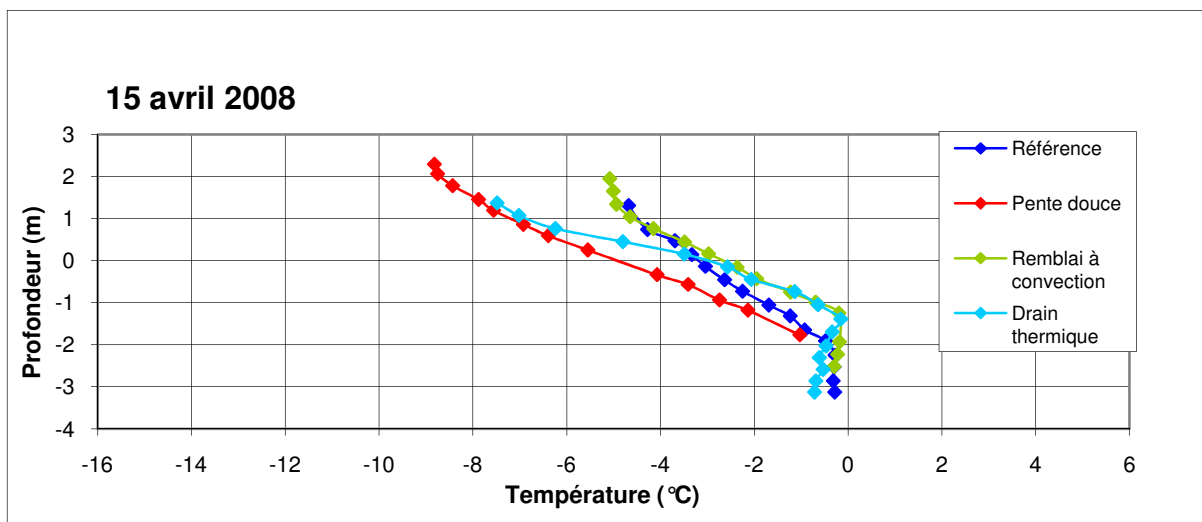


Figure A-15. Régime thermique des quatre sections au 15 avril 2008

Au 1^{er} avril 2008, le maximum de refroidissement est passé et les différentes sections se réchauffent. Elles connaissent encore cependant des températures négatives dans la totalité de la profondeur instrumentée. Au niveau du contact remblai / sol naturel, seule la section à pente douce se distingue des trois autres par une température plus basse de 2,5°C. Dans le remblai, la section à drain thermique et la section à pente douce se distinguent par un meilleur refroidissement (2,5°C plus froid à 1m de hauteur dans le remblai). Tandis que dans le sol

naturel, ce sont les sections à pente douce et de référence qui connaissent un meilleur refroidissement jusqu'à environ 2m de profondeur. Les sections (C) et (D) ne parviennent pas à refroidir le sol naturel. Lorsque l'on regarde plus précisément les régimes thermiques de ces deux sections au cours du mois d'avril, on peut noter qu'il existe un écoulement d'eau qui les affecte autour de 1,30 mètre de profondeur. La température de cet écoulement est environ $-0,18^{\circ}\text{C}$ et est stable au cours du mois. Cet écoulement n'était pas décelable les mois précédents car il se confondait avec le régime thermique. Au mois d'avril, l'écoulement empêche la pénétration du froid plus en profondeur.

A.9. Mai 2008

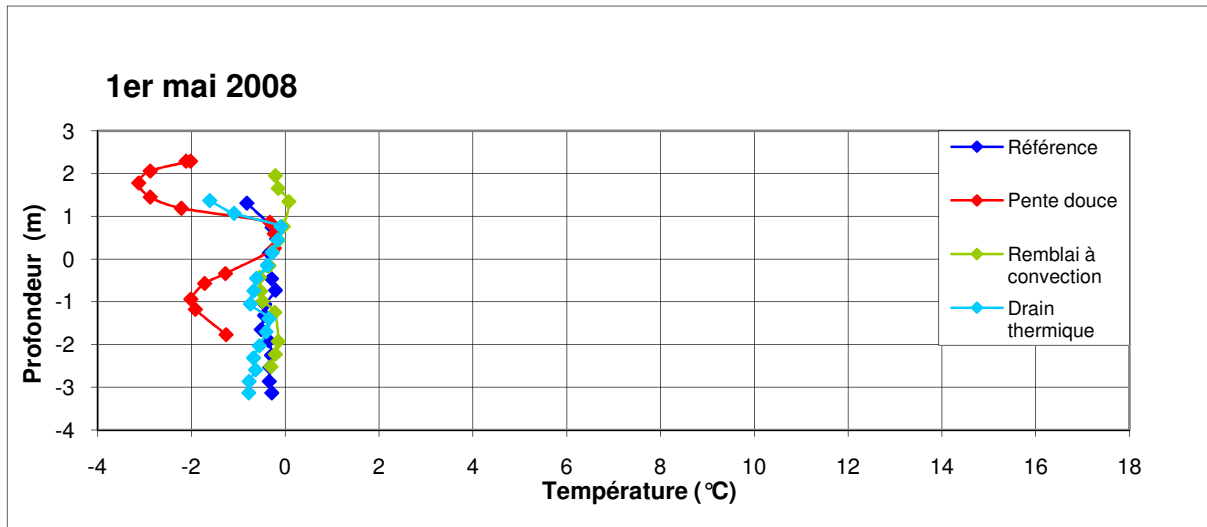


Figure A-16. Régimes thermiques des quatre sections au 1er mai 2008

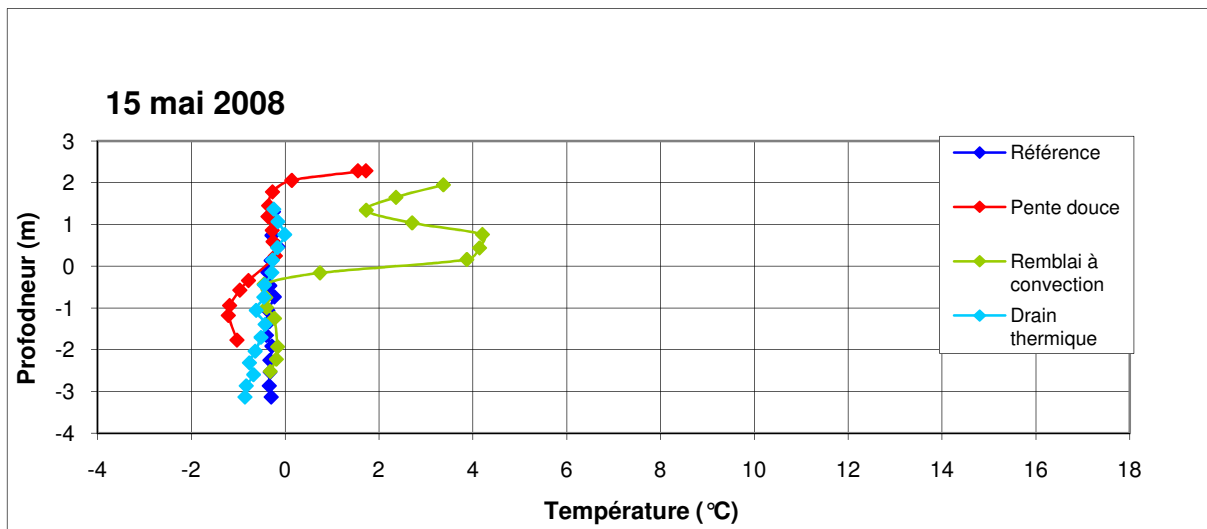


Figure A-17. Régimes thermiques des quatre sections au 15 mai 2008

Les quatre sections poursuivent leur réchauffement au cours du mois de mai 2008. Au début du mois, la température est proche de $-0,4^{\circ}\text{C}$ sur toute la profondeur située en-dessous de 1m de profondeur pour les sections de référence, à convection et à drain thermique. On note que la section à pente douce reste plus froide que les autres sections malgré le fait qu'elle soit perturbée autour de 0,60 mètre dans le remblai. L'infiltration d'eau est une explication possible à ce réchauffement soudain qui ne se propage pas depuis la surface. Autour du 15 mai, la section (C)

est à son tour affectée par un réchauffement soudain autour de 0,60 mètre dans le remblai ; l'eau est alors nettement plus chaude (environ 4°C au 15 mai). Ces deux réchauffements apparaissent sur de courtes périodes, peu de temps après les premiers beaux jours. L'écoulement de la fonte des neiges est une possible explication.

A.10. Juin 2008

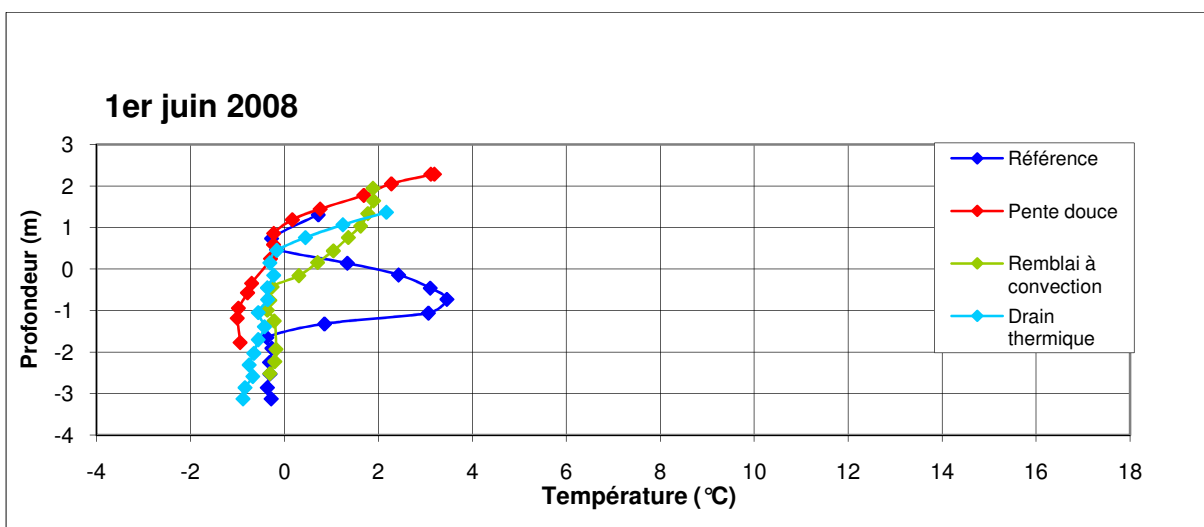


Figure A-18. Régimes thermiques des quatre sections au 1er juin 2008

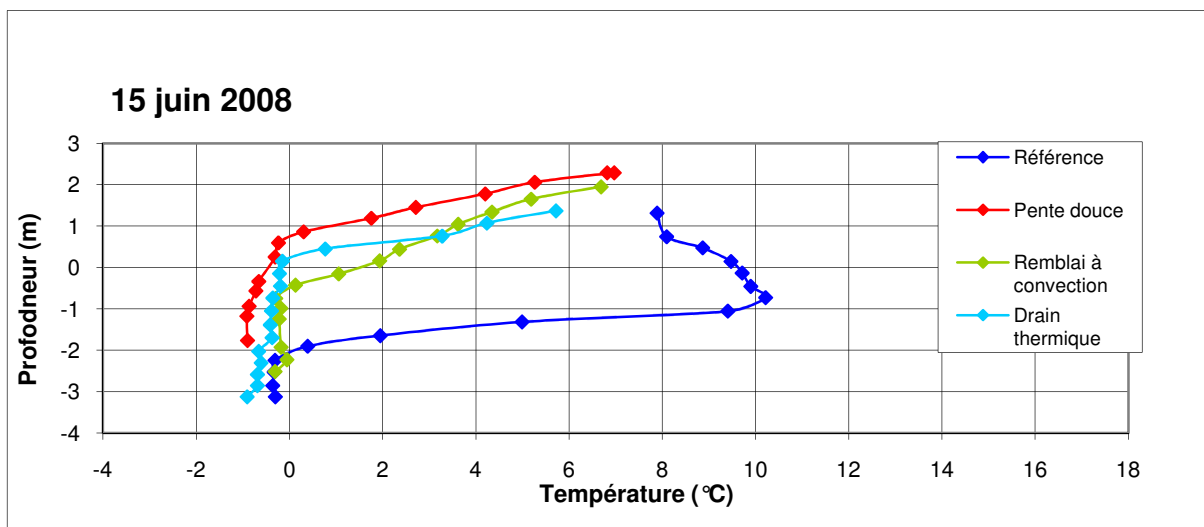


Figure A-19. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juin 2008

Le réchauffement se poursuit pour les sections; à cette période ; au début du mois, seuls les remblais connaissent des températures positives. Le sol naturel restant encore suffisamment froid, sauf pour la section de référence qui est réchauffée massivement par l'écoulement d'eau à une profondeur entre 0 et 1 mètre dans le sol naturel. La section à remblai à convection est plus affectée que les autres sections par la vague de chaleur. La moyenne mensuelle des températures extérieures a été de $-6,5^{\circ}\text{C}$ au mois d'avril avec des maximums de 6°C et de $3,5^{\circ}\text{C}$ au mois de mai avec des maximums de 12°C : le réchauffement extérieur est donc très important. Au 15 juin, la section de référence est toujours excessivement perturbée par l'écoulement d'eau : la température de l'écoulement est proche de 10°C . Les remblais des trois techniques se réchauffent mais leurs températures respectives restent inférieures à la section de référence. A 1 mètre de hauteur dans le remblai, les températures sont : 8°C pour la section (A), 4°C pour la section (D), $3,6^{\circ}\text{C}$ pour la section (C) et 1°C pour la section (B).

A.11. Juillet 2008

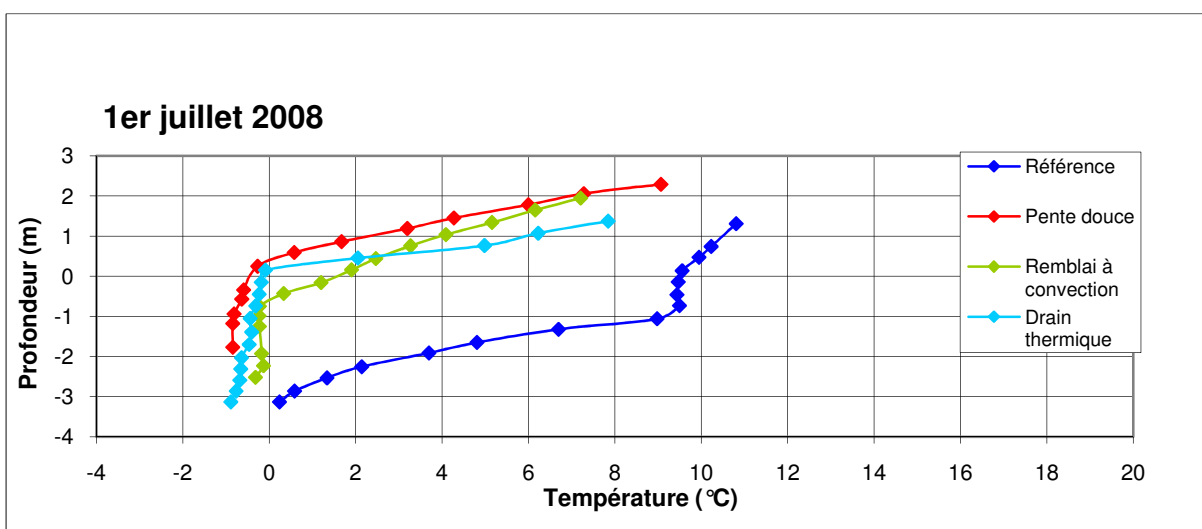


Figure A-20. Régimes thermiques des quatre sections au 1er juillet 2008

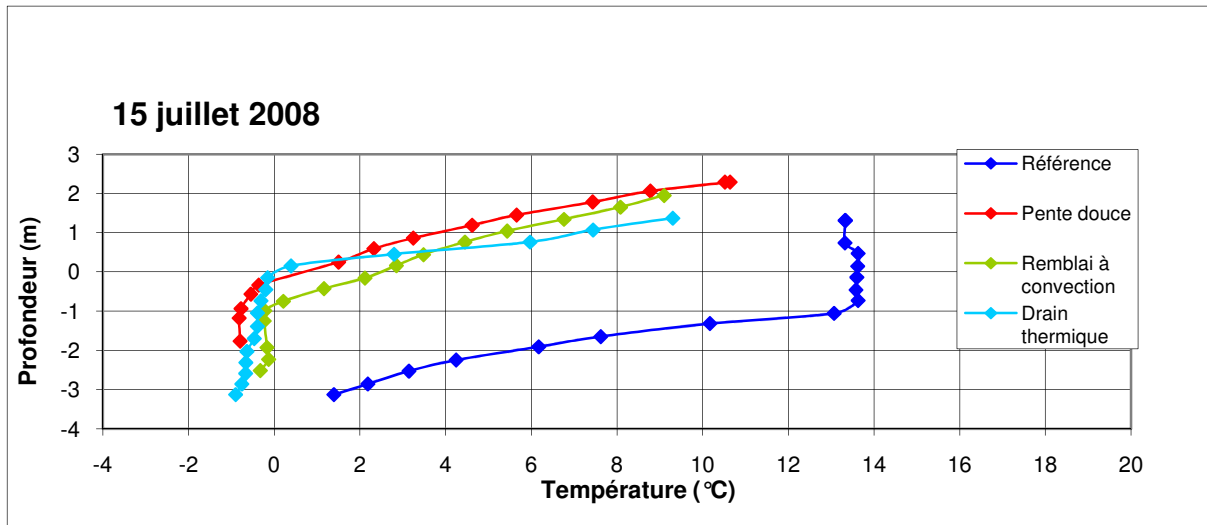


Figure A-21. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juillet 2008

L'air extérieur a continué de se réchauffer au cours du mois de juin avec une valeur moyenne mensuelle de 8,7°C et des maximums de 23°C. La section de référence est toujours perturbée par la présence d'eau entre 0 et 1 mètre dans le sol naturel. Elle apparaît ainsi beaucoup plus chaude que les autres sections. Ces dernières réchauffent massivement dans le remblai (+9°C pour la section à pente douce en surface au 1^{er} juillet). Le sol naturel restant gelé pour les sections à pente douce et à drain thermique. Le sol dégelant sur près de 0,8 mètre pour la section à remblai à convection au 15 juillet.

