

**EXPÉRIMENTATION DE MÉTHODES DE MITIGATION ET DES EFFETS DE LA FONTE
DU PERGÉLISOL SUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT AU NUNAVIK :
PROJET EXPÉRIMENTAL DE SALLUIT**

RAPPORT FINAL (VERSION FINALE)



Rédigé par :
Guy Doré
Érika Voyer

Rapport GCT-2009-04

Remis au ministère des transports du Québec

Groupe de recherche en ingénierie des chaussées

www.gci.ulaval.ca

Juin 2010



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de génie civil

www.gci.ulaval.ca

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	HISTORIQUE DU SITE EXPÉRIMENTAL.....	2
3	ANALYSE DES DONNÉES THERMIQUES DE LA PREMIÈRE ANNÉE DE SUIVI À SALLUIT	7
3.1	INTRODUCTION	7
3.2	ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES EN FONCTION DU TEMPS	8
3.2.1	<i>Température de l'air (Station météo) en fonction du temps.....</i>	<i>8</i>
3.2.2	<i>Température des talus et des chaussées en fonction du temps.....</i>	<i>11</i>
3.3	ANALYSE DES TEMPÉRATURES DANS LES TALUS	17
3.3.1	<i>Profils de températures en fonction de la profondeur pour les thermistances installées dans les talus.....</i>	<i>17</i>
3.3.2	<i>Températures du système d'entrées et de sorties d'air pour les talus</i>	<i>22</i>
3.4	ANALYSE DES PROFILS DE TEMPÉRATURES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DANS LA CHAUSSÉE	25
3.5	COMPARAISON ENTRE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ET LES TEMPÉRATURES DE SURFACE DES TALUS ET DE LA CHAUSSÉE	30
3.6	ESTIMATION DE LA PROFONDEUR DE LA COUCHE ACTIVE (MOLLISOL) DU SITE À L'ÉTUDE.....	32
3.7	ANALYSE PRÉLIMINAIRE DU COMPORTEMENT DES SYSTÈMES DE PROTECTION	34
3.7.1	<i>Drain thermique.....</i>	<i>34</i>
3.7.2	<i>Remblai à convection.....</i>	<i>36</i>
3.7.3	<i>Surfaces réfléchissantes.....</i>	<i>37</i>
4	ANALYSE DES DONNÉES THERMIQUES DE LA DEUXIÈME SAISON DE SUIVI	39
4.1	DONNÉES DISPONIBLES	39
4.2	GRADIENTS THERMIQUES MESURÉS DANS LES TALUS.....	43
4.3	GRADIENTS THERMIQUES MESURÉS SOUS LA CHAUSSÉE	45
4.4	ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE AU NIVEAU DE L'INTERFACE REMBLAI-SOL.....	46
5	CONDITION DES SECTIONS EXPÉRIMENTALES	48
5.1	CONDITION GÉNÉRALE DE LA ROUTE.....	48
5.2	CONDITION DES SECTIONS EXPÉRIMENTALES	51
6	DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS	54
6.1	EXPÉRIMENTATION DE TECHNIQUES DE PROTECTION SUR LE TERRAIN	56
6.2	CONCEPTION DES SECTIONS	58
6.3	AUTRES CONSIDÉRATIONS	60
7	CONCLUSION.....	62
	RÉFÉRENCES	64
	ANNEXE 1 : DONNÉES THERMIQUES ADDITIONNELLES POUR LES SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE SALLUIT	66

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Intersection entre le chemin menant à l'aéroport et le chemin menant à Salluit II	2
Figure 2-2 : Vue en plan du site d'essai (Beaulac et Doré, 2006)	3
Figure 2-3 Principe du remblai à convection d'air	4
Figure 2-4 Principe du drain de chaleur.....	5
Figure 3-1 A) Températures moyennes hebdomadaires de la station météo SM1, B) Températures provenant de la station météo d'Environnement Canada, Salluit (Environnement Canada, Archives climatiques nationales).....	10
Figure 3-2: Régime thermique dans les sols	14
Figure 3-3 Évolution des températures en fonction du temps A) à la station SM1 et dans les talus, B) Chapelet C (Talus du drain thermique avec surface réfléchissante), C) Chapelet H (Talus du remblai à convection avec surface réfléchissante), D) Chapelet E (Talus de la section témoin).....	15
Figure 3-4 Évolution des températures en fonction du temps A) à la station SM1 et dans la chaussée, B) Chapelet F (Surface réfléchissante), C) Chapelet D (Section témoin).....	16
Figure 3-5 Profils de température en fonction de la profondeur des thermistances pour les talus des sections drain thermique et drain thermique avec surface réfléchissante et le talus de la section témoin, pour quatre semaines représentatives soit les semaines du 9 août 2006, du 19 octobre 2006, du 7 décembre 2006 et du 18 janvier 2007	20
Figure 3-6 Profils de température en fonction de la profondeur des thermistances pour les talus des sections remblai à convection et remblai à convection avec surface réfléchissante ainsi que le talus de la section témoin , pour quatre semaines représentatives soit les semaines du 9 août 2006, du 19 octobre 2006, du 7 décembre 2006 et du 18 janvier 2007	21
Figure 3-7 Profils de température (semaine 20, soit du 7 au 14 décembre 2006) en fonction de la profondeur des thermistances pour le talus de la section remblai à convection avec surface réfléchissante (T-RCSR) , le talus de la section drain thermique avec surface réfléchissante et le talus de la section témoin	22
Figure 3-8 Évolution des températures des entrées et des sorties en fonction du temps des drains thermiques, A) Talus de la section drain thermique, B) Talus de la section drain thermique avec surface réfléchissante	24
Figure 3-9 Évolution des températures des entrées et des sorties en fonction du temps des remblais à convection, A) Talus de la section remblai à convection, B) Talus de la section remblai à convection avec surface réfléchissante	25
Figure 3-10 Profils de température en fonction de la profondeur des thermistances pour les chaussées avec surface réfléchissante (Surface réfléchissante seule, drain thermique avec surface réfléchissante et remblai à convection avec surface réfléchissante) et la chaussée témoin , pour quatre semaines représentatives, A) Semaines 3 (11 au 17 août 2006), 10 (28 septembre au 5 octobre 2006) et 16 (9 au 16 novembre 2006), B) Semaines 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007)....	29
Figure 3-11 Évolution des températures de surface en fonction du temps, A) Sections de talus avec drain thermique, B) Sections de talus avec remblai à convection, C) Sections de chaussée	31
Figure 3-12 Profondeur du mollisol dans les talus, selon l'extrapolation linéaire de profils de température selon la profondeur pour les données de la semaine 5 (25 au 31 août 2006).....	33
Figure 3-13 Profondeur du mollisol dans les talus, selon l'extrapolation linéaire de profils de température selon la profondeur pour les données de la semaine 5 (25 au 31 août 2006).....	34
Figure 4-1 : Correction de la position d'une thermistances mal positionnée.....	40
Figure 4-2 : Analyse temporelle des données thermiques	41

Figure 4-3 : Régime thermique dans les talus de quatre sections expérimentales au 19 septembre 2007	44
Figure 4-4 : Régime thermique dans les talus de quatre sections expérimentales au 4 février 2008	44
Figure 4-5 : Régimes thermiques dans la chaussée de deux sections expérimentales au 19 septembre 2007 et au 4 février 2008.....	45
Figure 4-6 : Évolution de la température en fonction du temps pour les talus de trois sections expérimentales à une profondeur de 1,8 m (entre le 17 septembre et le 5 février 2008)	47
Figure 5-1 : Vue d'ensemble de la route d'accès de l'aéroport de Salluit à l'entrée du village.	49
Figure 5-2 : Fissures dans l'épaulement du remblai de la route de Salluit	50
Figure 5-3 : basculement des poteaux de la ligne de transport électrique	50
Figure 5-4 : Vue des conduites de ventilation et de l'ensemble des sections d'essai	51
Figure 5-5 : Conduites de ventilation telles qu'observées à l'hiver 2008.....	52
Figure 5-6 : Signes d'affaissement des tumulus supportant les systèmes de ventilation.....	53
Figure 5-7 : Accumulation d'eau au pied du talus de la section avec drain thermique	53
Figure 5-8 : Condition des surfaces réfléchissantes.....	54
Figure 6-1 : modifications à la conception du système de drain thermique pour les expérimentations futures.....	59
Figure 0-0-1 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans le talus avec drain thermique (T-DT)	67
Figure 0-2 : Profils de température à quatre périodes dans le talus avec drain thermique (T-DT).....	68
Figure 0-3 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans la chaussée avec surface réfléchissante et drain thermique (C-DTSR).....	69
Figure 0-4 : Profils de température à quatre périodes dans la chaussée avec surface réfléchissante et drain thermique (C-DTSR).....	69
Figure 0-5 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans le talus avec surface réfléchissante et drain thermique (T-DTSR)	70
Figure 0-6 : Profils de température à quatre périodes dans le talus avec surface réfléchissante et drain thermique (T-DTSR)	70
Figure 0-7 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans la chaussée de la section témoin (C-T).....	71
Figure 0-8 : Profils de température à quatre périodes dans la chaussée de la section témoin (C-T)	72
Figure 0-9 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans le talus de la section témoin (T-T)	72
Figure 0-10 : Profils de température à quatre périodes dans le talus de la section témoin (T-T)	73
Figure 0-11 : Évolution des températures dans le talus avec convection (T-RC). Les profondeurs vont de 0,4 à 1,9 m.	73
Figure 0-12 : Profils de température à quatre périodes dans la chaussée avec surface réfléchissante et drain thermique (C-DTSR).....	74
Figure 0-13 : Profil des températures en fonction du temps à 1,8 m de profondeur.....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 Position des chapelets de thermistances et nomenclature utilisée dans le texte	12
Tableau 4-1 : Synthèse des thermistances disponibles avant et après correction.	42

1 INTRODUCTION

Le projet expérimental de Salluit a été entrepris à l'été 2006 pour permettre de documenter la réalisation et la performance de techniques de protection du pergélisol appliquées à un remblai routier en conditions réelles d'exploitation. Les techniques appliquées à Salluit incluent le drain thermique, le remblai à convection et la surface réfléchissante. L'objectif principal de ce projet est de vérifier l'efficacité de ces techniques. Les objectifs spécifiques du projet étaient les suivants :

- Concevoir, réaliser et instrumenter six sections d'essai sur le chemin d'accès de l'aéroport de Salluit afin de valider l'efficacité de trois techniques jugées prometteuses dans le contexte du Nunavik (rapport de recherche GCT-0405).
- Obtenir les paramètres thermiques (requis pour la modélisation dans le cadre du projet R535.1P1) et les données de comportement à court terme permettant de juger de la performance des techniques proposées
- Établir le potentiel et le champ d'application des techniques pour les différentes infrastructures de transport du Nunavik.

Avant de procéder à l'installation de ces trois solutions d'adaptation à Salluit, le drain thermique et les surfaces réfléchissantes ont été respectivement expérimentés en laboratoire et au Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL). Ces techniques ont également fait l'objet de modélisation par méthodes numériques. Lors de ces études préliminaires, les trois techniques ont démontré un niveau d'efficacité qui laissait entrevoir un potentiel d'application intéressant pour la protection des infrastructures de transport du Nunavik.

2 HISTORIQUE DU SITE EXPÉRIMENTAL

Six sections d'essai ont été construites à Salluit à l'été 2006 à l'intersection du chemin pavé menant à l'aéroport et du chemin menant à Salluit II (Figure 2-1).



Figure 2-1: Intersection entre le chemin menant à l'aéroport et le chemin menant à Salluit II (juillet 2005)

Cette section de la route d'accès est construite sur des argiles riches en glace. Plusieurs facteurs relatifs à la géométrie du remblai, à l'écoulement d'eau et, surtout, à la pose d'un revêtement bitumineux l'année précédente laissaient présager une dégradation thermique du pergélisol sous la route.

Le site d'essai couvre une longueur totale de 30 m et est situé seulement sur une voie de la route menant à l'aéroport. Le site comporte six sections d'essai adjacentes d'une longueur de 5 m et de 3,6 m de largeur. Elles sont disposées de façon à pouvoir évaluer l'efficacité des techniques utilisées seules et combinées avec une autre technique. Les sections ont été nommées selon leurs caractéristiques et instrumentées à l'aide de thermistances pour permettre le suivi du régime thermique en continu pour toute la durée du projet (figure 2, 3). Les thermistances qui sont situées dans la chaussée sont placées dans des trous de forage. Les autres thermistances sont installées à même le talus. Les systèmes d'acquisition de données se trouvent dans un boîtier métallique, situé à

côté du poteau électrique 30. Sur les épaulements de route, des promontoires sont érigés pour permettre l'installation de systèmes de ventilation requis pour le drain thermique et le remblai à convection (Figure 2-2).

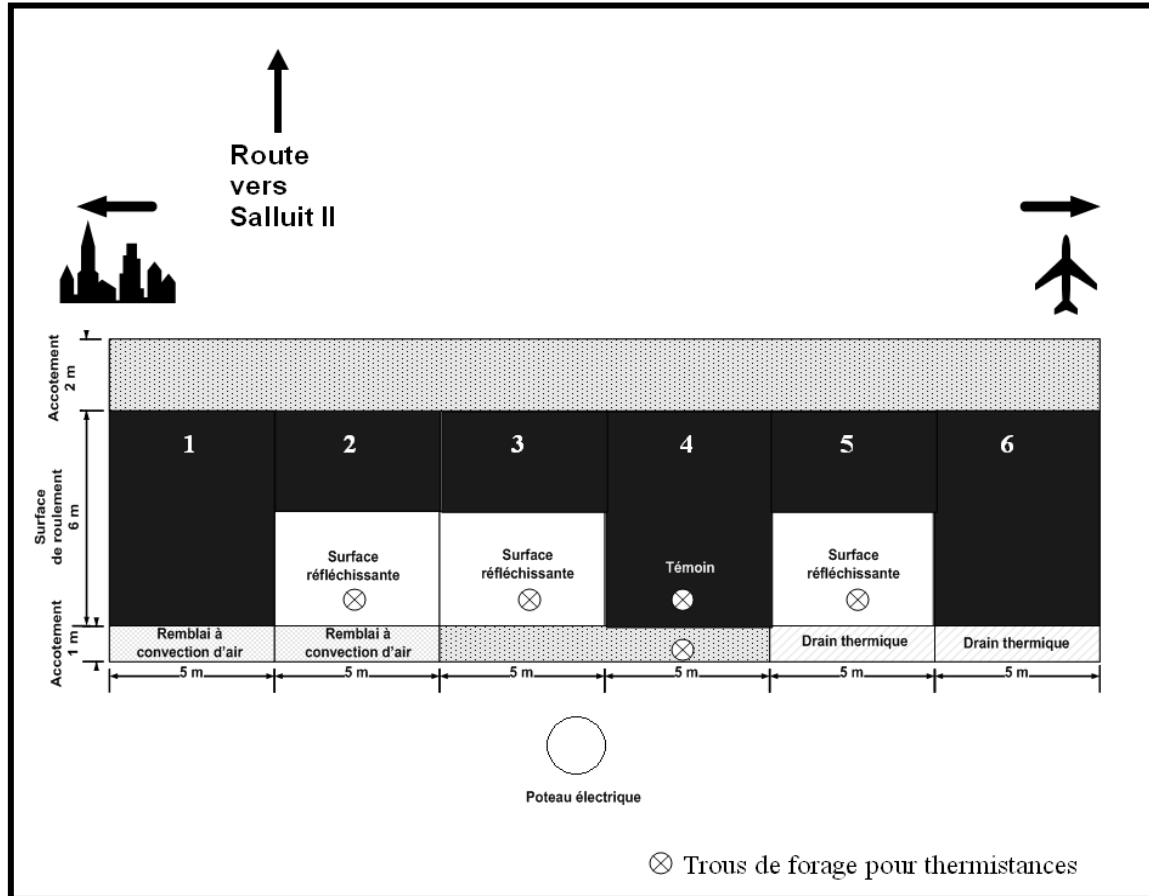


Figure 2-2 : Vue en plan du site d'essai (Beaulac et Doré, 2006)

Les techniques de protection identifiées pour expérimentation dans le cadre de ce projet expérimental sont le remblai à convection d'air, le drain de chaleur et la surface réfléchissante.

Remblai à convection d'air

Le remblai à convection d'air est une technique de protection visant à extraire la chaleur des remblais. Le développement a été réalisé principalement à l'Université d'Alaska à Fairbanks (Goering, 1998, 2001, 2003) Son fonctionnement est schématisé à la Figure 2-3.

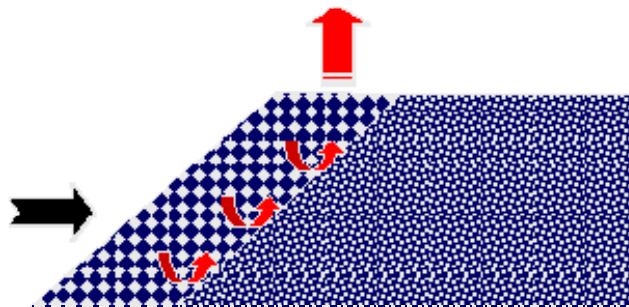


Figure 2-3 Principe du remblai à convection d'air

Durant l'hiver, cette méthode favorise la formation de cellules de convection dans les pores d'un matériau granulaire grossier. L'air dans les pores de la partie supérieure du remblai refroidit et sa plus forte densité le fait descendre poussant vers le haut l'air plus chaud de la partie inférieure du remblai. Ce mouvement d'air augmente considérablement l'efficacité du transfert de chaleur entre le pergélisol

et l'air durant l'hiver. Cette méthode est intéressante puisqu'elle est peu coûteuse, simple et ne requiert pas d'entretien après sa construction.

Drain de chaleur

Le drain de chaleur est une innovation proposée par le *Groupe de recherche en ingénierie des chaussées de l'Université Laval*. Il s'agit d'une méthode permettant l'extraction de chaleur dans les remblais pendant l'hiver. Le drain de chaleur consiste en un géocomposite drainant à forte perméabilité placé à la limite entre le remblai constituant le centre de la piste et celui constituant l'accotement. Son fonctionnement est schématisé à la Figure 2-4.

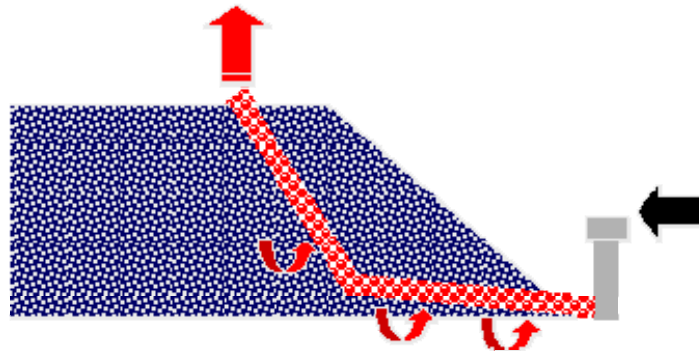


Figure 2-4 Principe du drain de chaleur

Une prise d'air est installée au pied du remblai afin de permettre la création d'un mouvement ascensionnel de l'air dans la membrane. Ce mouvement de l'air va être provoqué par sa densité plus faible en raison d'une différence de température. En somme, cette membrane devrait permettre l'extraction efficace de chaleur du remblai par effet de convection. Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire d'importer le géocomposite, ce qui engendre certains coûts de transport. Il s'agit d'une méthode simple et facile d'installation.

Surface réfléchissante

Cette technique vise à réduire l'entrée de chaleur dans les remblais par l'utilisation de surfaces pâles (ADOTPF, 1985 Esch, 1988, 1996; Molmann et al., 1998). Les surfaces réfléchissantes consistent en des surfaces où une couche de

peinture blanche a été appliquée sur le revêtement bitumineux noir. La technique implique des coûts importants lors de l'application et de l'entretien. En effet, il peut être nécessaire de rappliquer de la peinture périodiquement puisqu'elle tend à s'user. La peinture peut par ailleurs réduire sensiblement l'adhérence de la surface. Pour contrer ces problèmes, il est possible d'y ajouter du sable. L'utilisation d'un béton bitumineux de couleur pâle tel que celui développé par la compagnie Shell peut aussi être envisagée.

La construction des sections expérimentales a été réalisée à la fin de l'été 2006. Dans l'ensemble, la construction du site expérimental était considérée un succès. Plusieurs problèmes sont toutefois survenus durant la construction incluant un problème important de déversement d'huile sur le pavage.

Ce dernier problème a entraîné une dégradation rapide des surfaces réfléchissantes ainsi que l'arrachement du coulis qui servait à protéger les fils des thermistances. Plusieurs fils sans protection furent arrachés lors des activités de déneigement l'hiver suivant. Une visite sur le site à la fin de l'hiver a permis de constater un autre problème relié à l'obstruction des conduites d'aération des systèmes convections. Malgré ces problèmes, quelques signes de refroidissement ont été enregistrés au cours de l'hiver mais une perte d'efficacité a été notée à la fin de janvier, vraisemblablement suite à l'obstruction des conduites de ventilation.

L'analyse préliminaire des données thermiques a également mis en évidence plusieurs problèmes reliés à l'identification et aux connections des thermistances. Plusieurs anomalies qui semblent être des inversions de fils ont été notées lors de l'analyse des régimes thermiques.

Pour tenter de remédier à ces problèmes, le Ministère des transports du Québec et l'Université Laval ont collaboré dans l'organisation d'une mission de remise en état du site au cours de l'été 2007. À cette occasion, les surfaces contaminées

par l'huile ont été meulées puis restaurées avec un produit à base de latex, les conduites d'aération ont été rallongées pour assurer une bonne ventilation et les fils endommagés ont été réparés.

Lors d'une visite à l'hiver 2008, plusieurs déficiences ont à nouveau été notées incluant l'arrachement de plaques de la surface réfléchissante et la panne de deux des cinq systèmes d'acquisition de données. Les données des trois systèmes fonctionnels ont été récupérées et analysées.

Le rapport d'étape 2 faisait état de la situation et envisageait plusieurs scénarios incluant l'interruption du projet. Faisant suite à ce rapport,, le Ministère des transports du Québec a choisi de mettre un terme au projet de recherche. Le présent rapport en constituera donc le rapport final. Les sections 3 et 4 du rapport traiteront de l'analyse des données thermiques récupérées entre l'installation des systèmes de mesure et février 2008 et de leur analyse. La section 5 discutera de la condition du site expérimental telle qu'observée lors des visites de février et d'août 2008. La section 6 présentera une discussion sur l'expérience acquise à Salluit ainsi que sur les leçons à en tirer. Cette section présentera également quelques recommandations pour la poursuite de la recherche à Salluit.

3 ANALYSE DES DONNÉES THERMIQUES DE LA PREMIÈRE ANNÉE DE SUIVI À SALLUIT

3.1 Introduction

Les données du site expérimental recueillies de juillet 2006 à février 2008 sont présentées dans les sections 3 et 4 du document. Les données du premier hiver (trente semaines de données enregistrées entre juillet 2006 et février 2007) seront traitées d'abord dans la section 3. Plusieurs problèmes sont survenus durant cette période et une remise en condition du site a été effectuée au cours de l'été 2007. Les données recueillies entre l'été 2007 et février 2008 seront présentées dans la section 4 du rapport.

