UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

COMPORTEMENT HYDRAULIQUE D'UN GÉOCOSYNTHÉTIQUE DRAINANT EN PRÉSENCE DE GEL

SONIA LARRIVÉE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU

DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

AVRIL 1998

© Sonia Larrivée, 1998

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-37450-5

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

COMPORTEMENT HYDRAULIQUE D'UN

GÉOSYNTHÉTIQUE DRAINANT EN PRÉSENCE DE GEL

Présenté par : LARRIVÉE, Sonia

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès Sciences Appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

LADANYI, Branko, D.Sc.A, Président du jury,

LAFLEUR, Jean, Ph.D., membre du jury et directeur de recherche,

ROLLIN, André L., Ph.D, membre du jury.

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier, M. Jean Lafleur, mon directeur de recherche pour m'avoir donné un sujet de recherche intéressant et de ne pas avoir perdu patience avec moi. Merci aussi à M. Yves Savard du Ministère des Transports pour sa collaboration dans le développement de l'étude.

Je voudrais aussi remercier André Ducharme pour son aide indispensable lors des travaux de laboratoires. Je suis heureuse que le transport de mes sacs de sable ne lui ait pas causé de tours de reins. Merci aussi à tous les étudiants en Géotechnique. Ceux qui ont fini avant moi, merci d'avoir diminué mes craintes face à une maîtrise qui se prolonge et à ceux qui finiront après moi, lâchez pas, vous allez y arriver.

Merci aussi à toute ma famille et à mes amis qui m'ont supportée lors de mes séances de découragement.

On a constaté que le blocage était fonction de la direction de l'écoulement, du débit et de la conductivité thermique du milieu encaissant. La formation de glace à l'intérieur des géocomposites est favorisée par une conductivité thermique des matériaux encaissants élevée, un faible débit intermittent et un écoulement horizontal. Les essais verticaux n'ont pas présenté de blocage. Pour les essais horizontaux il y a eu blocage dans les cas suivants:, dalle de béton et débit maximal (21 jours) et dalle de béton et débit minimal (5 jours). Les conditions sous lesquelles il y a eu blocage ne se retrouvent que très rarement sur le terrain. Le blocage des couches drainantes sous conditions de terrain est donc improblable.

Les conditions d'expérimentation étant soit représentatives ou plus sévères que sur le terrain, on conclut que l'utilisation des géocomposites en tant qu'écran de rive ne pose pas de problème de blocage par formation de glace lors de périodes de dégel.

ABSTRACT

In northern climate, subsurface road drainage involves the presence of materials with large pores within the frost penetrated zone. One of the road designs uses horizontal open graded drainage layers (OGDL) laid directly under the pavement and connected to edge drains. In some instances, relatively thin geotextiles with smaller pores have been used. These drains are subject to extreme weather conditions: the proper evacuation of water from pavement cracks, joints or unpaved shoulders can be hampered if it freezes inside the system and blocks it. The thesis will present the results of a testing program designed to simulate these conditions on a needlepunched geocomposite. The premise is that the input of heat of the flowing water through the fibres is sufficient to compensate the influx of cold from the confining medium. A polypropylene geocomposite, constituted of coarse filaments sandwiched between two filter layers, was tested. The samples were confined by materials with different thermal conductivities: concrete slab or sand layer with degrees of saturation of 0, 70 and 100 % . Water was circulated vertically and horizontally through the sample for 30 days inside a freezing cabinet. The applied flowrates of 100 and 600 ml/min per linear meter corresponded to the minimum (winter) and maximum (thaw) observed in a field

test section. Intermittent flows were also applied to simulate alternating daily thaw-freezing conditions.

The testing conditions applied through the testing program were either representative of the field condition or more severe. So, the conclusion that can be made from the results of the tests is that total blockage by ice is unlikely inside vertical edge drain and blanket drain under field conditions.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iv
RÉSUMÉ v
ABSTRACT vii
LISTE DES ANNEXES xii
LISTE DES TABLEAUX xiii
LISTE DES FIGURES xiv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xv

Chapitre 1 Introduction 1

Chapitre 2 Problématique 4
2.1 Utilisation des géocomposites en tant que drains 4
2.2 Problématique du drainage interne des chaussées 6
2.3 Problématique de l'écran de rive 7
2.4 Problématique de la couche drainante 8
2.5 Hypothèse de base 8

Chapitre 3 Description des conditions d'expérimentation 10
3.1 Géocomposite 10
3.1.1 Description 11
3.1.2 Transmissivité 12
3.1.3 Comparaison avec les débits appliqués 13

3.2 Description du montage vertical 16
3.2.1 Banc d'essai 16
3.2.2 Alimentation en eau 20
3.2.3 Thermocouples 23
3.2.4 Isolation du montage 25
3.3 Montage horizontal 27
3.4 Montage de la dalle de béton 28
3.5 Conditions d'essai 30
3.5.1 Température ambiante 30
3.5.2 Température de l'eau 32
3.5.3 Matériaux encaissants 32
3.5.4 Durée 37
3.6 Procédure 38
3.6.1 Préparation 38
3.6.2 Déroulement de l'essai 38
3.7 Programme d'essais 39

Chapitre 4 Résultats 40
4.1 Blocage du géocomposite 40
4.1.1 Influence du débit 41
4.1.2 Milieu encaissant 43
4.1.3 Direction de l'écoulement 43
4.2 Analyse sommaire pour les essais avec écoulement vertical 44
4.3 Analyse sommaire des résultats des écoulement horizontal 45

Chapitre 5 Discussion 46
5.1 Température ambiante 46
5.2 Matériaux encaissants 48
5.2.1 Conductivité thermique des agrégats routiers 48
5.2.2 Conductivité thermique des sables utilisés lors des essais 48
5.2.3 Comparaison des conductivités thermiques 49
5.2.4 Conditions aux frontières - flux thermique 50
5.2.5 Conditions aux frontières - flux hydraulique 56
5.3 Facteurs non considérés 57
5.3.1 Salinité de l'eau 57
5.3.2 Contraintes latérales 57
5.3.3 Mouillabilité 58
5.4 Synthèse de la représentativité des conditions d'essai 59

Chapitre 6 Conclusion 61
6.1 Simulation en laboratoire 61
6.2 Observations faites aux sites d'exhumation 64
6.3 Relation entre le programme d'essais et l'utilisation des géocomposites 65
6.4 Recommandations pour travaux futurs 66

RÉFÉRENCES 67

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A CALCUL DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DU MÉLANGE EAU-ANTIGEL 71
ANNEXE B MISE EN PLACE DU SABLE À L'INTÉRIEUR DES SACS 73
ANNEXE C DÉTAILS DE LA PRÉPARATION DU MONTAGE 75
ANNEXE D CROQUIS DES FORMATIONS DE GLACE À L'INTÉRIEUR DES GÉOCOMPOSITES 77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 Transmissivité du géocomposite (Gonthier & al, 1997) 13
Tableau 3-2 Caractéristiques des sables à l'intérieur des sacs 34
Tableau 3-3 Conductivités thermiques des matériaux utilisés lors des essais 37
Tableau 3-4 Programme d'essai 39
Tableau 4-1 Résultats des essais 41
Tableau 4-2 Comparaison des résultats selon les débits 42
Tableau 4-3 Influence de la continuité du débit 42
Tableau 4-4 Comparaison des résultats selon les conductivités thermiques 43
Tableau 4-5 Comparaison des résultats selon la direction d'écoulement 44
Tableau 5-1 Représentativité des températures 46
Tableau 5-2 Températures moyennes lors de périodes de dégel 48
Tableau 5-3 Comparaison des conductivités thermiques 49
Tableau 5-4 Apport de froid vers le géocomposite lors des essais en laboratoire 51
Tableau 5-5 Flux thermique vers les géocomposites 55

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Drainage à l'aide de géocomposite 5
Figure 2.2 Vue en coupe d'une route durant une période de dégel 7
Figure 3.1 Capacité d'évacuation de l'écran de rive 14
Figure 3.2 Capacité d'évacuation de la couche drainante 15
Figure 3.3 Banc d'essai 18
Figure 3.4 Plancher du montage 19
Figure 3.5 Déversoir 20
Figure 3.6 Alimentation continue 21
Figure 3.7Alimentation intermittente 23
Figure 3.8 Positionnement des thermocouples 24
Figure 3.9 Apport de froid 26
Figure 3.10 Isolation du montage lors d'un essai à écoulement vertical et débit intermittent 27
Figure 3.11 Dalle de béton 29
Figure 3.12 Montage de la dalle de béton 30
Figure 3.13 Profil de température dans une route (Roy & al. 1992) 31
Figure 3.14 Courbe granulométrique du sable 34
Figure 5.1 Profil des températures sous la route 122 au début du dégel printannier, le 12 mars 91 (d'après Roy & al., 1992) 52
Figure 5.2 Calcul de l'apport de froid vers un écran de rive et une couche drainante lors d'une période de dégel 54

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Θ: transmissivité d'un géocomposite; m^2/s

Q_p: débit volumique dans le plan; m^3/s

T_g: épaisseur du géocomposite; m

k_p: perméabilité dans le plan du géocomposite; m/s

v_{dp}: vitesse d'écoulement; m/s

i: gradient hydraulique; adimensionnel

L_2: largeur du géocomposite; m

C_u: Coefficient d'uniformité; adimensionnel

d: Diamètre des particules: mm

O_{95}: Diamètre des particules correspondant à 95 % passant sur courbe de la distribution cumulative des diamètres des particules; mm

ρ_d: Masse volumique du sable sec: kg/m^3

n: Indice des vides: adimensionnel

S_r: Degré de saturation dans un sol; %

w: Teneur en eau dans un sol; %

$\sigma_{appliquée}$: Contraintes maximales appliquées; kPa

K_0: Coefficient des terres au repos; adimensionnel

k_g: Conductivité thermique globale d'un banc d'essai; W/m°K

k_i: Conductivité thermique d'une couche d'un matériau; W/m°K

l_i: Épaisseur d'une couche dans le sens du gradient thermique; m

l_g: Somme des épaisseurs des couches; m

k_m: Conductivité thermique du mélange (W/m°K)

k_1: Conductivité thermique de l'éthylène glycol (W/m°K)

k_2: Conductivité thermique de l'eau (W/m°K)

Δk: Différence de conductivité thermique entre l'eau et le l'éthylène glycol

x_1: Fraction moléculaire de l'éthylène glycol; adimensionnelle

x_2: Fraction moléculaire de l'eau; adimensionnelle

t: Température du mélange; °C

Q_c: Apport de chaleur; W

$\Delta\theta$: Différence de température; °K

Δx: Distance sur laquelle il y a une différence de température de $\Delta\theta$; m

A: Surface normale au gradient thermique

Cette observation a amené le développement d'un projet d'étude expérimentale sur la performance de nouveaux produits géosynthétiques dans les chaussées drainantes. Ce projet a été mis sur pied par le Ministère des Transports du Québec et réalisé à l'École Polytechnique. Il consiste à recréer les conditions in-situ dans un montage et à tester un géocomposite sous diverses conditions d'utilisation.

Le chapitre 2 explique la problématique de l'étude. Avant de développer un processus expérimental, on doit comprendre le problème à résoudre. Les conditions d'utilisation des drains routiers synthétiques sont étudiées dans ce chapitre.

Le chapitre 3 décrit le banc d'essai et les conditions d'expérimentation appliquées lors du programme d'essais. L'étude consiste à reproduire en laboratoire des conditions d'utilisation de terrain, le banc d'essai doit être le plus fidèle possible à la réalité. Dans le cas contraire on ne pourra pas généraliser les conclusions sur l'utilisation des drains sur le terrain.

Le chapitre 4 donne les résultats des différents essais et en présente une analyse sommaire en fonction des facteurs suivants: débit, milieu encaissant et direction de l'écoulement.

Le chapitre 5 analyse les résultats et la représentativité des conditions d'expérimentation. Il est très important de vérifier si les conditions d'expérimentation sont le reflet de la réalité. La géométrie du banc d'essai, les températures impliquées, la durée des essais ainsi que la nature des matériaux encaissants utilisés sont étudiés. Les facteurs non considérés lors de la réalisation des essais sont commentés brièvement.

Le chapitre 6 contient les conclusions de l'étude. À partir des résultats des essais, on conclut sur la possibilité de blocage par formation de glace à l'intérieur des géocomposite. Le chapitre inclut aussi une discussion sur l'observation de glace à l'intérieur d'un écran de rive lors sur le rang St-CHarles par le Ministère des Transports.

l'hydrogéologie du site ainsi que de la situation géographique (rurale ou urbaine) (Savard, 1996).

Les drains synthétiques peuvent être utilisés en tant que couche drainante ou écran de rive. Les couches drainantes sont placées directement sous le revêtement (interception des eaux d'infiltration). Les écrans de rive doivent être placés à la ligne de rive pour capter efficacement les eaux d'infiltration des accotements. La figure 2.1 montre les positionnements des drains synthétiques dans une chaussée.