A.12. Août 2008

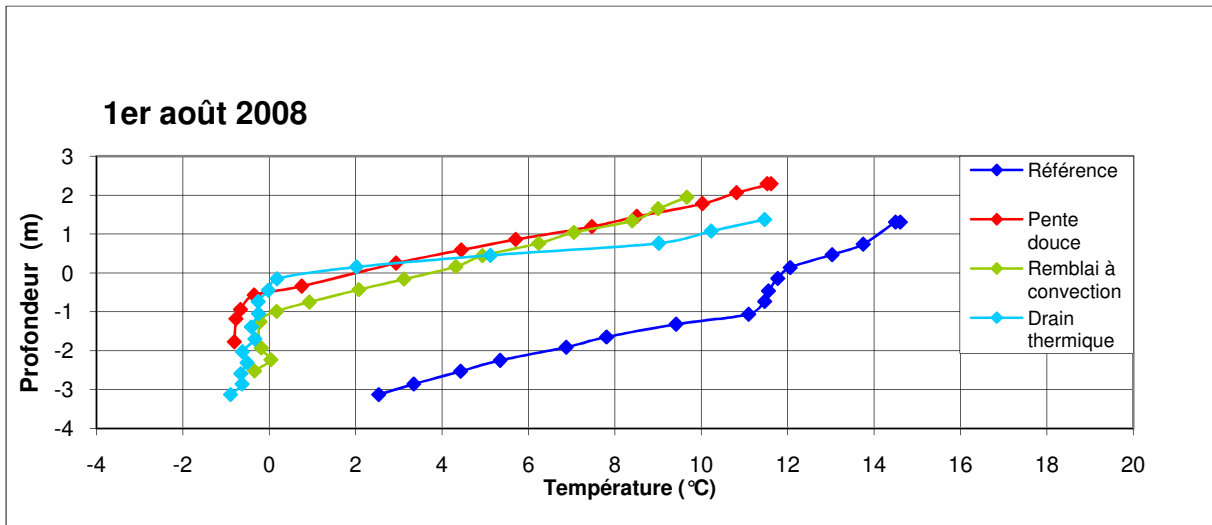


Figure A-22. Régimes thermiques des quatre sections au 1er août 2008

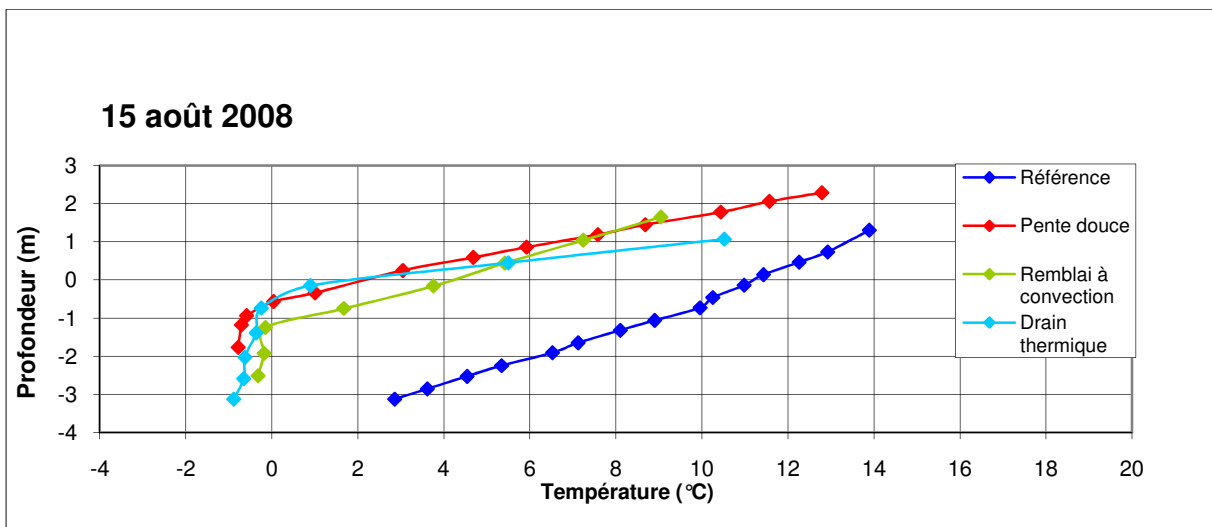


Figure A-23. Régimes thermiques des quatre sections au 15 août 2008

La phase de réchauffement de l'air extérieur atteint son maximum avec une valeur moyenne mensuelle en juillet de 12,9°C et des maximums de 29°C ; la section de référence est dégelée sur la totalité de la profondeur instrumentée (2,5°C au plus profond). Les autres sections ont des profils proches. Le dégel atteint alors 1,1 mètre pour la section à remblai à convection et 0,6 mètre pour les sections à drain thermique et à pente douce. A 1m de hauteur dans le remblai, la température dans la section à drain thermique est de 10°C tandis qu'elle est de 7°C pour les sections à pente douce et remblai à convection.

A.13. Septembre 2008

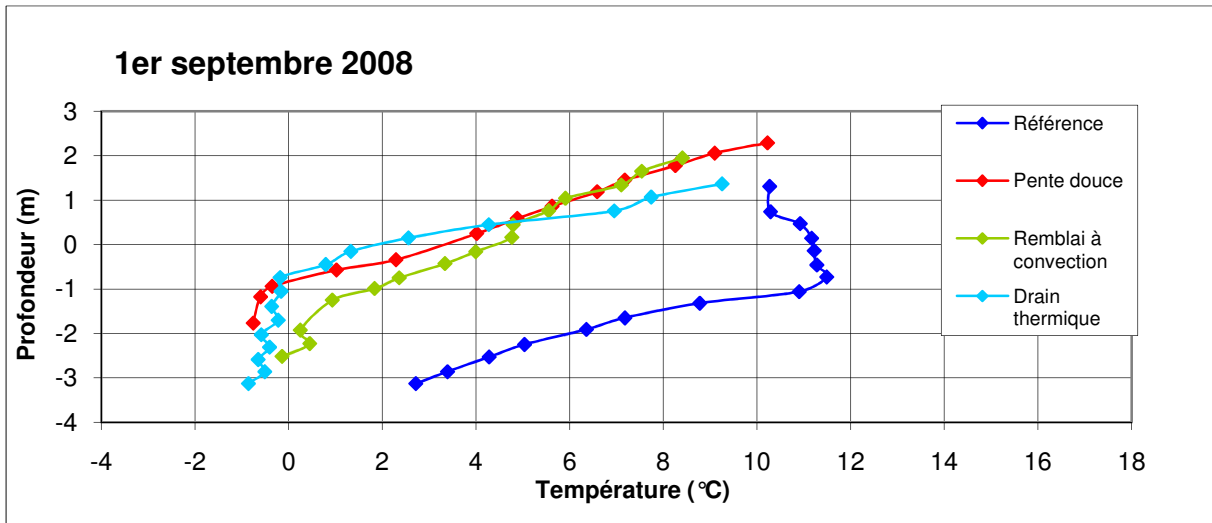


Figure A-24. Régimes thermiques des quatre sections au 1er septembre 2008

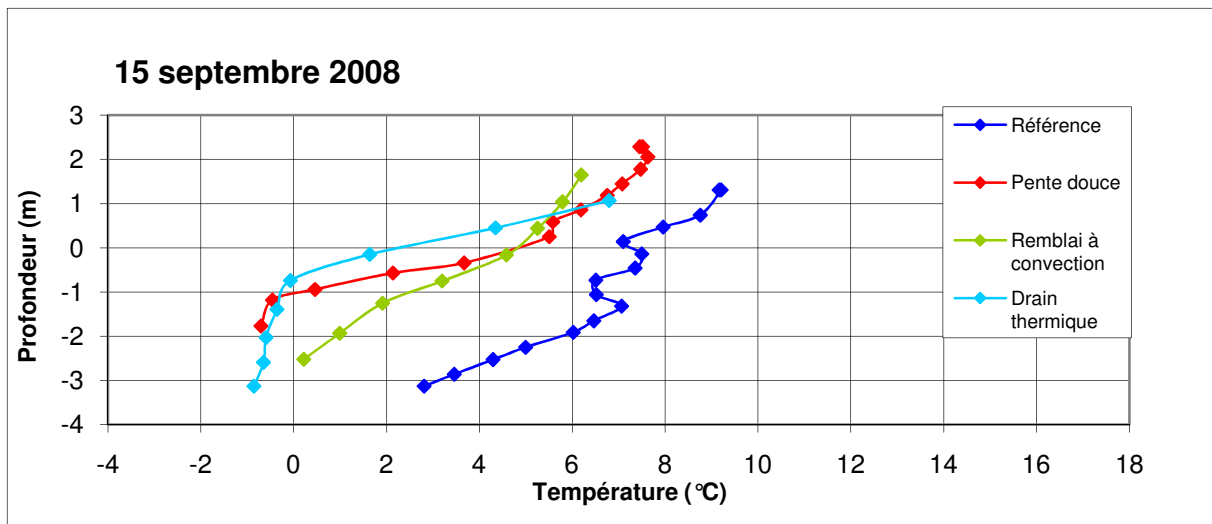


Figure A-25. Régimes thermiques des quatre sections au 15 septembre 2008

Au 1er septembre 2008, la phase de refroidissement est amorcée. En surface, les températures commencent à diminuer. Cependant, la chaleur qui a pénétré le sol, continue de se diffuser et de réchauffer ce dernier en profondeur. La profondeur de dégel pour les sections à drain thermique et à pente douce a légèrement augmenté (0,7 mètre) ; elle a, par contre, fortement augmenté pour la section à remblai à convection (passage de 1,1 mètre à 2,4 mètres en quelques semaines). La

présence d'une couche de glace à cette profondeur est une éventualité qui expliquerait ce dégel tardif et brutal. En effet, faire fondre une couche de glace nécessite beaucoup d'énergie à cause de la chaleur latente que cela requiert. Au cours du temps, la chaleur venue de la surface fait fondre progressivement la glace ; la chaleur ne pénétrant pas plus en profondeur. Lorsque la totalité de la glace est fondue, la pénétration de la chaleur dans le sol reprend alors rapidement et explique ce dégel brusque d'une épaisse couche de sol. La section de référence reste anormalement chaude à cause de l'écoulement d'eau.

A.14. Octobre 2008

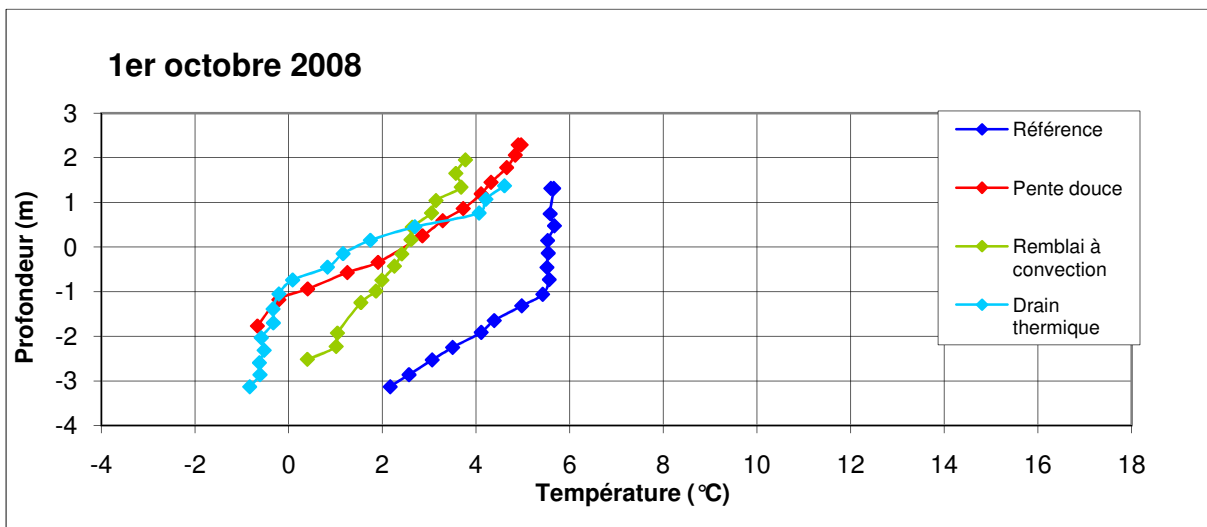


Figure A-2665. Régimes thermiques des quatre sections au 1er octobre 2008

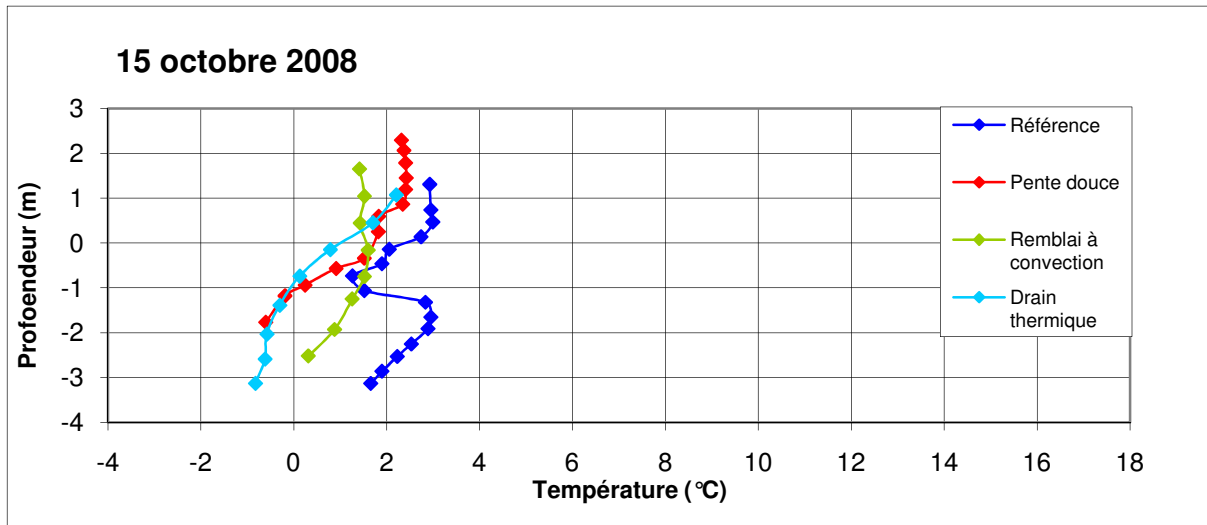


Figure A-27. Régimes thermiques des quatre sections au 15 octobre 2008

Le refroidissement en surface se poursuit (moyenne de la température extérieure du mois de septembre : $5,9^{\circ}\text{C}$). Cependant, au cours du mois de septembre, le dégel a atteint sa profondeur maximale. Elle est proche de 1,2 mètre pour les sections à drain thermique et pente douce ; la profondeur de la couche active avait été mesurée, à l'aide du pénétromètre dynamique, autour de 1,3 mètre au maximum du dégel dans le sol naturel. Pour la section à remblai à convection, la perturbation brutale du front de dégel est toujours présente. Par extrapolation, le front de dégel dépasserait 3m de profondeur. Ce dégel brusque, en quelques semaines, d'une épaisse couche de sol, correspond à la poursuite de la diffusion de la chaleur dans le sol naturel.

A.15. Novembre 2008

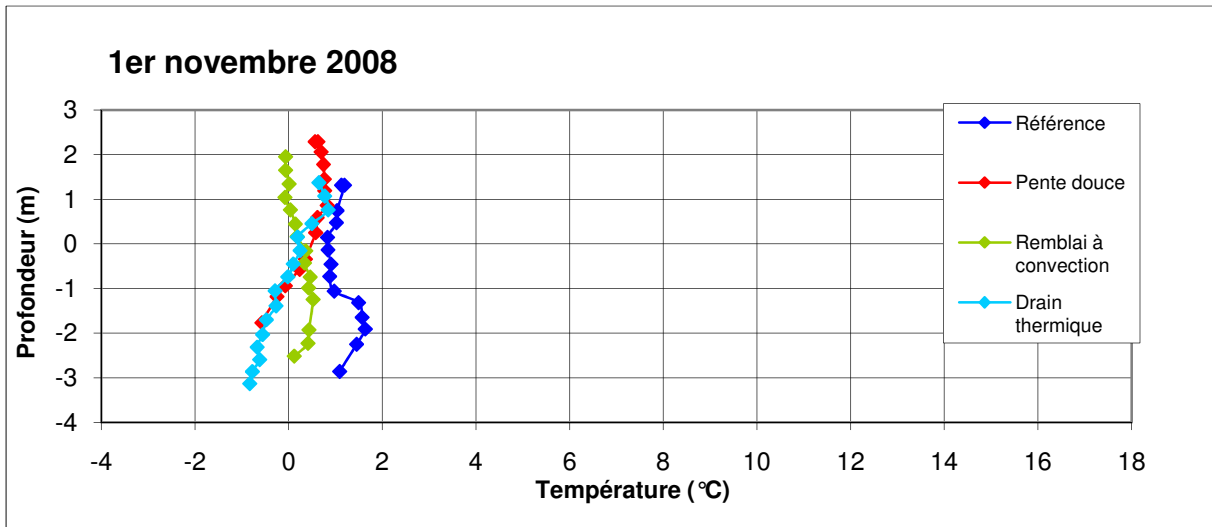


Figure A-28. Régimes thermiques des quatre sections au 1er novembre 2008

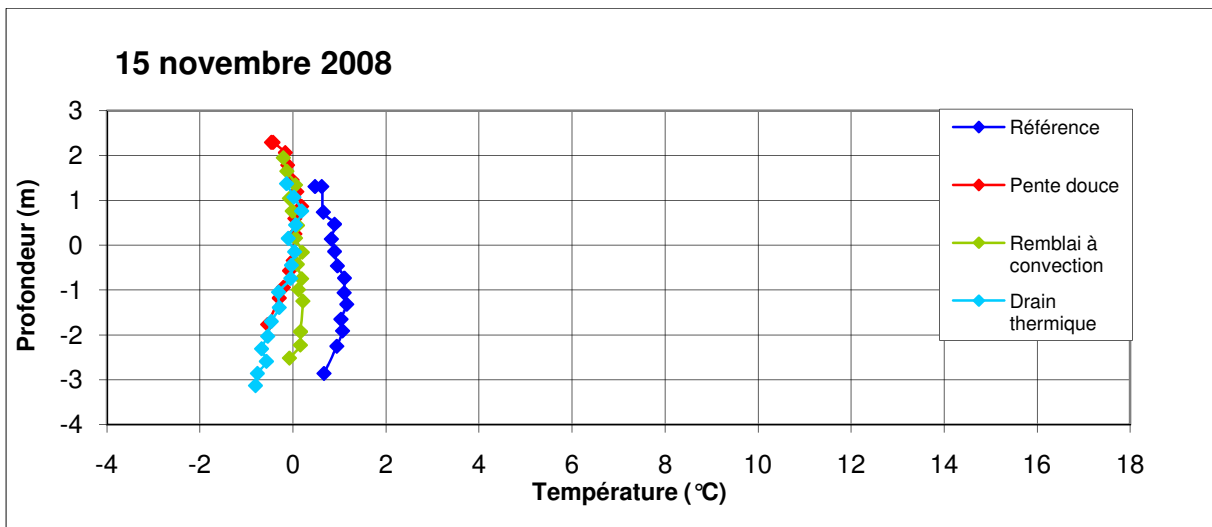


Figure A-29. Régimes thermiques des quatre sections au 15 novembre 2008

La vague de refroidissement continue de se propager depuis la surface du remblai. En un mois, la température à 1 mètre de profondeur dans le sol naturel a chuté de 5,4°C à 0,9°C, pour la section de référence. Cette section restant plus chaude que les trois autres sur la totalité de la profondeur instrumentée. On note que, de la même manière que la section à remblai à convection était particulièrement sensible à la vague de chaleur en été, elle est aussi très sensible à la vague de froid. Dès le début du mois, l'ensemble de son remblai connaît des températures négatives. Au

niveau du contact remblai / sol naturel, les sections à pente douce, à remblai à convection et à drain thermique rencontrent une température de l'ordre de $0,3^{\circ}\text{C}$.