Durant la première période d'acquisition des données, certains enregistreurs ont cessé de fonctionner, dû à certains problèmes avec l'alimentation électrique et le froid. Certaines données sont alors manquantes. La moyenne hebdomadaire des températures pour chacune des thermistances a été calculée lorsque les données étaient disponibles, et ce pour les trente semaines de relevés (28 juillet 2006 au 20 février 2007). Ce sont ces moyennes hebdomadaires de températures qui sont utilisées dans l'analyse. L'évolution des températures en fonction du temps est d'abord présentée. Ensuite, les profils thermiques de la température en fonction de la profondeur des thermistances pour chacune des sections sont également présentés et comparés. Les profils thermiques sont présentés pour certaines semaines jugées représentatives de l'évolution des températures. L'évolution des températures de la surface ainsi que l'estimation de la profondeur du mollisol sont également analysées. Finalement, l'analyse du comportement du drain thermique, du remblai à convection et des surfaces réfléchissantes en fonction des données recueillies est présentée. Une discussion et des recommandations sont présentées dans la section 6 du rapport.

3.2 Évolution des températures en fonction du temps

3.2.1 Température de l'air (Station météo) en fonction du temps

Les thermistances installées dans la station météo SM1 (localisée sur le boîtier d'instrumentation au site d'essai) ont pris des mesures de températures durant les trente semaines d'expérimentation (28 juillet 2006 à 20 février 2007), sauf pour la huitième semaine, soit du 14 au 21 septembre 2006. Seule la station météo SM1 est prise en considération, puisque la sonde SM2 n'a fonctionné que durant les sept premières semaines (28 juillet 2006 au 14 septembre 2006). Les valeurs de moyenne hebdomadaire de températures de la sonde SM1 sont présentées en fonction du temps dans le graphique de la Figure 3-1 A. Comparées aux valeurs de températures recueillies par la station météo d'Environnement Canada (Environnement Canada, Archives climatiques nationales) située près de l'aéroport de Salluit (Figure 3-1 B), les valeurs recueillies par la station météo

SM1 semblent très réalistes. Dans les deux cas, la température de l'air traverse la limite du 0°C entre la douzième et la quatorzième semaine, soit entre le 12 octobre 2006 et 2 novembre 2006. Il est à noter que les températures prises par Environnement Canada sont pour la plupart des températures diurnes. Les températures de l'air sont des données importantes puisqu'elles permettent de vérifier la cohérence des températures mesurées à la surface de la chaussée et des talus. Également, elles permettent de mieux comprendre l'évolution des diverses températures dans le sol, étant donné que ces dernières sont directement reliées à celle de l'air.

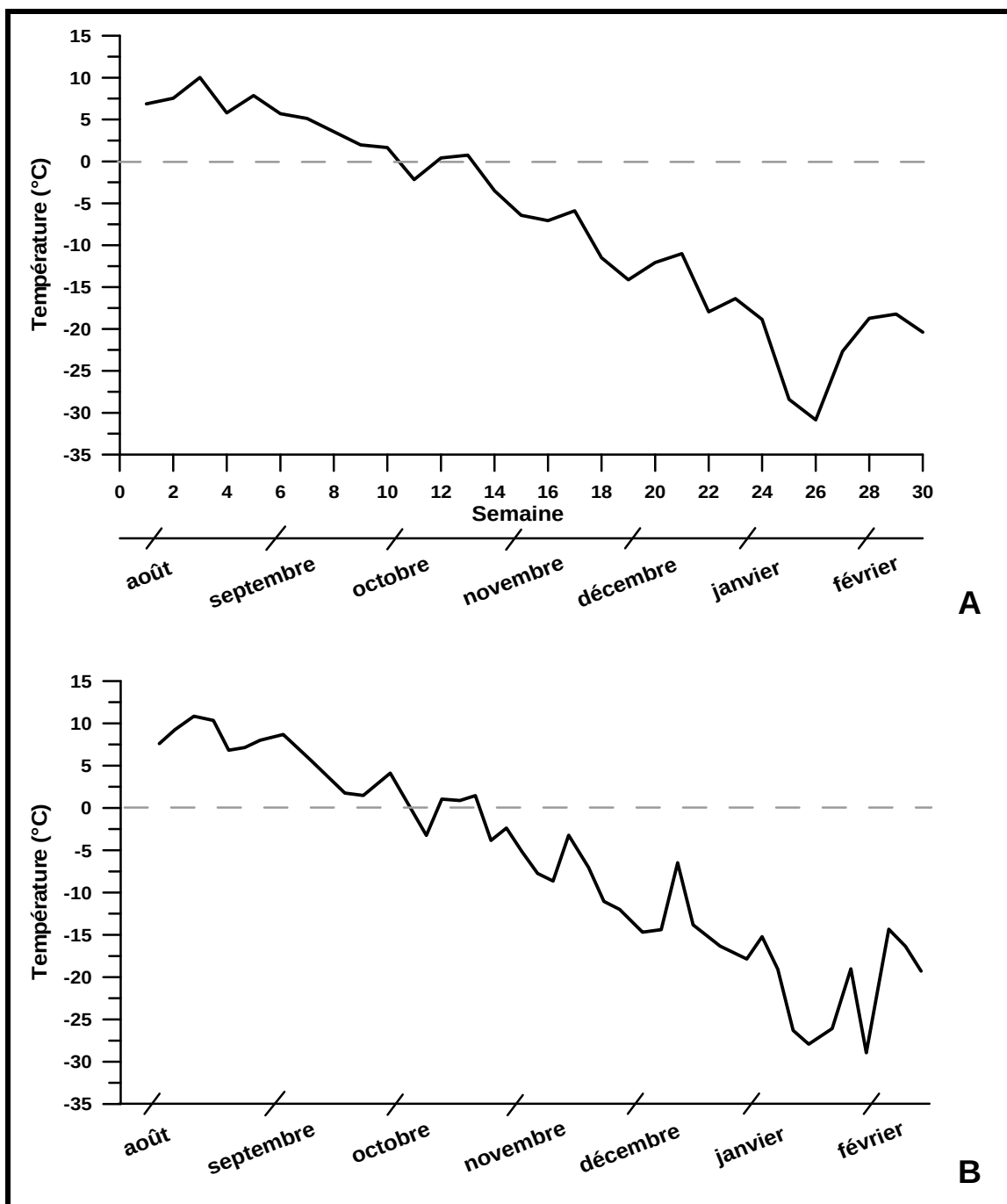


Figure 3-1 A) Températures moyennes hebdomadaires de la station météo SM1, B) Températures provenant de la station météo d'Environnement Canada, Salluit (Environnement Canada, Archives climatiques nationales)

3.2.2 Température des talus et des chaussées en fonction du temps

L'évolution des températures des talus et de la chaussée avec le temps est présentée à la Figure 3-3 et à la Figure 3-4. L'étude des changements de températures selon les saisons permet de mieux comprendre comment réagissent les régimes thermiques dans les talus et la chaussée aux différentes méthodes de mitigation. Toutes les sections de talus et de chaussées ne sont pas présentées dans cette section de l'analyse. Seulement certains graphiques typiques de chaussée et de talus sont montrés. Les graphiques ne présentent que les températures de certaines thermistances des chapelets, pour ne pas alourdir les graphiques et ne pas rendre leur interprétation difficile. Ces thermistances ont été choisies selon la pertinence de leur emplacement. Pour les talus, une thermistance dans le terrain naturel, une ou deux au centre des talus et une près de la surface ont été choisies. Pour ce qui est des thermistances dans la chaussée, une est située dans le terrain naturel, une intermédiaire est située près de l'interface de la fondation de la chaussée et du terrain naturel et une autre est située près de la surface. L'analyse de l'évolution des températures en fonction du temps porte ici surtout sur la comparaison entre les températures des talus et de la chaussée avec les températures de l'air. Le Tableau 3-1 indique la position des chapelets de thermistance et les abréviations utilisées pour les désigner dans les sections qui suivent.

<i>Chapelet</i>	<i>Section</i>	<i>Position; méthodes</i>	<i>Nomenclature</i>
<i>A</i>	<i>6</i>	<i>Talus; drain thermique</i>	<i>T-DT</i>
<i>B</i>	<i>5</i>	<i>Chaussée; drain thermique et surface réfléchissante</i>	<i>C-DTSR</i>
<i>C</i>	<i>5</i>	<i>Talus; drain thermique et surface réfléchissante</i>	<i>T-DTSR</i>
<i>D</i>	<i>4</i>	<i>Chaussée; témoin</i>	<i>C-T</i>
<i>E</i>	<i>4</i>	<i>Talus; témoin</i>	<i>T-T</i>
<i>F</i>	<i>3</i>	<i>Chaussée; surface réfléchissante</i>	<i>C-SR</i>
<i>G</i>	<i>2</i>	<i>Chaussée; remblai à convection et surface réfléchissante</i>	<i>C-RCSR</i>
<i>H</i>	<i>2</i>	<i>Talus; remblai à convection et surface réfléchissante</i>	<i>T-RCSR</i>
<i>I</i>	<i>1</i>	<i>Talus; remblai à convection</i>	<i>T-RC</i>

Tableau 3-1 Position des chapelets de thermistances et nomenclature utilisée dans le texte

Dans le cas des talus, les graphiques illustrant l'évolution de la température en fonction du temps à différents niveaux de la section avec le drain thermique et celle avec le remblai à convection combinées à la surface réfléchissante, ainsi que de la section témoin sont présentés à la Figure 3-3. Pour les chaussées, les graphiques illustrant l'évolution de la température en fonction du temps à différents niveaux de la section avec surface réfléchissante et de la section témoin sont présentés sur la Figure 3-4. L'évolution des températures pour les sections de talus et de chaussées est très similaire. Comme la température du sol est tributaire en grande partie de la température de l'air, il n'est pas étonnant de voir que les températures des talus et de la chaussée suivent un cheminement similaire à celles de l'air, surtout dans le cas des températures prises près de la surface. Les températures prises plus en profondeur présentent une moins grande variation avec le temps, car elles sont moins influencées par la température de l'air. Le passage des températures sous la limite du 0°C se fait entre la dixième et la douzième semaine, soit entre le 28 septembre 2006 et le 19

octobre 2006, pour tous les graphiques montrés. Le passage se fait donc environ à la même période que pour la température moyenne de l'air.

Lors des quatre premières semaines d'expérimentation (28 juillet 2006 au 24 août 2006), les températures de la surface sont plus chaudes, se situant pour la plupart entre 8°C et 12°C, tandis que celles en profondeur dans le sol sont plus froides. Pour les sections illustrées sur ces figures, la thermistance la plus profonde (courbe bleue) est située dans le pergélisol. De la quatrième semaine à la treizième semaine environ (24 août 2006 au 26 octobre 2006), les différences entre les températures diminuent. Bien que les températures refroidissent toutes, la différence entre les températures tend à devenir nulle entre la dixième et la douzième semaine (28 septembre 2006 au 19 octobre 2006). Puis, dans les semaines subséquentes (après le 19 octobre 2006), les valeurs de température recommencent à s'éloigner les unes des autres. Il y a par contre à ce moment une inversion dans l'ordre des températures. Les températures les plus chaudes sont maintenant celles en profondeur, tandis que les plus froides sont celles prises en surface des talus et de la chaussée. Il y a donc inversion du profil thermique. Cette inversion du profil thermique est illustrée par la courbe qui illustre l'enveloppe des températures annuelles du sol en fonction de la profondeur (Figure 3-2).

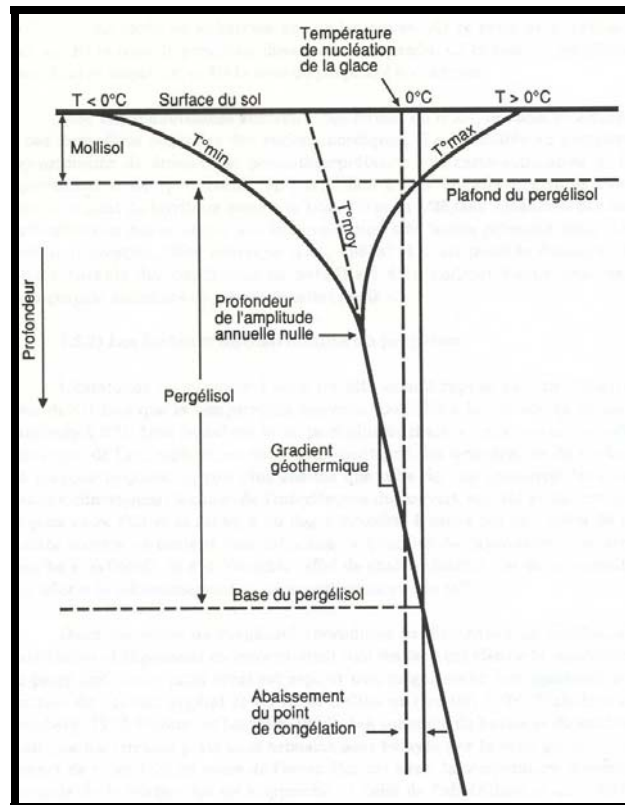


Figure 3-2: Régime thermique dans les sols

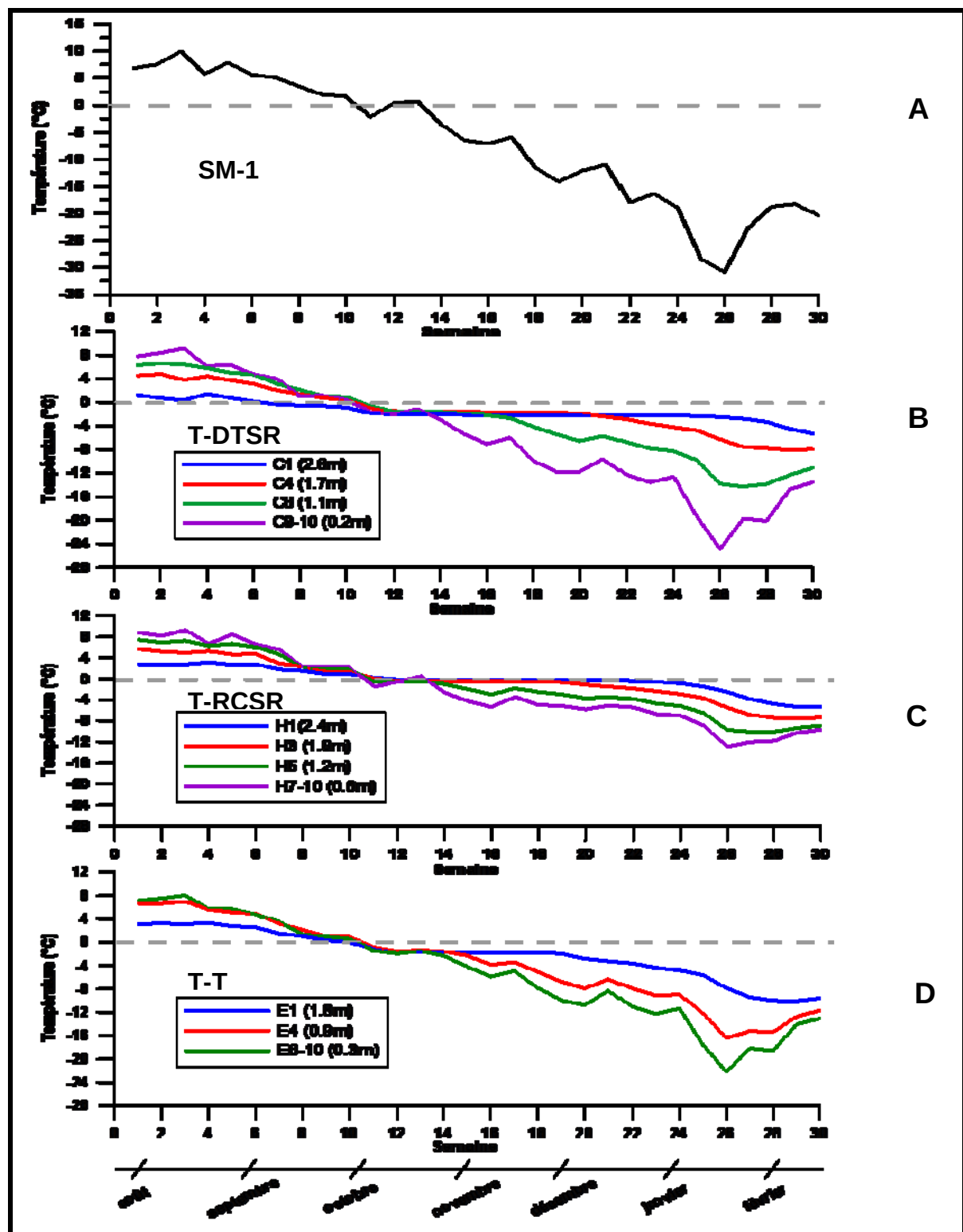


Figure 3-3 Évolution des températures en fonction du temps A) à la station SM1 et dans les talus, B) Chapelet C (Talus du drain thermique avec surface réfléchissante), C) Chapelet H (Talus du remblai à convection avec surface réfléchissante), D) Chapelet E (Talus de la section témoin)

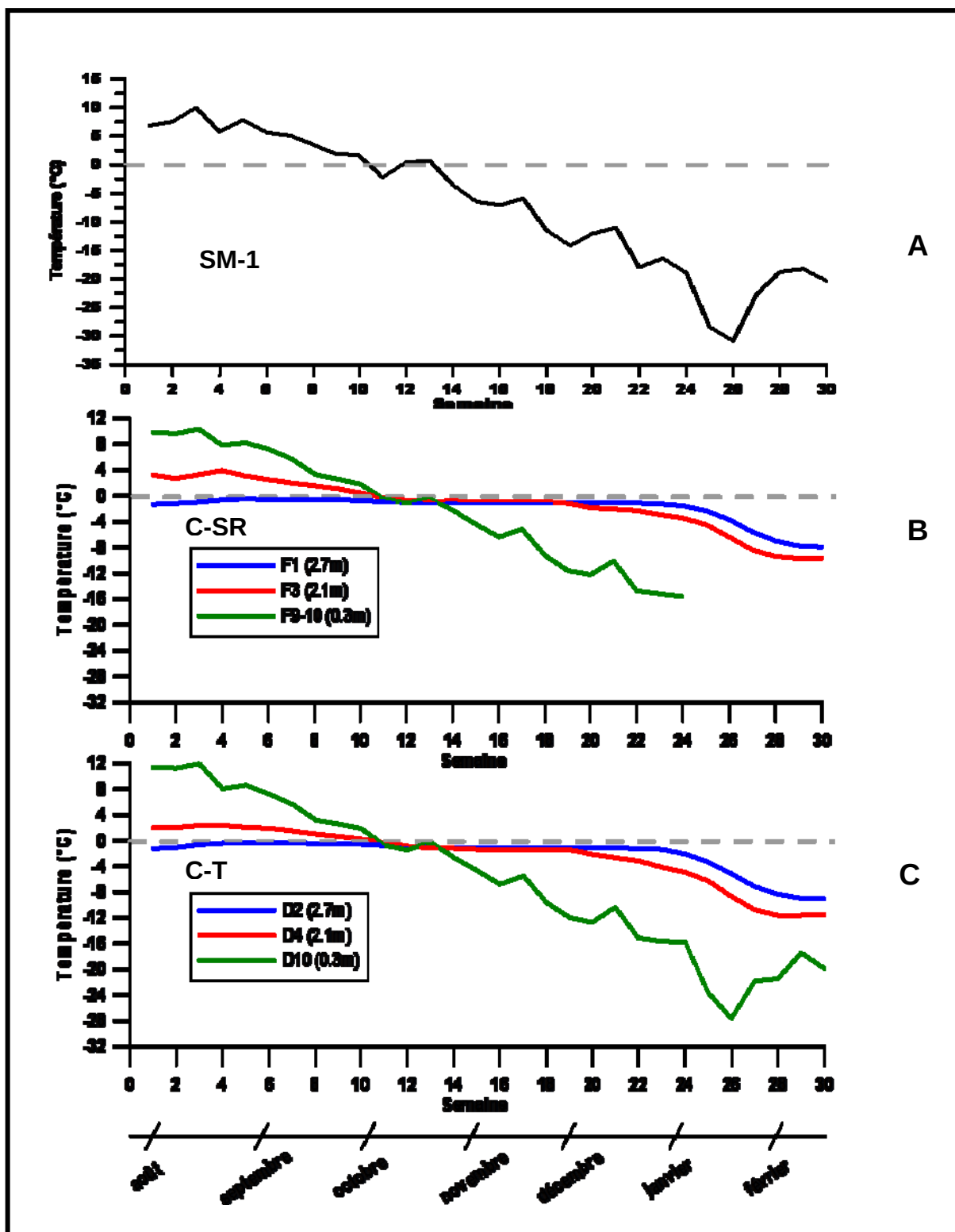


Figure 3-4 Évolution des températures en fonction du temps A) à la station SM1 et dans la chaussée, B) Chapelet F (Surface réfléchissante), C) Chapelet D (Section témoin)

3.3 Analyse des températures dans les talus

3.3.1 Profils de températures en fonction de la profondeur pour les thermistances installées dans les talus

Les graphiques de la Figure 3-5 et de la Figure 3-6 présentent respectivement les profils de températures en fonction de la profondeur des thermistances placées dans les talus pour le drain thermique et pour le remblai à convection. Quatre semaines jugées représentatives sont présentées soit les semaines du 9 août 2006, du 19 octobre 2006, du 7 décembre 2006 et du 18 janvier 2007. Pour les deux figures, les profils de températures du talus témoin sont également présentés, à des fins de comparaison. Les lignes pointillées indiquent approximativement les couches du talus dans lesquelles les thermistances des chapelets T-DT, T-DTSR, T-RC et T-RCSR se trouvent. Ces couches ne s'appliquent évidemment pas au chapelet T-T de la section témoin, sauf pour celle du terrain naturel.

Comme il est possible de remarquer sur l'ensemble des graphiques, les températures dans tous les talus passent des profils typiques d'été vers ceux d'hiver au fur et à mesure que les semaines avancent. Les profils de la semaine 7 (8 au 14 septembre 2006) présentent des températures plus chaudes en surface et qui diminuent avec la profondeur. La semaine 13 (19 au 26 octobre 2006), qui correspond environ à la période où la température moyenne de l'air passe 0°C, est une période de transition entre les profils de températures d'été et d'hiver. Pour cette période, les températures aux différentes profondeurs dans les talus sont très similaires pour un même profil. Les semaines 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007), qui sont respectivement en décembre et en janvier, présentent des profils de températures typiques d'hiver. Les températures en surface sont beaucoup plus froides que celles en profondeur dans les talus.

Deux phénomènes sont facilement observables sur les profils de températures du drain thermique de la Figure 3-5. Premièrement, pour les semaines 7 à 26 (du 9 août 2006 au 25 janvier 2007), il est visible que les profils T-DT et T-DTSR sont

décalés l'un par rapport à l'autre, et ce pour des profondeurs similaires. Le profil T-DT montre toujours des températures plus élevées que le T-DTSR. Le profil T-DTSR montre quant à lui des températures plus près de celles du profil témoin T-T. Deuxièmement, les profils de températures T-DTSR de la semaine 7 (8 au 14 septembre 2006) et 13 (19 au 26 octobre 2006) ne sont pas très réguliers, mais ils semblent se stabiliser aux semaines subséquentes. Pour les semaines 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007), le profil de températures T-DTSR présente une tendance générale semblable, c'est-à-dire que la température augmente avec la profondeur jusqu'au coussin de matériau granulaire à la base de la fondation du talus. Pour la semaine 20 (7 au 14 décembre 2006), le profil T-DTSR présente des températures qui semblent avoir tendance à refroidir au niveau du contact entre le remblai et le sol naturel, et qui seraient plus froides que celles du profil témoin T-T pour de mêmes profondeurs. Il est impératif de spécifier que cette affirmation est faite en assumant que les températures du profil T-T dans le terrain naturel sont approximées par une extrapolation. Faute de températures mesurées dans le terrain naturel du talus témoin à cause de la faible profondeur du trou (1.8m), il est assumé ici que les températures sous 1,8 m décroissent de façon linéaire. Cet effet de refroidissement dans le terrain naturel est par contre beaucoup plus négligeable pour les profils T-DTSR de la semaine 26 (18 au 25 janvier 2007).