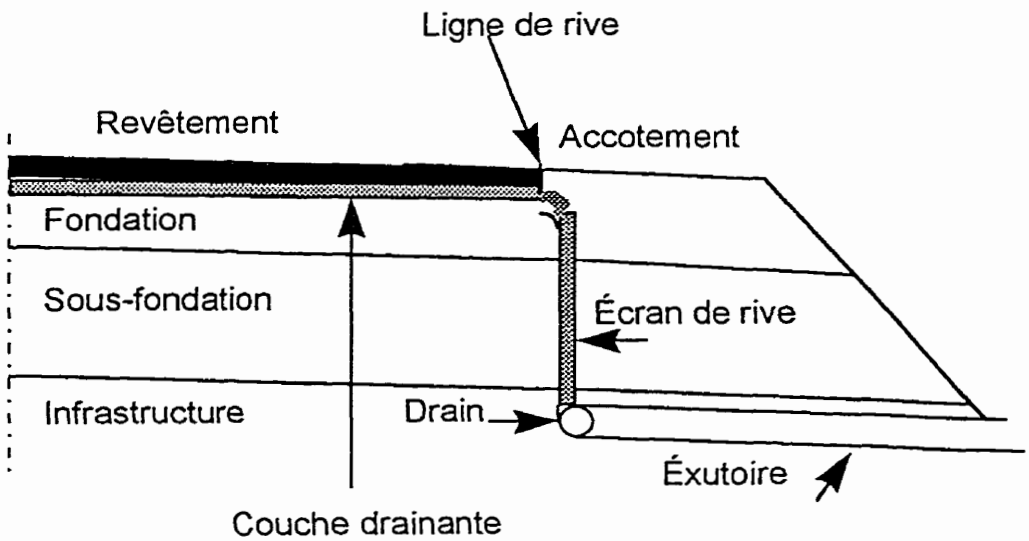


Figure 2.1 Drainage à l'aide de géocomposite

L'utilisation des drains synthétiques en est à ses débuts au Québec. Une couche drainante en géocomposite à été utilisée sous la chaussée rigide de

l'autoroute 15 au nord de l'autoroute Métropolitaine de Montréal en 1994 (Théoret, 1997). Trois types d'écrans de rive en géocomposite ont été testés sur la route 329 à St-Donat (Lafleur & Savard., 1996) ainsi que sur le rang St-Charles à St-Jules en Beauce et sur l'autoroute Henri V à Québec en 1988 (Ministère des Transport, 1991). Dans les deux derniers cas, des excavations de vérification ont permis de constater la présence de glace à l'intérieur des drains.

2.2 Problématique du drainage interne des chaussées

Les drains sont exposés à des conditions d'utilisation sévères. Les périodes de froid intense et la présence de sol gelé sont des facteurs favorisant la formation de glace à l'intérieur des drains. Deux périodes sont critiques: un redoux avec pluie hivernale et le dégel printanier. Lors de ces deux périodes, une zone dégelée repose sur une zone gelée imperméable (Figure 2.2). Les bancs de neige près des accotements agissent comme isolants thermiques et le dégel est plus lent à cet endroit, ce qui crée une cuvette qui garde l'eau captive sous la chaussée.

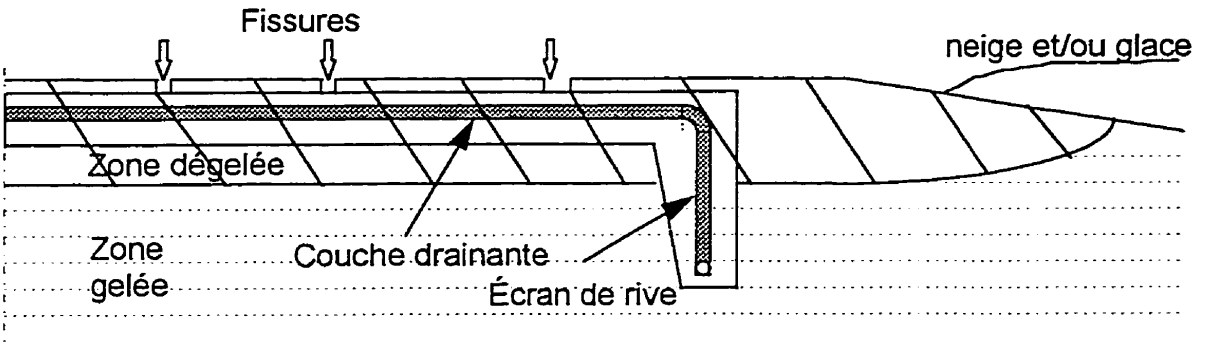


Figure 2.2 Vue en coupe d'une route durant une période de dégel

Les deux périodes critiques présentent les caractéristiques suivantes:

1. lors des périodes de redoux avec pluie hivernale, les débits à évacuer sont plus faibles et doivent passer à travers les drains qui sont entourés de matériaux gelés. La durée d'un redoux est de quelques jours.
2. lors du dégel printanier, les débits sont plus grands que lors des périodes hivernales et le sol est partiellement dégelé. La durée du dégel est environ un mois.

2.3 Problématique de l'écran de rive

L'écran de rive doit évacuer l'eau provenant de la couche drainante en plus d'évacuer les eaux d'infiltration de l'accotement. Si l'évacuation est empêchée, l'eau reste captive sous la chaussée et la perte de capacité portante est en partie réduite.

La profondeur de l'écran de rive dépend de l'épaisseur de la fondation et de la sous-fondation. Le radier du drain doit être placé en-dessous de la ligne d'infrastructure pour être efficace (Savard, 1996). Si le drain n'atteint pas la ligne d'infrastructure, une partie de l'eau présente dans la sous-fondation n'est pas évacuée et les problèmes de pertes de capacité portante en période de dégel ne sont pas éliminés.

2.4 Problématique de la couche drainante

La couche drainante posée directement sous le revêtement a été choisie pour les simulations. Les conditions d'utilisation sont plus sévères que pour la couche drainante posée à la ligne d'infrastructure. Elle est exposée à de grandes variations de températures tandis que celle posée à la ligne d'infrastructure est soumise à des température moins extrêmes et plus constantes. La largeur de la couche drainante dépend du type de route.

2.5 Hypothèse de base

L'eau qui circule a une énergie qui peut être transmise aux matériaux environnants. Lorsque cette énergie est suffisante pour contrer l'apport de froid

provenant des matériaux encaissants, il n'y a pas formation de glace. Toutefois, la répartition aléatoire des fibres cause des variations dans la vitesse d'écoulement de l'eau. Ces variations produisent un phénomène de turbulence qui résulte en une perte d'énergie de l'eau. Si la perte d'énergie calorifique est importante, la formation de glace à l'intérieur des géocomposite est possible.

Le but de l'étude est de vérifier si les géocomposites peuvent être bloqués par la glace sous les conditions d'utilisation pendant les deux périodes critiques.

Dans le système de géotextile tri-couche, les vides sont beaucoup plus petits et nombreux.

3.1.1 Description

Le géocomposite choisi est le système Draincotex (Théoret, 1997) utilisé sur une section de l'autoroute 15 (autoroute des Laurentides). Il est constitué d'une âme drainante en polypropylène aiguilleté, enveloppée de deux nappes filtrantes du même matériel. Les caractéristiques techniques du géocomposite sont tirées d'une étude précédente (Gonthier & al, 1997).

Filtre: Géocomposite en fibres de polypropylène aiguilletées ayant un diamètre de 26 μm.

Masse surfacique: 150 g/m^2 ± 15 g/m^2

Ouverture de filtration: 90 μm (O_{95}) ± 15 μm

Permitivité: 2,73 s^{-1} ± 0,8 s^{-1}

Épaisseur: 0,9 mm environ

Drain: Géocomposite en fibres de polypropylène aiguilletées ayant un diamètre de 92 μm.

Masse surfacique: 600 g/m^2 ± 60 g/m^2

Ouverture de filtration: 250 μm (O_{95}) ± 75 μm

Épaisseur: 8 mm environ

3.1.2 Transmissivité

La transmissivité Θ d'un géotextile est le produit de la perméabilité transversale k_p du milieu poreux sujet à l'écoulement, par son épaisseur T_g. On peut aussi exprimer la transmissivité en fonction de la vitesse d'écoulement v_{dp} ou du débit volumique dans le plan Q_p.

$$\boxed{\Theta_{(m^2/s)} = k_{p(m/s)} \bullet T_{g(m)} = \frac{v_{dp}}{i} \bullet T_g = \frac{Q_p}{L_2 \bullet i}}$$

avec Q_p : débit volumique dans le plan (m^3/s)

T_g : épaisseur du géocomposite (m)

k_p : perméabilité dans le plan du géocomposite (m/s)

v_{dp} : vitesse d'écoulement (définie par la loi de Darcy)

i : gradient hydraulique

L_2 : largeur du géocomposite (m)

Lors de l'étude de Gonthier & al. (1997), des essais de perméabilité ont été effectués sur le géocomposite du système Draincotex pour déterminer la transmissivité du géocomposite en fonction de contraintes appliquées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 3-1 Transmissivité du géocomposite (Gonthier & al, 1997)

Contraintes (kPa)	Transmissivité (10^{-5} m^2/s)
6,25	12,1
20	8,4
30	7,4
40	6

3.1.3 Comparaison avec les débits appliqués

À partir des valeurs de transmissivité, on peut calculer les débits volumiques dans le plan (Q_p) que le géocomposite peut évacuer, en fonction des contraintes. Les résultats sont présentés à la figure 3.1, pour une largeur unitaire de géocomposite et un gradient hydraulique de 1 (essai vertical).

Les valeurs des débits minimum et maximum de 100 ml/min/m et de 600 ml/min/m ont été choisies à partir de données obtenues sur le site de St-Donat (Lafleur & Savard, 1996) et sont considérées comme représentatives des conditions de terrain.

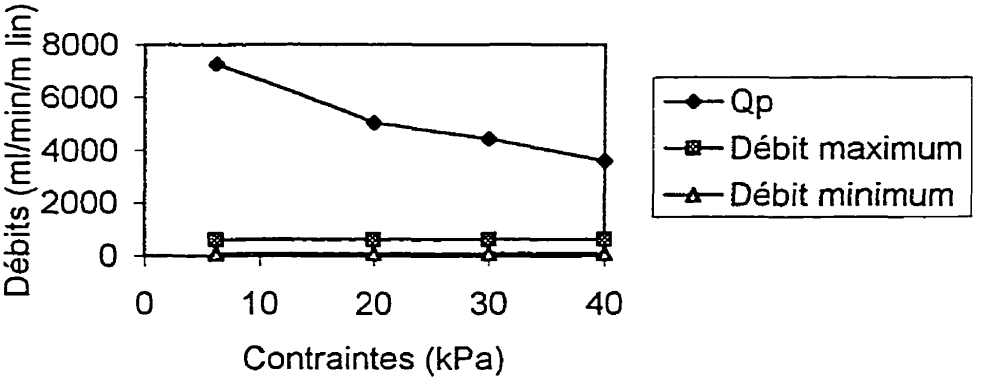


Figure 3.1 Capacité d'évacuation de l'écran de rive

La courbe Q_p correspondant aux débits calculés à partir des valeurs de l'essai de transmissivité. Les deux autres droites sont celles des débits appliqués lors des essais de cette étude. On remarque que les débits appliqués lors des essais verticaux sont inférieurs à la capacité d'évacuation du géocomposite.

Pour les essais horizontaux, en prenant une largeur unitaire de géocomposite et un gradient de 0.03, on obtient les résultats suivants.

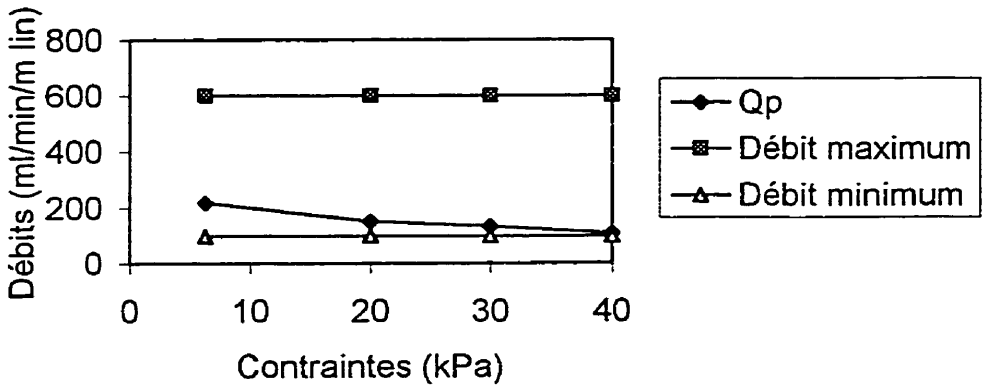


Figure 3.2 Capacité d'évacuation de la couche drainante

À cause du faible gradient hydraulique impliqué dans la couche drainante, la capacité d'évacuation du géocomposite est faible. On remarque que la couche drainante ne peut évacuer un débit de 600 ml/min/m lin (avec un gradient hydraulique de 0.03). Pour évacuer un débit de 600 ml/min/m lin, il faudrait avoir un gradient de 0.08. Effectivement, lors des essais à écoulement horizontal et débit maximum, il y a accumulation d'eau dans le déversoir.

On a décelé de plus, une faible mouillabilité du géocomposite. Ainsi, lorsque de l'eau est déversée sur les filtres, celle-ci à tendance à rester en surface avant de pénétrer à l'intérieur. Puisque l'âme drainante est faite du même matériau que les filtres, cela peut amener sur le terrain des baisses de la transmissivité du géocomposite. En effet, si le géotextile utilisé pour la fabrication de l'âme drainante est hydrophobe, l'évacuation des bulles d'air peut

être empêchée en partie. La présence de bulles d'air diminue la section mouillée $L_2 * T_g$ du géocomposite et donc la capacité d'évacuation.