A.16. Décembre 2008

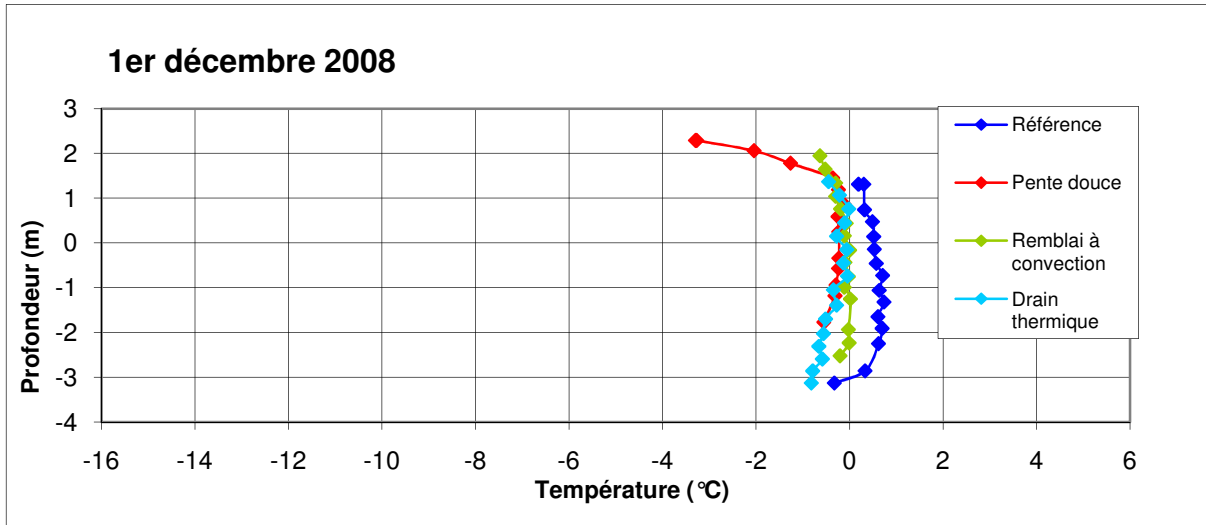


Figure A-30. Régimes thermiques des quatre sections au 1er décembre 2008

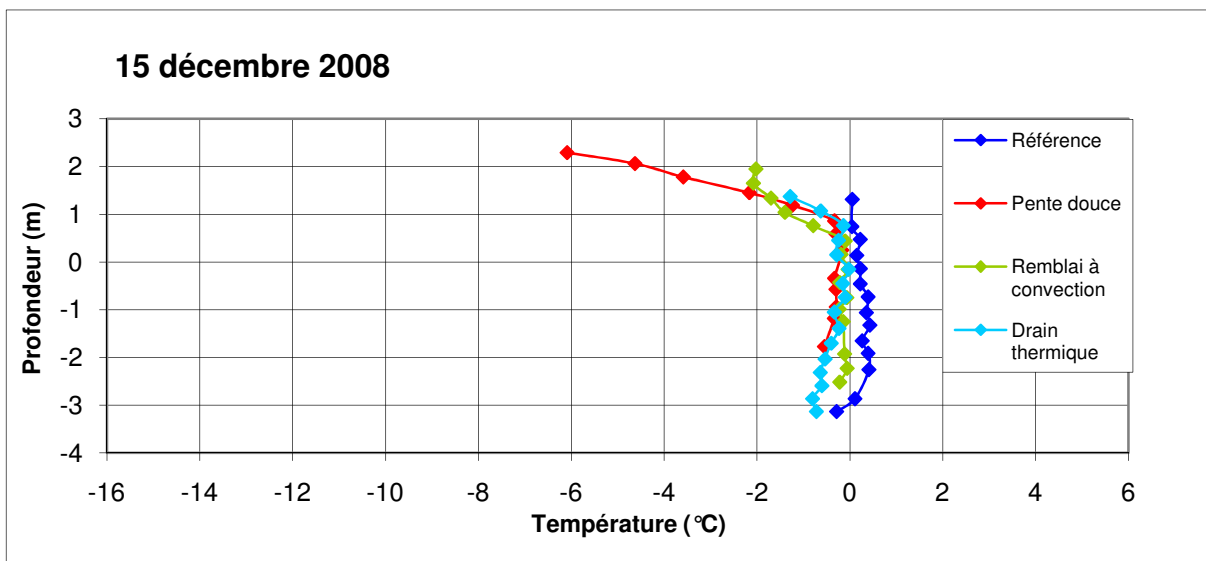


Figure A-31. Régimes thermiques des quatre sections au 15 décembre 2008

Au 1er décembre, les trois sections de mitigation sont de nouveau gelées dans leur intégralité. La section de référence reste plus chaude que les autres sections ($+0,5^{\circ}\text{C}$ au contact sol naturel/remblai). Après avoir dégelé massivement dans sa totalité, les mois précédents, cette section connaît, en premier lieu, des températures négatives au plus profond de l'instrumentation

(-0,3°C à 3,13 mètre de profondeur). Le gel de cette section se fait donc d'abord en profondeur. Les sections de mitigation ont des profils semblables : températures faiblement négatives dans le sol naturel (de l'ordre de -0,3°C) et plus faibles dans les remblais.

A.17. Janvier 2009

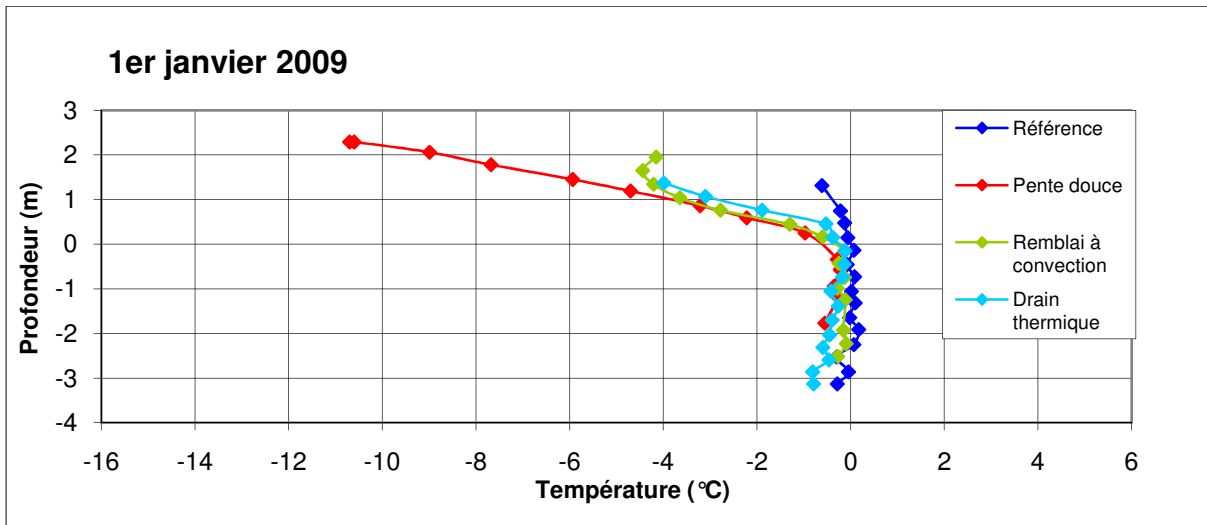


Figure A-32. Régimes thermiques des quatre sections au 1er janvier 2009

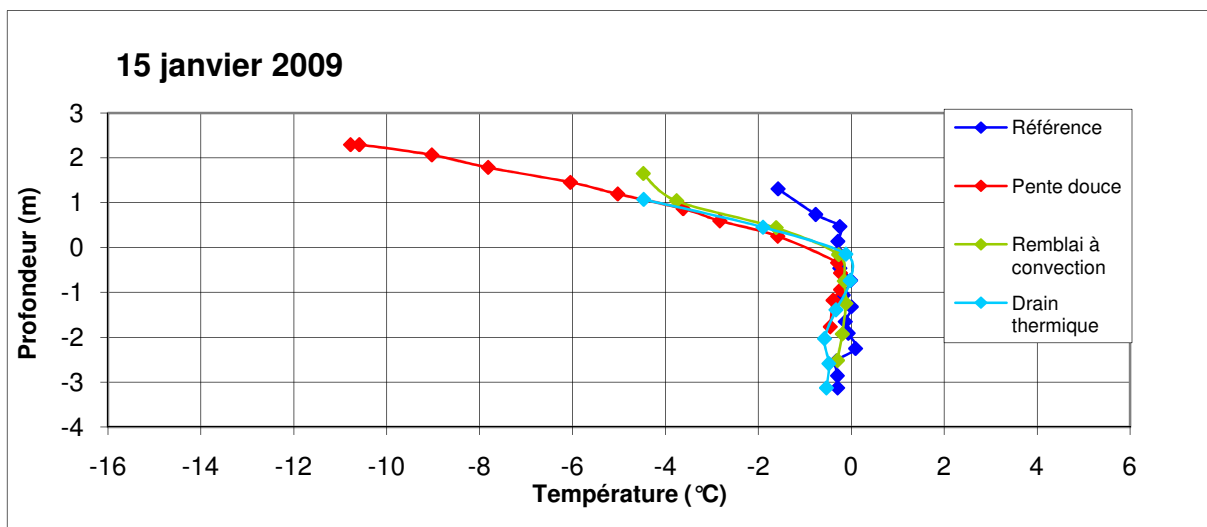


Figure A-33. Régimes thermiques des quatre sections au 15 janvier 2009

Les quatre sections ont des profils thermiques identiques dans le sol naturel; les températures sont faiblement négatives sur toute la profondeur instrumentée (de l'ordre de -0,3°C). Dans les remblais, les sections de mitigation refroidissent bien mieux que la section de référence (-3,8°C

versus $-0,4^{\circ}\text{C}$ environ, à 1 mètre dans le remblai au 15 janvier). Les sections de protection du pergélisol sont plus réactives vis-à-vis de la température extérieure.

A.18. Février 2009

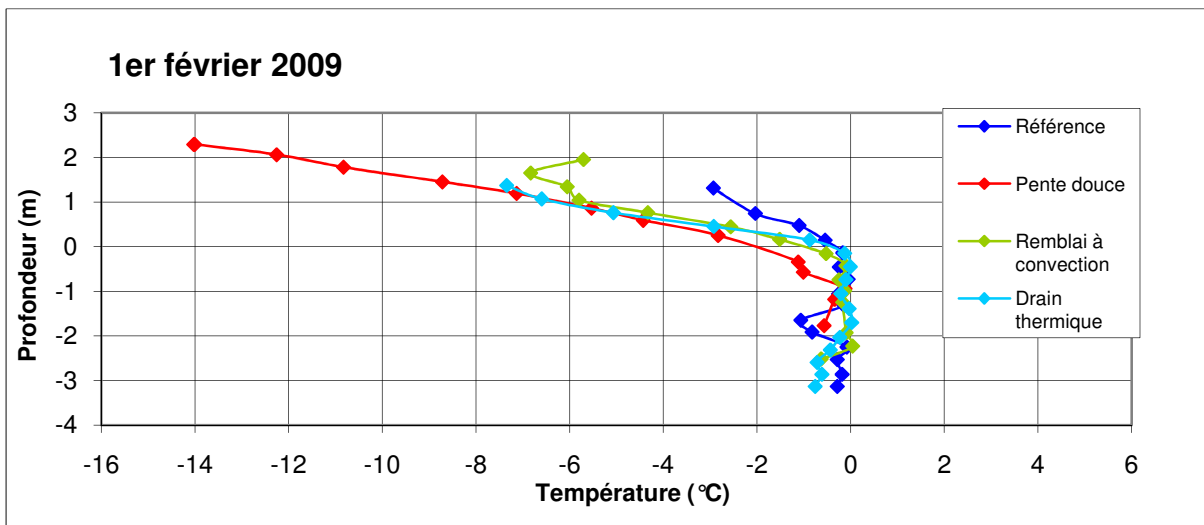


Figure A-34. Régimes thermiques des quatre sections au 1er février 2009

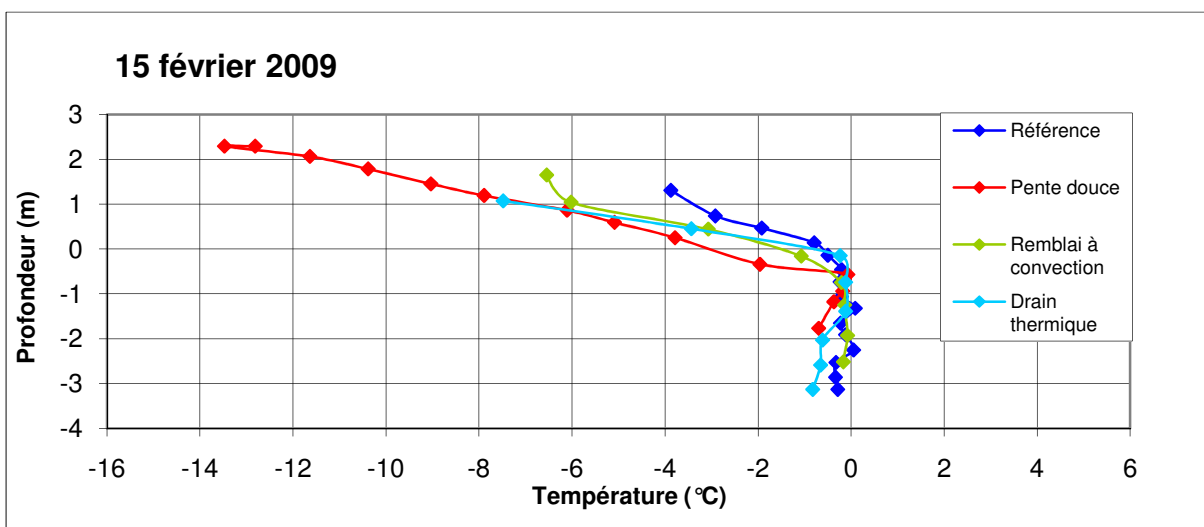


Figure A-35. Régimes thermiques des quatre sections au 15 février 2009

Le refroidissement se poursuit pour les différentes sections ; la température moyenne de l'air extérieur au mois de janvier a été de -23°C . La section de référence reste plus chaude dans le remblai, et se trouve légèrement perturbée par un apport de froid autour de 1,80 mètre de profondeur dans le sol naturel. On note l'inversion du profil de température proche de la surface pour la section à remblai à convection. La chaleur s'accumulant juste sous la surface du remblai. Les trois techniques sont plus efficaces que la section de référence pour refroidir le remblai. La section à adoucissement de pente se démarque car elle est la seule qui commence à refroidir le sol naturel.