Pour ce qui est des profils des remblais à convection de la Figure 3-6, un décalage est présent entre les profils T-RC et T-RCSR pour les semaines 7 (8 au 14 septembre 2006) et 13 (19 au 26 octobre 2006), le profil T-RCSR donnant des températures plus élevées. Ce décalage semble s'estomper pour les semaines 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007). Par contre, un décalage entre le profil témoin T-T et ceux des remblais à convection est visible pour ces deux semaines d'hiver. En effet, pour les semaines 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007), les remblais à convection sont beaucoup plus chauds que le talus témoin, et ce surtout près de la surface. Le décalage est moins important pour les températures en profondeur dans les talus.

Pour la semaine 20 (7 au 14 décembre 2006) , comme dans le cas du profil T-DTSR, les températures dans le terrain naturel des profils T-RC et T-RCSR semblent avoir tendance à être plus froides que celles du profil T-T. Cet effet est par contre négligeable et moins marqué que pour le profil du drain thermique; il s'estompe également pour la semaine 26 (18 au 25 janvier 2007).

La Figure 3-7 présente les profils thermiques T-DTSR et T-RCSR, en plus du profil T-T pour la semaine 20 (7 au 14 décembre 2006). Comme mentionné précédemment, le profil T-DTSR et T-T sont très similaires pour les températures au dessus du terrain naturel. Il y a par contre des différences de températures marquées entre le profil T-DTSR et T-RCSR. Cette différence est toutefois beaucoup plus marquée près de la surface, là où elle atteint environ 5°C. Les températures mesurées dans le coussin de matériau granulaire et le terrain naturel sont beaucoup plus similaires pour les deux profils T-DTSR et T-RCSR.

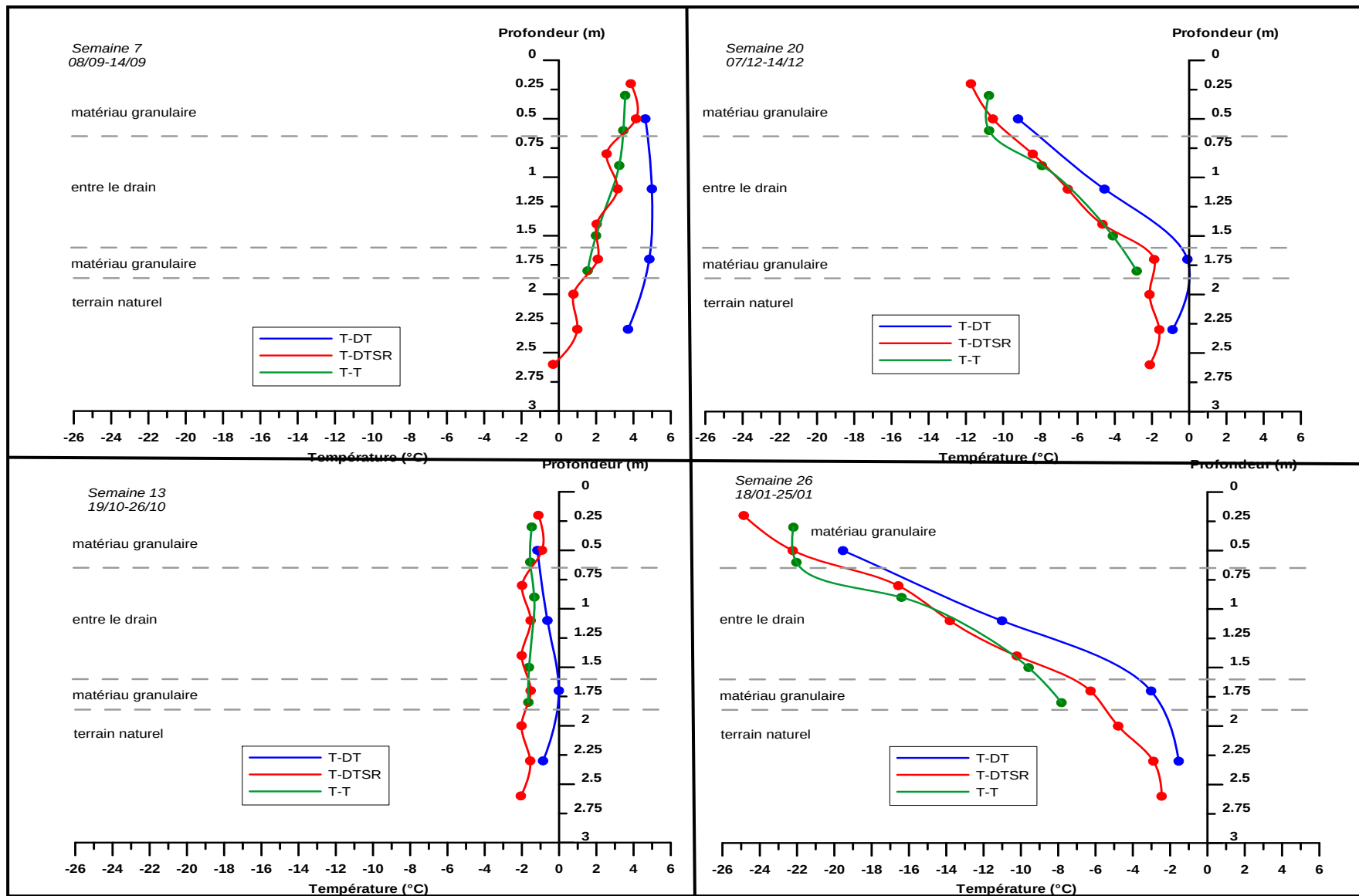


Figure 3-5 Profils de température en fonction de la profondeur des thermistances pour les talus des sections drain thermique et drain thermique avec surface réfléchissante et le talus de la section témoin, pour quatre semaines représentatives soit les semaines du 9 août 2006, du 19 octobre 2006, du 7 décembre 2006 et du 18 janvier 2007

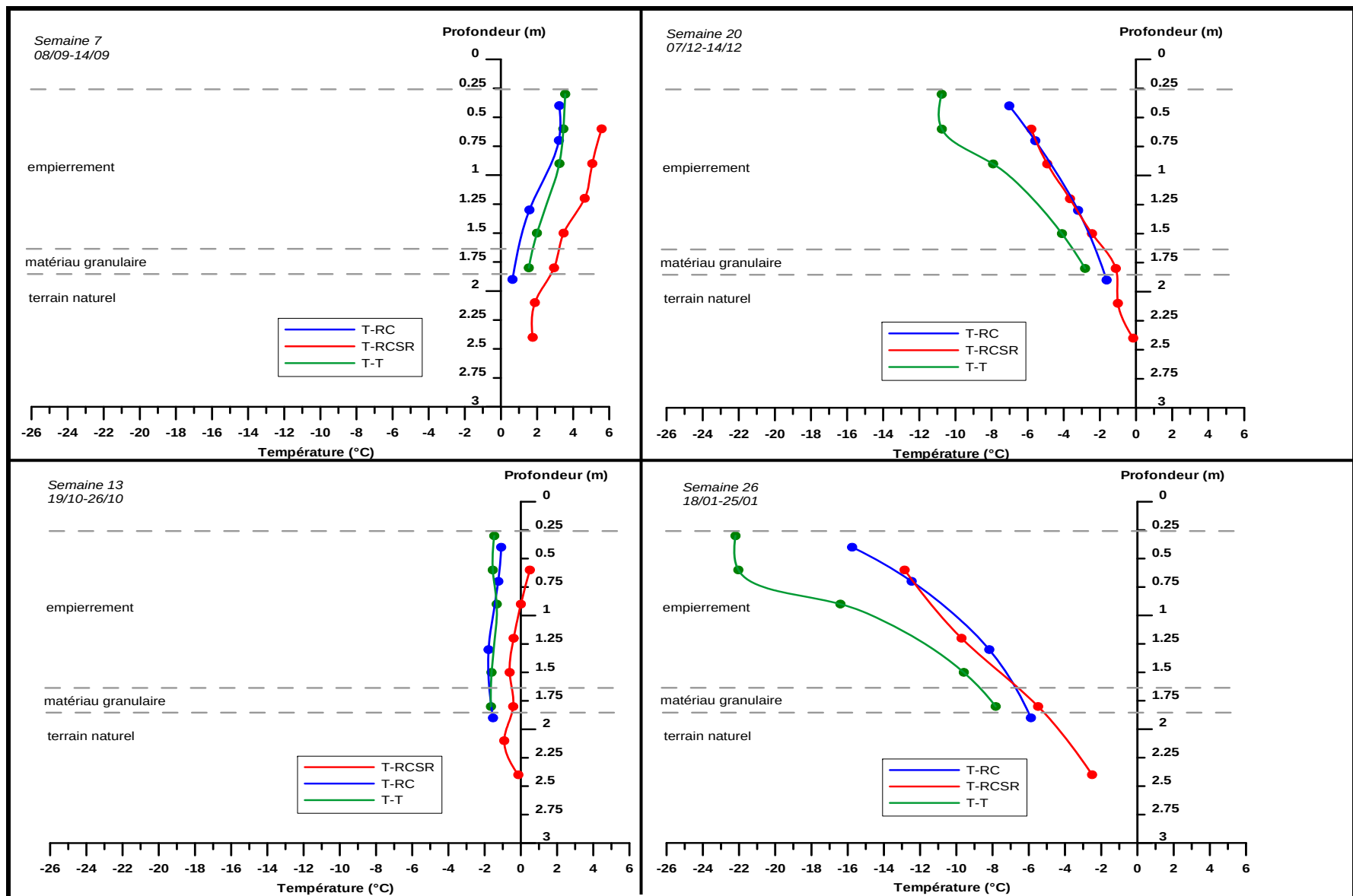


Figure 3-6 Profils de température en fonction de la profondeur des thermistances pour les talus des sections remblai à convection et remblai à convection avec surface réfléchissante ainsi que le talus de la section témoin, pour quatre semaines représentatives soit les semaines du 9 août 2006, du 19 octobre 2006, du 7 décembre 2006 et du 18 janvier 2007

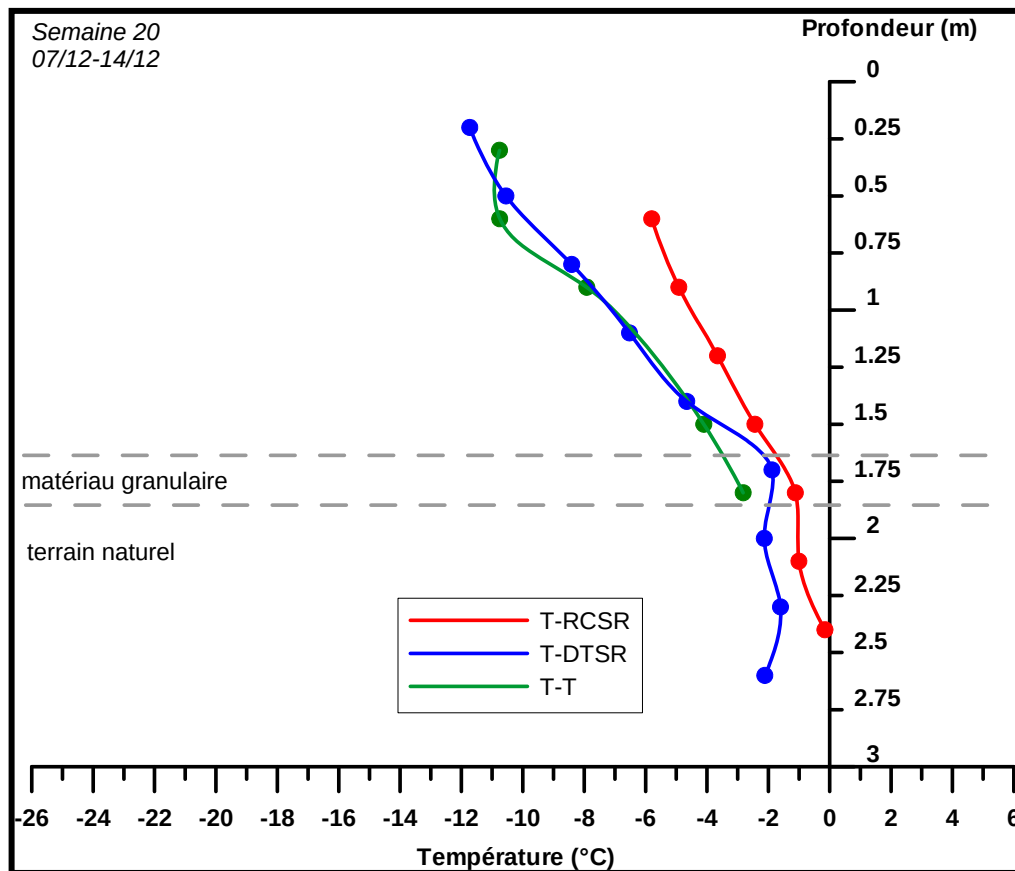


Figure 3-7 Profils de température (semaine 20, soit du 7 au 14 décembre 2006) en fonction de la profondeur des thermistances pour le talus de la section remblai à convection avec surface réfléchissante (T-RCSR), le talus de la section drain thermique avec surface réfléchissante et le talus de la section témoin

3.3.2 Températures du système d'entrées et de sorties d'air pour les talus

Les températures aux entrées et aux sorties d'air des systèmes de ventilation sont mesurées avec des thermistances insérées dans les cheminées verticales. L'évolution de ces températures en fonction du temps est présentée à la Figure 3-8 pour les cheminées du drain thermique et à la Figure 3-9 pour celles des remblais à convection.

Les systèmes de drain thermique et de remblai à convection ne sont considérés qu'efficaces seulement en hiver, lorsque la température de l'air passe sous 0°C et que le régime thermique du sol atteint son profil typique d'hiver. Durant les treize

premières semaines d'expérimentation soit du 28 juillet 2006 au 26 octobre 2006, il ne devrait pas y avoir une différence marquée entre les températures des entrées-sorties et la température de l'air extérieure. Les systèmes ne sont théoriquement pas en fonction. Sur les graphiques de la Figure 3-8 et de la Figure 3-9, il y a effectivement peu de décalage entre ces températures pendant les treize premières semaines soit du 28 juillet 2006 au 26 octobre 2006.

Pour les semaines d'expérimentation subséquentes, soit du 26 octobre 2006 au 25 janvier 2007, durant lesquelles les systèmes devraient être en fonction, un différentiel de température devrait s'installer entre les températures des entrées et des sorties d'air. Dû au phénomène d'entrée d'air froid de l'extérieur, les cheminées d'entrée d'air devraient avoir une température similaire à la température de l'air extérieur. Les cheminées de sortie d'air devraient quant à elles avoir une température plus chaude, due à la remontée et à l'expulsion d'air chaud par la cheminée de sortie. Bien que l'écart ne soit pas toujours important, on observe généralement que cette tendance est respectée. Par contre, la température des entrées d'air tend à être plus chaude que celles de l'air extérieur. Cette tendance peut possiblement être associée à une absorption de chaleur par radiation solaire par les cheminées.

Le seul système qui se comporte selon les attentes est le système T-RCSR. La courbe rouge, pour l'entrée d'air, présente des températures similaires à la température de l'air. La courbe bleue présente des températures beaucoup plus élevées, ce qui est logique puisque l'air chaud du système est sensé être évacué par cette cheminée. Le système d'entrée et d'évacuation d'air est donc probablement efficace pour ce système.

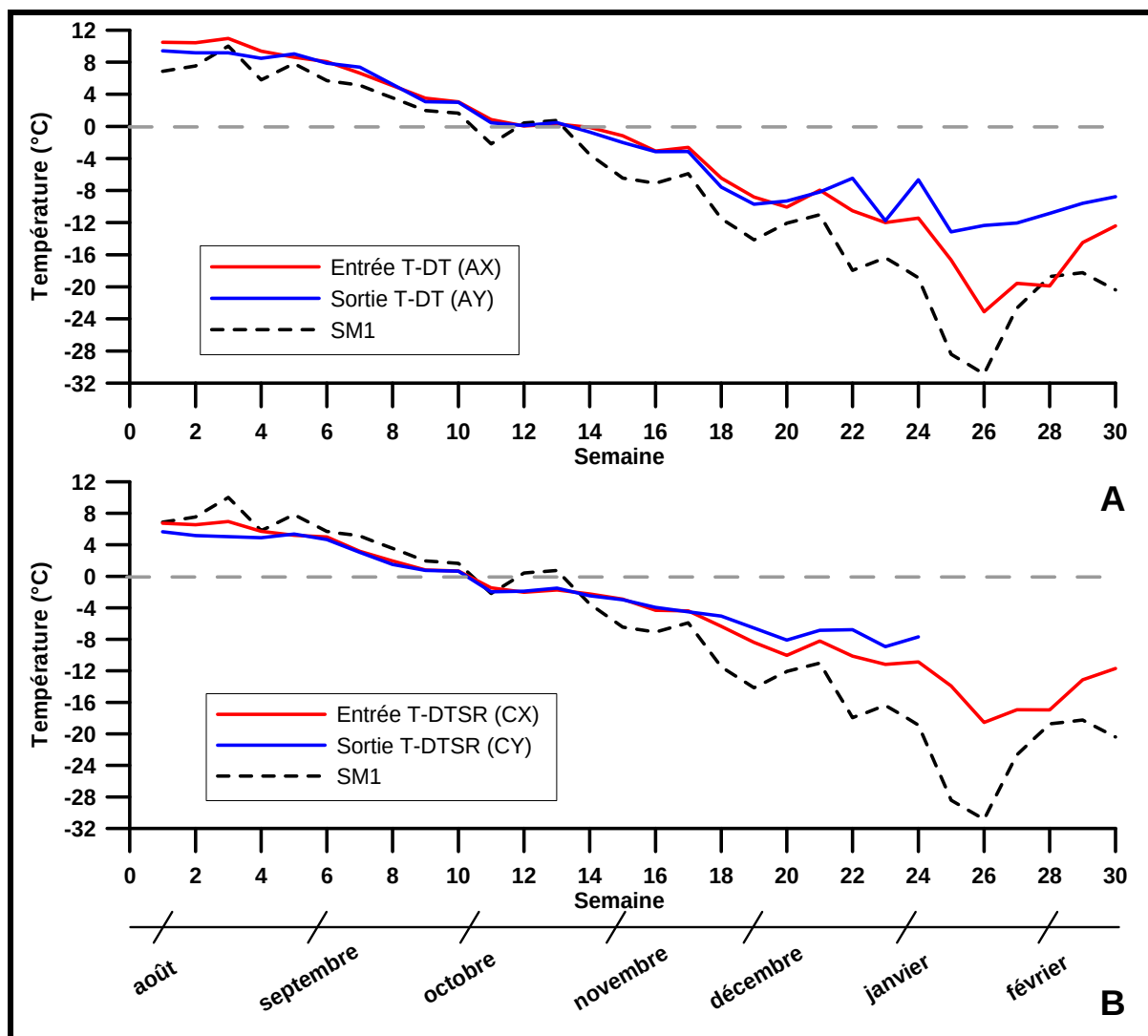


Figure 3-8 Évolution des températures des entrées et des sorties en fonction du temps des drains thermiques, A) Talus de la section drain thermique, B) Talus de la section drain thermique avec surface réfléchissante

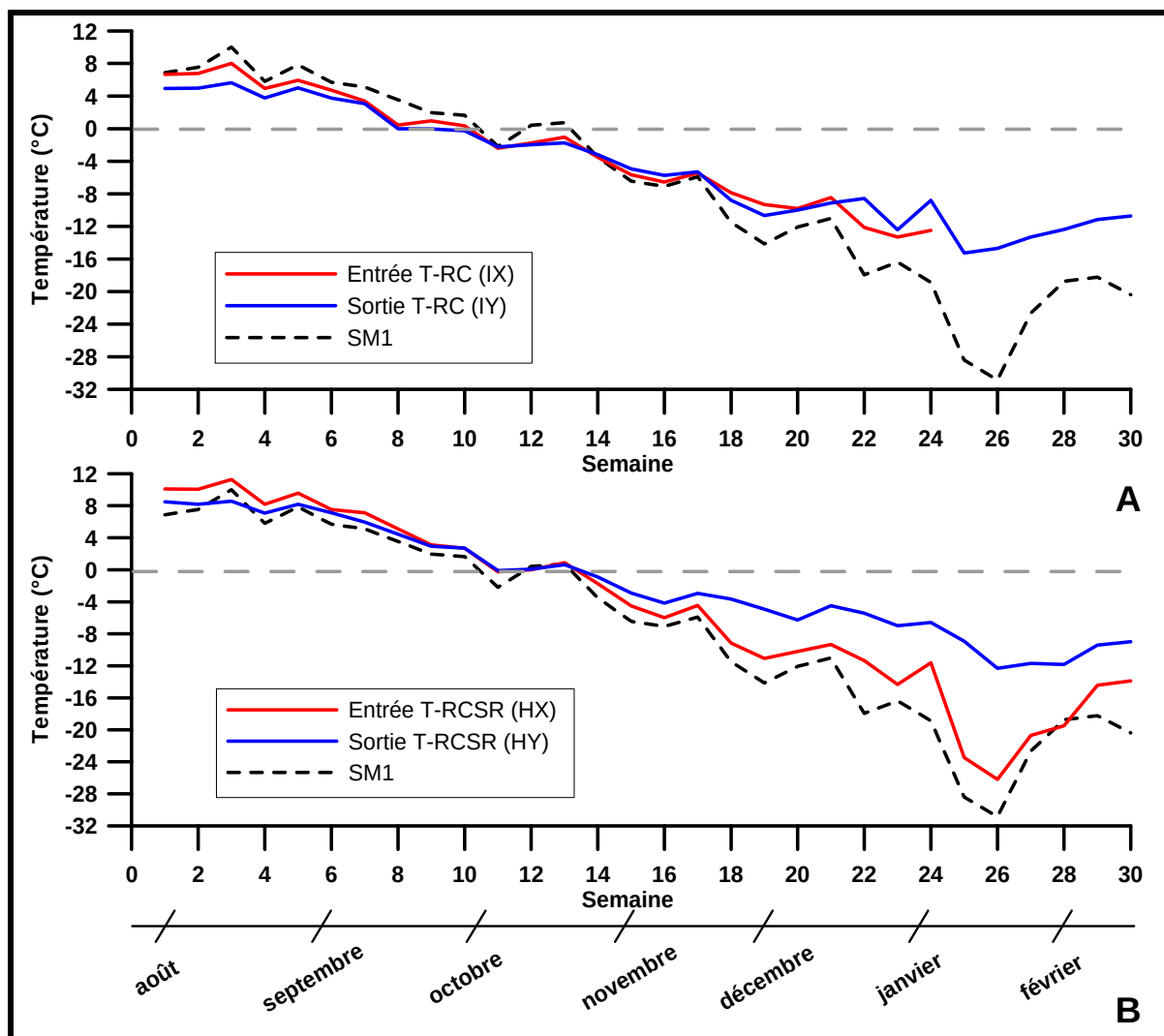


Figure 3-9 Évolution des températures des entrées et des sorties en fonction du temps des remblais à convection, A) Talus de la section remblai à convection, B) Talus de la section remblai à convection avec surface réfléchissante