3.2 Description du montage vertical

Le banc d'essai est similaire à celui de Lafleur & Boursier (1994). La section 3.2 décrit en détail le montage vertical. Les sections 3.3 et 3.4 décrivent les modifications qui ont dû être apportées au montage pour passer d'un écoulement vertical à un écoulement horizontal.

3.2.1 Banc d'essai

Le banc d'essai est constitué d'un échantillon de géocomposite, d'une longueur de 1 m, coincé entre deux sacs flexibles en néoprène remplis d'un matériel encaissant qui crée une pression latérale sur le géocomposite et transmet un flux de température uniforme au géocomposite. Pour être efficace, le radier d'un drain longitudinal doit être placé sous la ligne d'infrastructure (Savard, 1996). Puisque l'épaisseur des fondations et sous-fondations varie en général entre 0.3 m à 1 m, la longueur de 1 m pour le géocomposite est appropriée. Un système en circuit fermé permet d'alimenter le montage en eau à débit et

température constants. Le tout est disposé dans une chambre froide avec 2 thermocouples (température de l'eau et de la chambre froide).

Les dimensions de chaque sac sont de 1 m x 0.5 m x 0.14 m. Les sacs sont munis à chaque extrémité de bouchons dévissables (2 cm de diamètre). Les parois verticales du banc d'essai sont faites de deux planches de bois de 1 m x 0.5 m et de deux plaques en plastique translucide de 1 m x 0.30 m qui permettent la visualisation de la progression du gel (Figure 3.3). Le plancher du montage est constitué d'une planche de bois avec une ouverture de 2 cm de large (Figure 3.4) pour permettre à l'eau de s'écouler et empêcher le géocomposite d'être coincé. Deux coins en membrane PEHD sont placés le long de l'ouverture et empêchent le géocomposite d'être pincé par les deux sacs. Deux trous permettent aux bouchons des sacs de passer à travers le plancher. Les parois de bois sont vissées au plancher du montage et les parois de plastique sont vissées aux parois de bois. Ainsi on peut enlever n'importe laquelle des parois sans défaire le montage au complet. Une structure métallique est vissée à la partie supérieure des parois de bois pour supporter le déversoir et le tuyau d'alimentation en eau.

aluminium, placés aux coins des sacs en contact avec les géomembranes permettent de maintenir le géocomposite sur un plan, lors du remplissage des sacs. Les coins métalliques ne sont pas en contact avec le géocomposite.

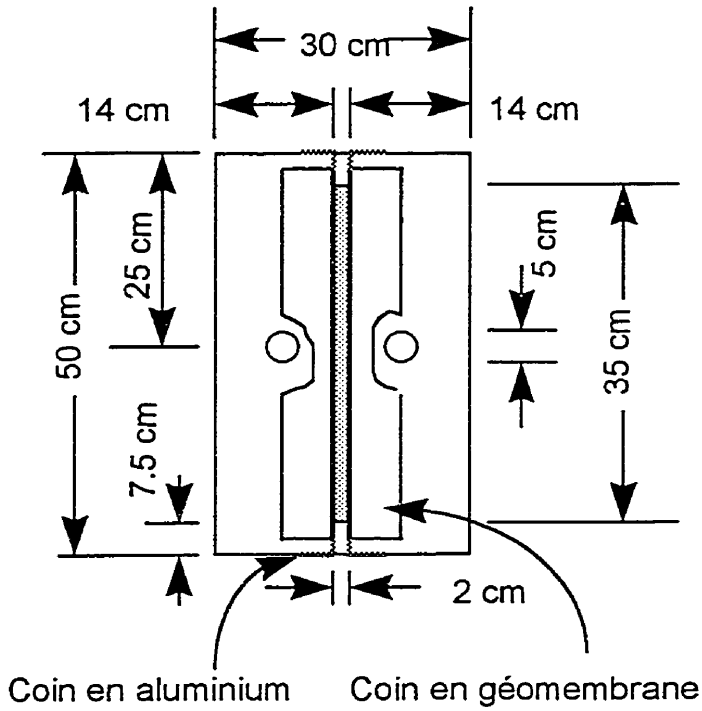


Figure 3.4 Plancher du montage

Le déversoir est fabriqué à partir d'une géomembrane PEHD. Il a une forme en V et est troué à intervalles réguliers (17 trous de 1 cm) pour permettre à l'eau de se distribuer uniformément le long du géocomposite (Figure 3.5). Le déversoir est placé de façon à être contenu par les deux géomembranes et que les trous soient alignés sur le géocomposite.

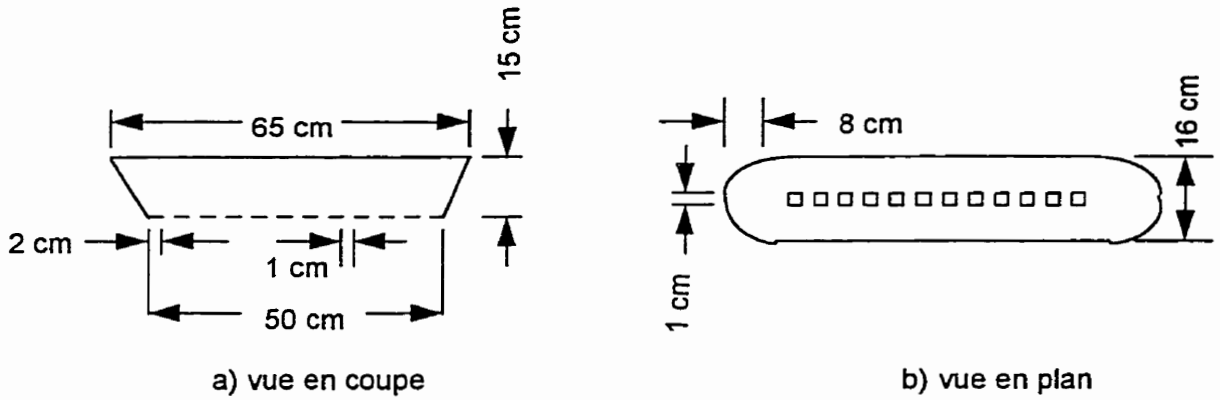


Figure 3.5 Déversoir

3.2.2 Alimentation en eau

L'alimentation peut être de continue ou intermittente.

3.2.2.1 Alimentation continue

L'eau circule en circuit fermé, elle est pompée du réservoir et passe dans un bain thermostaté avant d'être déversée dans le déversoir. Elle coule à l'intérieur du géocomposite et est captée à la sortie du géocomposite dans le bac réservoir. La figure 3.6 montre le schéma d'alimentation en eau du montage.

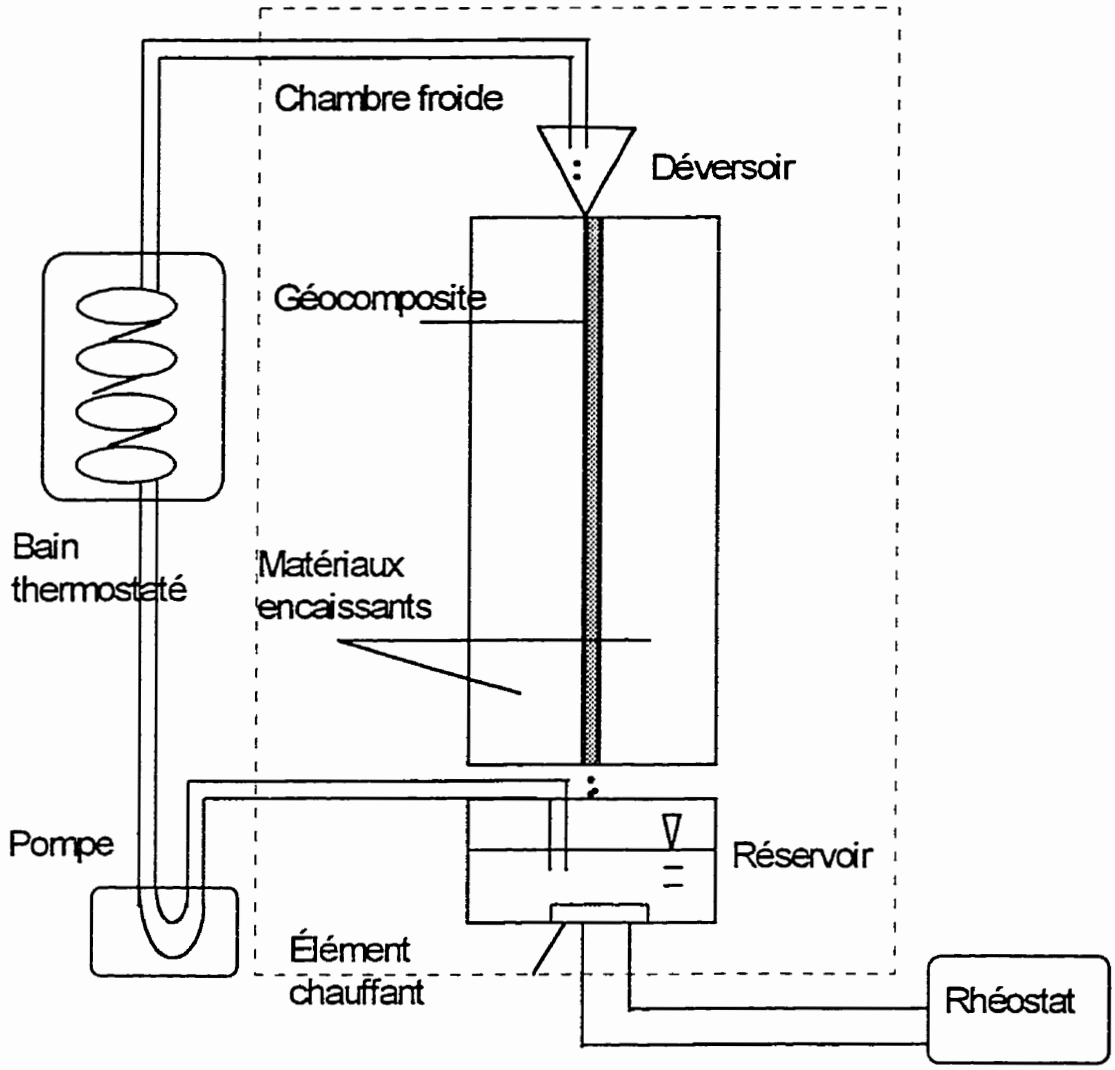


Figure 3.6 Alimentation continue

3.2.2.2 Alimentation intermittente

Les débits testés sont en général de type continu. Les températures, durant le jour lors d'un période de dégel hivernal ou printanières sont au-dessus de 0 °C, tandis qu'en hiver et au début de la période de dégel printanière, elles sont

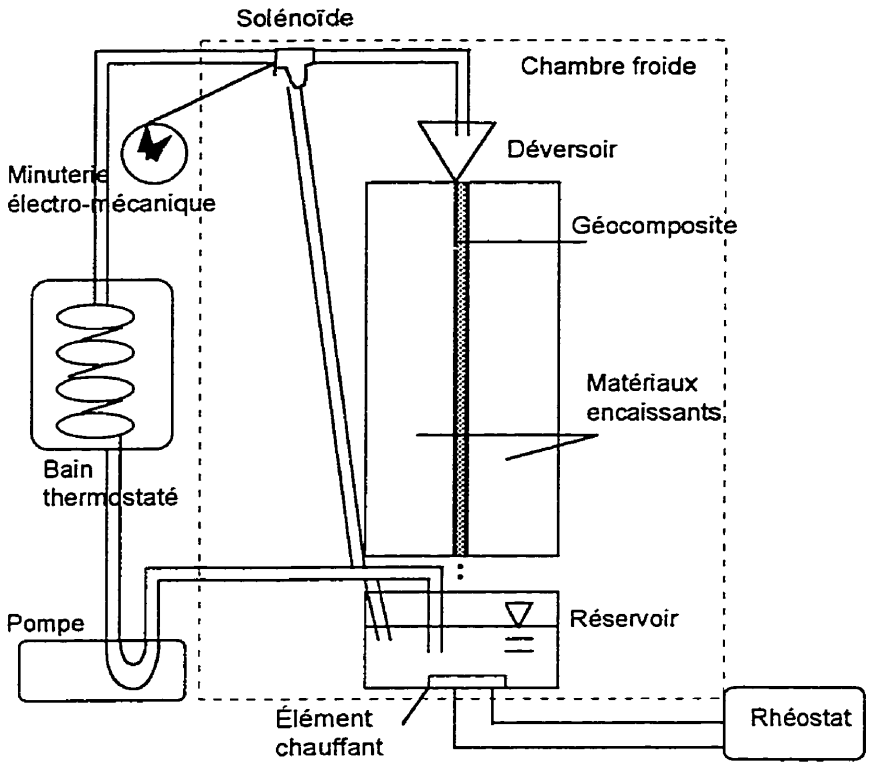
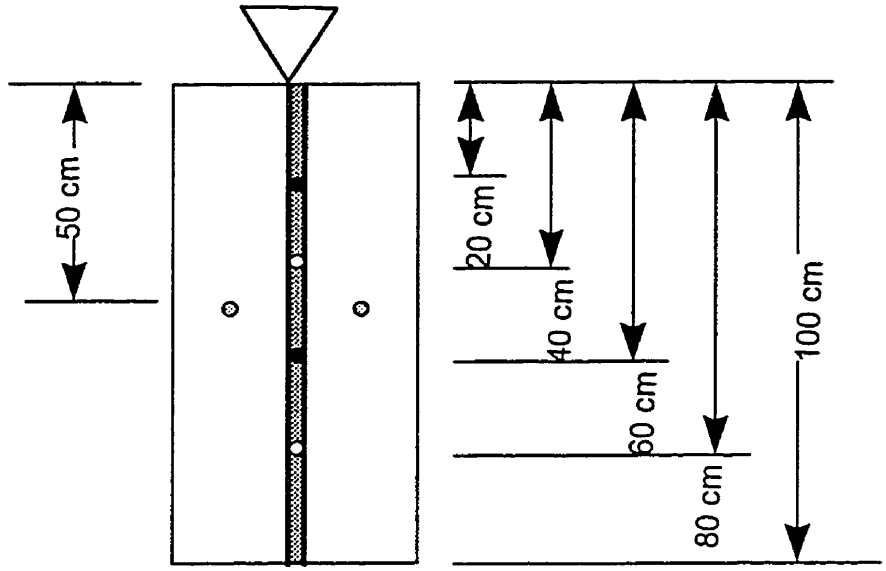


Figure 3.7Alimentation intermittente

3.2.3 Thermocouples

Six thermocouples ont été placés de façon à obtenir les températures du matériau encaissant et à l'intérieur du géocomposite. La figure 3.8 montre le positionnement des thermocouples.