A.19. Mars 2009

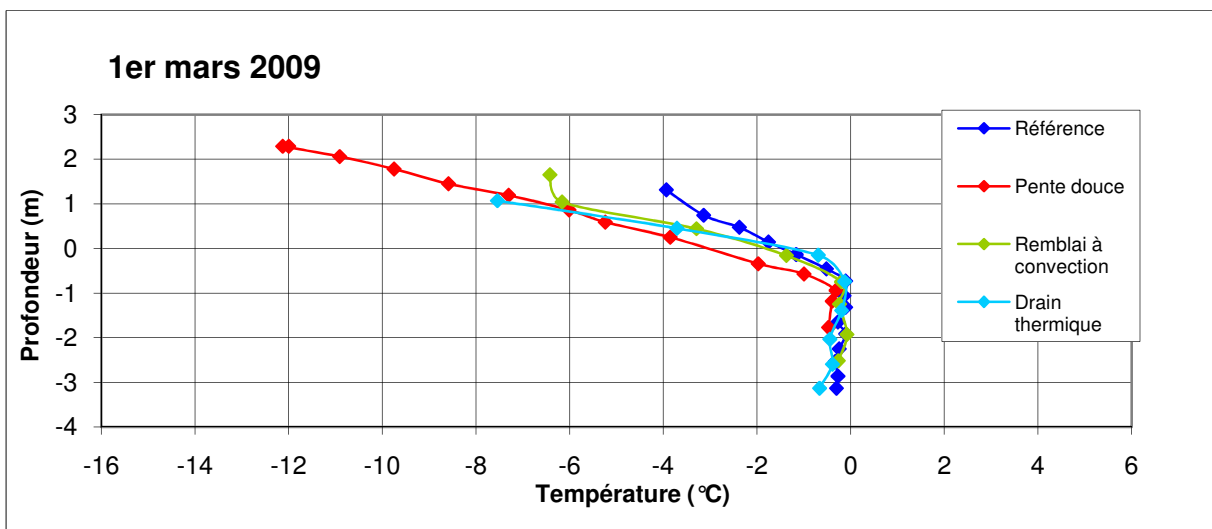


Figure A-36. Régimes thermiques des quatre sections au 1er mars 2009

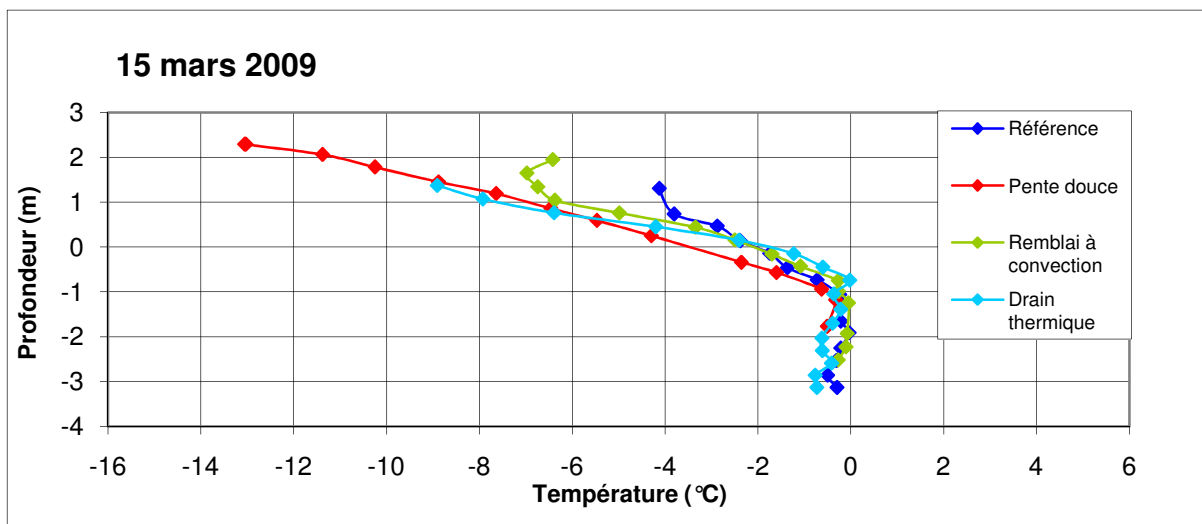


Figure A-37. Régimes thermiques des quatre sections au 15 mars 2009

La phase de refroidissement est finie en surface mais le froid contenu dans le remblai, continue de se propager en profondeur (à l'instar de la chaleur l'été). On retrouve l'accumulation de chaleur dans la partie supérieure du remblai à convection, et un refroidissement du sol naturel plus prononcé pour la section à pente douce que pour les autres sections. Au niveau du contact remblai / sol naturel, la température de la section à pente est de -3°C ; elle est de $-1,5^{\circ}\text{C}$ pour les autres sections. Dans le sol naturel, les efficacités des différentes sections sont modifiées. La section à pente douce reste la plus efficace mais les deux autres techniques sont moins efficaces que la section de référence pour refroidir le premier mètre de sol naturel. En dessous, les différentes sections ont des comportements similaires.

A.20. Avril 2009

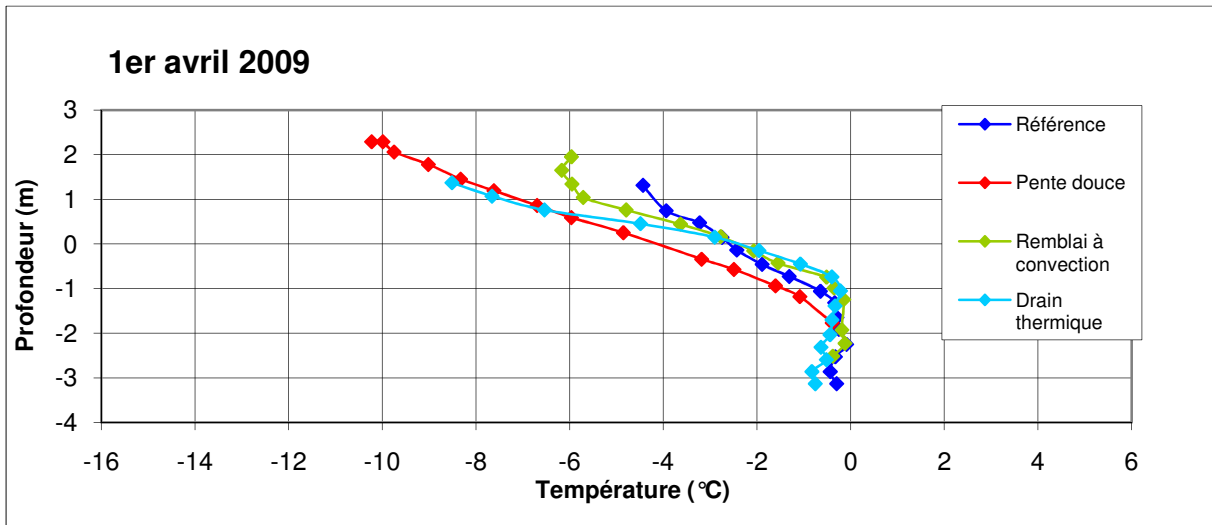


Figure A-38. Régimes thermiques des quatre sections au 1er avril 2009

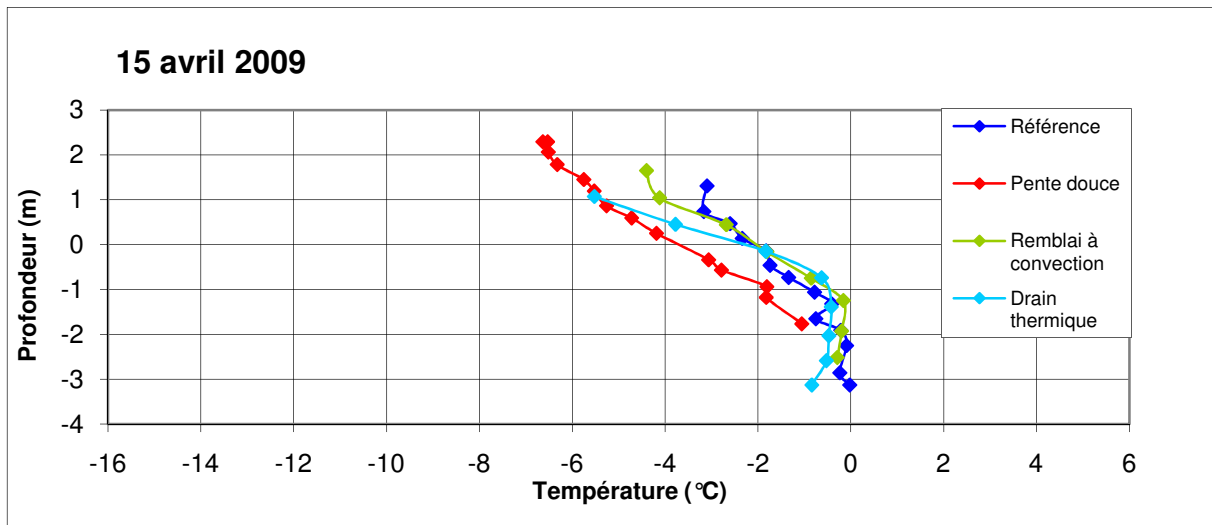


Figure A-39. Régimes thermiques des quatre sections au 15 avril 2009

Dans le remblai, les sections à drain thermique et à pente douce sont très efficaces, elles proposent les températures les plus faibles (à 1 mètre de hauteur dans le remblai, environ $-7,2^{\circ}\text{C}$ versus $-5,7^{\circ}\text{C}$ pour la section à remblai à convection et $-4,2^{\circ}\text{C}$ pour la section de référence). Dans la partie supérieure du sol naturel, la section à pente douce refroidit massivement, tandis que les sections à remblai à convection et à drain thermique, perdent en efficacité et connaissent des températures plus chaudes que la section de référence. La chaleur du remblai est évacuée par les systèmes de ventilation de manière effective, mais la chaleur du sol naturel ne semble pas pouvoir s'évacuer correctement.

A.21. Mai 2009

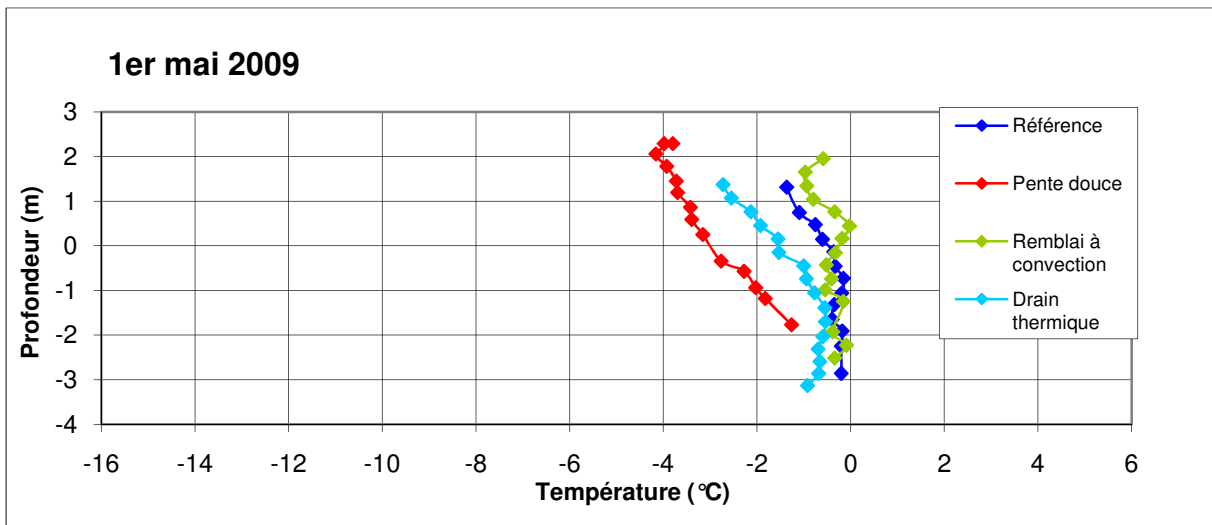


Figure A-4066. Régimes thermiques des quatre sections au 1er mai 2009

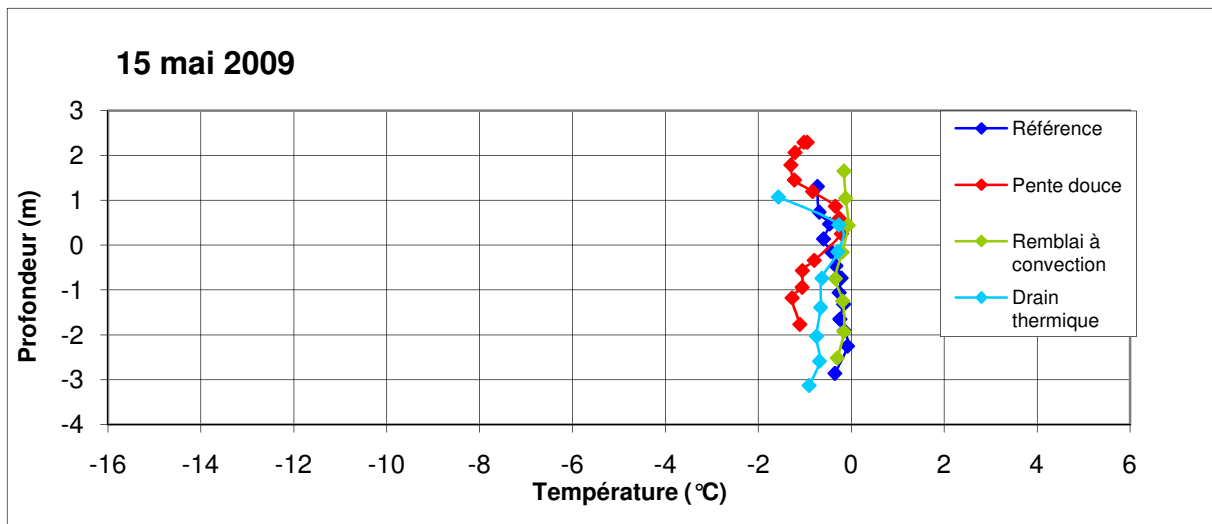


Figure A-41. Régimes thermiques des quatre sections au 15 mai 2009

Au début du mois de mai, on peut distinguer deux réactions des techniques face au réchauffement extérieur. Pour les sections à pente douce et à drain thermique, le froid continue de pénétrer en profondeur. Tandis que pour les sections de référence et à remblai à convection d'air, le réchauffement est déjà amorcé en profondeur. Plus tard dans le mois, les sections ont des températures proches dans le remblai. Dans le sol naturel, les sections (B) et (D) restent les plus

froides. A 1,70 mètre de profondeur, la section (B) est la plus froide ; $-1,1^{\circ}\text{C}$, $-0,7^{\circ}\text{C}$ pour la section (D) et environ $-0,2^{\circ}\text{C}$ pour les sections (A) et (C).

A.22. Juin 2009

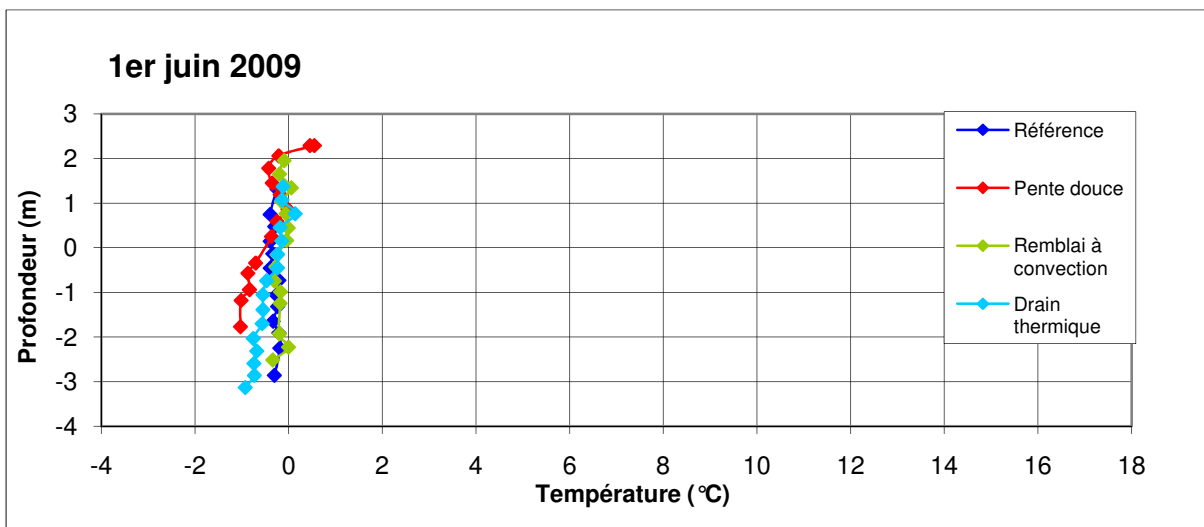


Figure A-42. Régimes thermiques des quatre sections au 1er juin 2009

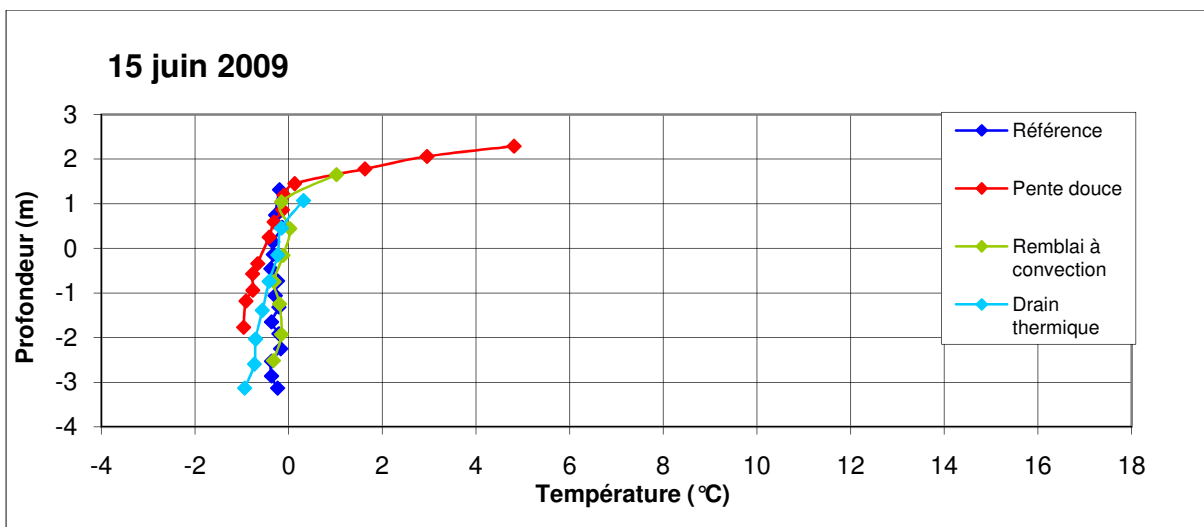


Figure A-43. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juin 2009

Au cours du mois de juin, le réchauffement se poursuit. Les quatre sections retrouvent des profils proches ; presque identiques dans le remblai (environ $-0,2^{\circ}\text{C}$). Dans le sol naturel, les sections à pente douce et à drain thermique restent légèrement plus froides que les deux autres sections.