3.4 Analyse des profils de températures en fonction de la profondeur dans la chaussée

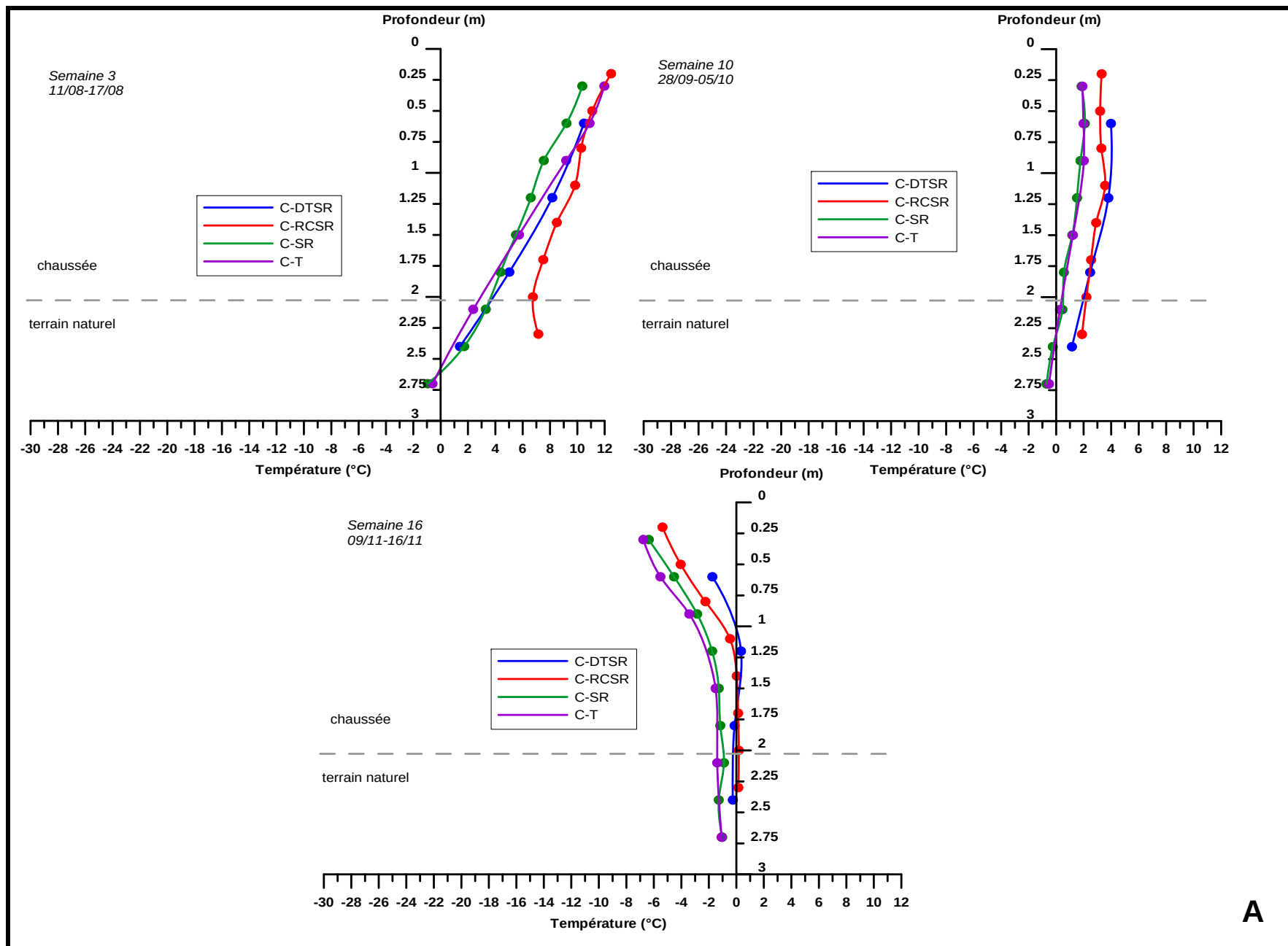
Le graphique de la Figure 3-10 présente les profils de températures en fonction de la profondeur des thermistances placées dans la chaussée, pour cinq semaines jugées représentatives soit les semaines 3 (11 au 17 août 2006), 10 (28 septembre au 5 octobre 2006), 16 (9 au 16 novembre 2006), 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007). Les profils des trois sections de chaussées modifiées, soit C-SR, C-DTSR, C-RCSR sont présentés, ainsi que celui de la section témoin C-T. La ligne pointillée sur les graphiques indique la

frontière entre la fondation de la chaussée et le terrain naturel, soit le sol d'infrastructure.

La présentation des profils de températures pour cinq semaines (semaines 3 (11 au 17 août 2006), 10 (28 septembre au 5 octobre 2006), 16 (9 au 16 novembre 2006), 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007) montre encore une fois l'évolution entre des profils typiques d'été vers des profils d'hiver. La semaine 3 (11 au 17 août 2006) présente des profils typiques d'été, où la température diminue quasi linéairement avec la profondeur. Les semaines 10 (28 septembre au 5 octobre 2006) et 16 (9 au 16 novembre 2006) sont des périodes de transition entre les deux états. Les profils des semaines 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007) sont typiques de l'hiver. La température est plus froide en surface et augmente avec la profondeur dans la chaussée.

Le graphique de la semaine 3 (11 au 17 août 2006) montre que le profil C-SR est légèrement plus froid que le profil témoin C-T en surface de la chaussée, et ce jusqu'à environ 1,5 m de profondeur. Les températures des profils C-RCSR et C-DTSR ont des températures très similaires au profil C-T en surface, mais un certain décalage est visible vers 0,75 m de profondeur. Dans le terrain naturel sous la fondation, les températures sont très similaires entre les profils, sauf pour le profil C-RCSR. Le profil C-RCSR présente des températures considérablement plus chaudes en profondeur que les autres profils dans la chaussée. Ce type de comportement est typique de chaussées affectées par des infiltrations d'eau. Considérant que cette section est adjacente à un tumulus supportant le système de ventilation, il est plausible que l'eau bloquée par le tumulus se soit infiltrée dans la section au niveau du contact entre le remblai et le sol naturel. Cette infiltration peut être une source importante de chaleur. Par contre, le profil C-RCSR tend à s'ajuster aux autres profils au cours des semaines subséquentes d'expérimentation.

Durant la période de transition, c'est-à-dire durant les semaines 10 (28 septembre au 5 octobre 2006) et 16 (9 au 16 novembre 2006), un certain décalage entre les profils de la chaussée s'installe. Tous les profils de températures adoptent par contre la même tendance générale. Les profils C-T et C-SR présentent des températures très similaires pour l'ensemble des profondeurs. Cette similarité perdure jusqu'à la semaine 20 d'expérimentation (7 au 14 décembre 2006). Les profils C-DTSR et C-RCSR ont eux aussi des températures très similaires pour les semaines 10 (28 septembre au 5 octobre 2006) et 16 (9 au 16 novembre 2006), mais seulement à partir d'environ 1,25 m de profondeur dans la fondation de la chaussée. Près de la surface, à une profondeur de 0,6 m, la température du profil C-DTSR semble légèrement plus élevée. Le décalage entre les deux paires de profils, soit C-T et C-SR ainsi que C-DTSR et C-RCSR est d'environ 1 à 2 °C pour toutes les profondeurs durant les semaines 10 (28 septembre au 5 octobre 2006) et 16 (9 au 16 novembre 2006).



A

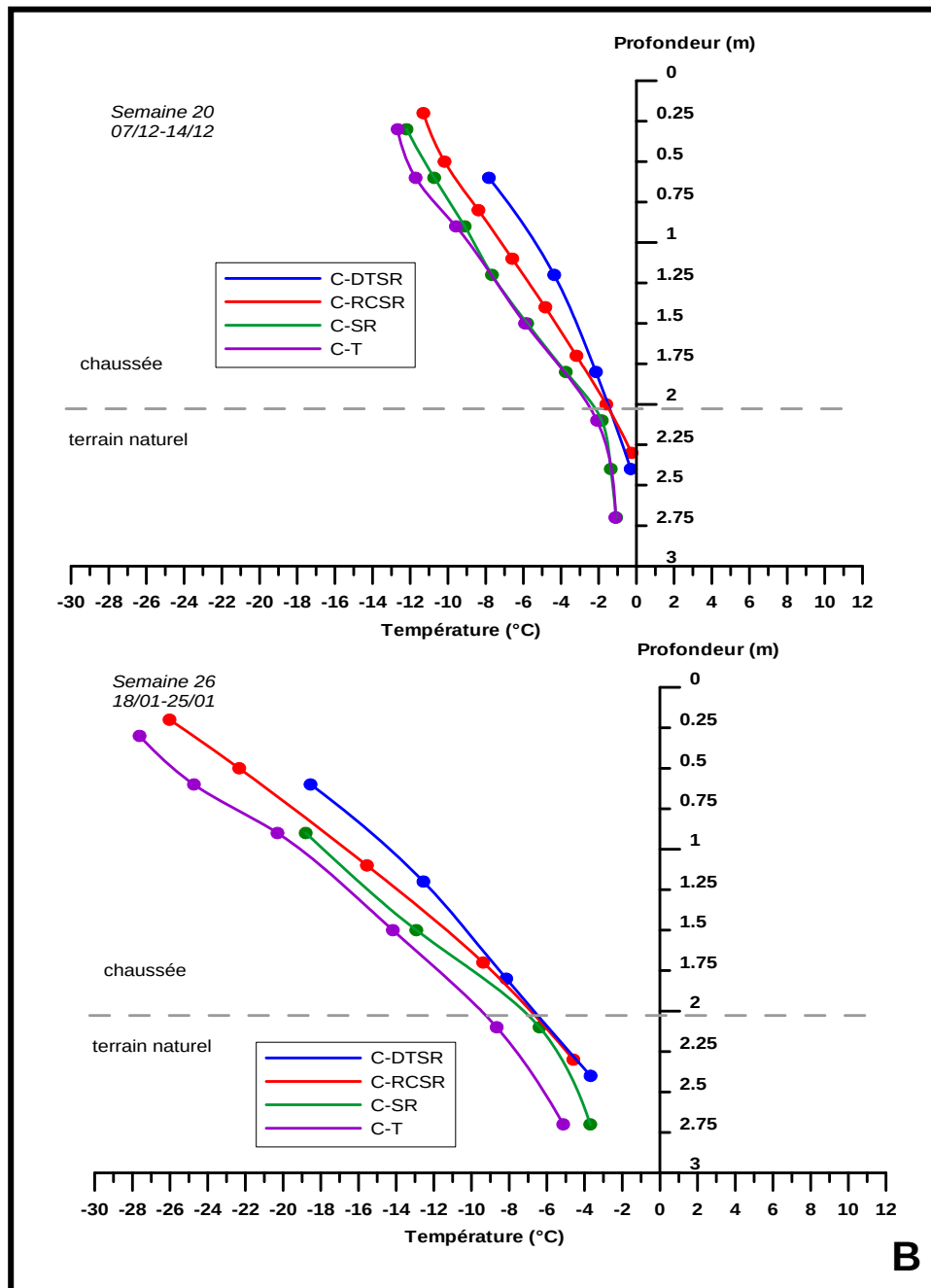


Figure 3-10 Profils de température en fonction de la profondeur des thermistances pour les chaussées avec surface réfléchissante (Surface réfléchissante seule, drain thermique avec surface réfléchissante et remblai à convection avec surface réfléchissante) et la chaussée témoin, pour quatre semaines représentatives, A) Semaines 3 (11 au 17 août 2006), 10 (28 septembre au 5 octobre 2006) et 16 (9 au 16 novembre 2006), B) Semaines 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007)

Durant les semaines d'hiver, soient 20 (7 au 14 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007), les profils évoluent encore selon une même tendance générale. Un décalage plus important apparaît entre le profil C-DTSR et C-RCSR. Les températures dans le sol naturel restent par contre similaires pour les deux profils. Pour la semaine d'expérimentation 26 (18

au 25 janvier 2007), il y a un décalage plus général entre tous les profils. Le profil C-T devient plus froid que les autres à toutes les profondeurs, ce qui est contraire aux attentes. Les profils C-DTSR et C-RCSR ont le même décalage l'un par rapport à l'autre qu'à la semaine 20 (7 au 14 décembre 2006), mais sont nettement plus chaud que le profil témoin C-T. Quant au profil C-SR, il est plus chaud que le profil C-T et plus froid que les profils C-DTSR et C-RCSR, sauf dans le terrain naturel où il enregistre les mêmes températures que C-RCSR et C-DTSR.

3.5 Comparaison entre la température de l'air et les températures de surface des talus et de la chaussée

L'évolution des températures de surface (données des thermistances près de la surface) en fonction du temps pour les talus et la chaussée est présentée à la Figure 3-11. Sur les graphiques, la température de l'air de la station météo SM1 est également présentée. Il est possible de remarquer que sur l'ensemble des graphiques, les températures de surface suivent la même tendance générale que la température de l'air, ce qui démontre une certaine cohérence dans les données recueillies.

Les températures de surface des sections de talus avec le drain thermique et remblai à convection sont présentées dans les graphiques de la Figure 3-11A et la Figure 3-11B. Durant les quatorze premières semaines d'expérimentation (28 juillet 2006 au 2 novembre 2006), les températures de surface des talus sont très similaires à la température de l'air extérieure. Par contre, dans les semaines subséquentes, un décalage entre les températures apparaît et demeure jusqu'à la semaine 30 (15 au 20 février 2007). Les températures des talus modifiées et également du talus témoin deviennent plus élevées que les températures de l'air à partir de la semaine 14 (26 octobre au 2 novembre 2006). Dans le cas des talus avec drain thermique, bien que les températures de la surface de T-DT et T-DTSR sont supérieures à celles de SM1, les températures de T-DTSR sont similaires à celles de T-T. Celles de T-DT sont supérieures à celles de T-T et T-DTSR.

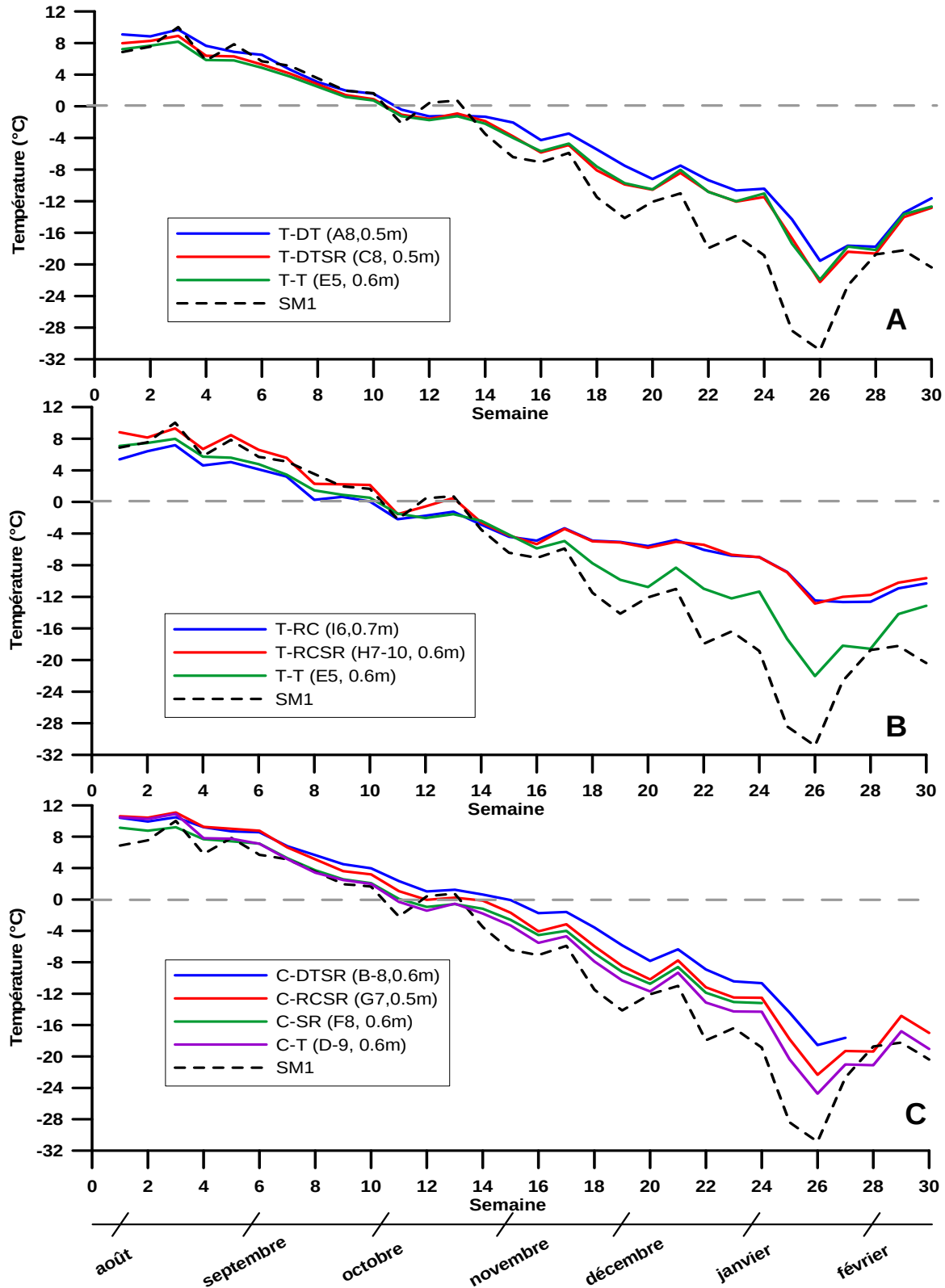


Figure 3-11 Évolution des températures de surface en fonction du temps, A) Sections de talus avec drain thermique, B) Sections de talus avec remblai à convection, C) Sections de chaussée

Pour les remblais à convection, les températures de surface de T-RC et T-RCSR sont plus élevées que celles de SM1 et que celles du T-T. Cet écart est maintenu jusqu'à la semaine 30 (15 au 20 février 2007). Il est intéressant de souligner que les températures de surface des remblais à convection sont plus élevées durant l'hiver que celles des drains thermiques. Par exemple, respectivement pour les semaines 22 (21 au 28 décembre 2006) et 26 (18 au 25 janvier 2007), la température de T-DTSR était de $-10,8^{\circ}\text{C}$ et $-22,2^{\circ}\text{C}$. Pour T-RC, elles étaient respectivement de $-6,1^{\circ}\text{C}$ et $-12,5^{\circ}\text{C}$.

Dans le cas des températures de surface de la chaussée présentées sur le graphique de la Figure 3-11C, durant les trois premières semaines, elles ont tendance à être légèrement plus chaudes que la température de l'air. Cette tendance s'atténue par contre, surtout pour C-SR et C-T. Les températures de C-SR et C-T sont généralement similaires ou légèrement plus chaudes que celles de SM1, et ce jusqu'à la semaine 14 (26 octobre au 2 novembre 2006). Quant aux températures des sections de chaussée C-RCSR et C-DTSR, elles sont plus élevées que C-SR et C-T. À partir de la semaine 14 (26 octobre au 2 novembre 2006), toutes les températures de surfaces de la chaussée sont supérieures à la température de l'air. La surface de la section témoin C-T est la plus froide, tandis que celle de la section C-DTSR est la plus chaude, et ce jusqu'à la semaine 27 (25 janvier au 2 février 2007).

3.6 Estimation de la profondeur de la couche active (mollisol) du site à l'étude

La profondeur du mollisol est l'épaisseur de couche de sol qui se trouve au-dessus du pergélisol et qui dégèle en été (la zone active). Elle est déduite dans ce cas-ci par la régression linéaire des profils de températures ou par son extrapolation, selon la profondeur à laquelle le profil intercepte l'ordonnée à 0°C . La Figure 3-12 et la Figure 3-13 présentent les profondeurs de mollisol mesurées ou extrapolées pour les talus et la chaussée, à partir des profils de températures de la cinquième semaine d'expérimentation. Cette période correspond à la fin du mois d'août, là où la couche active du pergélisol risque d'être près de son maximum d'extension. Ces profondeurs ont été trouvées par extrapolation (ligne pointillée) de la régression linéaire des profils de températures (ligne pleine). Pour les talus, la section du drain thermique seul (T-DT) n'a pas été considérée puisqu'elle donnait une valeur de profondeur du mollisol très supérieure à celles obtenues dans les autres sections de talus

et beaucoup trop élevées pour la région étudiée. Pour les mêmes raisons, la section de chaussée C-RCSR n'a pas été considérée pour l'estimation de la profondeur du mollisol sous la chaussée.

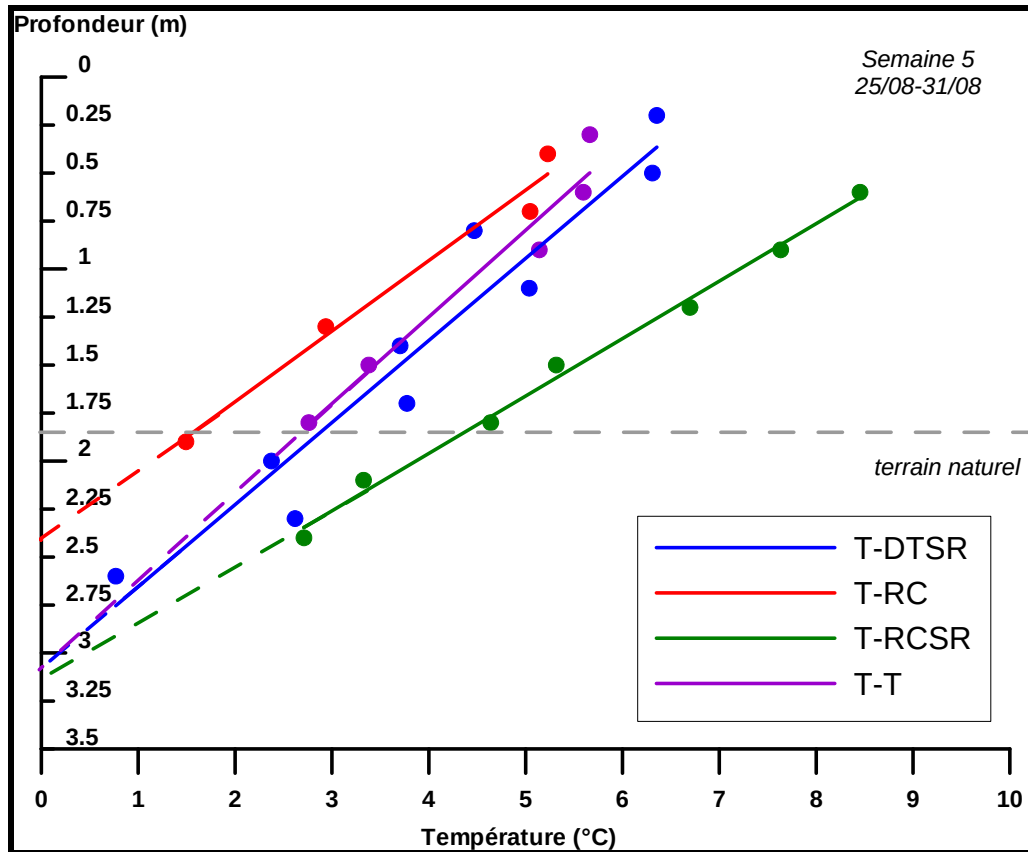


Figure 3-12 Profondeur du mollisol dans les talus, selon l'extrapolation linéaire de profils de température selon la profondeur pour les données de la semaine 5 (25 au 31 août 2006)

Selon les profils de température de la cinquième semaine, la profondeur du mollisol (incluant l'épaisseur du remblai au point de mesure) pour les talus varie entre 2,4 et 3,1 m dans les talus et entre 2,7 et 2,9 m dans la chaussée. Il y a donc une certaine régularité dans l'ensemble des valeurs obtenues, ce qui donne une valeur moyenne de la profondeur du mollisol à environ 2,9 m. Cette valeur est réaliste sous un remblai pour la région de Salluit. Il est par contre important de préciser que ces valeurs de profondeurs ne sont que des estimations grossières à partir de données provenant d'une semaine de la période d'été. Elles ne doivent en aucun cas être considérées comme absolues.