- ● Thermocouples placés à l'intérieur du géocomposite, paroi avant
- ○ Thermocouples placés à l'intérieur du géocomposite, paroi arrière
- ⊙ Thermocouples placés à l'intérieur des sacs, approximativement au centre

Figure 3.8 Positionnement des thermocouples

Les deux thermocouples à l'intérieur des sacs, permettent de vérifier la température du matériau encaissant. Les quatre thermocouples à l'intérieur du géocomposite ont été prévus pour obtenir les variations de températures en fonction de la progression de la glace. L'enfoncement des thermocouples dans le géocomposite est cependant difficile à cause de l'enchevêtrement des fibres. Ils sont positionnés en périphérie du géocomposite et donnent les températures aux bordures. L'information provenant des quatre thermocouples est donc assujetie à erreur et ils ont été éliminés lors des derniers essais à écoulement vertical.

Un thermocouple à l'intérieur de la chambre froide permet de vérifier la température ambiante. Un autre thermocouple est placé dans le déversoir pour vérifier la température de l'eau.

3.2.4 Isolation du montage

Le banc d'essai est isolé à l'aide de laine minérale (R-12) aux extrémités (déversoir et réservoir) pour empêcher l'eau de geler à l'entrée et à la sortie. Au début du programme les quatre faces latérales n'étaient pas isolées. On a réalisé que ces conditions étaient plus sévères que la réalité et pouvaient favoriser l'amorce de formation de glace sur les bordures de l'échantillon. On a par la suite posé de l'isolation latérale le long des panneaux en plastique pour empêcher un apport de froid bidimensionnel. La figure 3.9 compare l'apport de froid sur le terrain (Figure 3.9 a) et dans le montage (Figure 3.9 b et c). La figure 3.10 montre une photo de l'isolation lors d'un essai à écoulement vertical et débit intermittent.

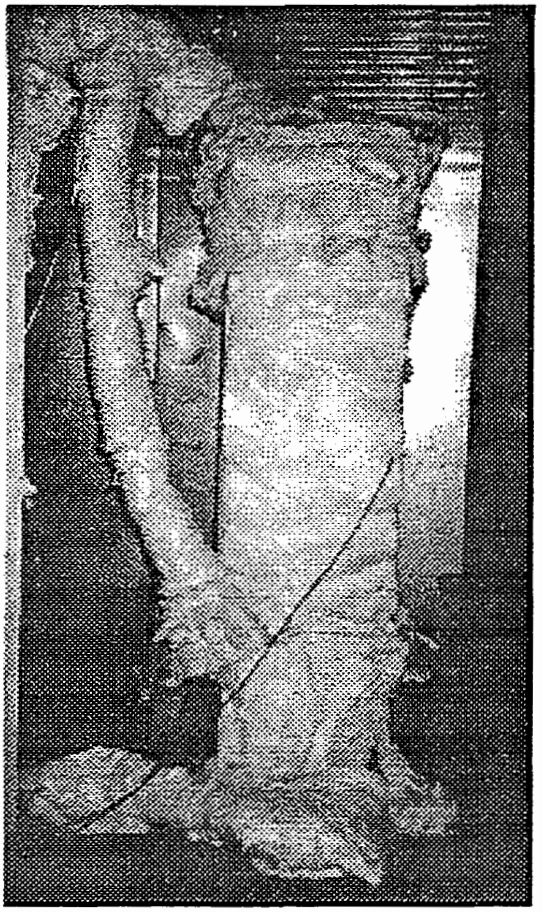


Figure 3.10 Isolation du montage lors d'un essai à écoulement vertical et débit intermittent

3.3 Montage horizontal

Pour les essais simulant une couche drainante, on a utilisé le même banc d'essai. Pour une couche drainante, 1 m est représentatif des conditions prévalant avant la connexion avec l'écran de rive. Pour une route, la longueur du géocomposite dépend du nombre de voie et l'eau d'infiltration est exposée au froid sur une plus grande distance que dans le cas d'un drain vertical.

Toutefois, la longueur de l'échantillon peut être considérée comme représentative. Au milieu de la route, les débits sont très petits et vont en augmentant vers les épaulements. Si les débits sont trop petits, l'eau va geler au tout début du géocomposite et va bloquer l'entrée de l'eau dans le géocomposite. L'eau va alors se déplacer vers la prochaine fissure et faire augmenter le débit entrant dans cette fissure. Les problèmes sont donc attendus vers la fin de la couche drainante.

Le montage est couché avec une pente de 3 % sur l'horizontale pour se conformer à une section transversale de route type. Le bas du montage (sac et géomembrane inférieur) a été étanchéisé pour empêcher les fuites le long des parois latérales. Pour faciliter le montage, on a dû éliminer les thermocouples dans le montage. Tous les essais horizontaux ont été effectués avec de l'isolation latérale.

3.4 Montage de la dalle de béton

Le montage avec la dalle de béton est une variante du montage à écoulement horizontal (figure 3.11). Le sac placé sur le géocomposite et le géocomposite sont remplacés par une dalle de béton qui a été préalablement coulée directement sur le géocomposite (Gonthier & al., 1997). Le sac sur lequel la

dalle de béton est placé est empli de sable sec. La dalle de béton fait 0.65 m de long X 0.35 m de large X 0.25 m d'épaisseur. Pour agir en tant que déversoir et forcer l'eau à passer dans le géocomposite, une géomembrane semi-rigide est placée sous le géocomposite et rabattue le long des parois de la dalle. La membrane est fixée à la dalle à l'aide de rivets.

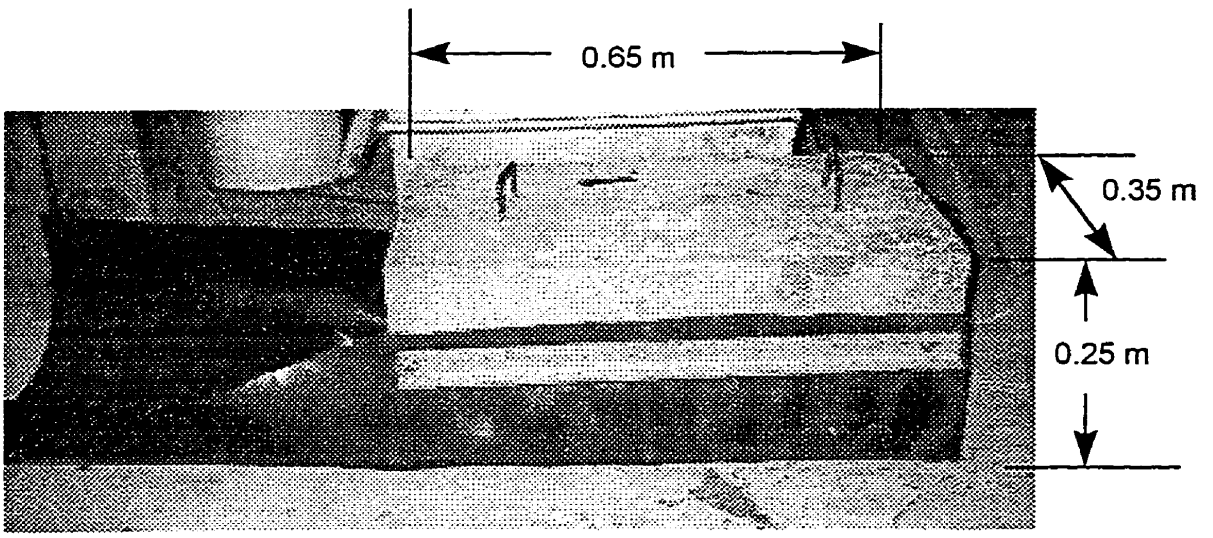


Figure 3.11 Dalle de béton

Un tuyau a été ajouté pour évacuer l'excès d'eau à l'intérieur du déversoir. Le trop plein est placé de façon a évacuer l'eau excédant une hauteur de 13 cm par rapport au géocomposite (Figure 3.12). Le montage est isolé latéralement.

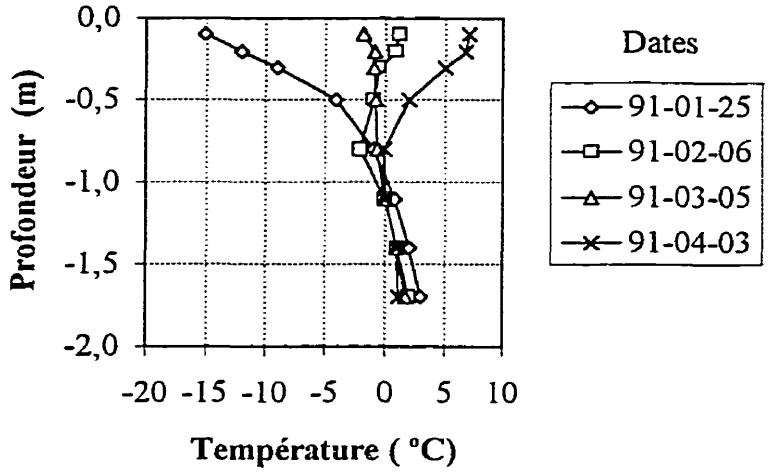


Figure 3.13 Profil de température dans une route (Roy & al. 1992)

On observe une variation de - 15 °C à + 7 °C près de la surface, qui s'atténue pour atteindre 0 °C à 1 m de profondeur. La courbe de 91-01-25 est représentative d'un profil hivernal. La courbe 91-02-06 montre une période de réchauffement, la température en surface augmente tandis qu'il y a peu de variation en profondeur. Les deux autres courbes sont typiques du début et de la fin du dégel printanier. La température à la surface passe de - 2 °C à 7 °C tandis que la température en profondeur passe de - 2 °C à 0 °C. Ces variations de température étant difficiles à simuler dans la chambre froide, la température ambiante a été fixée à - 6 °C pour obtenir des températures de - 2 °C à l'intérieur des matériaux encaissants.

3.5.2 Température de l'eau

Sur le terrain, la température de l'eau n'est pas constante. L'eau qui vient de dégeler a une température de près de 0 °C. La température de l'eau de pluie et de l'eau en mouvement dépend de la température extérieure, de l'ensoleillement, de la vitesse d'écoulement etc. En considérant les limites de précision du bain thermostaté et que l'eau à 0 °C peut être difficile à pomper, la température a été fixée à 2 °C.

3.5.3 Matériaux encaissants

Les matériaux encaissants jouent un double rôle: ils confinent le géocomposite et permettent un apport de froid uniforme. Dans le cas des écrans de rive, les débits appliqués sont beaucoup plus faibles que la capacité d'évacuation du géocomposite (voir figure 3.1), ils ne sont donc pas affectés par les variations de transmissivité. Dans le cas des couches drainantes, les débits appliqués sont du même ordre de grandeur que la capacité d'évacuation. Elles sont donc affectées par les variations de la transmissivité.

Les matériaux encaissants utilisés sont un sable à degrés de saturation sec, partiellement saturé et totalement saturé et une dalle de béton. Un mélange eau-antigel est utilisé pour saturer le sable.

3.5.3.1 Mélange eau-antigel

Le mélange eau-antigel est constitué d'un volume d'antigel pour trois volumes d'eau. On a utilisé ce mélange pour saturer le sable encaissant, afin d'éviter que l'eau interstitielle ne se transforme en glace (augmentation de volume et des contraintes sur le banc d'essai) durant un essai.

3.5.3.2 Caractéristiques du sable

Le matériau choisi pour emplir les sacs est un sable (C_u = 1.6, 0.3 mm < d < 1.25 mm) classifié SP selon USCS (ASTM, 1997). La courbe granulométrique du sable est présentée à la figure 3.14.