A.23. Juillet 2009

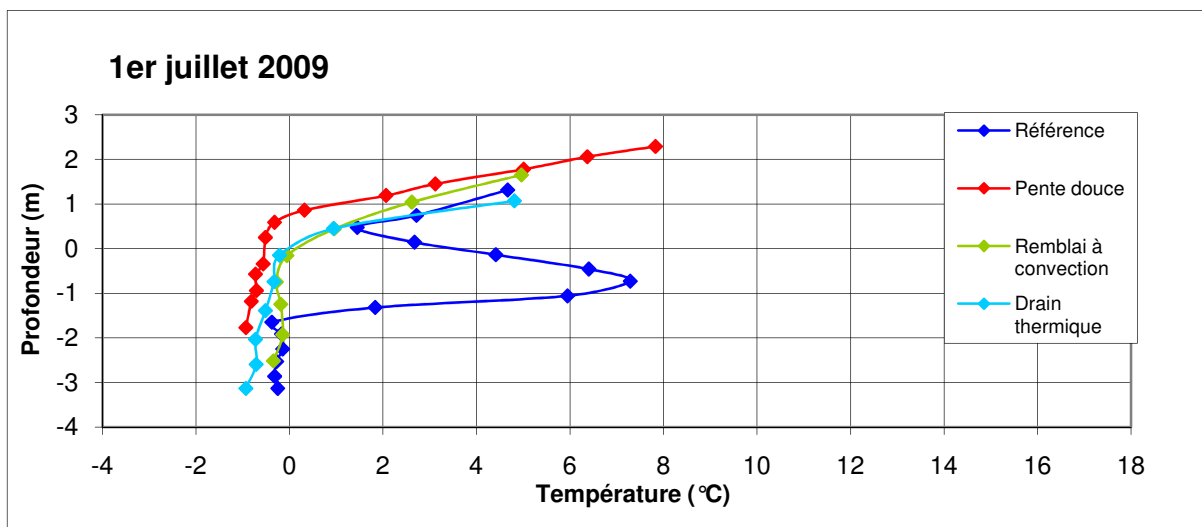


Figure A-44. Régimes thermiques des quatre sections au 1er juillet 2009

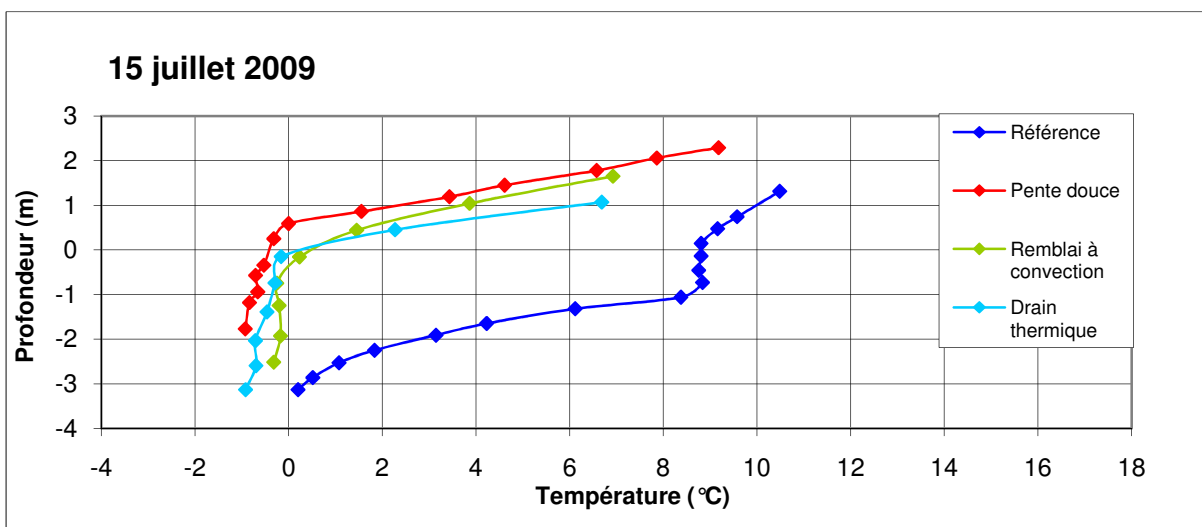


Figure A-45. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juillet 2009

Au 1er juillet 2009, la vague de chaleur a pénétré massivement les sections. On retrouve, comme l'année précédente, un écoulement d'eau qui vient affecter fortement la section de référence, aux environs de 0,75 mètre de profondeur. Le profil thermique de la section s'en trouve

complètement altéré. Pour les autres sections, le réchauffement n'atteint pas encore le sol naturel ; la section à pente douce reste gelée jusqu'à 0,6m dans le remblai. Au 15 juillet, le dégel atteint le contact remblai / sol naturel pour les sections (C) et (D). La section de pente reste la moins affectée. Pour la section de référence, la totalité de la profondeur instrumentée est déjà dégelée.

A.24. Août 2009

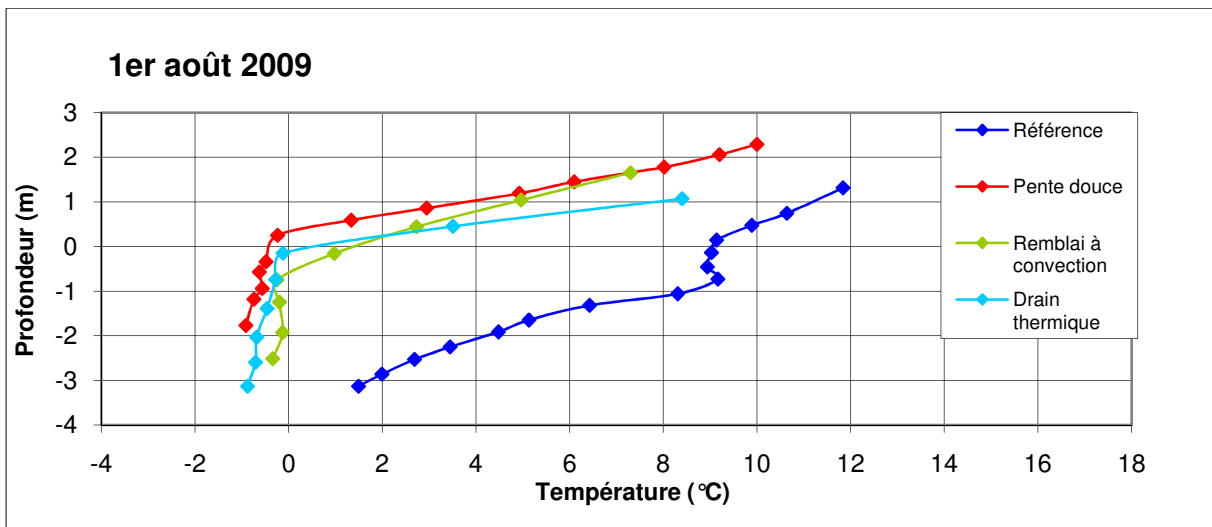


Figure A-46. Régimes thermiques dans les quatre sections au 1er août 2009

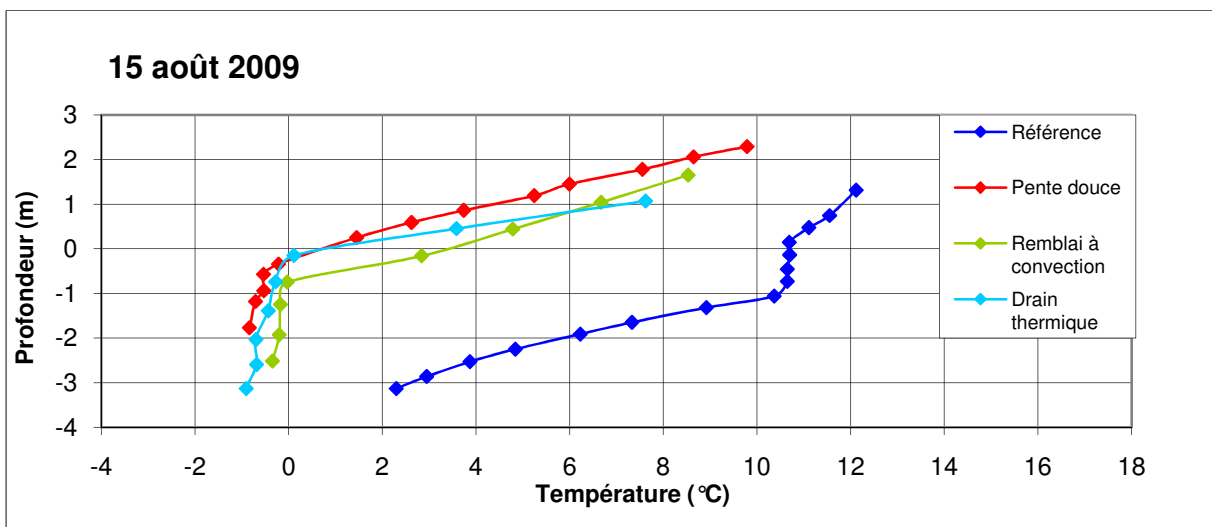


Figure A-47. Régimes thermiques des quatre sections au 15 août 2009

En août, le réchauffement est massif et concerne toutes les sections. La section de référence, qui est perturbée, dégèle jusqu'à une profondeur de 4m environ (valeur obtenue par extrapolation). La température de l'écoulement augmente jusqu'à atteindre 11°C. Dans les sections à drain thermique et à pente douce, le dégel atteint l'interface remblai / sol naturel. Pour la section à remblai à convection, il atteint 0,7 mètre. La section en pente douce reste la plus froide sur la totalité de la profondeur instrumentée.

A.25. Septembre 2009

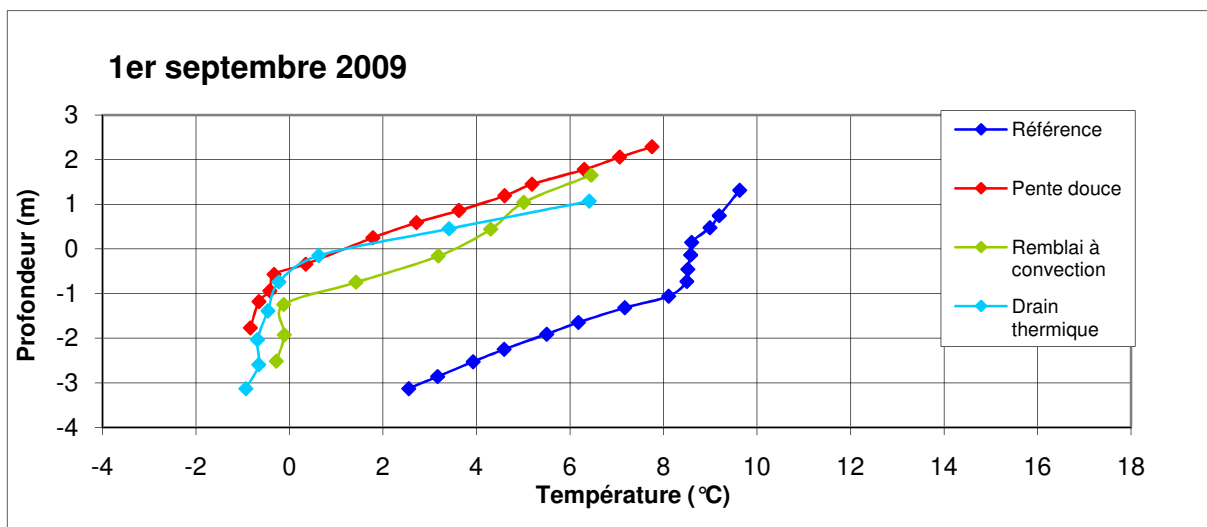


Figure A-48. Régimes thermiques des quatre sections au 1er septembre 2009

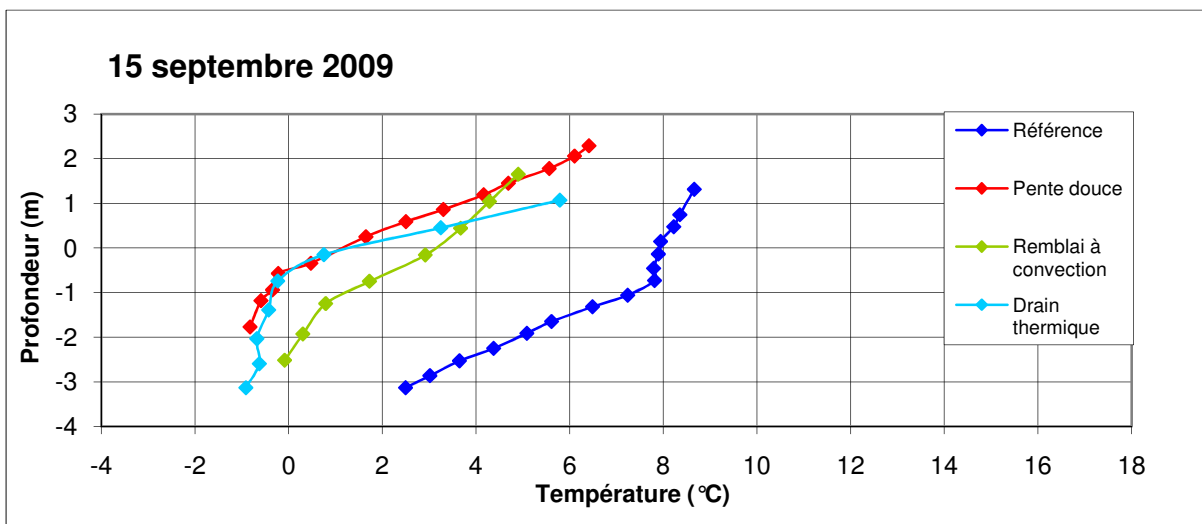


Figure A-4967. Régime thermiques des quatre sections au 15 septembre 2009

La section de référence est encore plus chaude que les trois autres sections. Le dégel se poursuit progressivement dans les sections ; la section à remblai à convection restant la plus affectée par la vague de chaleur. La profondeur de dégel qui était proche de 1 mètre au début du mois de septembre, chute brutalement jusqu'à atteindre 2,50 mètres moins de quinze jours plus tard. Ce dégel brutal est propre à la section à remblai à convection d'air. Au niveau du contact remblai / sol naturel, la température est de 1°C pour les sections drain thermique et pente douce, 3,5°C pour la section à remblai à convection et enfin de 8,6°C pour la section de référence. Le dégel se poursuit donc en profondeur alors que les températures extérieures continuent de décroître.

A.26. Octobre 2009

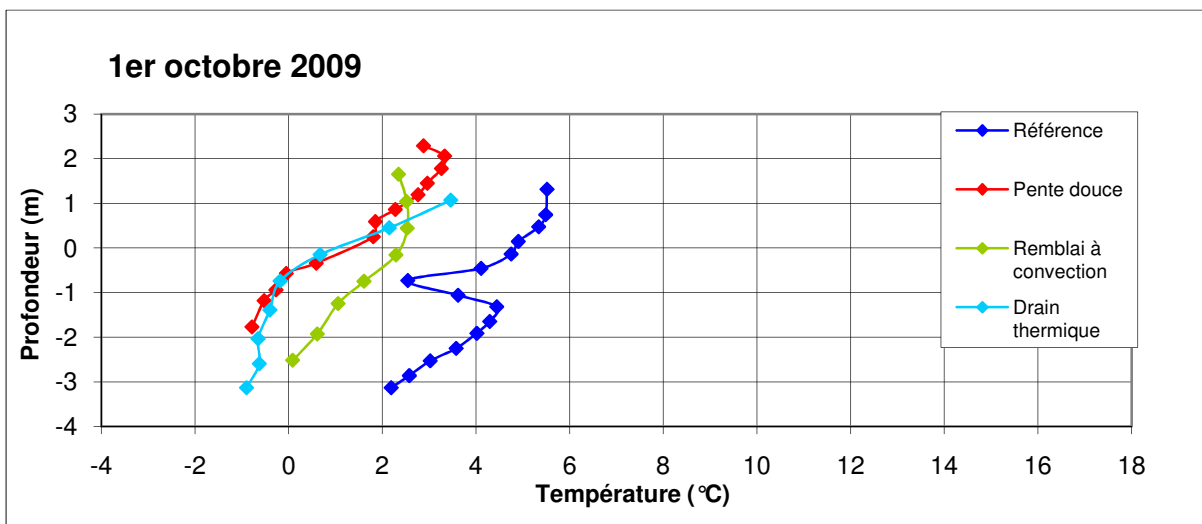


Figure A-50. Régimes thermiques des quatre sections au 1 er octobre 2009

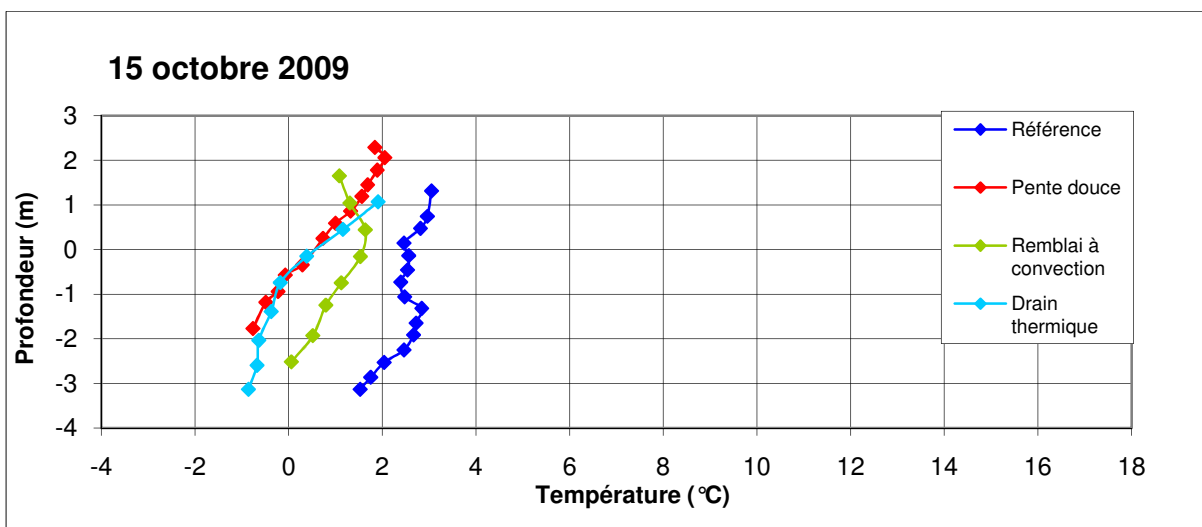


Figure A-51. Régimes thermiques des quatre sections au 15 octobre 2009

On note tout d'abord que la section de référence qui avait connu un apport de chaleur au mois de juillet à 0,75 mètre de profondeur, connaît maintenant un apport de froid à cette même profondeur au début du mois. Par ailleurs, les fronts de dégel des différentes sections ont peu évolué par rapport au mois précédent : environ 0,5 mètre pour les sections (B) et (D), 2,6 mètres pour la section (C) et près de 4,5 mètres pour la section (A). La section à remblai à convection est la plus réactive vis-à-vis des températures négatives extérieures ; elle est la plus froide dans la partie supérieure du remblai.