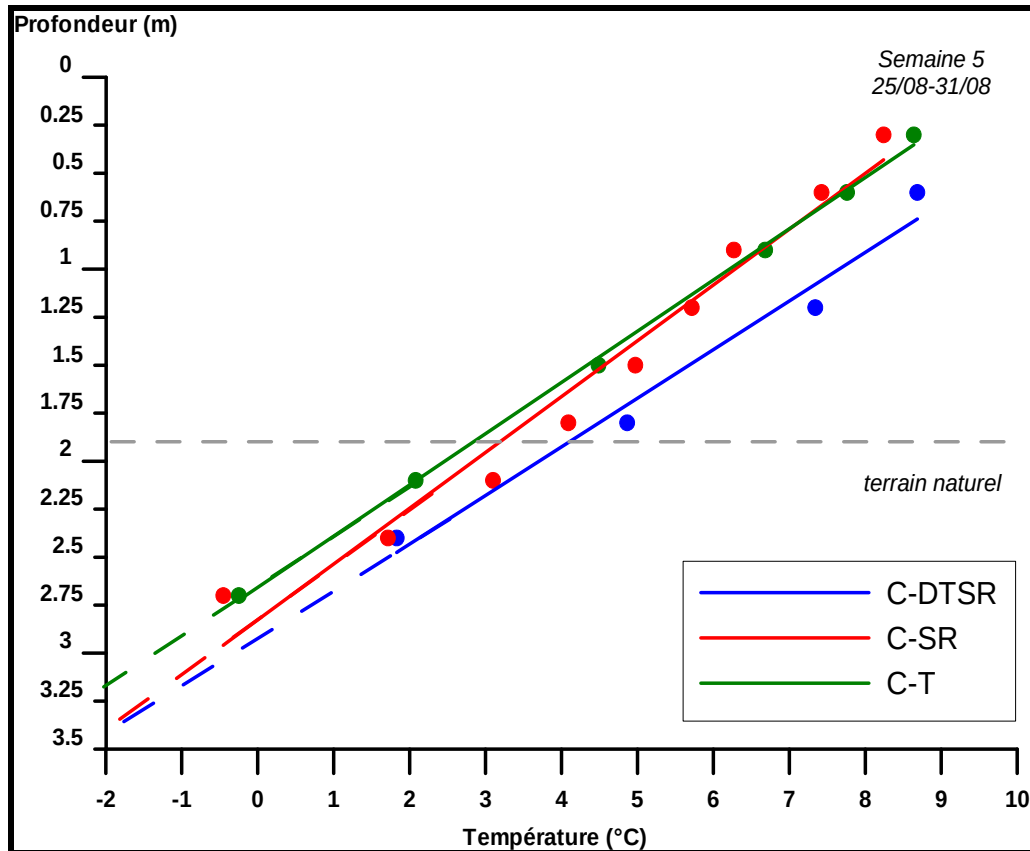


Figure 3-13 Profondeur du mollisol dans les talus, selon l'extrapolation linéaire de profils de température selon la profondeur pour les données de la semaine 5 (25 au 31 août 2006)

3.7 Analyse préliminaire du comportement des systèmes de protection

3.7.1 Drain thermique

L'évolution des températures avec le temps des sections de drain thermique présente la même tendance que les températures de l'air, ce qui démontre une certaine cohérence dans les données de températures mesurées (Figure 3-3B). Comme la température du sol est directement liée à celle de l'air, il est logique que ces deux températures aient une évolution semblable, c'est-à-dire dans ce cas-ci, qu'elles diminuent au fur et à mesure des semaines d'expérimentation. Il est donc possible d'affirmer que selon les données de températures de la station météo et d'Environnement Canada, les données de températures des sections du drain thermique évoluent de manière logique avec le temps et les saisons durant la période d'expérimentation.

D'après les profils de températures en fonction de la profondeur (Figure 3-5), les températures de la section T-DT sont plus chaudes que celles de T-DTSR et T-T, et ce pour toutes les

profondeurs tout au long de l'expérimentation. Comme les températures du profil T-DTSR et T-T sont similaires, il est possible de supposer que les températures du profil T-DT sont anormales. Le décalage des valeurs de températures de la section T-DT est peut-être attribuable à un problème dans la calibration des thermistances du chapelet posé dans cette section. Avec une mauvaise calibration, les températures lues peuvent être surestimées par rapport aux températures réelles dans le sol. Cette affirmation ne peut par contre pas être appuyée par les températures relevées aux cheminées d'entrée et de sortie, puisque dans le cas du drain thermique, aucun des systèmes de cheminées ne semble fonctionner de la façon prévue. Pour les deux sections de drain, soient T-DT et T-DTSR, les températures aux entrées d'air sont supérieures à la température de l'air, et il n'y a pas de différence significative entre les températures des sorties et des entrées d'air. Ces observations ne confirment donc pas qu'il y a véritablement un apport d'air froid de l'extérieur et un mouvement ascendant de l'air chaud dans le système par convection.

Lors de la visite du site au mois de février 2007, les cheminées d'entrée et de sortie d'air étaient bloquées par l'accumulation de neige. Il est certain que le blocage des cheminées ait eu un effet négatif sur le fonctionnement adéquat du drain thermique. Il était impossible à l'air froid de pénétrer dans le système et à l'air chaud de sortir du système. Même si le drain absorbe la chaleur du talus par conduction, le fait qu'il n'y ait pas d'air froid aidant à la convection et que l'air chaud ne puisse pas s'évacuer ruine considérablement l'effet de stabilisation thermique que pourrait avoir le drain sur le talus. Ceci a possiblement contribué au faible fonctionnement du drain de la section T-DTSR. Le profil de températures T-DTSR de la semaine 20 montre que le drain thermique aurait tendance à légèrement abaisser les températures du sol naturel, ce qui aurait un effet positif pour la stabilisation thermique du talus. Cet effet n'est par contre peut-être pas suffisant pour qu'une remontée significative d'air chaud dans le drain soit perceptible.

D'autres aspects ont pu également influencer le comportement du drain thermique. Lors de la pose des sections de géocomposite, ces dernières ont peut-être été pliées ou fortement poinçonnées lors du remblayage, ce qui pourrait avoir obstrué le système et empêcher son fonctionnement adéquat. Le niveau de courbure du géocomposite a également pu influencer le processus de convection dans le drain, donc affecter le pouvoir d'extraction de chaleur.

Finalement sa position dans le remblai, c'est-à-dire principalement sa position par rapport au sol naturel, est peut-être inadéquate et a pu affecter le fonctionnement et l'impact du drain thermique dans le talus.

Des accumulations d'eau importantes à l'automne au pied du talus ont été observées. De l'eau était peut-être présente également dans la partie inférieure du drain. Cette eau, transformée en glace lors du gel, a pu obstruer le bas du drain et donc empêcher son fonctionnement. Une forte accumulation de neige et de glace durant l'hiver sur les talus a également bouché les systèmes de cheminées d'entrée et de sortie d'air. Ce blocage des cheminées empêche le drain de fonctionner; il n'y plus d'air froid entrant dans le système et plus d'air chaud ne peut être extraite. À ce stade d'expérimentation, il n'est pas facile de déterminer la cause exacte du mal fonctionnement de drain thermique. Une combinaison de plusieurs des facteurs énumérés en est probablement la cause.

3.7.2 Remblai à convection

Tout comme les températures du drain thermique, celles du remblai à convection évoluent en concordance avec la température de l'air (Figure 3-3). Comme la température des remblais à convection est directement liée à celle de l'air, il est logique que ces deux températures aient une évolution semblable. Selon les profils de températures en fonction de la profondeur (Figure 3-6), les deux sections de remblai, T-RC et T-RCSR, montrent des températures relativement semblables, malgré un décalage du profil T-RCSR durant les premières semaines. Par contre, les deux profils du remblai à convection présentent des températures plus chaudes que celles du profil témoin T-T. Il est possible que les sections de remblai à convection présentent des températures plus élevées que le talus témoin dans la partie supérieure du talus, étant donné que l'air chaud est sensé monter vers la surface par convection. Par contre, de par la remontée d'air chaud et la rentrée d'air froid dans le système, la partie inférieure des remblais devrait présenter des températures plus froides, pour ainsi préserver l'état gelé du sol d'infrastructure. Les profils de la Figure 3-6 ne permettent pas de voir cette tendance.

Le système d'entrée et de sortie d'air de la section T-RCSR est le seul qui semble adéquatement fonctionner, selon l'évolution de ses températures (Figure 3-9). Les températures de la surface des remblais à convection sont plus élevées que celles de l'air et que du talus témoin, mais également que celles du drain thermique. Il y a donc probablement une remontée d'air chaud vers la surface des remblais à convection.

Durant l'hiver, une forte accumulation de neige dense sur les talus due au déneigement de la route et au vent a été notée lors de la visite en février 2007. Comme la surface du remblai était couverte de neige dense glacée, l'entrée d'air froid de l'extérieur est minimisée. De plus, l'accumulation de neige causait une obstruction partielle ou complète des cheminées d'entrée et de sortie d'air. Cela a donc pu contribuer à atténuer les performances des remblais à convection. Par contre, même si le remblai à convection est couvert de neige, il est théoriquement sensé pouvoir refroidir le remblai, car il peut y avoir un mouvement de convection à l'intérieur du remblai lui-même, et donc un transfert de chaleur. Comme les cheminées de sortie d'air étaient probablement bouchées, il y a donc peut-être eu une accumulation d'air chaud à l'intérieur des remblais, ce qui pourrait expliquer le fait qu'ils ont des températures plus élevées que le talus témoin.

Une accumulation d'eau au bas du talus a également été remarquée à l'automne 2007, ce qui aurait pu perturber le fonctionnement du remblai à convection. Par contre, même si de la glace s'est formée à la base du remblai, il peut quand même y avoir convection. Finalement, l'épaisseur du remblai à convection agit également sur son niveau d'efficacité (Lai et al., 2004; Lai et al., 2006). Cela devrait donc être considéré pour augmenter l'efficacité du remblai à convection. Encore une fois, il est difficile de trouver la cause exacte des problèmes rencontrés avec les remblais à convection. Par contre, la forte accumulation de neige et de glace sur les talus et à l'embouchure des cheminées est probablement la cause ayant le plus d'impacts sur le fonctionnement des remblais à convection.

3.7.3 Surfaces réfléchissantes

Tout comme les températures des talus, les températures de la chaussée évoluent avec la même tendance que la température de l'air. Comme les surfaces réfléchissantes sont

efficaces surtout l'été, les premières semaines d'expérimentation sont importantes dans l'analyse de leur efficacité. Selon les profils de températures, le profil C-SR de la semaine 3 montre que la surface réfléchissante utilisée seule aurait eu un impact de refroidissement dans la partie supérieure de la chaussée (Figure 3-10A). La même conclusion peut être tirée de l'analyse de l'évolution des températures de surface durant les premières semaines de la section C-SR (Figure 3-11C). Par contre, les autres sections de surfaces réfléchissantes combinées au drain thermique et au remblai à convection ne semblent avoir aucun impact en comparaison avec la section de chaussée témoin.

Durant la période d'hiver, les profils de températures des surfaces réfléchissantes combinées montrent des températures plus chaudes que la surface réfléchissante seule et que la chaussée témoin. L'évolution des températures de surface indique évidemment la même tendance. Comme les systèmes dans les talus éprouvent certains problèmes dans leur fonctionnement, il est possible que ceci ait eu un impact sur la section de chaussée adjacente. Si une accumulation d'air chaud se fait dans le talus par exemple, il se peut que cela ait un effet de réchauffement dans la chaussée adjacente, et ce principalement dans la fondation de la chaussée. Les écarts de températures des sections de chaussées se situent principalement dans la fondation de la chaussée, au-dessus du terrain naturel.

L'efficacité des surfaces réfléchissantes utilisées seules ou combinées est difficile à juger avec les données recueillies. Premièrement, il y a peu de données de la période d'été disponibles. Également, certaines conditions rencontrées durant la mise en place ont affecté les surfaces presque immédiatement après leur pose. Il a été impossible d'enlever complètement l'huile déposée par la machinerie sur la chaussée avant la pose du coulis, ce qui a probablement favorisé le décollement prématuré des surfaces réfléchissantes sur le revêtement bitumineux. Également, le coulis appliqué était trop épais, ce qui n'a pas permis d'étendre le mélange en minces couches qui auraient probablement mieux résisté à l'écaillage. Finalement, lors des premières périodes de gel, le coulis n'a probablement pas réagi de la même manière que le revêtement bitumineux, ce qui a encore une fois favorisé le décollement durant l'hiver. Une restauration des surfaces ainsi que des données supplémentaires durant la période estivale a été nécessaires pour tenir un véritable bilan sur l'efficacité des surfaces réfléchissantes seules et combinées.

4 ANALYSE DES DONNÉES THERMIQUES DE LA DEUXIÈME SAISON DE SUIVI

La compilation des données thermiques provenant de l'instrumentation de Salluit a été faite en fonction des données disponibles lors de la dernière prise de données au printemps 2008. Les données présentées dans cette section complètent celles qui ont été présentées dans la section 3 du rapport. Plusieurs données ont été perdues au cours de cette saison de suivi. Les figures présentées sont celles qui sont les plus cohérentes et dont le nombre de points est assez élevé pour pouvoir tirer des conclusions.

4.1 Données disponibles

Un exercice exhaustif de vérification des données a été effectué pour chercher à obtenir le maximum de cohérence dans les données de Salluit. Cet exercice, qui avait déjà été réalisé de façon préliminaire avec les données disponibles pour la production du rapport intérimaire de 2007, a été repris avec l'objectif d'augmenter le niveau de fiabilité des régimes thermiques recueillis sur le site expérimental. L'analyse a été effectuée avec une représentation spatiale puis avec une représentation temporelle des données. L'analyse de la distribution spatiale des données a été effectuée pour des conditions froides en milieu d'hiver. À ce moment, la température doit normalement augmenter avec la profondeur et toute mesure qui ne répond pas à cette règle doit être considérée comme anormale. L'analyse des données temporelles est pour sa part basée sur le fait que les variations brusques de températures dans le temps pour des thermistances situées à une certaine profondeur (> 1 m) sont également improbables. La Figure 4-1 illustre le principe de l'analyse de cohérence spatiale des données et la Figure 4-2 illustre le principe de l'analyse de cohérence temporelle.

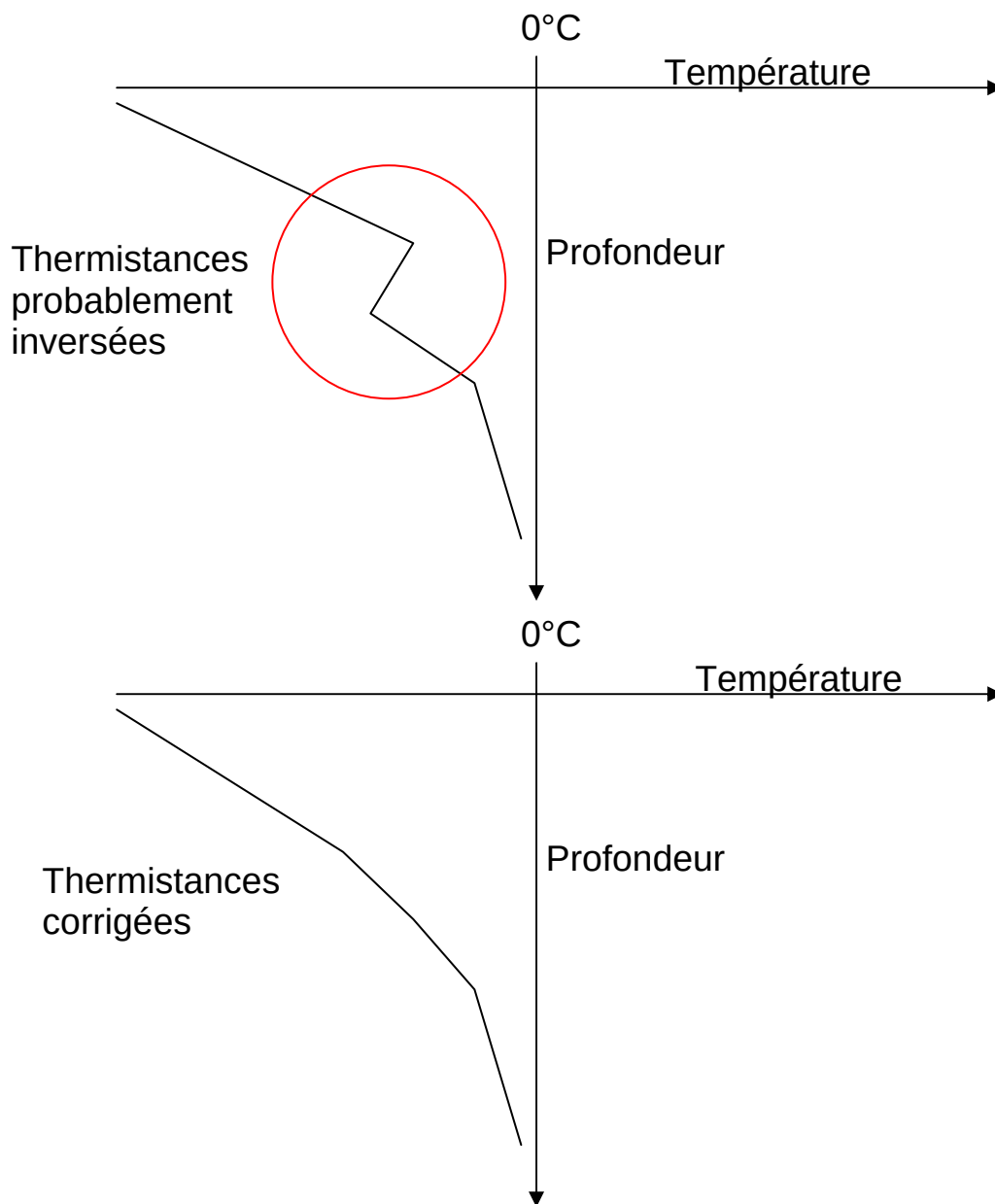


Figure 4-1 : Correction de la position d'une thermistances mal positionnée

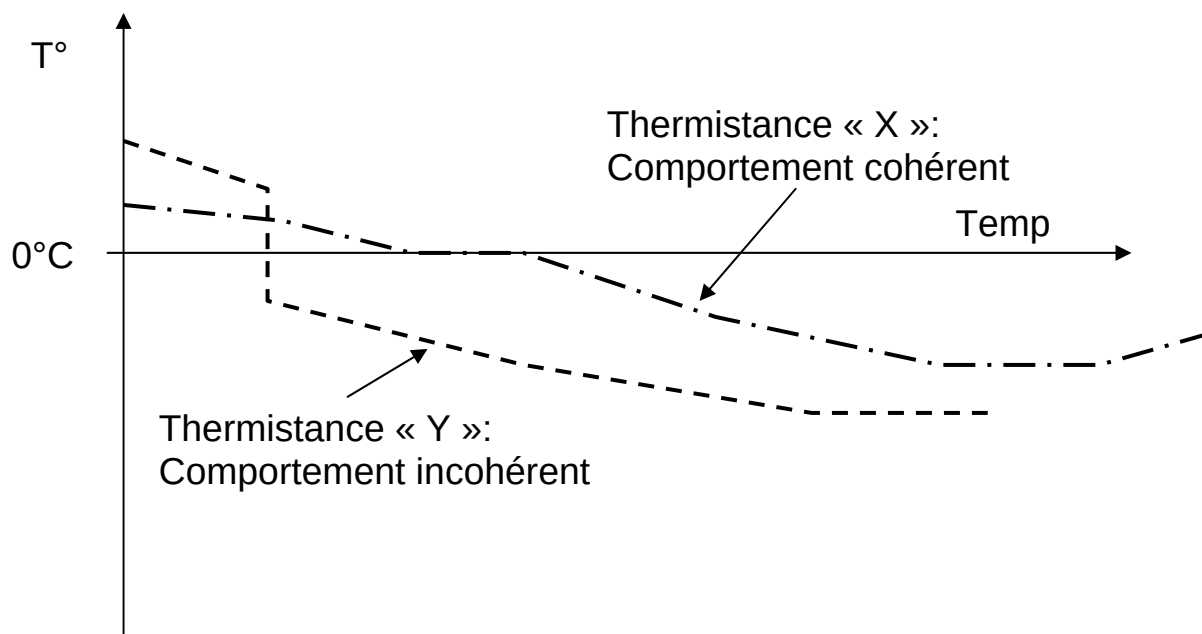


Figure 4-2 : Analyse temporelle des données thermiques

Le Tableau 4-1 fait la synthèse des thermistances disponibles tel que répertorié initialement puis modifié en fonction des données contradictoires.

Tableau 4-1 : Synthèse des thermistances disponibles avant et après correction.

Section 1				Section 2				Section 3			
Convection				Conv. + Surf. Réfléch.				Surface Réfléch.			
Talus (I)		Chaussée		Talus (H)		Chaussée (G)		Talus		Chaussée (F)	
Original	Corrigé	Original	Corrigé	Original	Corrigé	Original	Corrigé	Original	Corrigé	Original	Corrigé
I8-I10 [0,4 m]	I6, I9 [0,4 m]					G8-G10 [0,2 m]				F9, F10 [0,3 m]	
I6 [0,7 m]	I10 [0,7 m]			H7-H10 [0,7 m]		G7 [0,5 m]				F8 [0,6 m]	
	I8 [0,9 m]			H6 [0,9 m]		G6 [0,8 m]				F7 [0,9 m]	
I4 [1,3 m]	I2 [1,3 m]			H5 [1,2 m]		G5 [1,1 m]				F6 [1,2 m]	
				H4 [1,5 m]		G4 [1,4 m]				F5 [1,5 m]	
I2 [1,9 m]	I4 [1,9 m]			H3 [1,8 m]		G3 [1,7 m]				F4 [1,8 m]	
				H2 [2,1 m]		G2 [2,0 m]				F3 [2,1 m]	
				H1 [2,4 m]		G1 [2,3 m]				F2 [2,4 m]	
										F1 [2,7 m]	
Section 4				Section 5				Section 6			
Témoin				Drain Th. + Surf. Réfléch.				Drain Thermique			
Talus (E)		Chaussée (D)		Talus (C)		Chaussée (B)		Talus (A)		Chaussée	
Original	Corrigé	Original	Corrigé	Original	Corrigé	Original	Corrigé	Original	Corrigé	Original	Corrigé
E6-E10 [0,3 m]	E6-E10 [0,3 m]	D9 [0,3 m]	D9,D10 [0,3 m]	C9, C10 [0,2 m]	C9,C10 [0,2 m]	B9 [0 m]	B9 [0 m]	A9,A10 [0,3 m]	A9,A10 [0,3 m]		
E5 [0,6 m]	E5 [0,6 m]	D10 [0,6 m]	D6 [0,6 m]	C8 [0,5 m]		B10 [0,3 m]	B10 [0,3 m]	A8 [0,6 m]	A8 [0,6 m]		
E4 [0,9 m]		D7 [0,9 m]		C7 [0,8 m]	C7 [0,8 m]	B7 [0,6 m]	B8 [0,6 m]	A7 [0,9 m]	A7 [0,9 m]		
E3 [1,2 m]	E3 [1,2 m]	D8 [1,2 m]	D8 [1,2 m]	C6 [1,1 m]		B8 [0,9 m]	B5 [0,9 m]	A5 [1,2 m]	A6 [1,2 m]		
E2 [1,5 m]		D5 [1,5 m]	D5 [1,5 m]	C5 [1,4 m]	C5 [1,4 m]	B5 [1,2 m]	B6 [1,2 m]	A6 [1,5 m]	A5 [1,5 m]		
E1 [1,8 m]	E1 [1,8 m]	D6 [1,8 m]	D7 [1,8 m]	C4 [1,7 m]		B6 [1,5 m]	B7 [1,5 m]	A3 [1,8 m]	A4 [1,8 m]		
		D3 [2,1 m]	D1 [2,1 m]	C3 [2,0 m]	C3 [2,0 m]	B3 [1,8 m]	B4 [1,8 m]	A4 [2,1 m]	A3 [2,1 m]		
		D4 [2,4 m]	D4 [2,4 m]	C2 [2,3 m]		B4 [2,1 m]	B3 [2,1 m]	A1 [2,3 m]	A2 [2,3 m]		
		D1 [2,7 m]	D2 [2,7 m]	C1 [2,6 m]	C1 [2,6 m]	B1 [2,4 m]	B2 [2,4 m]	A2 [2,6 m]	A1 [2,6 m]		
		D2 [3,0 m]	D3 [3,0 m]			B2 [2,7 m]	B1 [2,7 m]				

On peut observer dans le Tableau 4-1 que seules les sections 4 et 5 ainsi que les sections 1 et 6 « Talus » comportent une quantité importante de données de température. Pour ce qui est des autres sections, les données de profondeur n'ont pu être corrigées compte tenu des pannes à répétition des systèmes d'acquisition de données auxquels elles sont raccordées. Les températures à l'entrée et à la sortie du drain thermique et du remblai à convection ne

peuvent pas non plus être analysées, car les seules données disponibles sont la sortie du drain thermique et l'entrée du remblai à convection.