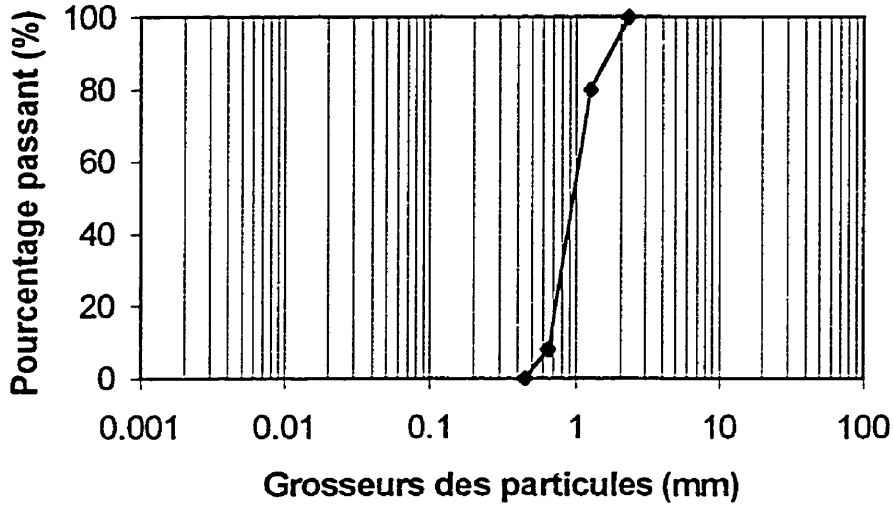


Figure 3.14 Courbe granulométrique du sable

Les caractéristiques du sable en place (dans les sacs) sont présentées au tableau 3.2. Le détail de la méthode de remplissage est présenté en annexe B.

Tableau 3-2 Caractéristiques des sables à l'intérieur des sacs

	Écoulement vertical			Écoulement horizontal	
Matériaux	Sec	Partiellement saturé	Saturé	Sec	Saturé
ρ_d (kg/m^3)	1590	1590	1590	1590	1590
n	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
S_r (%)	0	70	100	0	100
w (%)	0	17.6	25.1	0	25.1
$\sigma_{appliquée}$ (kPa)	7.0	8.2	16.8	2.3	3.7

Pour le calcul des contraintes horizontales maximales (essais avec écoulement vertical), le coefficient des terres au repos est supposé égal à 0.45 (K_0 d'un sable normalement consolidé selon Holtz et Kovacs, 1991).

3.5.3.3 Dalle de béton

La dalle de béton utilisé lors des essais provient d'une étude antérieure (Gonthier & al., 1997). La dalle de béton ayant une masse totale de 137 kg, la contrainte appliquée sur le géocomposite est donc de 6 kPa.

3.5.3.4 Conductivité thermique

L'apport de froid à travers le matériau encaissant vers le géocomposite est lié à la conductivité thermique du matériau. Plus la conductivité thermique est élevée, plus l'apport de froid est grand. Pour un sable, la conductivité thermique dépend entre autres, de la teneur en eau, de la porosité et de la masse volumique sèche (Ladanyi, 1996).

Le mélange eau-antigel a une conductivité thermique de 0.37 W/m°K (voir calcul en annexe A) tandis que la glace a une conductivité thermique de

2.2 W/m°K. La conductivité thermique d'un sable gelé sur le terrain est donc plus élevée que celle du sable utilisé dans notre montage.

De plus, sur le terrain, le géocomposite est en contact direct avec le sol. Dans le banc d'essai, la quantité de froid provenant de l'air ambiant et allant vers le géocomposite, est diminuée par la présence de la géomembrane, des parois du sac et de la paroi de bois du montage.

La conductivité thermique globale k_g d'un système dépend de l'épaisseur l_i dans le sens du gradient de température de chaque matériau et de sa conductivité thermique k_i. On peut l'évaluer l'aide de l'équation suivante:

$$\frac{l_g}{k_g} = \sum \frac{l_i}{k_i}$$

où l_g est la somme des épaisseurs

Les résultats sont donnés dans le tableau 3.3. Il est à noter que les coins en aluminium et les coins en géomembrane ainsi que les débordements vers l'intérieur du montage, du déversoir et de la bavette sur le géocomposite n'ont pas été pris en compte. Les variations de conductivités thermiques dues à leur présence sont minimes (ordre du centième de W/m°K) et localisées.

Tableau 3-3 Conductivités thermiques des matériaux utilisés lors des essais

Matériaux encaissant	Conductivité thermique k_i (W/m°K)	Épaisseur l_i (mm)	Conductivité thermique globale k_g (W/m°K)
Sable Sr = 0 %	0,6*	150	0.41
Béton	0,92*	250	0.91
Sable Sr = 70 %	1.78*	150	0.71
Sable Sr = 100 %	1.94*	150	0.73
Géomembrane PEHD	0,3**	1	
Sacs	0,3**	0,5	
Bois	0,126 *	19.0	

* de Harlan & Nixon (1978)

** de Toulikian & al. (1970)

3.5.4 Durée

Etant donné qu'un sol prend environ 1 mois pour dégeler en profondeur (Roy & al, 1992), la durée maximale de chaque essai a été fixée à 30 jours.

Sur le terrain, les 50 premiers centimètres dégèlent rapidement (≈ une semaine). Une durée d'un mois est donc représentative pour les essais à écoulement vertical mais sévère pour les essais à écoulement horizontal.

Les réchauffements hivernaux sont en général de quelques jours seulement (Environnement Canada, 1994-1998) et une période d'un mois peut-être considérée comme sévère pour les couches drainante et les écrans de rives.

3.6 Procédure

3.6.1 Préparation

Une fois le banc d'essai monté (détail en annexe C), les thermocouples placés et le montage isolé thermiquement, on met en route la chambre froide, la pompe, le bain thermostaté et le rhéostat. On ajuste au préalable la vitesse de la pompe pour avoir le débit désiré. Durant les heures suivantes, on vérifie la température de l'eau et on ajuste le bain thermostaté de façon à obtenir une température de 2 °C.

3.6.2 Déroulement de l'essai

À chaque jour, on vérifie l'alimentation en eau et on relève les températures de l'air ambiant, de l'eau et des thermocouples placés à l'intérieur des sacs et du géocomposite.

Lorsque le débit est nul (ou après 30 jours), on arrête la pompe et on ferme le rhéostat ainsi que le bain thermostaté. On enlève l'isolation et le déversoir et on démonte la structure métallique. On couche le montage à l'horizontale et on dévisse la planche de bois du dessus. On enlève la géomembrane puis on observe l'état du géocomposite. Si il y a formation de glace, on en relève l'étendue.

3.7 Programme d'essais

Quatre matériaux encaissants ont été testés: sable sec, sable saturé, sable partiellement saturé et dalle de béton. Les directions d'écoulement ainsi que les débits ont varié. Le programme d'essai est présenté dans le tableau 3.4.

Tableau 3-4 Programme d'essai

Direction d'écoulement	Débit (ml/min/m lin)	Sable *Sr* = 0 %	Sable *Sr* = 70 %	Sable *Sr* = 100 %	Béton
Vertical	100	√	√	√	
	100 (i)		√		
	100 (i + l)		√		
	600	√		√	
Horizontal	100 (l)	√			√
	100 (l + i)	√			
	600 (l)	√		√	√

l: essai avec isolation latérale

i: essai avec débit intermittent

Chapitre 4 Résultats

Ce chapitre présente les observations au cours des essais et fait une analyse sommaire des résultats. L'influence de facteurs tels la direction d'écoulement, les débits appliqués et la nature du matériau encaissant est commentée.

4.1 Blocage du géocomposite

L'ensemble des résultats d'essais est présenté au tableau 4.1. Lorsqu'il y a un écoulement à travers le géocomposite après 30 jours, le résultat est considéré comme étant non bloqué (N.B.). Lors de certains essais, de la glace s'est formée à l'intérieur du géocomposite sans toutefois empêcher l'écoulement de l'eau. Les croquis des formations de glace à l'intérieur du géocomposite au démontage sont présentés à l'annexe D. Il est à noter que les zones avec formations de glace sont solides, c'est-à-dire que le géocomposite est raide (non pliable). On dénote l'influence des trois facteurs ci-haut mentionnés. Dans les sections suivantes, on a isolé chacun des facteurs.

Tableau 4-2 Comparaison des résultats selon les débits

Écoulement	Matériau encaissant	Débit (ml/min/m lin)	Résultats
Horizontal	Sable sec	600	N.B.
		100	N.B., gelé aux bordures
	Béton	600	Bloqué en 21 jours
		100	Bloqué en 5 jours
Vertical (non isolé)	Sable saturé	600	N.B.
		100	Bloqué en 5 jours

L'influence de la continuité des débits est montrée au tableau suivant. On voit qu'un débit intermittent est plus favorable à la formation de glace.

Tableau 4-3 Influence de la continuité du débit

Écoulement	Matériau encaissant	Débit (ml/m/m lin)	Résultat
Horizontal	Sable sec	100 continu	N.B. un peu de glace en bordure
		100 intermittent	N.B. glace partout sauf en bordure

par un gain d'énergie cinétique (vitesse d'écoulement) ou thermique (libération de chaleur). Donc, pour un débit et un matériau encaissant identiques, la perte de chaleur est moindre pour l'écoulement vertical que pour l'écoulement horizontal. Le tableau 4.5 montre l'influence de la direction d'écoulement sur la formation de glace.

Tableau 4-5 Comparaison des résultats selon la direction d'écoulement

Écoulement	Matériau encaissant	Débit (ml/min/m lin)	Résultats
Vertical (non-isolé)	Sable Sr = 100 %	600	N.B.
Horizontal			4 jours

4.2 Analyse sommaire pour les essais avec écoulement vertical

Pour les essais à écoulement vertical, il y a eu blocage avec sable saturé et débit minimum et lors de l'essai avec sable partiellement saturé et débit minimum. Ces essais ont cependant été effectués sans isolation latérale. Cela représente une condition beaucoup plus sévère que sur le terrain. Un essai sur un sable partiellement saturé avec débit minimum a été effectué avec isolation latérale pour vérifier l'influence de l'isolation latérale sur les résultats. L'essai n'a présenté aucun blocage et la quantité de glace à l'intérieur du géocomposite permet de supposer qu'un essai sur un sable saturé avec débit

minimum ne bloquerait pas s'il y avait une isolation latérale du montage ou du moins prendrait quelques semaines avant de présenter un blocage total. Même sans aucune isolation latérale il n'y a pas eu de blocage dans les essais avec sable sec et l'essai avec sable saturé et débit maximum. L'essai avec sable partiellement saturé, débit minimum intermittent et isolation latérale a présenté qu'un petite formation de glace. L'influence de l'intermittence du débit dans le cas des essais à débit vertical est donc faible.

4.3 Analyse sommaire des résultats des écoulement horizontal

Pour les essais à écoulement horizontal, il y a eu blocage lors des essais avec dalle de béton (débit minimum et maximum) et pour l'essai avec sable saturé et débit maximum. Lors de l'essai avec débit intermittent (sable sec et débit minimum), il n'y a pas eu de blocage mais la formation de glace à l'intérieur du géocomposite était plus importante que lors de l'essai à débit continu.

Chapitre 5 Discussion

Outre les dimensions, la température de l'eau et la valeur des débits discutés au chapitre 3, ce chapitre porte sur l'applicabilité des résultats d'essai aux conditions de terrains.

5.1 Température ambiante

Les températures à l'intérieur de la structure d'une route durant un réchauffement (dégel) hivernal et durant le dégel printanier dans la région de Québec ont été obtenues de la figure 3.13. Elles sont présentées au tableau 5.1 et comparées aux conditions d'essais.

Tableau 5-1 Représentativité des températures

Période	Niveau mm	Température sur le terrain (°C)	Température du sable (° C)	Représentativité
Dégel hivernal	50	+ 1	- 2	variable
	800	- 3	- 2	représentatif
Dégel printanier	50	+ 1	- 2	sévère
	800	- 2	- 2	représentatif

Les profils de température sont difficiles à reproduire en laboratoire, spécialement pour les drains horizontaux qui sont exposés à de grandes

variations de températures. La température des sables est représentative des conditions en profondeur (800 mm) mais elle est sévère pour les conditions en surface, spécialement pour les essais représentant un drain de surface en période de dégel (où les températures peuvent monter au-dessus de 5 °C en peu de temps).

Pour un réchauffement hivernal, la température près de la surface varie selon l'intensité et la durée du réchauffement. Si la période précédant le réchauffement est froide et que le réchauffement est court et peu intense, alors la température du sol peut rester sous zéro. En profondeur, la température ne varie pas beaucoup. La température est donc représentative en profondeur et en surface si le réchauffement est peu intense. La température est toutefois sévère si le réchauffement est intense (température élevée le jour et la nuit).

Pour les essais avec la dalle de béton, les conditions d'essai étaient très sévères pour un réchauffement hivernal et pour un dégel. La surface du béton était en contact direct avec l'air ambiant de la chambre froide (- 6 °C). Cette température est beaucoup plus sévère que celles observées lors d'un dégel hivernal et printanier. Les températures moyennes lors des dégels du mois de janvier et d'avril des cinq dernières années (Environnement Canada, 1994-1998) sont données dans le tableau 5.2.

l'eau, fait que le sable ne gèle pas. Tous ces facteurs réduisent la valeur globale de la conductivité thermique du système. Les calculs de conductivité thermique global du montage ont été faits à la section 3.5.3.4 et ont été présentés au tableau 3.3.