A.27. Novembre 2009

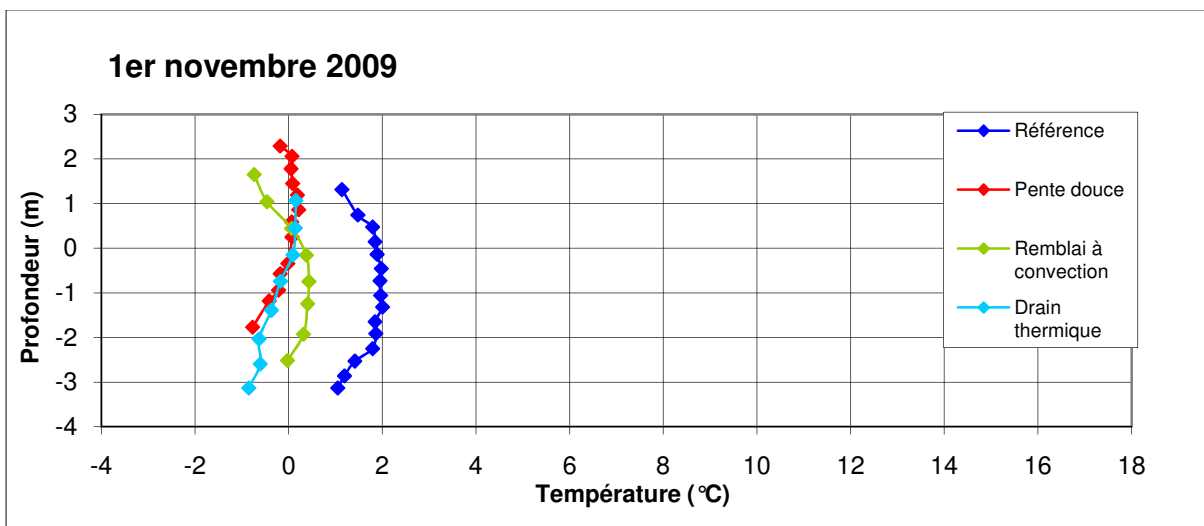


Figure A-52. Régimes thermiques des quatre sections au 1er novembre 2009

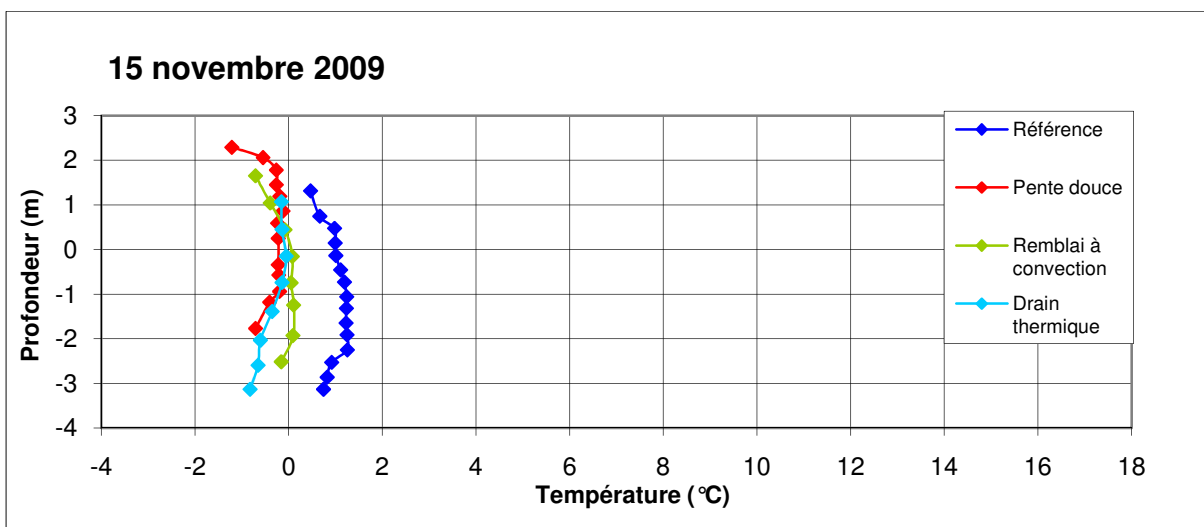


Figure A-53. Régime thermique des quatre sections au 15 novembre 2009

Au cours du mois de novembre, les sections continuent de se refroidir. Au 15 novembre, les trois techniques ont des profils de température similaires entre +1 mètre dans le remblai et -1 mètre dans le sol naturel. En dessous de cette profondeur, la section à remblai à convection est légèrement plus chaude : 0°C pour la section (C) contre -0,6°C pour les sections (B) et (D). La

section de référence subit toujours les conséquences de l'écoulement en profondeur et reste donc plus chaude que les autres sections.

A.28. Décembre 2009

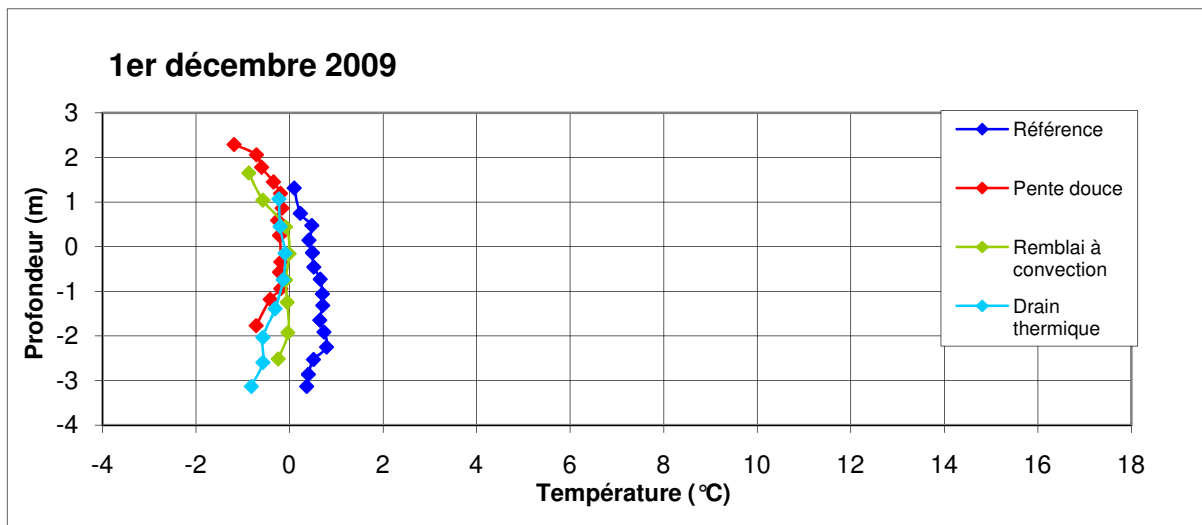


Figure A-54. Régimes thermiques dans les quatre sections au 1er décembre 2009

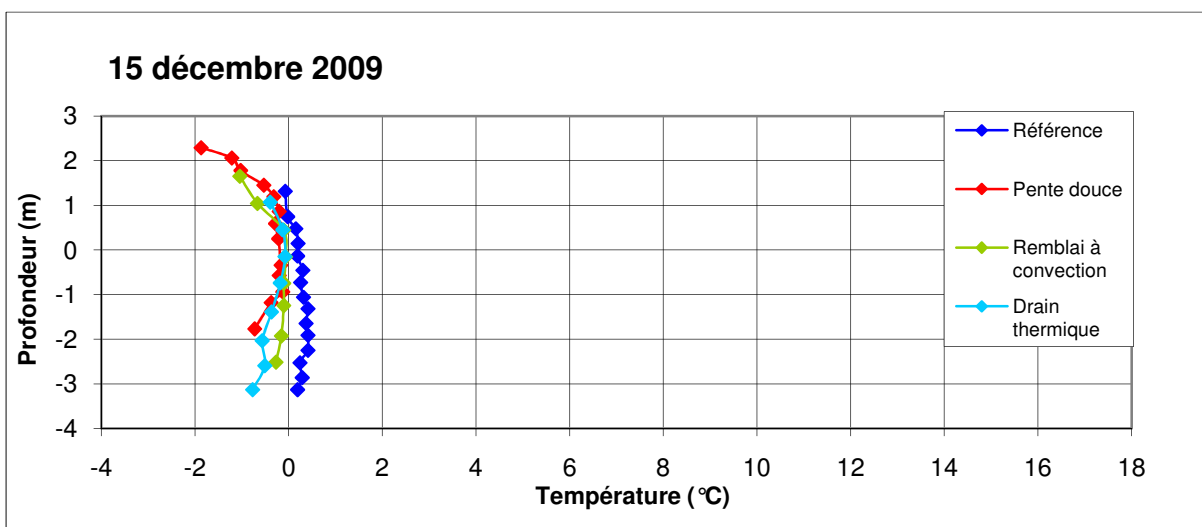


Figure A-55. Régimes thermiques des quatre sections au 15 décembre 2009

En décembre, le refroidissement se poursuit. Les techniques ont toujours des profils proches. Les seules différences notables sont présentes pour les profondeurs inférieures à 1 mètre dans le sol naturel. Les sections à drain thermique et à pente douce sont les plus froides, puis la section à remblai à convection d'air et enfin la section de référence.

A.29. Janvier 2010

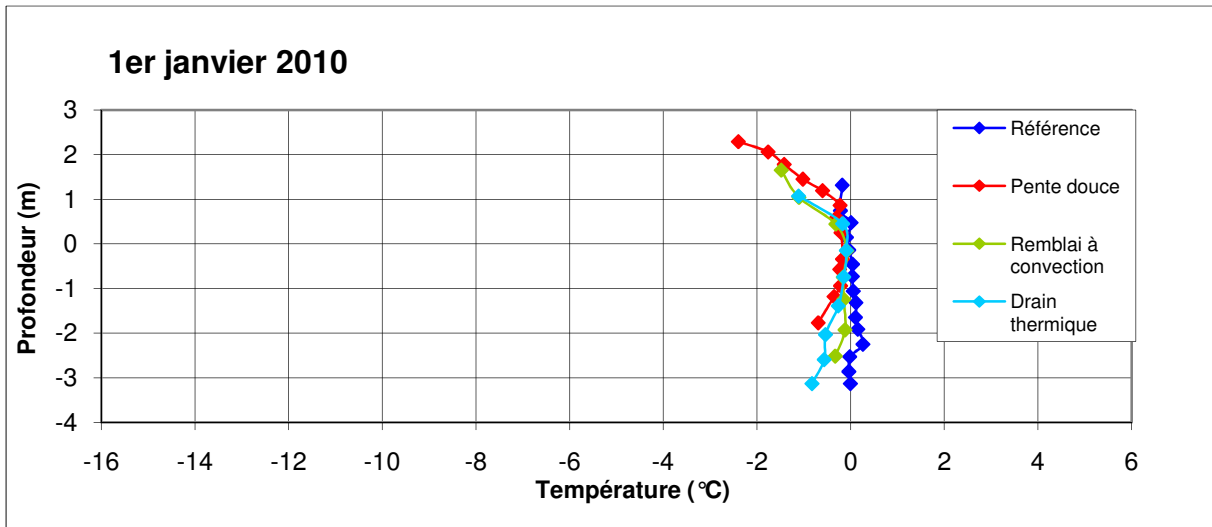


Figure A-56. Régimes thermiques des quatre sections au 1er janvier 2010

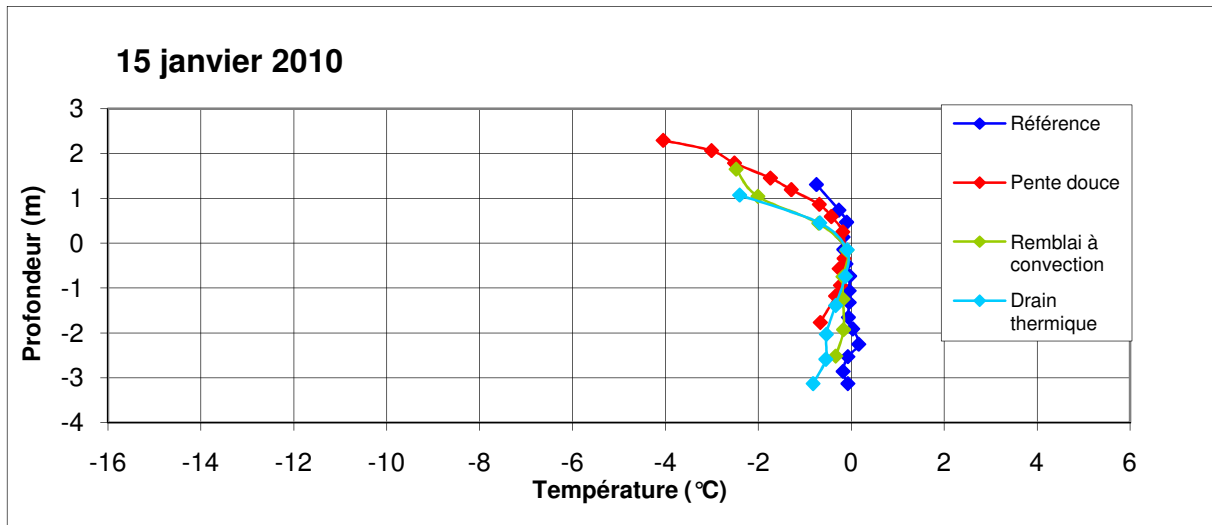


Figure A-57. Régimes thermiques des quatre sections au 15 janvier 2010

Au 15 janvier, la section de référence connaît de nouveau des températures négatives sur presque la totalité de la profondeur instrumentée. Le refroidissement de l'air extérieur est alors suffisamment important pour que les comportements des différentes sections se distinguent. A 1 mètre de hauteur dans le remblai, les sections (C) et (D) sont les plus froides (-2°C et $-2,4^{\circ}\text{C}$ respectivement), suivi par la section à pente douce (-1°C) et enfin la section de référence ($-$

0,5°C). En dessous de 1 mètre de profondeur dans le sol naturel, on retrouve les mêmes comportements que le mois précédent.

A.30. Février 2010

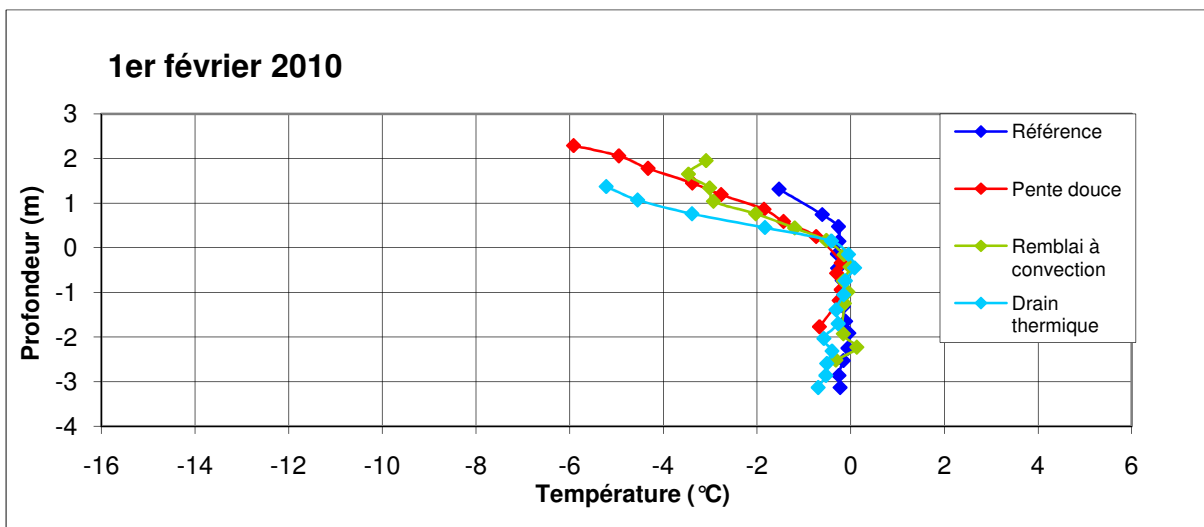


Figure A-58. Régimes thermiques des quatre sections au 1er février 2010

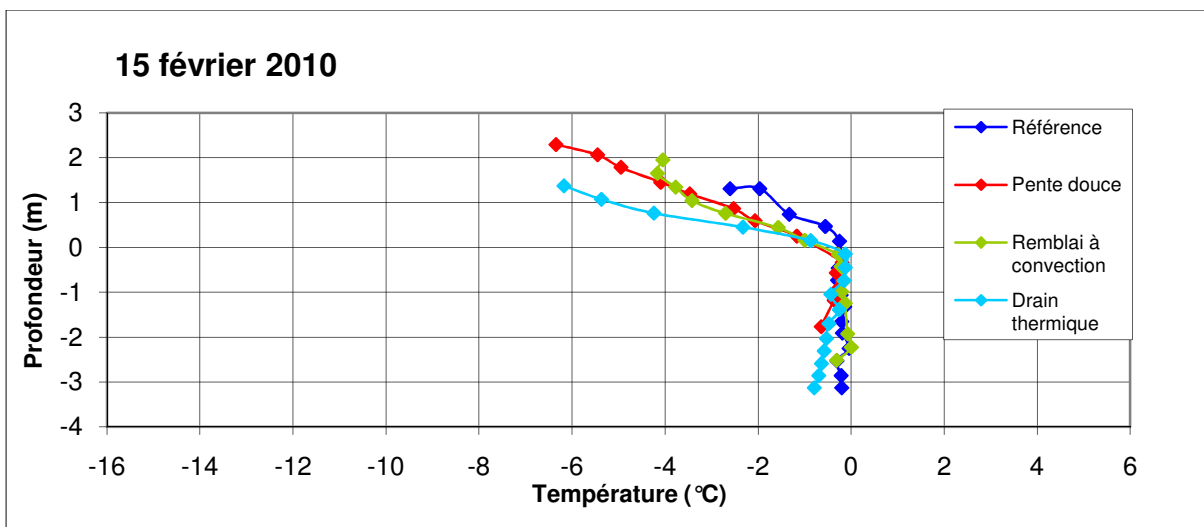


Figure A-59. Régime thermiques des quatre sections au 15 février 2010

Au cours du mois de février 2010, les quatre sections ont des régimes thermiques identiques dans le mètre situé sous le contact remblai / sol naturel. En dessous de cette zone, les sections (B) et

(D) restent légèrement plus froides que les deux autres. Au dessus du contact remblai / sol naturel, le refroidissement est important pour les différentes sections. La section à drain thermique se distingue par un refroidissement plus prononcé ; à 1 mètre de hauteur dans le remblai, elle est environ 2°C plus froide que les sections (B) et (C), et 3,7°C plus froide que la section de référence.