De plus, la profondeur des thermistances du chapelet D a été modifiée à plusieurs reprises, sans toutefois en arriver à un profil de température cohérent. Les principaux graphiques avec les données disponibles sont présentés dans les sections suivantes.

4.2 Gradients thermiques mesurés dans les talus

Les gradients thermiques ont pu être mesurés dans les talus de quatre sections expérimentales soit les sections : témoin (T-T), drain thermique (T-DT), drain thermique avec surface réfléchissante (T-DTSR) et remblai à convection (T-RC). La section « surface réfléchissante » ne comporte pas de mesure thermique dans le talus. L'information n'est donc manquante que dans la section « remblai à convection avec surface réfléchissante (T-RCSR) ». Les régimes thermiques pour les quatre sections disponibles sont donnés pour la période du 19 septembre 2007 à la Figure 4-3 et pour la période du 4 février 2008 à la Figure 4-4. Ces deux graphiques illustrent le comportement des sections en fin d'été et en milieu d'hiver.

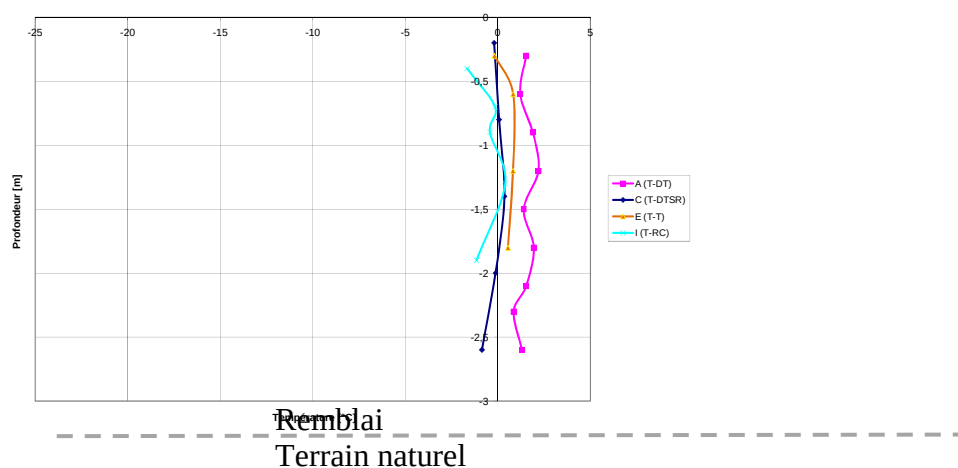


Figure 4-3 : Régime thermique dans les talus de quatre sections expérimentales au 19 septembre 2007

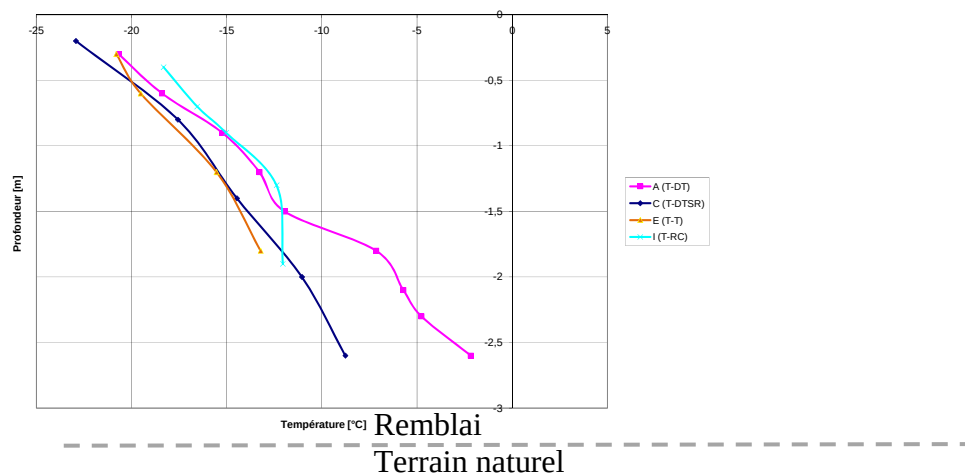


Figure 4-4 : Régime thermique dans les talus de quatre sections expérimentales au 4 février 2008

On note sur ces figures que les comportements thermiques des sections sont généralement cohérents (après les corrections décrites précédemment). Les régimes thermiques ne permettent cependant pas de déceler un effet significatif des techniques de protection. On note que la surface réfléchissante ne semble pas avoir d'effet sur les températures d'été, ce qui n'est pas surprenant pour une mesure dans le talus. On note également qu'aucun des systèmes d'extraction de chaleur ne semble avoir d'effet significatif sur les régimes thermiques en hiver alors que la section témoin présente les températures les plus froides.

4.3 Gradients thermiques mesurés sous la chaussée

Les gradients thermiques ont également pu être mesurés dans la chaussée pour deux sections expérimentales soit les sections : témoin (C-T) et drain thermique avec surface réfléchissante (C-DTSR). L'information n'a pas pu être analysée pour les quatre autres sections. Les régimes thermiques pour les deux sections disponibles sont donnés pour la période du 19 septembre 2007 et pour la période du 4 février 2008 à la Figure 4-5. Ce graphique illustre le comportement des deux sections en fin d'été et en milieu d'hiver.

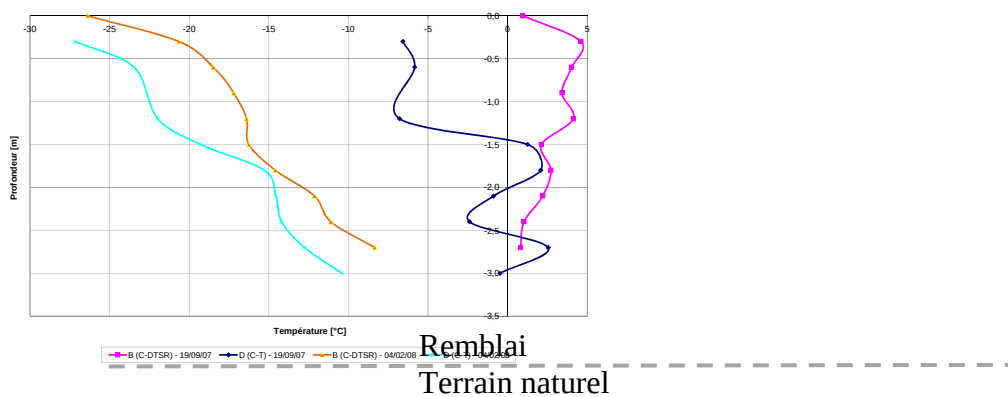


Figure 4-5 : Régimes thermiques dans la chaussée de deux sections expérimentales au 19 septembre 2007 et au 4 février 2008

Les régimes thermiques, notamment ceux mesurés à la fin de l'été, semblent ici un peu moins cohérents. Ce comportement peut possiblement s'expliquer par des fluctuations thermiques importantes qui ont plus de chances de survenir à la surface de la chaussée revêtue. Si on compare le régime thermique observé en septembre sur la section C_T à celui de la section C-DTSR, on note une incohérence importante pour les températures mesurées à moins de 1,5 m de la surface. Il est en effet très difficile d'expliquer pourquoi la surface de la chaussée témoin ait pu commencer à refroidir plus rapidement que celle de la chaussée avec la surface réfléchissante. On devrait normalement s'attendre à ce qu'une surface réfléchissante qui ne fonctionne pas ait, dans le pire des cas, le même comportement que la chaussée témoin. Une température observée de près de 10°C plus chaude dans la chaussée de la section protégée par la surface réfléchissante apparaît improbable et ne pourrait s'expliquer que par un apport important de chaleur par écoulement d'eau sous le remblai ou par un problème au niveau de l'instrumentation. Une accumulation d'eau a d'ailleurs été notée le long de la section C-DTSR (Figure 5-7).

La mesure des régimes thermiques en hiver indiquent un comportement qui semble cohérent mais qui n'indique aucun avantage de la section C-DTSR par rapport à la section témoin(C-T) qui est plus froide.

4.4 Évolution de la température au niveau de l'interface remblai-sol

L'analyse des données de comportement thermique dans le temps à un niveau proche de la ligne de séparation entre le remblai et le sol naturel a été possible dans les talus de trois sections du site expérimental soit : la section T-RC, la section T-DTSR ainsi que la section T-T. Ce type d'analyse est normalement très intéressant pour mesurer l'efficacité d'une technique de protection puisque c'est à ce niveau que l'efficacité de la technique doit se faire sentir. La Figure 4-6 illustre le comportement des trois sections dans le temps.

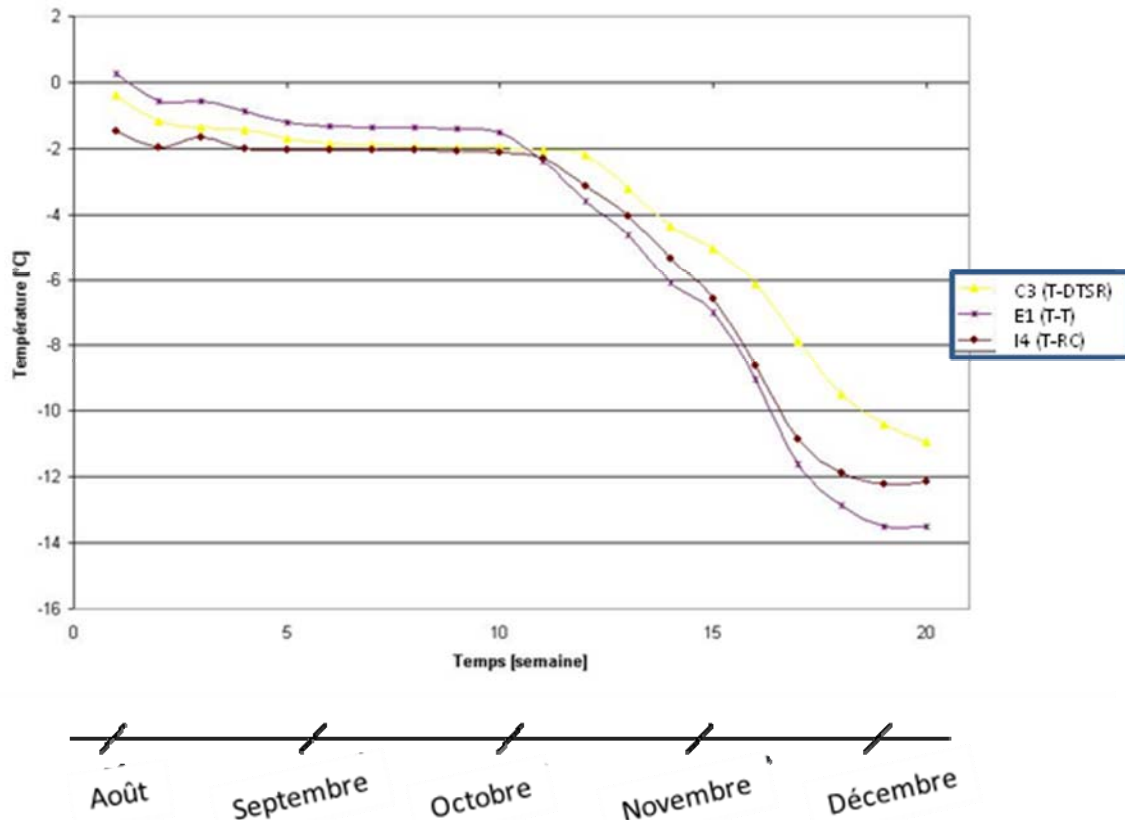


Figure 4-6 : Évolution de la température en fonction du temps pour les talus de trois sections expérimentales à une profondeur de 1,8 m (entre le 17 septembre et le 5 février 2008)

A priori, il semble que le comportement temporel des thermistances utilisées pour cette analyse soit cohérent puisqu'on ne note aucune variation brusque de température dans le temps. On note que jusqu'à la 10^e semaine (19-25 novembre 2007) les sections avec systèmes de protection sont plus froides (à ce niveau) que la section témoin ce qui semble indiquer une certaine efficacité des systèmes. Par contre, en milieu d'automne, cette tendance s'inverse après une période de stagnation thermique de toutes les sections. On note en effet que la section témoin (T-T) se refroidit alors beaucoup plus rapidement que les autres sections pour atteindre une température de 1,5° plus froide que la section « remblai à convection (T-RC)» et 2,5°C plus froide que la section « drain thermique/surface réfléchissante (T-DTSR)» en milieu d'hiver. Cette analyse n'apporte donc pas plus d'indication d'une certaine efficacité des systèmes de protection. La stagnation thermique de la section T-DTSR qui dure près de deux semaines de plus que la section témoin et le refroidissement subséquent plus lent sous la section T- DTSR peut supporter l'hypothèse que

l'écoulement d'eau sous le remblai soit un facteur en cause dans la performance thermique du système.

5 CONDITION DES SECTIONS EXPÉRIMENTALES

Les visites sur le site expérimental effectuées lors des tournées d'hiver puis d'été 2008 ont permis de faire certaines observations sur la condition de la route en général puis sur celle des sections expérimentales.

5.1 Condition générale de la route

L'état de la route d'accès à l'aéroport de Salluit semble se dégrader rapidement depuis la pose du revêtement bitumineux. La Figure 5-1 donne une vue d'ensemble sur la section de route traversant la vallée argileuse avant le village de Salluit. On observe sur la photo de nombreux affaissements comblés par du gravier sur cette section de route. Ces affaissements semblent coïncider avec des infiltrations d'eau sous le remblai induites par les obstacles que forment les tumulus qui servent de support aux poteaux de la ligne électrique (Observations faites par Michel Allard et son équipe du CEN).



Figure 5-1 : Vue d'ensemble de la route d'accès de l'aéroport de Salluit à l'entrée du village.

On observe également plusieurs signes d'affaissements de l'épaulement du remblai qui se manifestent par la formation de fissures sur les accotements (Figure 5-2) et dans les talus ainsi que par le basculement des poteaux de la ligne électrique (Figure 5-3).



Figure 5-2 : Fissures dans l'épaulement du remblai de la route de Salluit



Figure 5-3 : basculement des poteaux de la ligne de transport électrique

5.2 Condition des sections expérimentales

Plusieurs problèmes affectent également la section expérimentale. On retrouve des affaissements également dans ce secteur. À l'été 2008, les affaissements se manifestaient aux deux extrémités de la section expérimentale. On peut observer l'une de ces dépressions sur la Figure 5-4. Bien que la section expérimentale ne soit pas touchée directement par les affaissements, le remplissage de ces dépressions par du gravier a deux effets importants qui affectent directement les sections de surfaces réfléchissantes. Le premier effet est de salir la surface, réduisant ainsi l'albédo de la surface et sa capacité à réfléchir la radiation solaire. Le second effet est l'apport de granulats qui favorisent l'abrasion des surfaces réfléchissantes.

État des conduites de ventilation

Lors de la visite à l'été 2008, les conduites de ventilation, qui avaient été rehaussées l'été précédent, étaient en très bon état et paraissaient être pleinement fonctionnelles (Figure 5-4). Lors de la visite précédente, à l'hiver 2008, les conduites étaient bien dégagées et semblaient également fonctionnelles (Figure 5-5).



Figure 5-4 : Vue des conduites de ventilation et de l'ensemble des sections d'essai



Figure 5-5 : Conduites de ventilation telles qu’observées à l’hiver 2008

Quelques dégradations préoccupantes des sections expérimentales ont été observées lors de la visite de l’été 2008. On a d’abord noté un début d’affaissement aux abords des tumulus supportant les systèmes de ventilation. Tel qu’on peut le voir sur la Figure 5-6, des fissures apparaissent dans le remblai indiquant un affaissement actif à cet endroit. On note également une accumulation d’eau en pied de talus dans le secteur du drain thermique (Figure 5-7). Ce problème, qui pourrait être associé à la présence du tumulus supportant le système de ventilation, est également une indication d’un tassement qui survient dans ce secteur. Il pourrait entraîner une dégradation du remblai si l’eau venait à s’écouler sous le remblai.

Le problème le plus important demeure le recouvrement et l’arrachement des surfaces réfléchissantes. Les deux problèmes peuvent être notés sur la Figure 5-8. On observe sur la figure que la surface réfléchissante située à l’égaleité de la camionnette est en partie recouverte de gravier et de sable au niveau des sentiers de roues. On note également l’arrachement de plaques du produit de recouvrement. La seconde surface réfléchissante montre pour sa part des problèmes plus sévères d’arrachement.



Figure 5-6 : Signes d'affaissement des tumulus supportant les systèmes de ventilation



Figure 5-7 : Accumulation d'eau au pied du talus de la section avec drain thermique



Figure 5-8 : Condition des surfaces réfléchissantes

6 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

L'analyse des données recueillies au cours de la période allant d'août 2006 à février 2008 et les observations faites sur le terrain en février 2008 et en août 2008 nous a conduits à faire les constats suivants :

1. Les systèmes d'acquisition de données en opération à Salluit ne sont pas fiables et ont causé la perte d'une quantité importante de données au cours des deux premières années de la période de suivi thermique
2. Les anomalies thermiques résultant d'erreurs lors de l'installation des thermistances (inversion probable de fils) et lors de la réparation des câbles endommagés à l'hiver 2007, ont en bonne partie été résolus par une analyse détaillée de la cohérence des données thermiques. Des incohérences subsistent et elles nuisent à la qualité des analyses futures des données thermiques.
3. Les données thermiques disponibles indiquent une efficacité mitigée des systèmes de protection. La pauvre qualité des données ne permet pas d'établir de constat clair à cet

effet mais il semble que la performance des systèmes de protection soit nettement en deçà des attentes. En se fiant sur l'expérience de l'Alaska, on pourrait supposer que les systèmes de protection installés à Salluit n'avaient pas la hauteur requise pour générer des effets convectifs importants (hauteur minimale de 1,5 m selon Esch, 1996). Toutefois, la très bonne performance des systèmes expérimentés en laboratoire (hauteur de 0,7m) ainsi que la modélisation thermique réalisée lors des études préliminaires (Chataigner, 2007) suggèrent que les systèmes en place à Salluit (hauteur approximative de 0,8 – 0,9 m) devraient avoir un effet significatif sur le régime thermique des sections. Les travaux de ce dernier indiquent par contre que l'efficacité des systèmes augmente avec l'épaisseur des remblais.

4. Les tumulus des systèmes de ventilation construits du coté amont du remblai routier induisent des accumulations d'eau et des infiltrations sous le remblai routier. Ces écoulements d'eau sous le remblai pourraient être un des facteurs expliquant la pauvre performance des sections avec drain thermique.
5. Une dégradation importante des surfaces réfléchissantes est survenue après seulement une saison d'exploitation des surfaces restaurées à l'été 2007. Cette dégradation est associée aux résidus d'huile répandue sur la chaussée lors de l'installation initiale en 2006 (nettoyé en 2007 mais probablement pas complètement), au recouvrement partiel des surfaces par des matériaux abrasifs (sable et gravier), ainsi qu'à l'action des véhicules réguliers et véhicules d'entretien circulant sur la chaussée. Des rainures provenant vraisemblablement des lames de charrues ont d'ailleurs été notées dans les surfaces réfléchissantes.

Une partie de la responsabilité des problèmes rencontrés doit être assumée par l'équipe de recherche. Des erreurs d'inexpérience ont probablement été commises lors de la préparation du projet et lors de l'installation des sections. À la décharge de l'équipe, il est important de préciser que l'installation de ces planches expérimentales est une première du genre au Canada, et à notre connaissance, une des premières à l'échelle internationale. L'expérience acquise à Salluit a d'ailleurs servi à préparer un projet de qualité pour la construction des planches expérimentales de Tasiujaq. Une grande partie des problèmes semble toutefois

attribuable aux aléas de la recherche en milieu nordique. Les problèmes reliés à l'épandage d'huile et de gravier sur les surfaces ainsi que les pannes à répétition des systèmes d'acquisition de données auraient difficilement pu être prévus dans le contexte du projet.

Ces constats ont amené l'équipe de chercheurs et le Ministère des transports du Québec à envisager quelques options dont l'abandon pur et simple du projet. Cette option a finalement été retenue. Les systèmes d'acquisition de données ont été démantelés au début de l'automne 2009 mais les systèmes de ventilation ont été laissés en place. Les données accumulées ont été consolidées en un rapport final. L'état des sections pourrait être documenté lors des visites du MTQ au cours des 2 ou trois prochaines années pour compléter l'information disponible.

L'efficacité des méthodes n'aura donc pas pu être évaluée dans le cadre de ce projet expérimental. Il est toutefois possible de tirer bon nombre de leçons du projet de Salluit pouvant être utiles pour de futurs travaux de terrain. Les enseignements suivants sont donc retenus.

6.1 Expérimentation de techniques de protection sur le terrain

L'expérimentation de terrain doit normalement se faire à la fin du processus expérimental après que les techniques à expérimenter aient été optimisées par analyse numérique et validées en laboratoire. L'expérimentation de terrain est nécessaire pour finaliser l'évaluation de ces techniques. C'est cependant une opération coûteuse et risquée. Les problèmes rencontrés à Salluit sont attribués principalement aux facteurs suivants :

1. Surfaces trop petites : L'expérimentation des techniques de protection sur des surfaces restreintes de 6m X 3m peut avoir contribué à la faible performance des techniques évaluées. Les pertes de chaleur en bordure de la surface évaluée peuvent avoir affecté de façon significative le régime thermique des sections et, conséquemment, la mesure de leur efficacité. L'expérience de Salluit nous incite à recommander des longueurs minimales de 10m pour l'évaluation de techniques de protection et l'utilisation de la pleine largeur de la chaussée (7m) lors que des

techniques de surface claires sont utilisées. Il est de plus recommandé de prévoir le contrôle des zones d'approche des sections expérimentales (sur environ 30m) pour éviter les problèmes de contamination des surfaces par des matériaux granulaires utilisés pour l'entretien des surfaces adjacentes de la chaussée.