5.2.3 Comparaison des conductivités thermiques

Les valeurs des conductivités thermiques ont été déduites de Harlan & Nixon (1978) en prenant pour le terrain les valeurs correspondant aux sables gelés et pour les essais, les valeurs de conductivité thermique globale. Ces valeurs sont comparées dans le tableau 5.3.

Tableau 5-3 Comparaison des conductivités thermiques

Matériaux de confinement	ρ_d (kg/m^3)	Conductivité thermique (W/m°K)		
		S_r = 0 %	S_r = 70 %	S_r = 100 %
Sable (essai)	1600	0.41	0.71	0.73
Sable (terrain)	2000	0.5*	3.0*	4.0*

* selon Harlan & Nixon (1978)

Les conductivités thermiques des matériaux d'essai sont plus faibles que celles rencontrées sur le terrain (excepté pour celle du sable sec). Les conditions d'essais semblent être moins sévères que sur le terrain.

5.2.4 Conditions aux frontières - flux thermique

Tel qu'expliqué à la section 3.2.4, l'apport de froid vers le géocomposite est différent géométriquement pour le banc d'essai et pour le terrain. Dans le premier cas, il est uniforme dans une direction horizontale alors que dans le deuxième cas il est presque vertical. La quantité de chaleur vers le géocomposite se calcule à l'aide de l'équation de Fourier:

$$Q_c = -k * \frac{\Delta\theta}{\Delta x} * A$$

où k est la conductivité thermique (W/m°K), $\Delta\theta$ est une différence de température (°K), Δx est la distance (m) sur laquelle il y a ce changement de température et A est la surface normale au flux thermique (m^2) sur laquelle on veut connaître l'apport en chaleur. Le gradient thermique est toujours dirigé de la température la plus chaude vers la température la plus froide. Par convention, une valeur négative de Q_c indique une perte de chaleur (apport en froid). Pour simplifier la compréhension, les apports en froid seront indiqués par le symbole Q_f et donnés en valeur absolue.

5.2.4.1 Dans le banc d'essai

Pour les essais, la température ambiante est de - 6 °C tandis que la température mesurée à l'intérieur des sacs est de -2 °C. Le gradient de température est toujours perpendiculaire au géocomposite et il est symétrique de part et d'autre du géocomposite sauf pour l'essai avec dalle de béton ou l'apport provenant de la dalle est différent de l'apport provenant du sac sur lequel repose la dalle. On obtient les résultats suivants comme apport de froid.

Tableau 5-4 Apport de froid vers le géocomposite lors des essais en laboratoire

S_r (%)	k (W/m°K)	θ (°K)	x (m)	A (m^2)	Q_f (1 sac) (W)	Q_f total (W)
0	0.41	4	0.171	0.5	4.8	9.6
70	0.71	4	0.171	0.5	8.3	16.6
100	0.73	4	0.171	0.5	8.3	17.0
Dalle	0.91	4	0.151	0.23	5.5	10.3

Pour fin de comparaison, on trouve pour la valeur de Q_f total du système avec la dalle de béton l'apport de froid équivalent qui se dirigerait vers le géocomposite si la dalle avait les mêmes dimensions que l'échantillon. On voit que l'apport de froid obtenu à partir du sable sec est près de l'apport à travers la dalle de béton.

5.2.4.2 Sur le terrain

Sur le terrain, le flux thermique est presque vertical. En effet, si l'on regarde les courbes isothermes de la figure 5.1 sous une chaussée, on voit qu'elles sont presque horizontales.

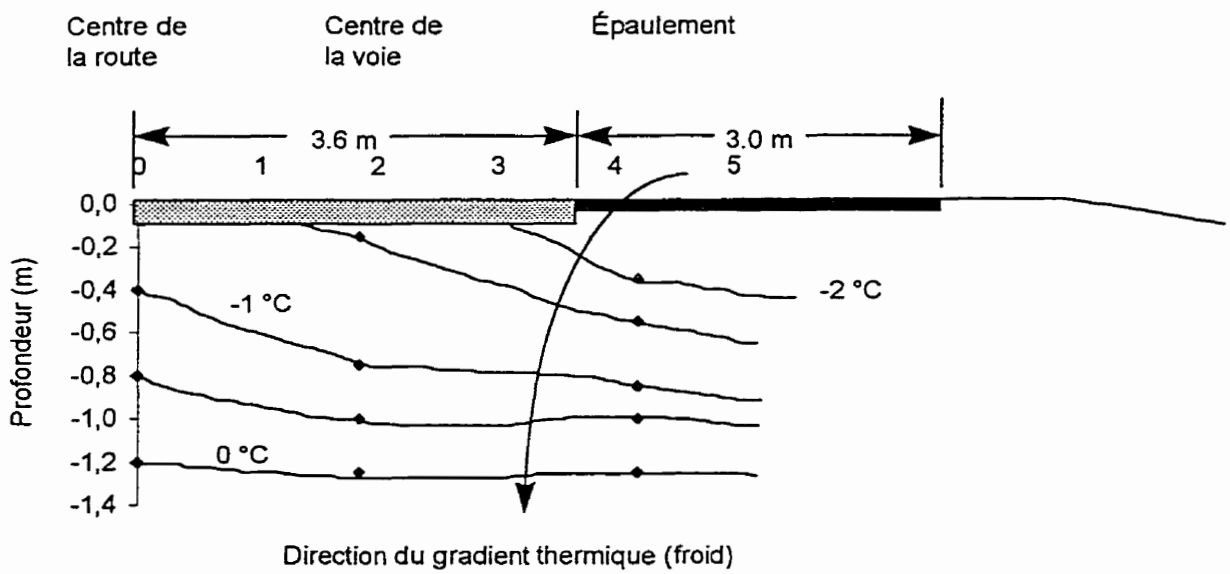


Figure 5.1 Profil des températures sous la route 122 au début du dégel printannier, le 12 mars 91 (d'après Roy & al., 1992)

Il y a des distorsions aux abords de la ligne de rive (fin du revêtement des voies de roulement) qui inclinent légèrement le gradient thermique vers les accotements. On pose comme hypothèse que la présence d'un géocomposite n'aurait pas d'effet sur le profil thermique sous la route. Bien que le

géocomposite soit fait d'un matériel synthétique (k = 0.3 W/m°K) et d'air (k = 0.024 W/m°K), son effet est très limité à cause de sa faible épaisseur.

Les profils de températures varient avec la température de l'air et dans le temps (Ladanyi, 1996). En profondeur, les variations sont moindres mais en surface, le profil peut varier grandement d'une semaine à l'autre. La figure 3.13, montre un profil de température mesuré durant un dégel hivernal (06/02/91). Le profil est similaire à un profil de début de dégel printannier. Les apports de froid sont donc du même ordre de grandeur lors des deux dégels. Pour le dégel printanier, avec la progression du dégel à l'intérieur du sol dans le temps, les apports de froid diminuent pour atteindre zéro.

À partir des valeurs du profil du 6 février 91 de la figure 3.13, on calcule les apports de froid pour l'écran drainant et la couche drainante. La figure 5.2a montre le profil général sous la route, la figure 5.2b montre le détail pour le calcul de l'écran de rive et la figure 5.2c le détail pour la couche drainante. L'inclinaison de 25 ° des gradients de froid près de l'écran de rive provient de la figure 5.1. Les distorsions du profil de températures sont dues à la présence de matériaux ayant des conductivités thermiques différentes. Puisque les conductivités thermiques du revêtement et des épaulements ne varient pas

l'amortissement des variations de température à travers ces deux couches est toujours le même.

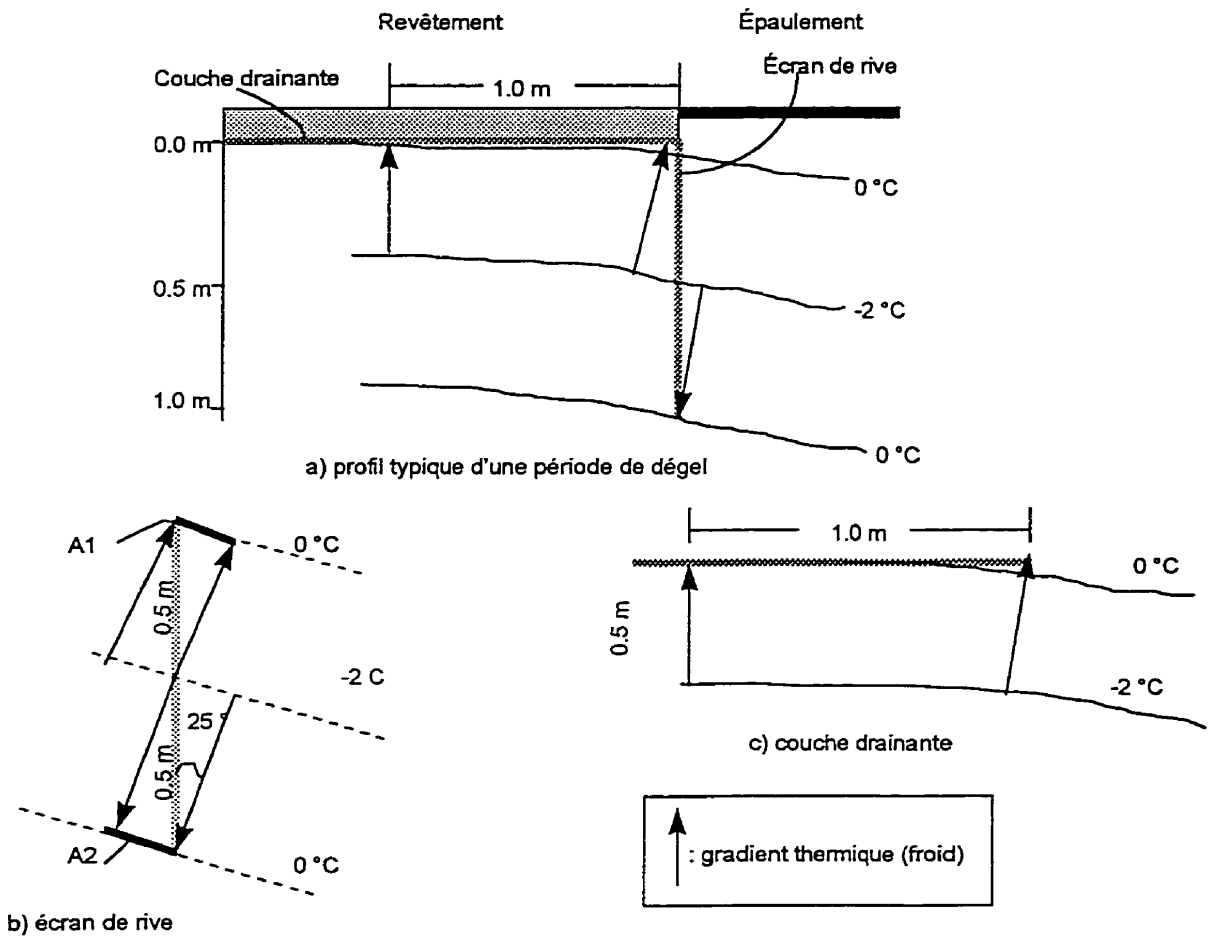


Figure 5.2 Calcul de l'apport de froid vers un écran de rive et une couche drainante lors d'une période de dégel

Pour l'apport de froid vers l'écran de rive (figure 5.2b), on calcule l'apport vers la surface A_1 et la surface A_2 (les deux surfaces ont les mêmes dimensions: largeur de 0.21 m et longueur de 0.5 m). La longueur de 0.5 m a été choisie

température (et donc des apports de froid) pourrait indiquer les cas présentant des apports de froid plus sévères que ce qui a été calculé ci-haut.

5.2.4.3 Résumé de la représentativité des matériaux encaissants

Si l'on considère la conductivité thermique globale du montage, on aurait tendance à croire que les conditions d'expérimentation ne sont pas assez sévères. Toutefois en calculant les apports de froid, on démontre que les apports de froid vers les écrans de rive et vers les couches drainantes lors des essais sont beaucoup plus sévères que ce qui s'observe sur le terrain. Les résultats sont donc très pessimistes au point de vue de l'apport de froid.

5.2.5 Conditions aux frontières - flux hydraulique

Dans le montage, l'alimentation en eau se fait uniquement sur un plan amont perpendiculaire à la nappe, par l'intermédiaire du déversoir. Bien que ce dispositif reproduise fidèlement le cas de l'apport d'une couche drainante raccordée à l'écran de rive, il est possible que ce dernier soit aussi alimenté en tout ou en partie par suintement le long des faces latérales, par l'eau libre contenue dans les agrégats de fondation et de sous-fondations. Les faibles débits impliqués dans ce suintement peuvent cependant amener un bourrage

graduel par la glace, des pores de l'écran de rive s'il n'est pas périodiquement alimenté par une eau plus chaude.