A.31. Mars 2010

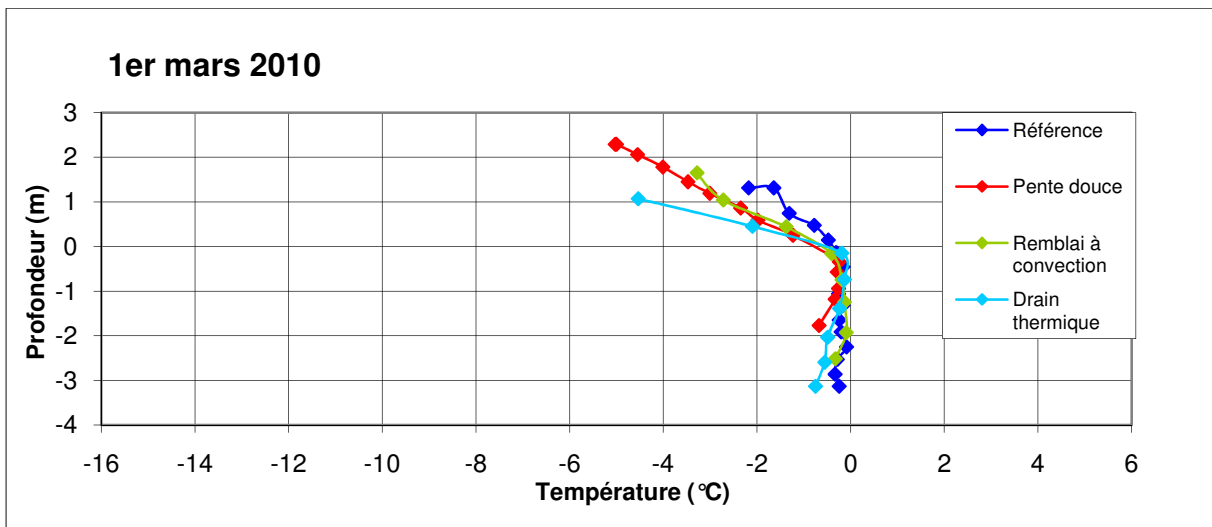


Figure A-60. Régimes thermiques des quatre sections au 1er mars 2010

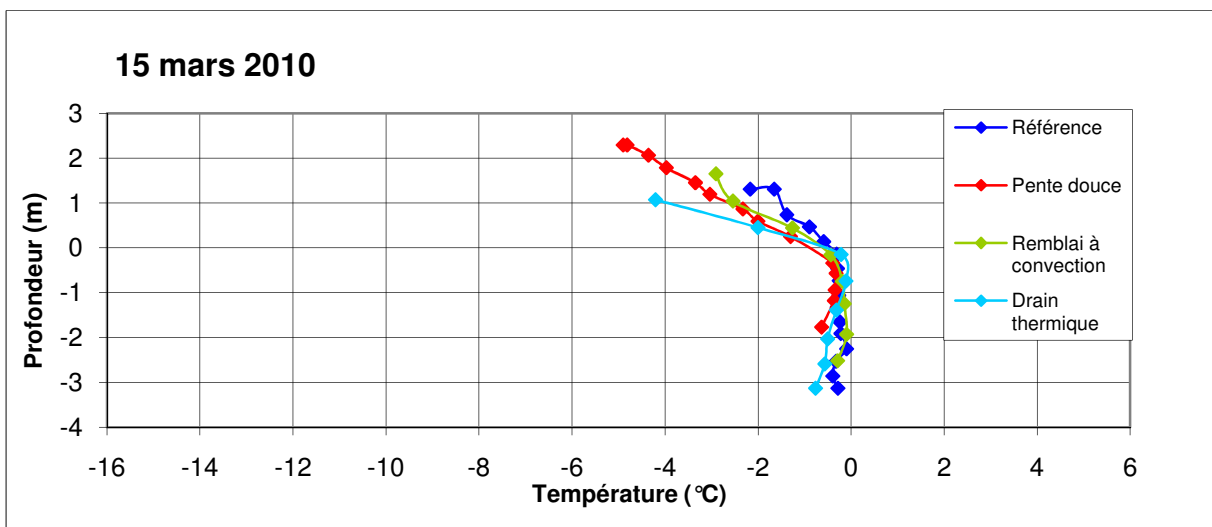


Figure A-61. Régimes thermiques des quatre sections au 15 mars 2010

Le mois de mars correspond à la fin de l'hiver en 2010. Ce dernier ayant été moins froid cette année, les sections n'ont pas refroidit le sol naturel en profondeur. Autour du contact remblai / sol naturel et en dessous de cette profondeur, les sections ont des régimes thermiques proches. Dans le remblai, les trois techniques sont plus froides que la section de référence. La section à drain thermique se distinguant pas un meilleur refroidissement.

A.32. Avril 2010

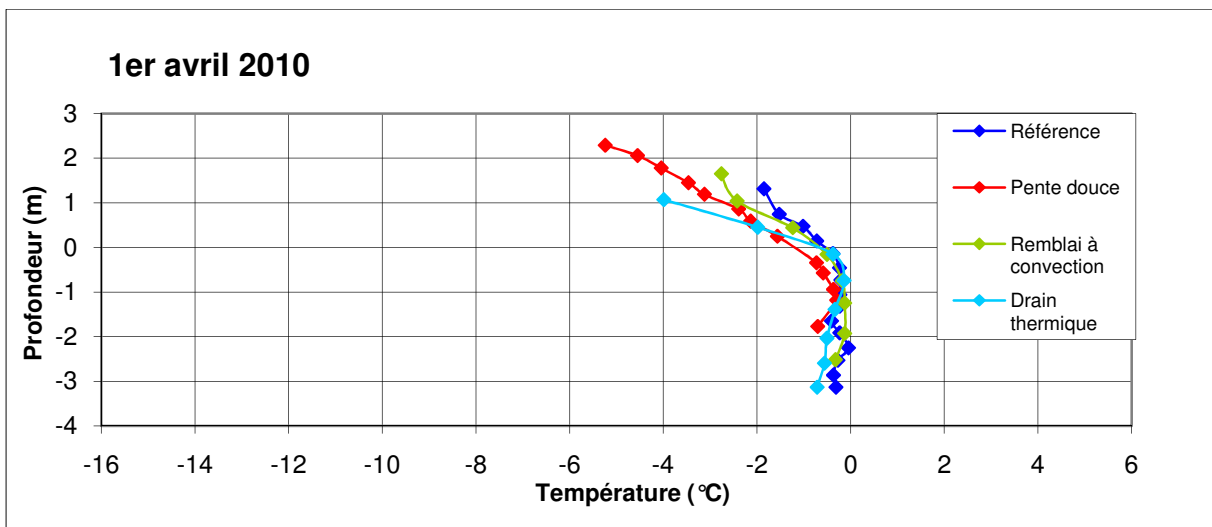


Figure A-62. Régimes thermiques des quatre sections au 1er avril 2010

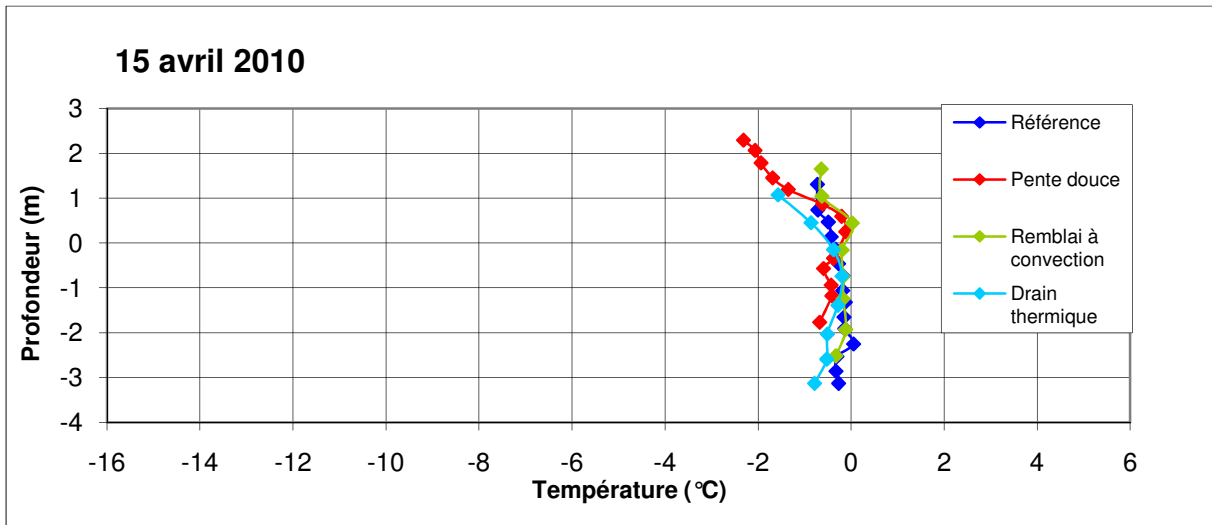


Figure A-63. Régimes thermiques des quatre sections au 15 avril 2010

Au début du mois d'avril, seule la section à adoucissement de pente est capable de refroidir la partie supérieure du sol naturel. La section à drain thermique restant cependant la plus froide dans le remblai. A partir du 15 avril, les quatre sections ont des régimes thermiques similaires. Les sections (B) et (C) étant légèrement plus chaudes que la section de référence juste au dessus du contact remblai / sol naturel.

A.33. Mai 2010

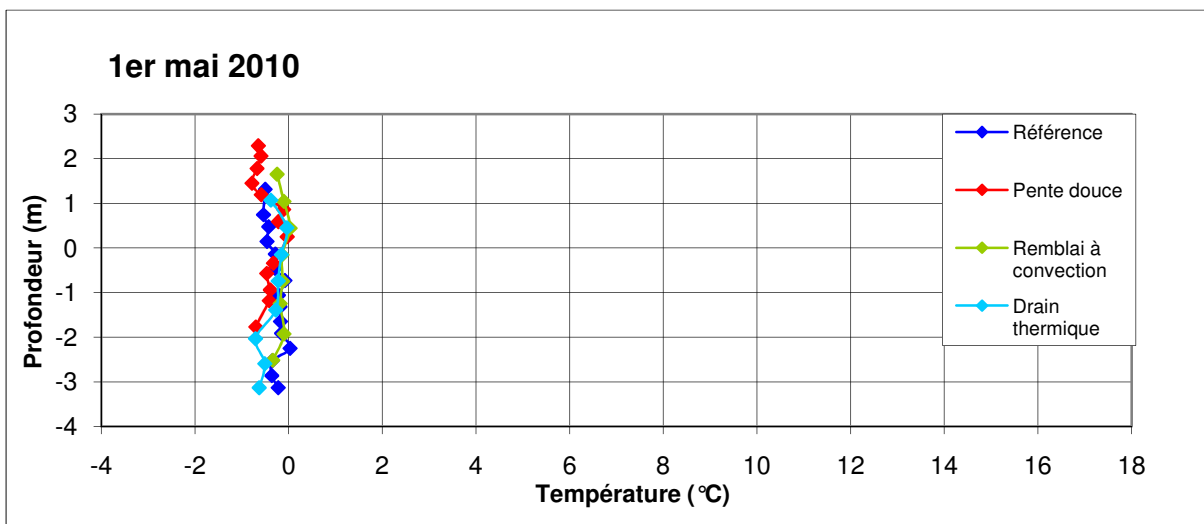


Figure A-64. Régimes thermiques des quatre sections au 1er mai 2010

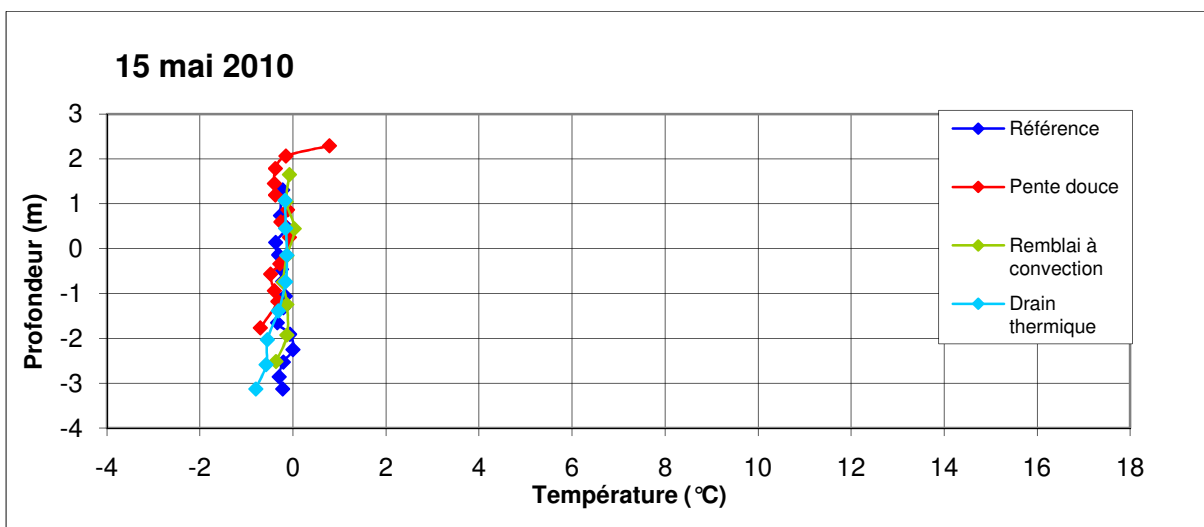


Figure A-65. Régimes thermiques des quatre sections au 15 mai 2010

Au cours du mois de mai, les quatre sections ont des régimes thermiques identiques au dessus de 1 mètre de profondeur dans le sol naturel. En dessous de cette profondeur, les sections à pente douce et à drain thermique se distinguent car elles sont légèrement plus froides. Le réchauffement de l'air extérieur commence à être ressenti dans les températures de surface de sections.

A.34. Juin 2010

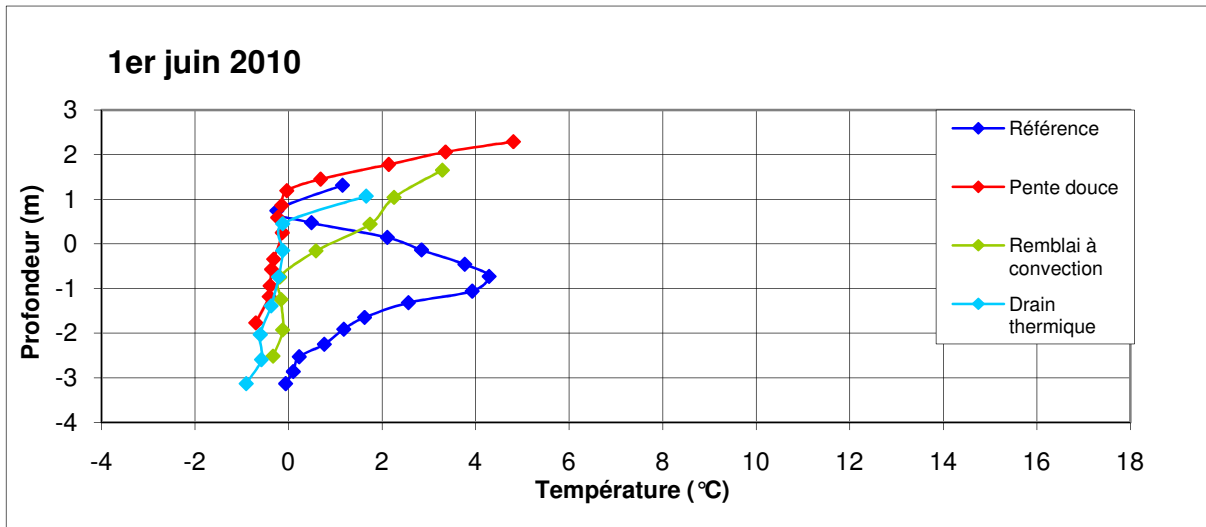


Figure A-66. Régimes thermiques des quatre sections au 1er juin 2010

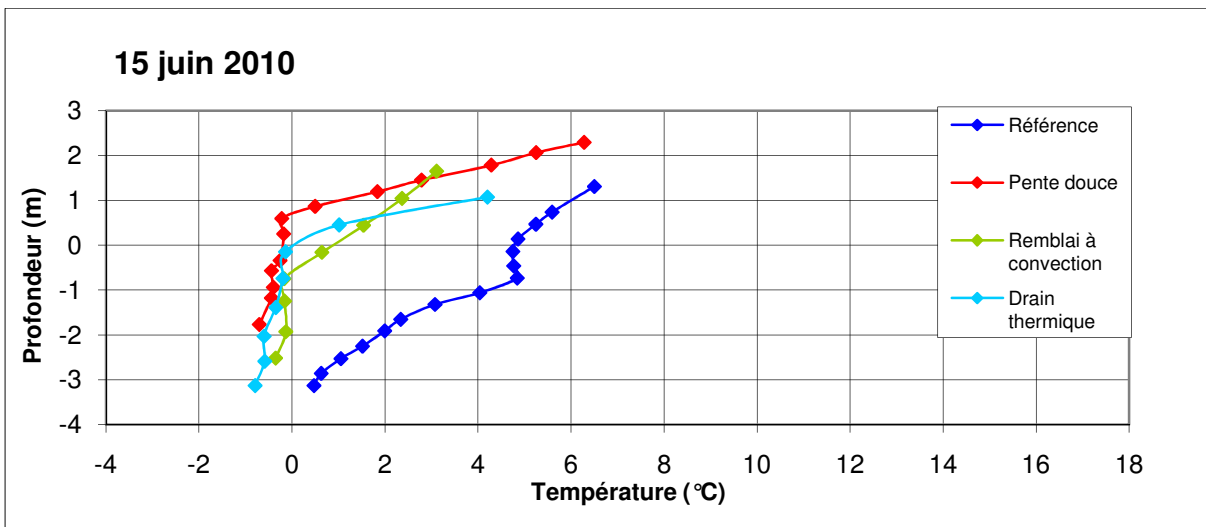


Figure A-67. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juin 2010

On retrouve au cours du mois de juin, l'écoulement d'eau qui réchauffe massivement la section de référence autour de 0,75 mètre de profondeur dans le sol naturel. La section est perturbée et devient rapidement beaucoup plus chaude que les autres sections. Les autres sections ayant moins refroidi l'hiver précédent, elles sont plus facilement affectées par les températures élevées de l'air extérieur. Ainsi, le 15 juin, le front de dégel atteint déjà 0,6 mètre dans le sol naturel pour la section à remblai à convection d'air; il est proche du contact remblai / sol naturel pour la section

à drain thermique. La section à pente douce reste la moins affectée (environ 0,7 mètre dans le remblai).