2. Réalisation des travaux : La réalisation « en régie » des travaux de construction et de réparation des sections expérimentales sous la direction de personnel inexpérimenté (chercheurs de l'Université) a certainement été un facteur qui a contribué au développement de certaines situations problématiques sur le chantier. L'importance de l'expérimentation de terrain pour documenter les problèmes de mise en œuvre d'une technique, pour évaluer son efficacité et pour documenter les coûts relatifs de l'opération justifie pleinement le recours à un entrepreneur pour la réalisation des travaux. À tout le moins, l'assistance d'un ingénieur ayant de l'expérience relative à la réalisation de travaux en milieux nordiques serait requise lors de la planification et de la réalisation des travaux.
3. Manque de robustesse de l'instrumentation : La complexité de la réalisation de travaux d'instrumentation et des opérations de collecte de données au Nunavik justifie pleinement l'utilisation d'une instrumentation et de systèmes d'enregistrement robustes et éprouvés pour utilisation en régions nordiques.
4. Interférence des opérations d'entretien : Les activités de déneigement en hiver ainsi que le remplissage des dépressions par du matériau granulaire en été sont deux opérations qui ont affecté le projet expérimental. Dans le premier cas, les opérations de déneigement ont contribué à détériorer les surfaces réfléchissantes et ont provoqué la rupture de certains câbles de thermistances. Dans le second cas, le gravier a contribué à salir et à user les surfaces réfléchissantes. Bien que ces opérations ont nui à l'évaluation de la performance des sections expérimentales, il faut considérer qu'elles sont nécessaires au maintien de la conditions des routes au Nunavik et que les méthodes de mitigation doivent conséquemment pouvoir y résister.

5. Drainage défavorable : l'accumulation d'eau sur les tumulus des poteaux électriques et sur les tumulus supportant les systèmes de ventilation a certainement contribué à altérer les régimes thermiques des sections.
6. L'enneigement local du site. Ce facteur a contribué au mauvais fonctionnement des systèmes de protection au cours de la première saison. Le problème a par la suite été corrigé en rehaussant les bouches d'aération.

6.2 Conception des sections

Plusieurs éléments relatifs à la conception des systèmes de protection peuvent être améliorés suite aux observations réalisées lors du projet expérimental de Salluit. Les principales recommandations sont les suivantes :

1. Épaisseurs minimales des systèmes de protection convectifs : Tel que mentionné précédemment dans le rapport, l'expérience de l'Alaska suggère qu'une hauteur minimale de 1,5m (Esch, 1996) est requise pour générer un effet convectif significatif dans un remblai à convection. Bien que l'expérimentation en laboratoire ainsi que la modélisation thermique réalisée lors des études préliminaires suggèrent que des remblais plus minces peuvent fonctionner, il semble que la faible épaisseur des systèmes installés à Salluit (environ 0,8m) soit un facteur en cause dans la mauvaise performance des systèmes expérimentés. Jusqu'à indication contraire, il est recommandé de spécifier une épaisseur minimale de 1,5 m de matériau convectif pour assurer une performance satisfaisante des systèmes de protection placés dans les accotements des remblais. Cette épaisseur minimale devrait également être appliquée au drain thermique. Dans ce dernier cas, le critère de 1,5 m s'applique à la hauteur entre la base et le sommet du drain. Des études additionnelles devront être réalisées pour vérifier si des systèmes convectifs plus minces peuvent protéger efficacement les remblais.

2. Position du drain thermique et ventilation : La conception du système de drain thermique semble en général adéquate. Le coussin de support joue bien son rôle et devrait être spécifié tel qu'illustré à la Figure 6-1. La modélisation numérique du système a également indiqué que la pente de 1H :1V pour l'installation du drain sur le remblai semblait maximiser sa performance tout en étant facile à mettre en œuvre sur le chantier. La courbure du drain dans sa partie supérieure est inutile et difficile à réaliser. Le drain devrait donc se terminer le long de la pente d'excavation tel qu'indiqué par le trait pointillé sur la figure. La pose d'une conduite à l'extrémité du drain pour évacuer la chaleur, s'est par ailleurs avérée difficile à réaliser à Salluit ainsi qu'à Tasiujaq. Ces deux expériences ont mené au remplacement de ces conduites par des capteurs constitués de demi-ponceaux en polyéthylène pour un projet subséquent à Puvurnituq. Ces capteurs illustrés en rouge sur la figure sont faciles à installer et à relier aux cheminées de ventilation. Les tuyaux perforés installés à la base et au sommet des remblais et utilisés pour la ventilation des matériaux convectifs doivent également être remplacés par des demi-ponceaux.

Les conduites de ventilation utilisées à Salluit semblent bien fonctionner. On doit cependant s'assurer de les placer à une hauteur telle qu'elles ne peuvent être obstruées par les accumulations de neige et de glace en hiver. La hauteur de 0,5 m spécifiée sur la figure semble insuffisante. Une valeur minimale de 0,8 m serait probablement appropriée. Cette spécification doit cependant être adaptée à la structure et aux sites considérés.

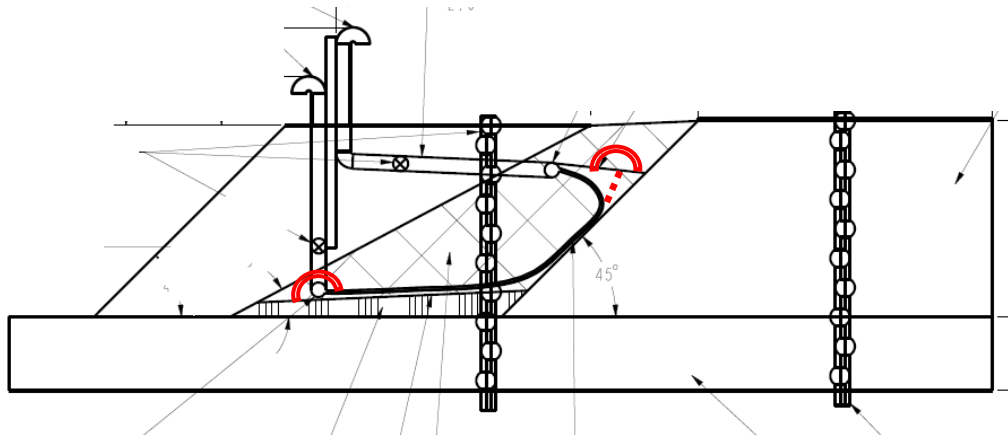


Figure 6-1 : modifications à la conception du système de drain thermique pour les expérimentations futures

3. Surfaces réfléchissantes : Les matériaux utilisés pour les surfaces claires n'ont pas performé à Salluit. La raison principale de cet échec est la contamination de la surface par de l'huile avant la pose des matériaux et, ultérieurement, la contamination par le gravier utilisé pour l'entretien de la route. Bien que ces problèmes soient susceptibles de survenir lors d'une utilisation élargie éventuelle de cette technique, l'utilisation de surfaces claires demeure la seule technique qui puisse stabiliser thermiquement de façon efficace une route pavée existante. Les matériaux utilisés à Salluit ont démontré une très bonne efficacité lors des essais préliminaires à la Forêt-Montmorency. Leur durabilité semble cependant limitée à quelques années (3 – 5 ans). Une solution plus durable consisterait à utiliser des traitements de surface ou des revêtements minces clair produits à partir de bitumes de type « Bituclair » (Colas) ou « MexAsphalt » (Shell). Bien que le prix de ces bitumes soit élevé, leur durabilité en ferait probablement une solution avantageuse pour la stabilisation thermique des routes des villages du Nunavik dont les routes d'accès de Salluit, d'Akulivik, de Umiujaq, de Kangiksualujjuaq et Tasiuaq. L'efficacité des techniques de surfaces claires a été démontrée au Groenland (Thule et Kangerluusaq). Elle est présentement évaluée à Beaver Creek et à Dawson City au Yukon. Le Ministère des Transports du Québec devrait considérer de compléter l'évaluation de cette technique par un projet pilote de stabilisation à l'aide d'un revêtement bitumineux clair à Salluit ou à Akulivik.

6.3 Autres considérations

1. Pavage des routes au Nunavik : Il semble clair que le pavage des routes et rues dans les communautés du Nunavik est une cause majeure de dégradation thermique des infrastructures de transport. La pose d'un revêtement bitumineux a pour effet de réduire l'albédo de la surface et, en conséquence, d'augmenter l'absorption de chaleur à la surface du remblai. La dégradation thermique qui en résulte se traduira par des tassements et par des risques accrus de rupture du remblai.

Le pavage des routes et rues dans les communautés peut facilement se justifier par l'amélioration de la qualité de vie qui en résulte. Il est cependant important de connaître les risques de dégradation qui peuvent en résulter et de planifier les interventions d'entretien en conséquence. L'utilisation de matériaux bitumineux clairs pour stabiliser les secteurs problématiques devrait être envisagée. L'utilisation de cette technique nécessite le développement de matériaux et de procédures appropriés ainsi que l'identification d'équipement adaptés pour la mise en œuvre.

2. Accumulation d'eau en amont les tumulus et écoulement sous les remblais : Un phénomène intéressant a été observé le long de la route de Salluit en rapport avec l'apport de chaleur par convection provenant de l'eau d'écoulement en bordure des remblais. La route étant construite à flanc de pente dans le secteur du site expérimental, le remblai tend à intercepter l'écoulement d'eau de surface. Cette eau ruisselle ensuite le long du remblai et est interceptée par les tumulus des poteaux de la ligne électrique. Elle tend alors à s'infiltrer sous le remblai. Les déformations observées sur la route dans ce secteur semblent coïncider avec ces zones d'infiltration. Ces observations confirment donc l'importance du phénomène de transport de chaleur par l'eau de surface qui s'infiltre sous remblais. Ces observations sont très intéressantes sur le plan phénoménologique. Elles ne permettent cependant pas de tirer de conclusion sur les implications pour la conception des systèmes de drainage. De toutes évidences, les tumulus provoquent l'infiltration de l'eau sous le remblai et contribuent probablement à la dégradation locale du remblai. Quel aurait été le comportement du remblai en absence de tumulus? Il est permis de croire que l'eau s'écoulant le long du remblai sans obstacle se serait accumulée dans les points bas et aurait possiblement provoqué un problème beaucoup plus grave en aval (endroit où la pose d'un ponceau aurait été requise). Deux solutions seraient à considérer dans ce type de situation. La première consisterait à placer plusieurs ponceaux en travers du remblai pour favoriser le passage de l'eau sans accumulation du côté amont du remblai. La seconde consisterait à creuser un fossé d'interception parallèle à la route à bonne distance du remblai (> 10 m) et de diriger l'eau vers des ponceaux de décharge aménagés le long de la route de façon à éviter les accumulations importantes d'eau.

En conclusion pour cette section du rapport, il est important de souligner que le secteur de la route sur laquelle se trouve le site expérimental constitue un cas critique sur lequel il faut continuer à travailler pour identifier des solutions efficaces et durables au problème de dégradation des infrastructures de transport en régions de pergélisol. La route pourrait ainsi éventuellement faire l'objet d'un projet pilote d'application d'une stratégie d'adaptation fondée sur les leçons tirées du projet expérimental de Salluit ainsi que sur ceux de Tasiujaq et de Beaver Creek (Yukon). Considérant la faible épaisseur du remblai, l'utilisation de matériaux de revêtement pâles constitue la technique d'intérêt pour évaluation dans le contexte de la route de Salluit.

7 CONCLUSION

L'analyse des données recueillies jusqu'au printemps 2008 et les observations faites sur le terrain en février 2008 et en août 2008 indiquent plusieurs problèmes reliés au comportement de la section expérimentale et aux systèmes de mesure installés sur le site. Ces problèmes sont décrits et discutés dans le rapport. En plus des problèmes d'instrumentation et d'acquisition de données sur le site, les données disponibles et jugées fiables indiquent qu'aucun des systèmes de protection n'a d'effet significatif sur les régimes thermiques des planches expérimentales. Deux hypothèses principales peuvent expliquer la pauvre performance des systèmes de protection : 1) la hauteur insuffisante des systèmes qui ne suffit pas à initier le mouvement convectif et, 2) l'écoulement d'eau sous la section de drain thermique qui peut possiblement annuler l'effet de refroidissement prévu. Par ailleurs, plusieurs signes de dégradation du remblai routier et des surfaces réfléchissantes ont été observés aux abords et sur les sections expérimentales.

Les résultats décevants obtenus jusqu'à maintenant pour le site expérimental de Salluit a amené l'équipe de recherche et le Ministère des transports du Québec à prendre la décision de mettre fin au suivi expérimental de la route de Salluit. Le présent rapport

donne les principales leçons à tirer de ce projet expérimental. Les principales leçons tirées du projet sont les suivantes :

- L'importance de l'expérimentation de terrain pour valider les développements de recherche réalisés en laboratoire et par simulation numériques
- L'importance de construire des planches expérimentales de grande dimension et de mettre en place des systèmes de mesure éprouvés et robustes
- La nécessité de recourir à des équipes expérimentées et à de l'outillage adéquat pour la mise en place des sections expérimentales
- L'importance d'améliorer la conception des systèmes de protection et de bien définir leurs limites d'application
- L'importance de prendre en compte les écoulements d'eau dans la préparation d'un projet de recherche et dans la conception des remblais
- L'importance de considérer les conditions d'enneigement local pour éviter les effets de comportement différentiel des sections et pour éviter l'obstruction des systèmes de ventilation
- La nécessité de poursuivre la recherche pour déterminer les solutions d'adaptation appropriées pour la stabilisation des infrastructures de transport importantes localisées dans des secteurs de pergélisol sensible
- Le besoin d'avoir une personne ressource locale pour suivre l'état des équipements et voir à l'entretien des systèmes

Il faut également souligner l'importance de continuer la recherche sur le site de Salluit qui représente un des cas critiques de comportement d'une infrastructure de transport au Nunavik. Ce site pourrait notamment faire l'objet d'un projet pilote de pavage avec un revêtement clair.

RÉFÉRENCES

ADOTPF, (1985), White Paint for Highway Thaw Settlement Control, Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Report no. FHWA-AK-RD-85-16, Fairbanks, Alaska, p.1-7

BEAULAC, I., DORÉ, G., (2006), *Permafrost degradation and adaptations of airfields and access roads, Nunavik, Quebec, Canada*, Transportation Association of Canada, Annual Conference and Exhibition, Charlottetown, Prince Edward Island, pp. 1-20

CHATAIGNER, Y., (2007), *Modélisation du transfert thermique dans un remblai sur pergélisol et élaborations de stratégies pour faire face aux changements climatiques*, Thèse de Maîtrise, Département de Génie mécanique, Université Laval, Québec, Canada, 136 p

ESCH D., (1988), Roadway Embankments on Warm Permafrost Problems and Remedial Treatments, Alaska Department of Transportation, USA, Book of Permafrost, Proceedings, Fifth International Conference, Volume 2, Ed. Kaare Senneset, Tapis Publishers, Trondheim, Norway, p.1223-1228

ESCH, D., (1996), Road and Airfield Design for Permafrost Conditions, Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph, book of Roads and Airfields in Cold Regions, Edited by Vinson, New York, p.121-149

Environnement Canada
Archives Climatiques Nationales
<http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/>

GOERING, D.J., (1998), *Experimental Investigation of Air Convection Embankments for Permafrost-Resistant Roadway Design*, Book of Permafrost, Seventh International Conference, Collection Nordicana, No 55, Whitehorse, Canada, pp.319-326

GOERING, D.J., (2001), *ACE and Thermosyphons Design Features Loftus Road Extension Project*, Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Report no. FHWA-AK-RD-02-01, Fairbanks, Alaska, pp.1-58

GOERING, D.J., (2003), *Thermal Response of Air Convective Embankments to Ambient Temperature Fluctuations*, Book of Permafrost, Proceedings, Eighth international

LAI, Y., WANG, Q., NIU, F., ZHANG, K., (2004), *Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions*, Cold Regions Science and Technology, Vol. 38, pp. 165-184.

LAI, Y., ZHANG, M., GAO, Z., YU, W., (2006), *Influence of boundary conditions on the cooling effect of crushed-rock embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibetan Plateau*, Cold Regions Science and Technology, Vol. 44, pp. 225-239.

MOLMANN, T., BERGHEIM, B., VALERIOTE, M., (1998), Svalbard Airport Geotechnical Study : Engineering Methodology and Results, Book of Permafrost, Proceedings, Seventh international Conference, Ed. Lewkowicz & Allard, Coll. Nordicana, Yellowknife, Canada, p.745-755

ANNEXE 1 : DONNÉES THERMIQUES ADDITIONNELLES POUR LES SECTIONS EXPÉRIMENTALES DE SALLUIT

Température en fonction du temps pour le chapelet A (17 sept 2007 au 5 fév 2008)

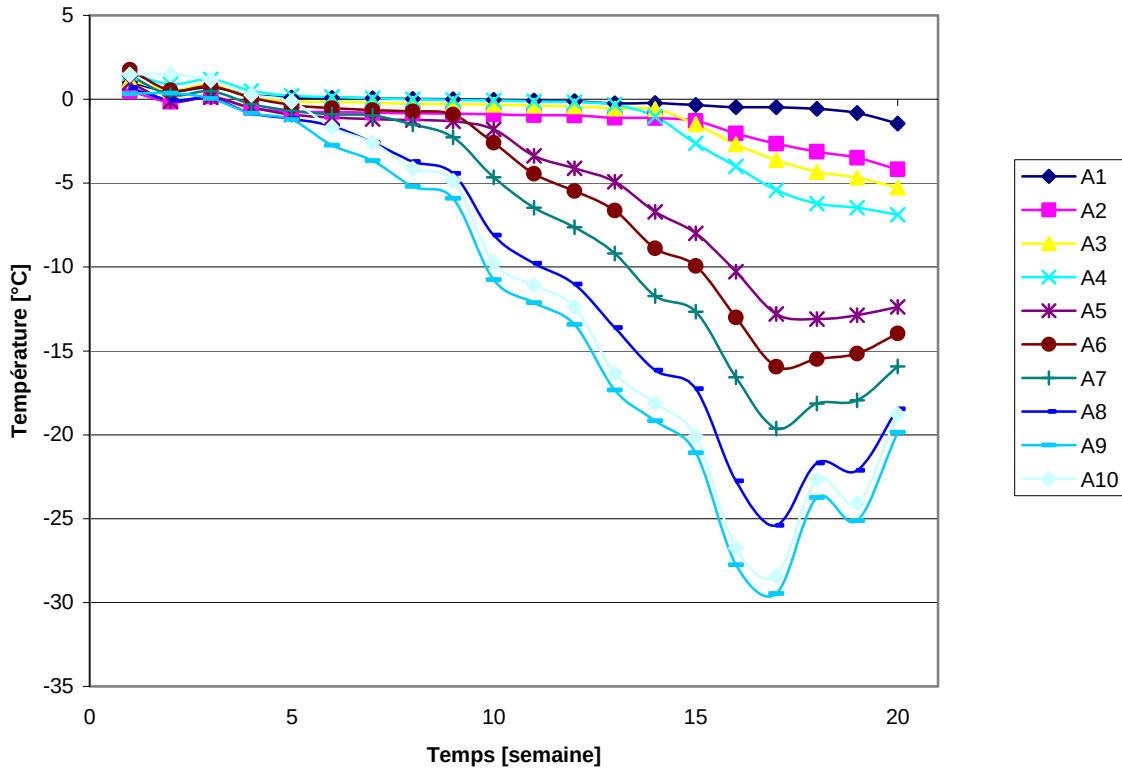


Figure 0-0-1 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans le talus avec drain thermique (T-DT)

Évolution des températures dans le **talus où un drain thermique** a été installé. La profondeur augmente ainsi : A10-A9 [0,3 m], A8 [0,6 m], A7 [0,9 m], A6 [1,5 m], A5 [1,5 m], A4 [1,8 m], A3 [2,1 m], A2 [2,3 m] et A1[2,6 m].

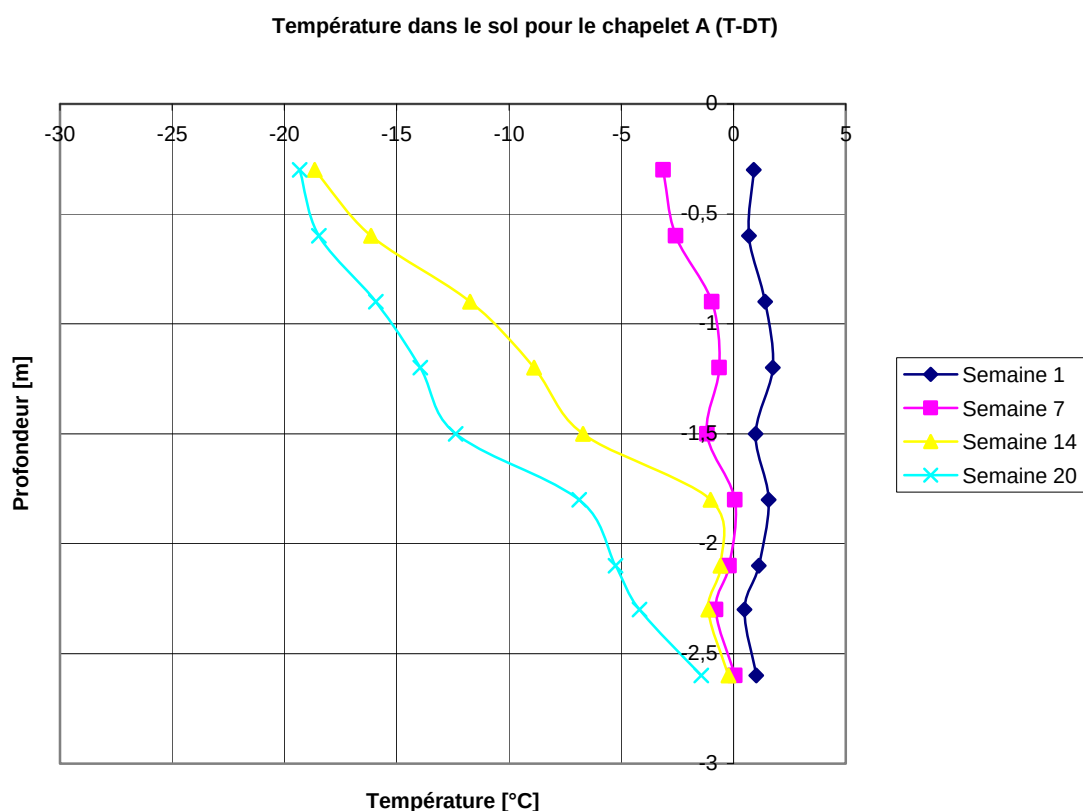


Figure 0-2 : Profils de température à quatre périodes dans le talus avec drain thermique (T-DT)

Les légères incohérences sur le profil de température peuvent être dues à un mauvais calibrage des thermistances ou par un apport de chaleur à la base du remblai. L'analyse spatiale suggère que les thermistances sont bien positionnées tandis que le profil de température varie beaucoup de 1,5 à 2,5 m.