5.3 Facteurs non considérés

5.3.1 Salinité de l'eau

Les essais sont faits avec de l'eau claire non saline, donc plus sévères que sur le terrain ou une certaine quantité de sel peut s'y retrouver. Le fait que le sel abaisse le point de congélation de l'eau cela pourrait empêcher l'eau de geler à l'intérieur du géocomposite. Toutefois les périodes où du sel se retrouve dans l'eau sont en général courtes et la variation des concentrations en sel est très grande (Brandt, 1973). On ne doit pas compter sur le sel pour empêcher le gel lors de la conception des drains et c'est pourquoi il n'a pas été considéré lors de cet étude.

5.3.2 Contraintes latérales

Les valeurs des contraintes horizontales n'ont pas été prises en considération. Les valeurs obtenues lors des essais sont toutefois du même ordre de grandeur que ce que l'on peut rencontrer sur le terrain. Puisque les débits testés sont

bien en-dessous de la capacité d'évacuation du géocomposite, les variations de transmissivité en fonction des contraintes n'affectent pas l'écoulement pour les écrans de rives. Pour les couches drainantes, la capacité d'évacuation est atteinte et les variations de transmissivité ont un effet. Les contraintes appliquées par les sacs sont inférieures à 17 kPa. Les variations de transmissivité ne sont donc pas assez grandes (Gonthier & al.,1997) pour être prises en compte.

Sur le terrain, la présence de lentilles de glace peut provoquer des contraintes localisées (effet de poinçonnement) sur le géocomposite. En choisissant un mélange eau-antigel pour saturer le sable lors des essais, on a évité les contraintes excessives sur les parois du montage mais on perd cet effet sur le géocomposite.

5.3.3 Mouillabilité

La mouillabilité des fibres constituant les filtres du géocomposite n'a pas été étudiée dan le cadre de ce projet. On a pu, néanmoins faire les constatations suivantes: on a déposé sur une table un échantillon sur lequel on a versé délicatement de l'eau qui a formé une flaque avant d'être absorbée par la couche filtrante. Cette expérience a été répétée sur un échantillon placé sur le

hivernal) puisque les dégels hivernaux durent en moyenne 3 jours. Pour les essais avec débit maximum, la durée est elle aussi, sévère puisque les 20 premiers centimètres dégèlent très rapidement (moins de 2 semaines).

Les conditions d'expérimentation étant représentatives, on peut donc conclure sur l'utilisation des géocomposites tri-couche en tant que drains routiers pour des régions avec un indice de gel de 1200 °C-jour ou moins.

thermique étaient beaucoup plus sévères que celles rencontrées sur le terrain. Ceci nous amène donc à tirer certaines conclusions quant à l'utilisation des géocomposites tri-couche pour le drainage des structures de chaussées. On a noté par ordre d'importance décroissante l'influence des facteurs suivants :

- **Direction de l'écoulement**

En direction verticale (écrans de rive), les gradients hydrauliques sont de 100%. Les écoulements sont relativement rapides, la durée théorique de passage d'une particule d'eau sur une hauteur d'un mètre étant de l'ordre de quelques minutes. L'eau demeure donc pour un très court laps de temps à l'intérieur du géocomposite et le blocage par la glace est improbable. En fait, on n'a pas observé de blocage complet de la section d'écoulement dans aucun des essais verticaux (avec isolation latérale).

En direction horizontale (couches drainantes), les gradients hydrauliques ne sont que de 3%. Les vitesses d'écoulement se trouvent ainsi réduites par un facteur de 33 par rapport à l'écran de rive et la durée de percolation de l'eau à l'intérieur du géocomposite excède une heure. Cette condition a été suffisante pour amener le blocage complet de certains échantillons. Dans ce cas, d'autres facteurs interviennent:

- **Intensité et continuité des débits**

Les résultats des observations ont fait ressortir que les vitesses d'écoulement (et les masses d'eau en transit) jouaient un rôle dans la formation de glace. Lorsque le débit minimum de 100 ml/min/m était appliqué, le blocage se faisait plus rapidement. A titre d'exemple le blocage complet par la glace sous la dalle de béton, s'est fait en 5 jours avec le débit minimum, comparativement à 21 jours avec un débit 6 fois plus élevé.

L'application de débits intermittents (12 heures avec écoulement, suivies de 12 heures sans écoulement) a généré des conditions plus propices à la formation de glace. Le nombre limité d'essais n'a cependant pas permis de quantifier cette influence.

- **Flux thermique à travers le milieu encaissant**

Pour fin de comparaison, divers milieux encaissants ont été utilisés : sable sec, partiellement ou complètement saturé et dalle de béton. Ce dernier était le plus représentatif des conditions de terrain. Les observations ont fait ressortir une relation directe entre la rapidité de blocage et la quantité de froid disponible au géocomposite. Les essais (horizontaux) avec le débit maximum permettent

cette comparaison : par ordre décroissant de flux thermique, le sable saturé (Q_f = 17.0 W) a amené le géocomposite à bloquer complètement en 4 jours alors qu'avec la dalle de béton (Q_f = 10.3 W), le géocomposite a mis 21 jours à se bloquer. Avec le sable sec (Q_f = 9.6 W), il n'a pas gelé au cours des 30 jours d'essai.

6.2 Observations faites aux sites d'exhumation

Tel que mentionné en introduction, les observations faites par le Ministère des Transports du Québec (1991) dans le rang St-Charles à St-Jules et dans un tronçon de l'autoroute Henri IV à Québec ont motivé la présente étude expérimentale. Des écrans drainants de 1 à 1.8 m de profondeur avaient été mis en place dans des sols contenant un pourcentage appréciable de fines, peu perméables et gélifs. Les écrans n'ont pas amélioré la performance de la route : les niveaux piézométriques sont sensiblement les mêmes dans les zones drainées et dans les zones non drainées. On a de plus noté la présence de cristaux de glace à l'intérieur du géocomposite.

Le rapport ne fournit cependant pas d'indications sur le profil du radier des écrans drainants, l'état des exutoires pendant l'hiver et l'élévation des fossés. L'efficacité d'un drainage est intimement reliée à ces facteurs.

les structures de chaussée à la condition expresse qu'il y ait suffisamment d'apport de chaleur des eaux d'infiltration pour empêcher la formation de glace.

6.4 Recommandations pour travaux futurs

Les données présentées dans ce rapport ont été obtenues à partir d'un processus expérimental qui a évolué considérablement au fur et à mesure de la progression des travaux. Il est indispensable que ces observations soient validées par des études de comportement en vraie grandeur sur le terrain.

En parallèle à cette étude, il serait souhaitable de procéder à une simulation numérique de la progression du front de dégel, couplée à une étude des écoulements saturés/non saturés dans la structure de chaussée, avec ou sans couche drainante. Cette étude permettrait en plus, d'optimiser la localisation des éléments de drainage.

RÉFÉRENCES

ASTM (1997) D 2487-93 Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08.

BRANDT, G.H. (1973). Potential Impact of Sodium Chloride and Calcium Chloride De-Icing Mixtures on Roadside Soils and Plants. Transportation Research Record, No. 425, Environmental Degradation by De-Icing Chemicals an Effective Countermesures, pp 52-66..

CRISPIN, J. (1992), Étude de comportement in-situ de chaussées pendant un cycle de gel et dégel, Thèse de maîtrise non-publiée, Université Laval, Québec, 142 p.

ENVIRONNEMENT CANADA, 1994-1998, Sommaire météorologique mensuel, Montréal-Dorval, Division de l'Environnement Atmosphérique, Ottawa.

GONTHIER, A. GOTTELAND, P. & LAFLEUR J. (1997), Transmissivité d'un géotextile multicouche sous un revêtement de béton, Recueuil des communications. 32e Congrès de l'AQTR. Trois-Rivières, pp. 299-316.

HARLAN, R.L. & NIXON, J.F. (1978). Ground Thermal Regime, Chapitre 3 dans Geotechnical Engineering for Cold Region, O.B. Andersland & D.M. Anderson, Eds., McGraw-Hill Book Co., pp. 103-163.

HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. (1991), Introduction à la Géotechnique traduit par J. Lafleur, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 808 p.

LADANYI, B. (1996), La conception et la réhabilitation des infrastructures de transport en régions nordiques, Génie et environnement, Ministère des Transports, 121 p.

LAFLEUR, J. & BOURSIER, P. (1994), Évaluation des chaussées drainantes - Sous-projet III Capacité de drainage en présence de froid. Rapport interne, Projet C.D.T. P1548, Centre de développement technologique, École Polytechnique de Montréal, 48 p.

LAFLEUR, J., & SAVARD, Y. (1996). Efficiency of Geosynthetic Lateral Drainage in Norther Climates. Transportation Research Record, No. 1534, Soils, Geology, and Foundations. Geosynthetics: Cold Regions, Flexible Pavements, and Other Issues, pp 12-18.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (1991), Draincotex - Rang St-Charles et autoroute Henri IV, N/Réf.: 0573-01-0580(31) 88, 85941-02(31)88, Division Structure de Chaussées, Services des Sols et Chaussées.

ROY, M., CRISPIN, J., KONRAD, J.M., LAROSE., G. (1992), A Field Study of Two Road Sections During a Freeze-thaw Cycle, Transportation Research Record, No. 1362, Soils, Geology and Foundations: Aggregate and Pavement-Related Research, pp. 71-79.

ROY, M., KONRAD, J.M.,SAMSON, M., GILBERT, F. (1994), Étude de comportement in situ de chaussées pendant un deuxième cycle de gel et de dégel: site des Bois-Francs, Rapport GCS-94-05 (Contrat de service MTQ numéro 2410-92-QZ01), Département de génie civil, Université Laval, 25 p.

SAVARD, Y., (1996), Les développements en drainage des chaussées à Transport Québec, Recueil des communications, 31e Congrès annuel de l'A.Q.T.R., Québec, Tome 2, pp. 125-188.

THÉORET, R. (1997), Réfection de l'autoroute 15 - Caractérisation du géocomposite de drainage, Recueil des communications, 32e Congrès annuel de l'A.Q.T.R., Trois-Rivières, Tome 1, pp. 286-297.

TOULIKIAN, Y.S., LILEY, P.E., SAXENA, S.C. (1970), Thermal Conductivity, Non Metallic Liquids and Gas, Thermophysical Properties of Matter, vol. 3. IFV/Plenum, New York - Washington, 531 p.

ANNEXE A CALCUL DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DU MÉLANGE EAU-ANTIGEL

Pour calculer la conductivité thermique du mélange eau-antigel, on suppose que l'antigel est composé d'éthylène glycol (CH_2OHCH_2OH). La masse moléculaire de l'éthylène glycol est de 62 g/mol.

L'équation prise pour calculer la conductivité thermique d'un mélange eau-éthylène glycol est celle de Rastorguev et Ganiev (Toulikian & al., 1970).

$$k_m = k_1x_1 + k_2x_2 + 1.4x_1(x_1-1)(\Delta k - 0.2) - 1.4x_1(x_1-1)*(t - 20)10^{-3}$$

où k_m est la conductivité thermique du mélange (W/m°K)

k_1 est la conductivité thermique de l'éthylène glycol (W/m°K)

k_2 est la conductivité thermique de l'eau (W/m°K)

x_1 est la fraction moléculaire de l'éthylène glycol

x_2 est la fraction moléculaire de l'eau

t est la température moyenne du mélange (°C)

1) Calcul de la fraction moléculaire

Pour un mélange qui contient 3 volumes d'eau pour un volume d'éthylène glycol on obtient les masses suivantes.

Tableau A.1.1 Caractéristiques du mélange eau-antigel

	Éthylène glycol	Eau
Masse moléculaire	62 g/mol	18 g/mol
Masse dans le mélange	624.71 g	200 g
Nombre de moles	10.07 mol	11.11 mol
Fraction moléculaire	0.475	0.524

Les conductivités thermiques respectives pour une température de -6 °C sont

k_1 = 0.25318 W/m°K

k_2 = 0.55024 W/m°K

En prenant t = -6 °C

on obtient ***k* = 0.37 W/m°K**

Note: pour le calcul, on suppose que la température du mélange est à -6 °C. La température à l'intérieur des sacs n'a pas été prise lors de l'essai avec eau-antigel. Puisque la conductivité thermique augmente avec la chaleur pour l'eau et l'éthylène glycol, la valeur $k_{mélange}$ calculée est légèrement inférieure qu'à la valeur réelle. Toutefois, les variations de conductivités thermiques avec la températures sont faibles et la valeur calculée est donc très près de la réalité

ANNEXE B MISE EN PLACE DU SABLE À L'INTÉRIEUR DES SACS

Les sacs sont mis en place dans le montage (position verticale) et sont emplis simultanément. Une quantité de sable sec est versée dans un sac, puis la même quantité est versée dans l'autre sac. De cette façon on évite l'affaissement des sacs lors du remplissage, ce qui courberait le géocomposite (on veut qu'il reste plane). Le sable est versé dans les sacs à l'aide d'entonnoir. L'ouverture des sacs étant de petit diamètre (φ = 25 mm), on ne peut pas compacter le sable.

La masse volumique (ρ_d) du sable sec est calculée approximativement en mesurant le poids total de sable ajouté et le volume des sacs. La porosité $n = V_v \ / \ V_t$ est calculée en estimant la masse des grains solides à ρ_s 2650 kg/m^3. À l'aide de l'indice des vides, on peut calculer le volume du mélange eau-antigel nécessaire pour obtenir une saturation de 100 % et 70 %.

Lors des essais avec sable saturé et partiellement saturé, on emplit les sacs du sable sec puis on ajoute la quantité du mélange eau-antigel nécessaire au degré de saturation voulue.