A.35. Juillet 2010

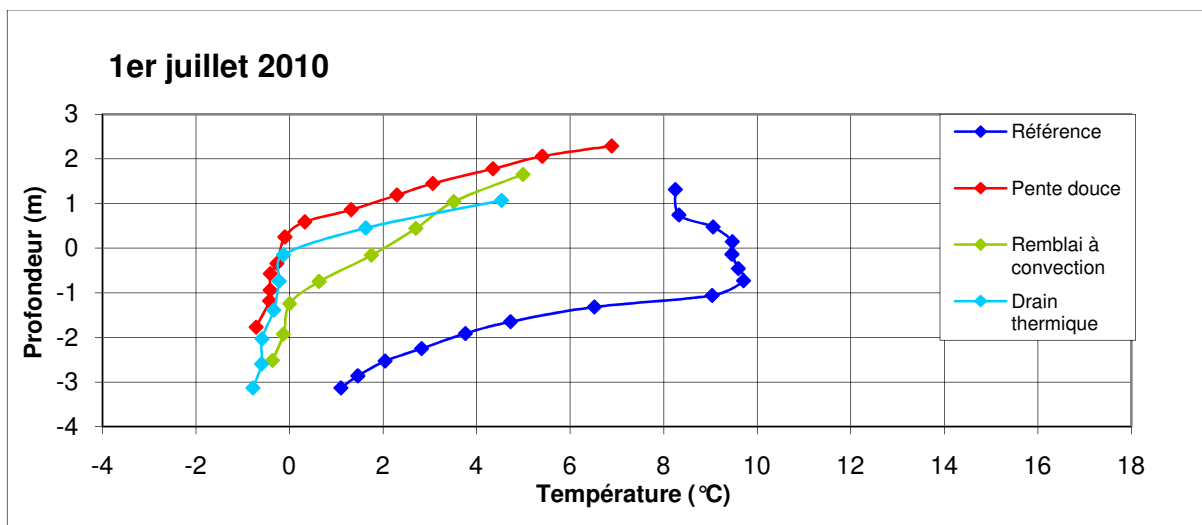


Figure A-6868. Régimes thermiques des quatre sections au 1er juillet 2010

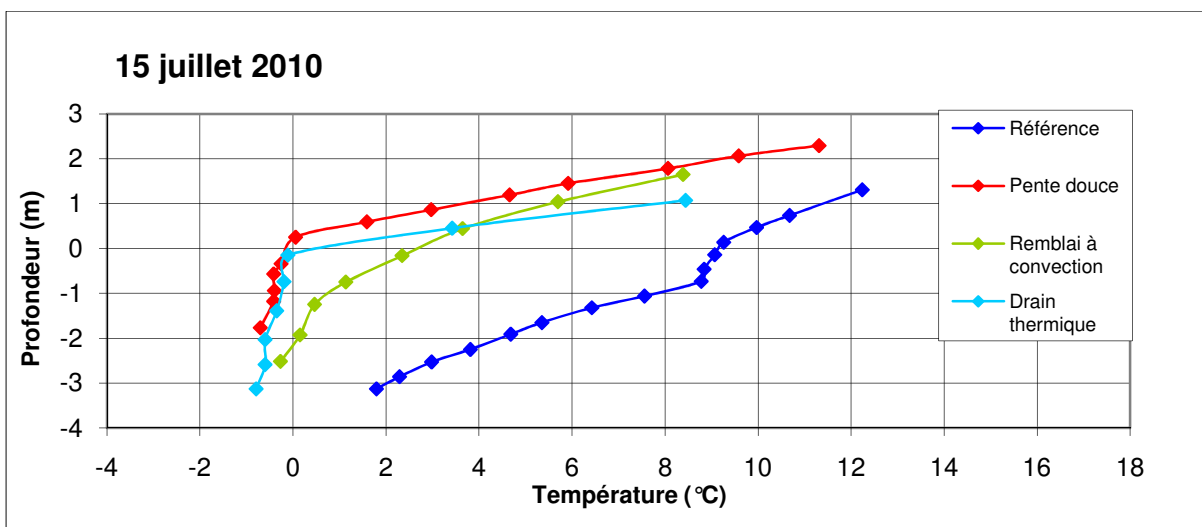


Figure A-69. Régimes thermiques des quatre sections au 15 juillet 2010

Au cours du mois de juillet, le réchauffement se poursuit intensivement. La température de l'écoulement qui affecte la section de référence continuant d'augmenter ; proche de 4°C au début du mois de juin, elle est proche de 9°C à la fin du mois de juillet. Les différentes sections se réchauffent peu à peu. Le front de dégel dépasse 2 mètres pour la section (C) alors qu'il n'atteint

pas le contact remblai / sol naturel pour les sections (B) et (D). A 1 mètre de hauteur dans le remblai, les quatre sections connaissent des températures élevées : 3,8°C pour la section (B), 5,6°C pour la section (C), 8,3°C pour la section (D) et environ 11,4°C pour la section (A).

A.36. Août 2010

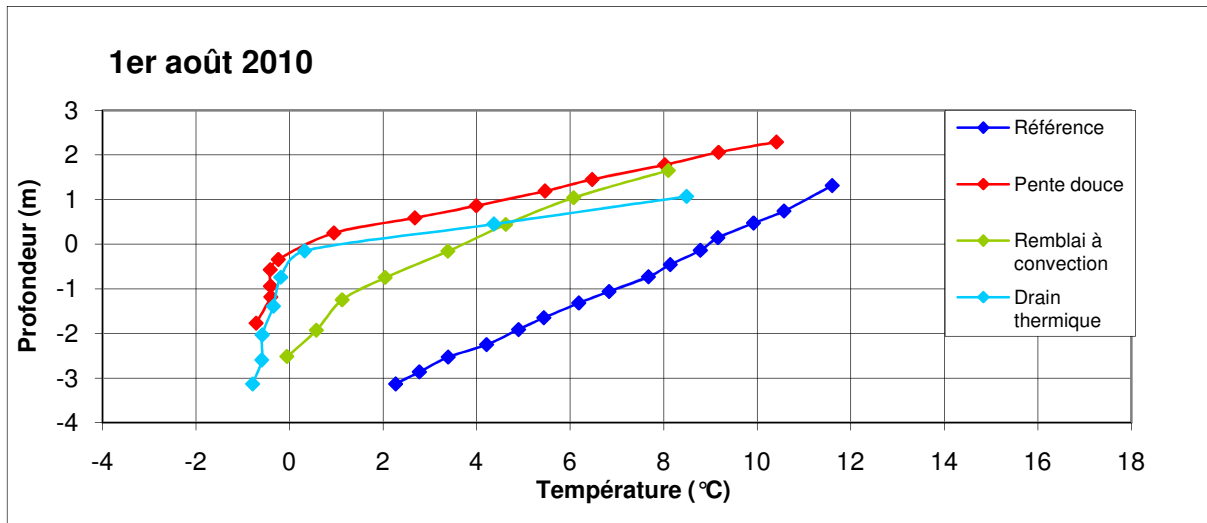


Figure A-70. Régimes thermiques des quatre sections au 1er août 2010

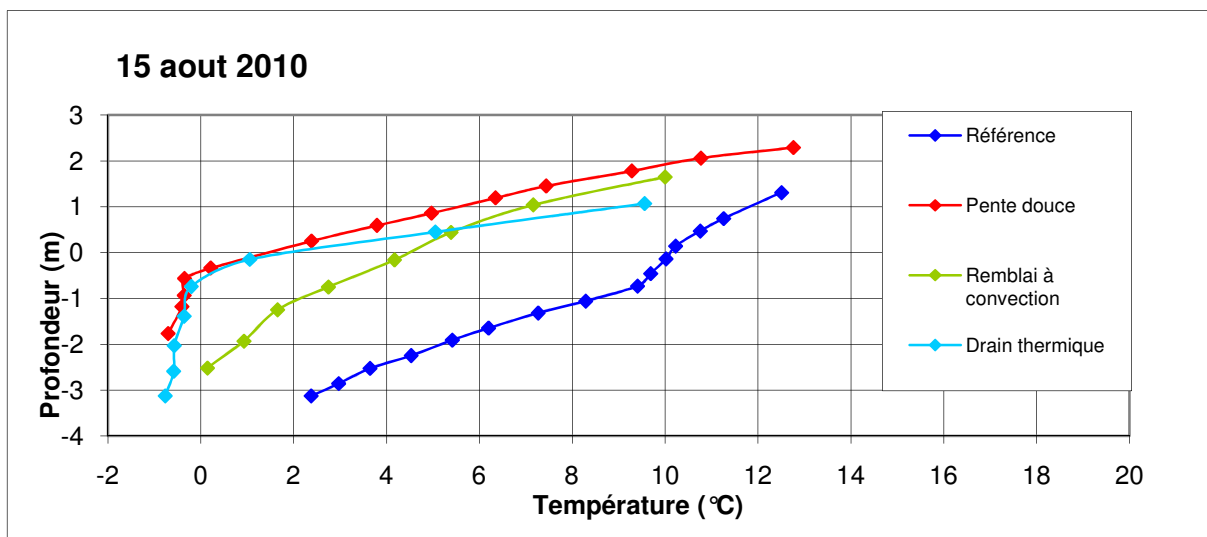


Figure A-71. Régimes thermiques des quatre sections au 15 août 2010

Le mois d'août correspond à la fin du réchauffement en surface. Cependant, la chaleur contenue dans le remblai continue de se diffuser dans le sol naturel. La profondeur de dégel continue donc d'augmenter : près de 4 mètres par extrapolation pour la section de référence, 2,6 mètres pour la

section à remblai à convection d'air, 0,6 mètre pour la section à drain thermique et 0,3 mètre pour la section à adoucissement de pente.

A.37. Septembre 2010

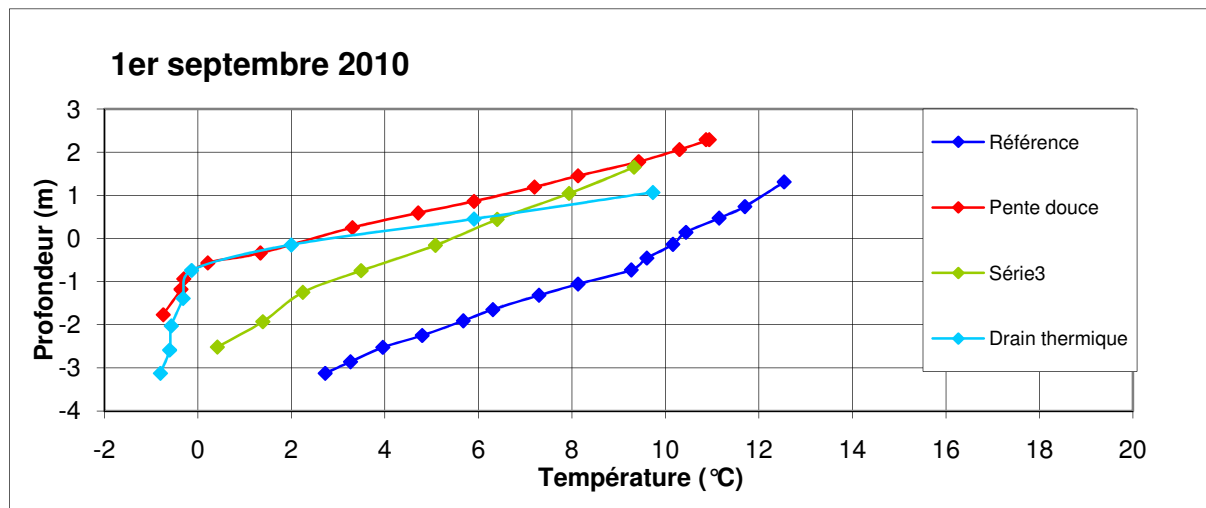


Figure A-71. Régimes thermiques des quatre sections au 1^{er} septembre 2010

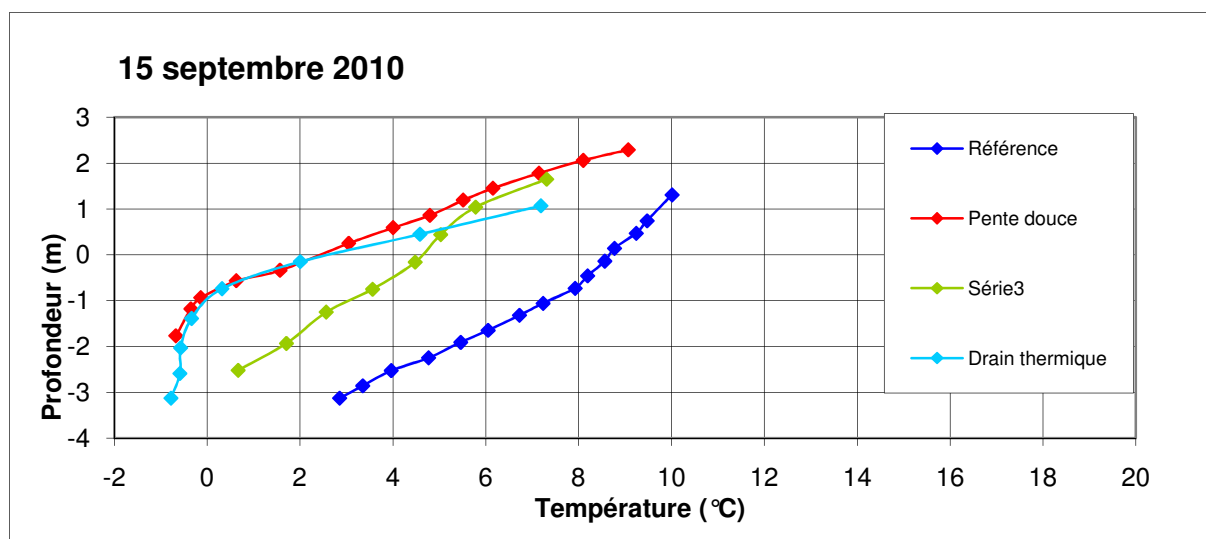
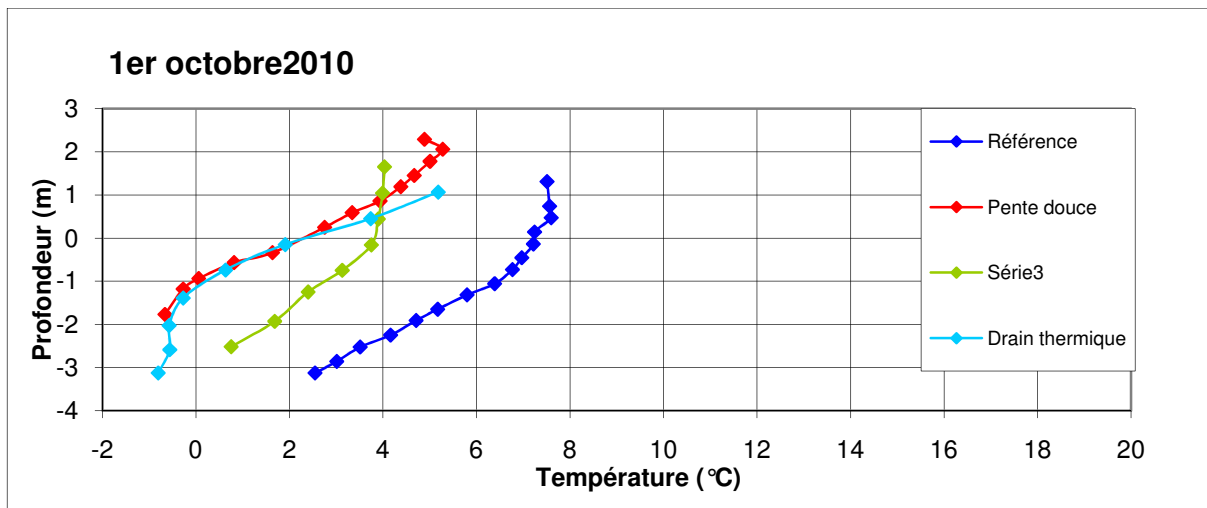


Figure A-72. Régimes thermiques des quatre sections au 15 septembre 2010

Au cours du mois de septembre, la température de surface diminue tandis que la chaleur absorbée antérieurement continue de se propager plus en profondeur dans les sections. Les profondeurs maximales annuelles de dégel sont alors observées : 0,8 m pour la pente douce, 1m pour le drain thermique, 2,9 m par extrapolation pour la section à remblai à convection d'air et 4,5m par extrapolation pour la section de référence. Ces valeurs sont plus élevées que l'année précédente, ce qui correspond bien à l'effet d'un hiver moins froid.

A.38. Octobre 2010

Figure A-73. Régimes thermiques des quatre sections au 1^{er} octobre 2010

Le début du mois d'octobre est la dernière période de suivi des données. Les températures en surface décroissent fortement alors que les températures en profondeur sont aux maximums annuels. La vague de refroidissement, qui se propage depuis la surface, commence alors à refroidir l'ensemble des sections.