Température en fonction du temps pour le chapelet B (17 sept 2007 au 5 fév 2008)

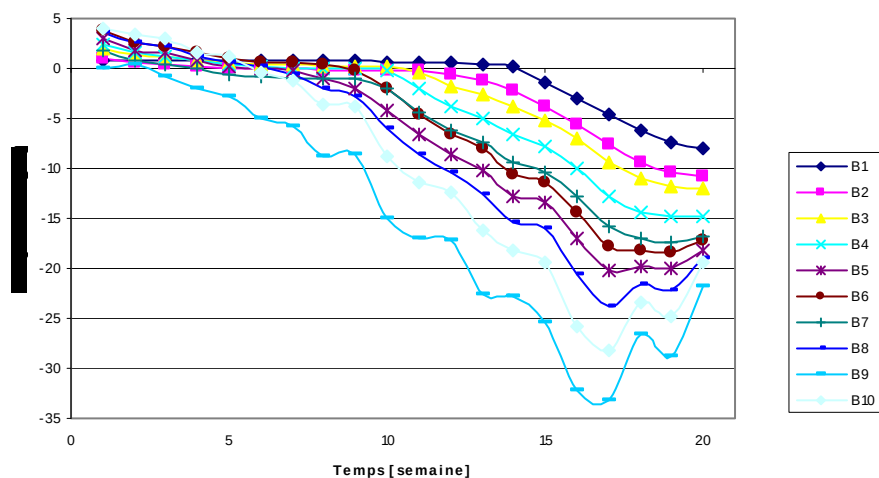


Figure 0-3 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans la chaussée avec surface réfléchissante et drain thermique (C-DTSR)

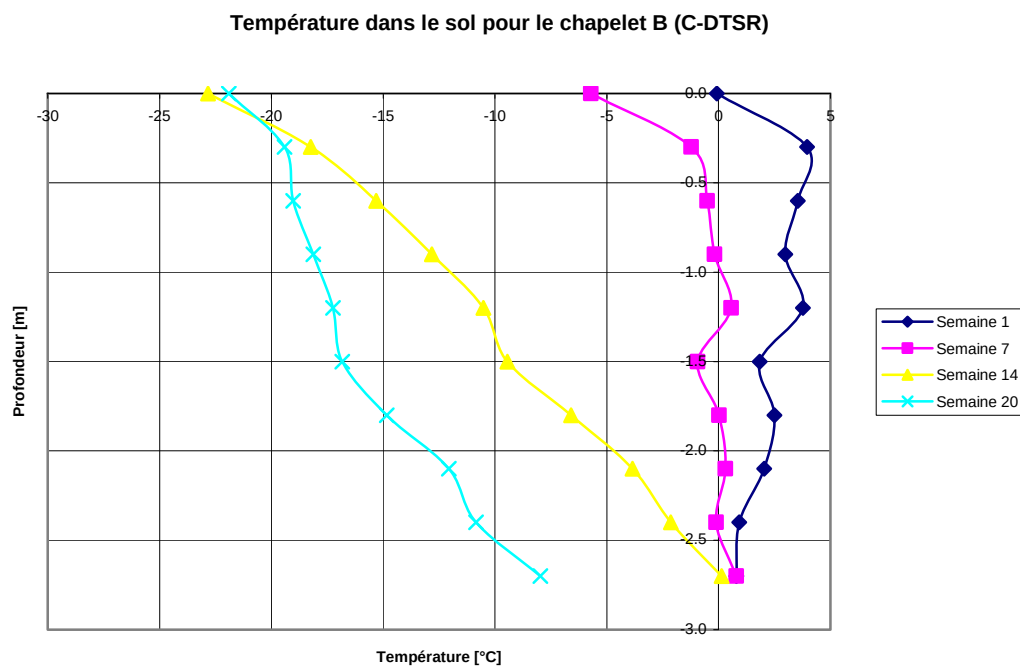


Figure 0-4 : Profils de température à quatre périodes dans la chaussée avec surface réfléchissante et drain thermique (C-DTSR)

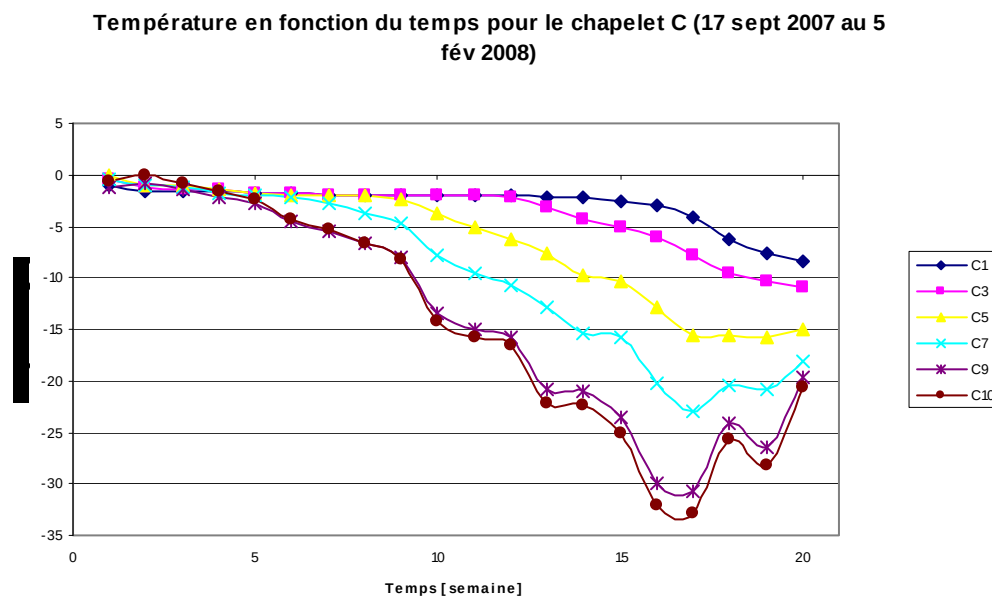


Figure 0-5 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans le talus avec surface réfléchissante et drain thermique (T-DTSR)

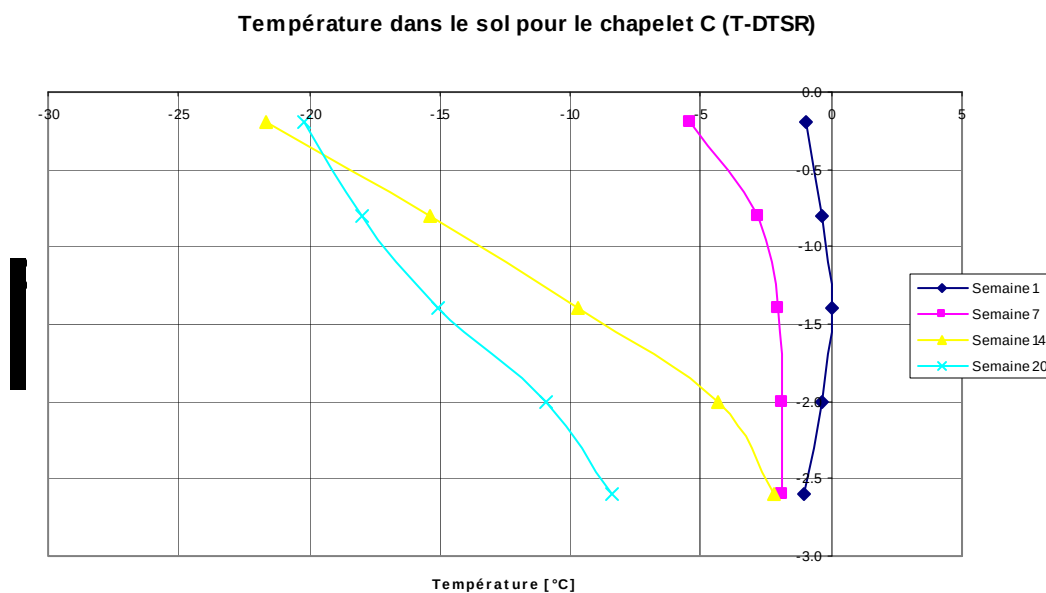


Figure 0-6 : Profils de température à quatre périodes dans le talus avec surface réfléchissante et drain thermique (T-DTSR)

Profil de température en fonction de la profondeur pour la section **Talus Drain thermique + surface réfléchissante** sur 4 semaines différentes. Semaine du 17/09-24/09 - Semaine du

30/10-05/11 - Semaine du 18/12-24/12 - Semaine du 29/01-05/02. C'est ce profil qui semble être le plus cohérent avec la théorie.

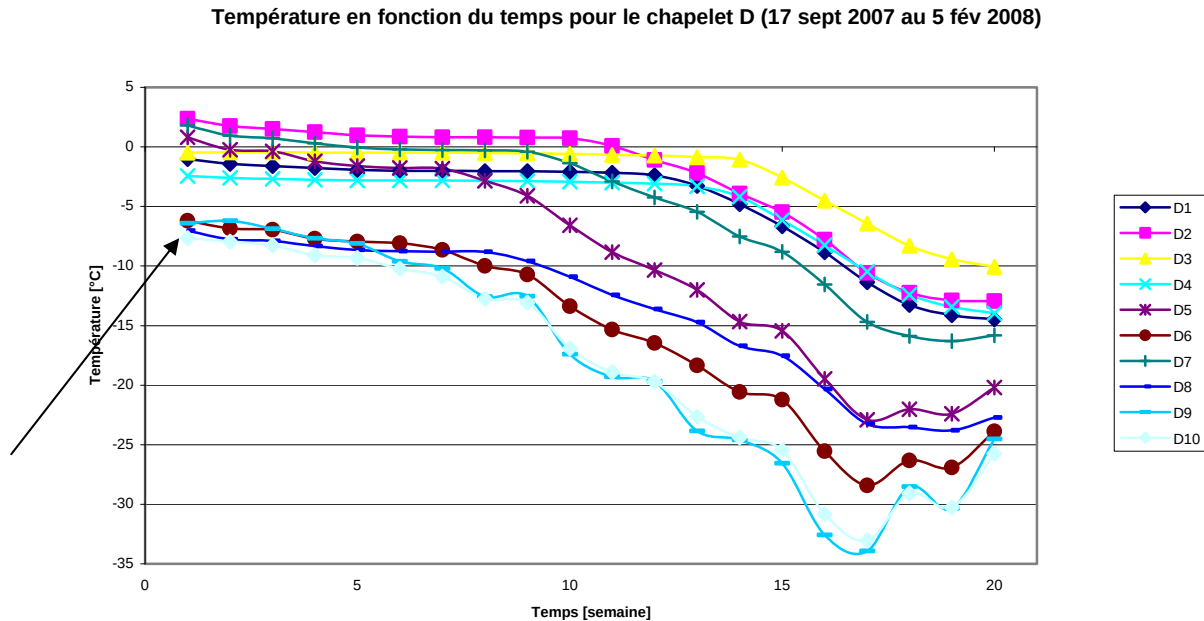


Figure 0-7 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans la chaussée de la section témoin (C-T)

Évolution des températures dans la chaussée **témoin**. La flèche indique un comportement qui apparaît incohérent car 4 thermistances indiquent une température très en-dessous de toutes les autres pour le même moment de l'année.

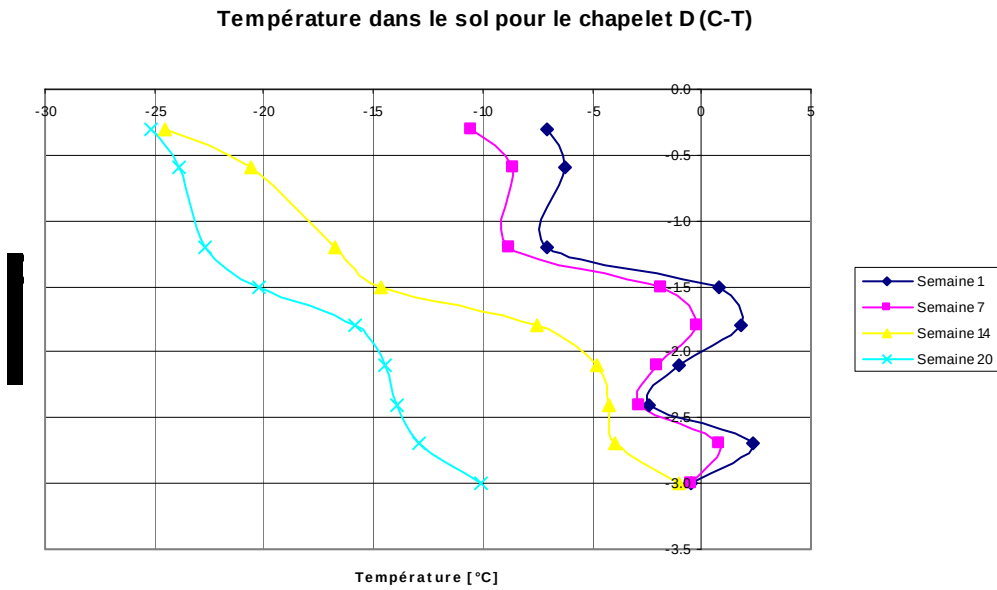


Figure 0-8 : Profils de température à quatre périodes dans la chaussée de la section témoin (C-T)

Profil de température en fonction de la profondeur pour la section **chaussée témoin**. Il a été impossible d'obtenir un profil cohérent avec les données recueillies.

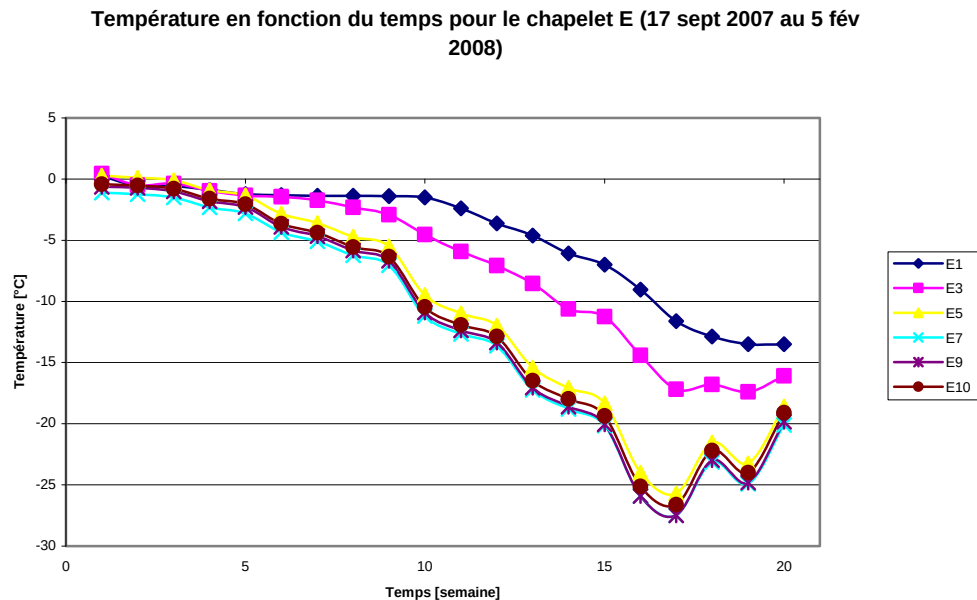


Figure 0-9 : Évolution des températures à différentes profondeurs dans le talus de la section témoin (T-T)

Évolution des températures dans le **talus témoin**. Les profondeurs vont de 0,3 m à 1,8 m.

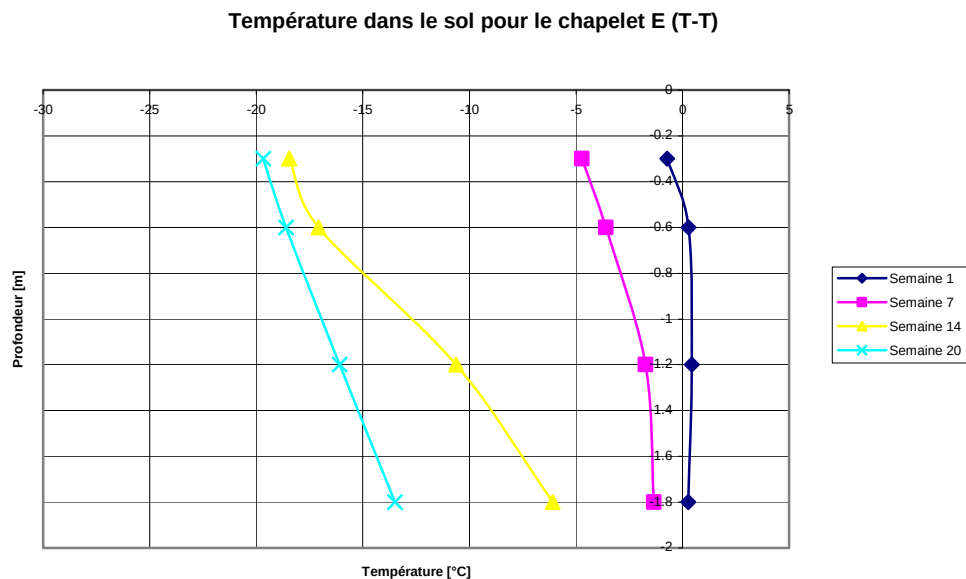


Figure 0-10 : Profils de température à quatre périodes dans le talus de la section témoin (T-T)

Profil de température en fonction de la profondeur pour la section **talus témoin**. Avec une modification des profondeurs, on obtient un profil de température logique.

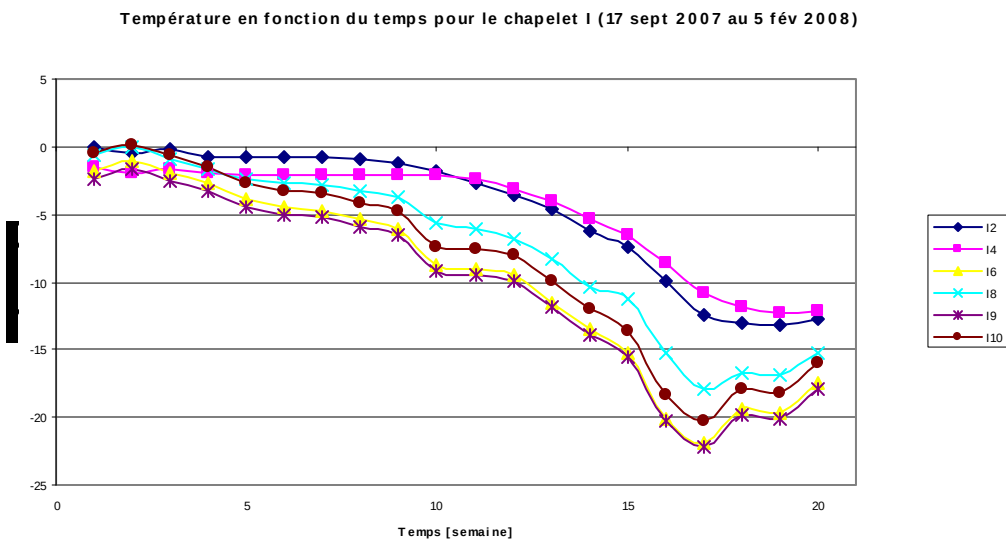


Figure 0-11 : Évolution des températures dans le talus avec convection (T-RC). Les profondeurs vont de 0,4 à 1,9 m.

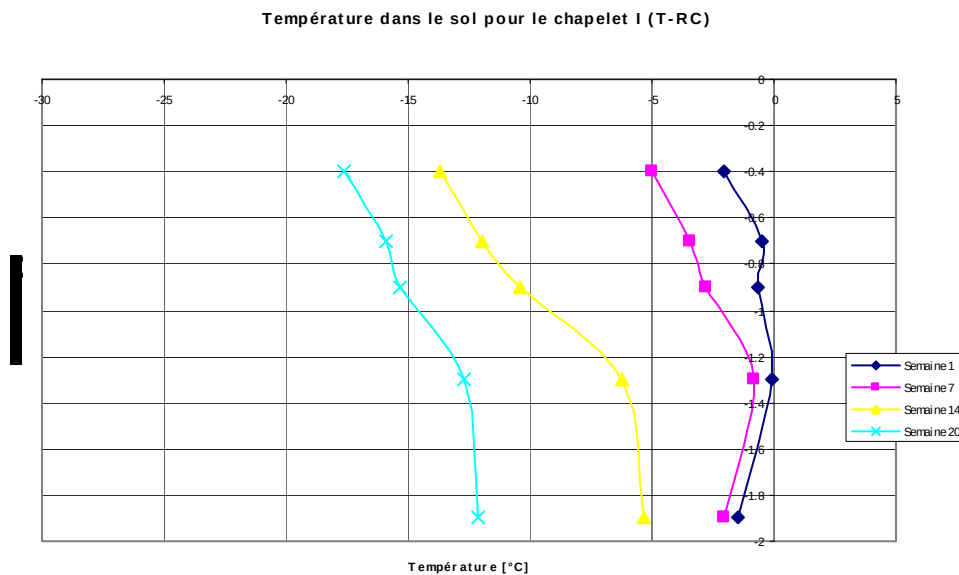


Figure 0-12 : Profils de température à quatre périodes dans la chaussée avec surface réfléchissante et drain thermique (C-DTSR)

Profil de température en fonction de la profondeur pour la section **talus avec convection**. Avec une modification des profondeurs, on obtient un profil de température logique.

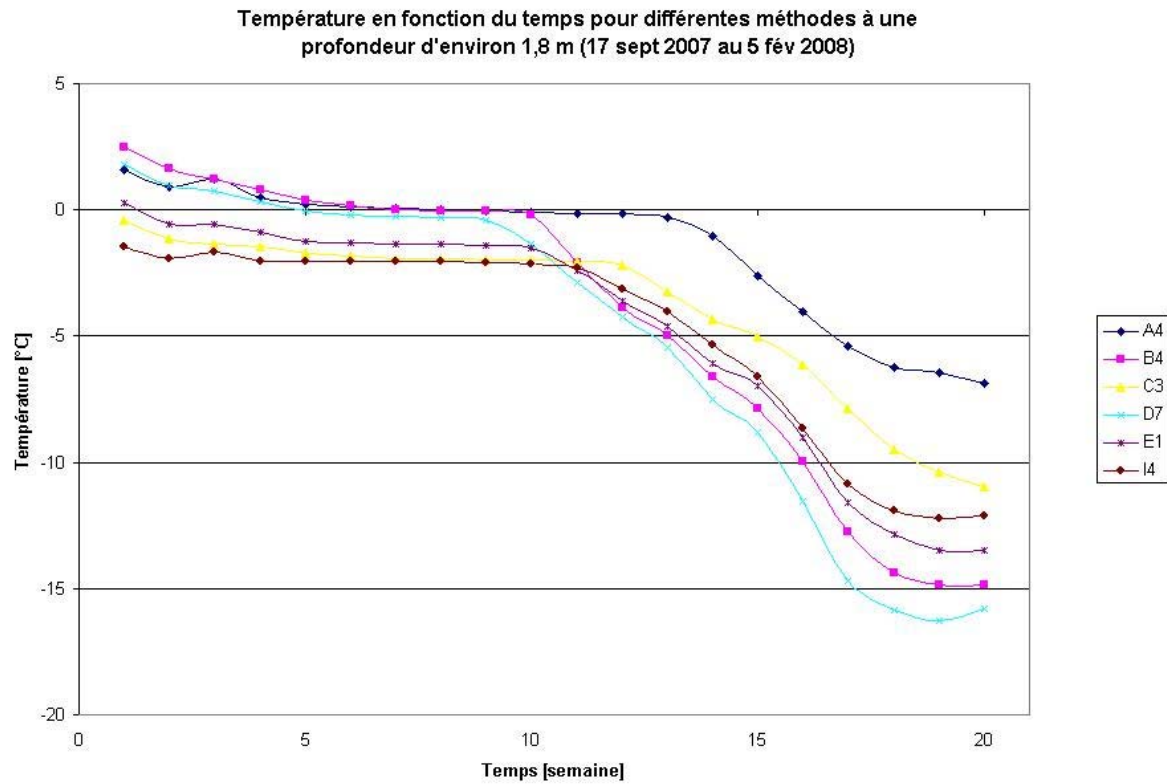


Figure 0-13 : Profil des températures en fonction du temps à 1,8 m de profondeur

Sur la période de mi-septembre à début décembre, on voit que les températures de C3 (**Talus – Drain thermique + Surf réfléch.**) et de I4 (**Talus convection**) sont plus basses que celle de E1 (**Talus témoin**).