Problèmes de saturation des sables

Lors des essais avec sable saturé et partiellement saturé, on emplit les sacs de sable sec puis on ajoute la quantité du mélange eau-antigel nécessaire pour atteindre le degré de saturation voulu. Cette méthode est la seule réalisable puisque le sable déjà saturé est très difficile à faire entrer dans les sacs. La méthode ne cause aucun problème pour un sable totalement saturé. Toutefois, pour le sable partiellement saturé, on se retrouve avec le sable dans le bas des sacs qui est totalement saturé et le sable dans le reste des sacs qui est saturé à un degré moindre.

Un test a été fait pour vérifier l'influence sur l'homogéneité de la teneur en solution. Le fait d'humidifier le sable avant de le déverser dans les sacs ne produit pas de meilleurs résultats qu'un simple déversement. Dans les deux cas, la distribution de la solution à l'intérieur des sacs est non uniforme parce que le sable est non capillaire. Lors des essais avec sable partiellement saturé il y a une saturation totale dans le bas des sacs et une saturation beaucoup moindre dans le reste.

ANNEXE C DÉTAILS DE LA PRÉPARATION DU MONTAGE

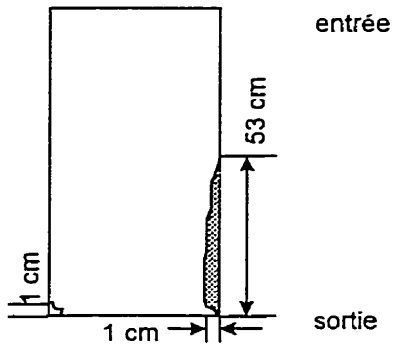
On place le banc d'essai sur deux poutre en bois (pour que l'on puisse poser un bac réservoir sous le banc d'essai). On place le géocomposite à l'intérieur du montage puis les sacs, pour se faciliter la tâche on peut enlever une des parois de plastique lors de la mise en place du géocomposite. On s'assure que le tout est le plus plane possible avant de commencer à remplir les sacs (détails en annexe 4). Une fois les sacs emplis, on pose le déversoir et la structure métallique. On fixe le tuyau d'alimentation sur la structure de façon à ce que l'eau s'écoule dans le milieu du déversoir. On place les thermocouples (s'il y a lieu) puis on place le bac servant de réservoir et on emplit d'eau. On installe à l'intérieur l'élément chauffant et le tuyau d'alimentation qui relie le réservoir au bain thermostaté. On place l'isolant thermique (laine minérale) en le faisant tenir en place à l'aide de corde. Il ne reste alors qu'à faire fonctionner la chambre froide, la pompe, le bain thermostaté et le rhéostat.

Pour le montage à écoulement horizontal, on procède de la même façon pour remplir les sacs (montage à la vertical). Une fois les sacs emplis, on verse le montage à l'horizontal. On enlève le sac et la géomembrane qui repose sur le géocomposite ainsi que le géocomposite. À l'aide de ruban adhésif de ventilation, on colmate les espaces où l'eau peut fuir, c'est-à-dire que l'on joint

la géomembrane inférieur et les parois de plastiques ensemble. Il faut aussi coller la membrane à la planche de bois qui sert de plancher. On colle ensuite la bavette en place. On étend le géocomposite en place et on soulève l'extrémité amont du banc à l'aide d'un vérin hydraulique. On place des bouts de bois sur la poutre qui est du coté amont pour élever cette extrémité du montage. On vérifie l'inclinaison du géocomposite avec un niveau et une mire. Un fois l'inclinaison de 3% obtenue, on retire le vérin. On installe le déversoir pour écoulement horizontal puis la géomembrane supérieure et le sac de sable, on remet ensuite la paroi de bois. On installe le tuyau d'alimentation à l'intérieur du déversoir (en ayant au préalable ajusté le débit) et on place un bac réservoir en amont en s'assurant que la bavette déverse bien l'eau dans le bac. On isole les extrémités amont et aval du montage puis on isole les parois latérales. Une fois complété on fait partir la pompe, la chambre froide, le bain thermostaté et le rhéostat.

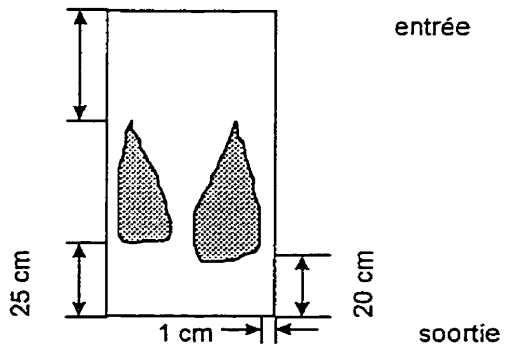
Croquis des formations de glace au démontage pour les essais qui n'ont pas présenté un blocage. Lorsqu'il n'y a pas de croquis du gécomposite cela veut dire qu'il n'y avait pas de formation de glace.

Matériau encaissant:sable sec
Direction d'écoulement: vertical
Débit: 600 ml/min/m lin, continu
Isolation latérale: non
Résultat: légèrement gelé



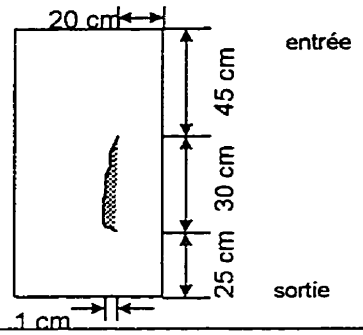
Matériau encaissant:sable sec
Direction d'écoulement: vertical
Débit: 100 ml/min/m lin, continu
Isolation latérale: non
Résultat: aucune formation de glace

Matériau encaissant: sable $Sr = 70$ %
Direction d'écoulement: vertical
Débit: 100 ml/min/m lin, continu
Isolation latérale: oui
Résultat: gelé en partie

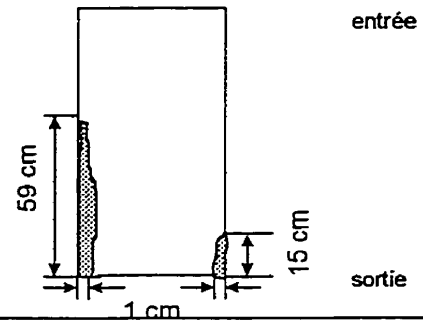


Croquis des formations de glace au démontage pour les essais qui n'ont pas présenté un blocage. Lorsqu'il n'y a pas de croquis du gécomposite cela veut dire qu'il n'y avait pas de formation de glace.

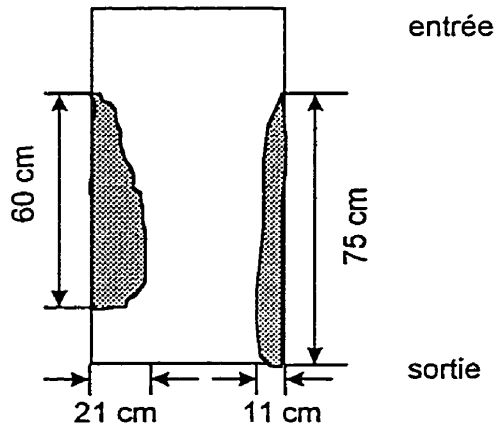
Matériau encaissant:sable *Sr* = 70%
Direction d'écoulement: vertical
Débit: 100 ml/min/m lin, intermittent
Isolation latérale: oui
Résultat: légèrement gelé



Matériau encaissant:sable *Sr* = 100%
Direction d'écoulement: vertical
Débit: 100 ml/min/m lin, continu
Isolation latérale: non
Résultat: glace en bordure



Matériau encaissant:sable sec
Direction d'écoulement: horizontal
Débit: 100 ml/min/m lin, continu
Isolation latérale: oui
Résultat: glace en bordure



Matériau encaissant:sable sec
Direction d'écoulement: horizontal
Débit: 100 ml/min/m lin, intermittent
Isolation latérale: oui
Résultat: formation de glace importante

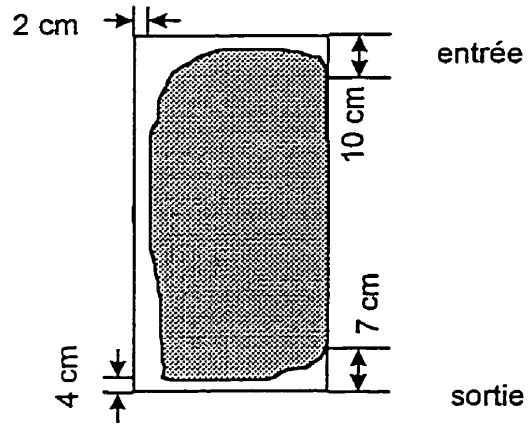
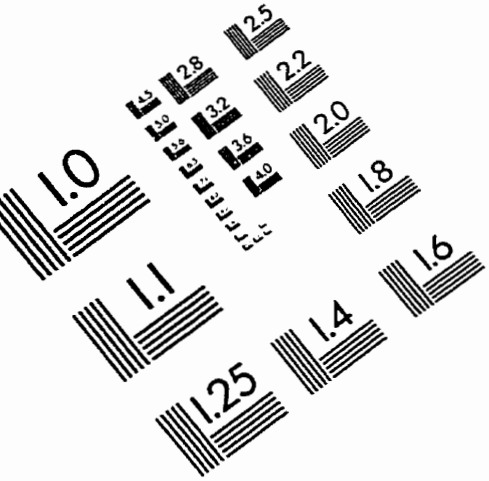
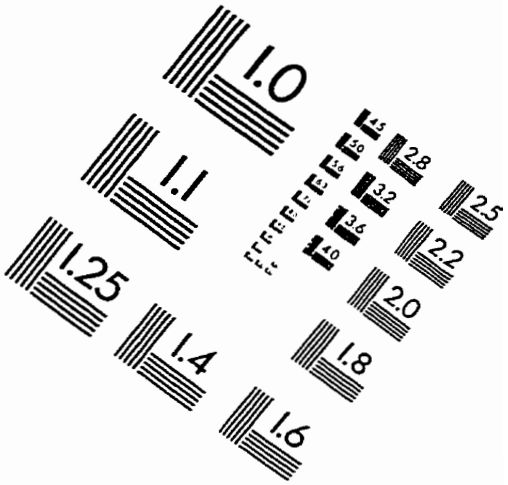
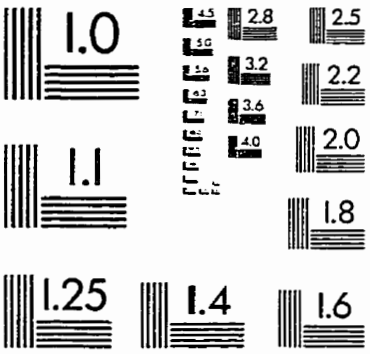
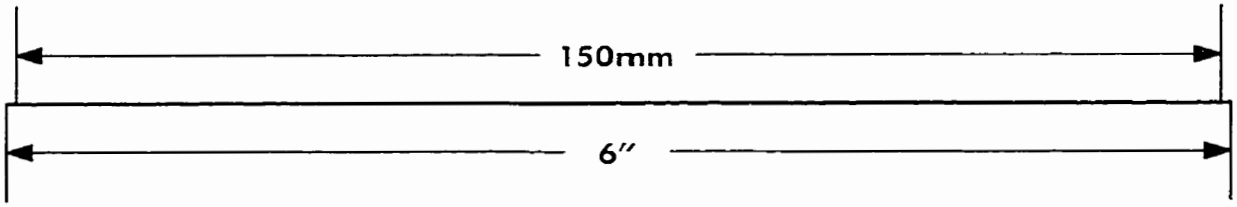


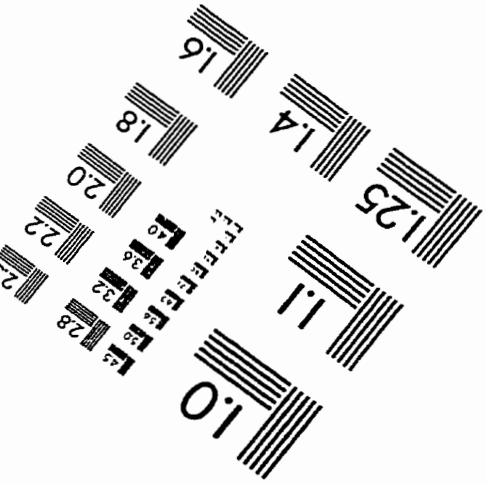
IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

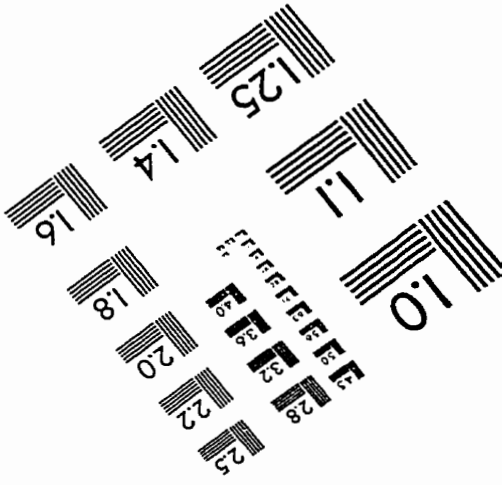










APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved