

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**APPLICABILITÉ DE L'ESSAI
DU RAPPORT DES GRADIENTS
EN CONDITIONS D'ÉCOULEMENT ALTERNÉ
POUR LES SYSTÈMES GÉOTEXTILE-SOL**

**JOSÉE FRANCOEUR
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)**

JUIN 2001



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**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.

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 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.

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.

0-612-65575-X

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**APPLICABILITÉ DE L'ESSAI
DU RAPPORT DES GRADIENTS
EN CONDITIONS D'ÉCOULEMENT ALTERNÉ
POUR LES SYSTÈMES GÉOTEXTILE-SOL**

présenté par: **FRANCOEUR Josée**

en vue de l'obtention du diplôme de: **Maîtrise ès sciences appliquées**

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

Mme **LEITE Marie Helena**, Ph.D., présidente

M. **LAFLEUR Jean**, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. **FAURE Yves-Henri**, D.Sc., membre

**À mes parents, Louis, Martin et Morgane
pour leur soutien, leurs encouragements et leur patience.**

**À mon meilleur ami disparu,
ta présence me manque terriblement.**

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier sincèrement mon directeur de recherche, Monsieur Jean Lafleur, pour m'avoir permis de réaliser ce projet de recherche. Votre intérêt et votre encadrement ont été grandement appréciés.

J'aimerais remercier tout spécialement Bidim Geosynthetics pour les échantillons de géotextiles et pour leur support financier. Je remercie également le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour leur soutien financier.

Enfin, un remerciement particulier à Monsieur André Ducharme, responsable du laboratoire, pour la réalisation du montage, ses renseignements pratiques, sa disponibilité et sa patience.

RÉSUMÉ

Dans les structures de protection côtières, le mouvement d'avancement et de retrait des vagues impose des gradients hydrauliques alternés. Il existe une distinction importante entre un écoulement unidirectionnel et un écoulement alterné. Sous un écoulement unidirectionnel, une structure avec pontage naturel est induite dans la couche de sol adjacente au géotextile. Ce réseau peut ne pas se développer sous l'influence d'un écoulement bidirectionnel où l'alternance de la direction de l'écoulement agit pour le déstabiliser. L'essai du rapport des gradients (norme ASTM D-5101) a pour objectif d'évaluer la compatibilité en filtration d'un sol et d'un géotextile. Nous avons adapté cette procédure expérimentale en appliquant une alternance de la direction des gradients hydrauliques pour simuler l'action des vagues dans les ouvrages de protection des berges.

Nous avons utilisé cinq sols fins non plastiques à granulométrie étalée et concave vers le haut. Deux de ces sols présentent un potentiel d'instabilité interne. Le programme a impliqué cinq géotextiles avec des structures différentes et des ouvertures de filtration variant entre 44 et 200 μm .

L'analyse du comportement en filtration des 21 systèmes géotextile-sol étudiés permet d'énoncer les observations suivantes. Tous les géotextiles ont initié la formation d'une zone plus perméable dans le sol à l'interface géotextile-sol. Le colmatage externe du géotextile ne survient donc pas puisque les sollicitations associées à l'alternance des gradients hydrauliques tendent à dégager les pores du sol près de l'interface. Les résultats indiquent également qu'un rapport de rétention croissant entraîne le lessivage d'un plus grand nombre de particules. Les systèmes caractérisés par un rapport de rétention supérieur à 3,5 subissent un lessivage d'une quantité inacceptable de particules.

Cette étude a aussi mis en évidence l'importance de la direction de l'écoulement, de l'intensité du confinement et du gradient hydraulique sur l'équilibre des systèmes. En

effet, nos résultats indiquent qu'un écoulement ascendant impose des conditions plus critiques qu'un écoulement descendant et que l'équilibre de l'interface géotextile-sol n'est assuré que sous certaines conditions hydrauliques et de confinement interdépendantes. Un confinement plus important du sol réduit la quantité de particules expulsées.

La comparaison des résultats a également montré l'influence de la stabilité interne des sols et de la forme de leurs particules. En contact avec le même géotextile, un sol instable subit une plus grande perte de particules qu'un sol stable présentant une granulométrie assez rapprochée. De plus, un sol reconstitué à l'aide de particules de forme sphérique est plus susceptible de passer au travers des constriction des géotextiles et présente donc des conditions plus sévères qu'un sol composé de particules anguleuses et aplaties. Finalement, pour une ouverture de filtration donnée, un géotextile comportant un nombre de constriction plus élevé laisse passer plus de particules.

La validation des critères de filtration existants a indiqué que la plupart des critères cités dans la littérature sont trop conservateurs. De plus, ces auteurs ne mentionnent pas l'importance du confinement du sol et du maintien du contact entre le géotextile et le sol. Nous avons donc proposé un nouveau critère de rétention des sols en conditions d'écoulement alterné qui tient compte du rapport de rétention, de la stabilité interne du sol et des conditions hydrauliques et de confinement imposées au système géotextile-sol sélectionné.

Les conclusions et les recommandations de cette étude montrent que plusieurs combinaisons doivent être soumises au test du rapport des gradients afin de valider ce nouveau critère de rétention des sols en conditions d'écoulement alterné.

ABSTRACT

In coastal protection structures, the waves action gives rise to alternating hydraulic gradients. There exists an important distinction between an unidirectional flow and an alternating flow. Under an unidirectional flow, a soil bridge filter is induced in the upstream zone of the geotextile filter. This network may not develop under the influence of a bi-directional flow, where the changing direction of flow acts to destabilize it. The Gradient Ratio test (ASTM D-5101) is used to evaluate the filtration compatibility between a geotextile and a soil. This experimental procedure was modified by applying hydraulic gradients with alternating direction to simulate the waves action in the revetment of a bank protection. Five non plastic broadly graded soils with a concave upward gradation curve were used and two of them were internally unstable soils. The program involved five geotextiles with different structures and filtration opening sizes ranging between 44 and 200 μm .

The analysis of the systems filtration behaviour denotes the following observations. All geotextiles have initiated a more permeable zone in the soil at the geotextile-soil interface. The external clogging of the geotextile does not occur since the alternating hydraulic gradients tend to open the clogged pores. An increased amount of washed out particles was also associated to an increased retention ratio. Acceptable filtration behaviour of the geotextile occurs with retention ratio values lower than 3,5. The study has also showed that the stability of the geotextile-soil combination depends on the flow direction and on the applied hydraulic gradient and the normal stress. Indeed, our results indicate that an upward flow imposes more critical conditions than a downward flow and that the interface stability is insured only under some interdependent hydraulic and stress conditions. A higher confinement reduces slightly the amount of washed out particles.

The comparison of results has equally shown the influence of the internal stability and the particles form of the soil. In contact with the same geotextile, an unstable soil induces a loss of particles larger than that of a stable soil presenting a similar gradation curve. Moreover, a soil reconstituted with spherical particles is more susceptible to pass through the constrictions of the geotextile. This soil presents therefore more severe conditions than a soil composed of flat and angular particles. Finally, for a given filtration opening size, a geotextile having a higher number of constrictions allows more particles to pass.

The validation of the existing filtration criteria has indicated that criteria most quoted in the literature are too conservative. Further, these authors do not mention the importance of the soil confinement and the contact between the geotextile and the soil. We have therefore proposed a new retention criterion for alternating flow that takes into account the retention ratio, the internal stability of the soil and the hydraulic and stress conditions imposed to the selected geotextile-soil system.

The conclusions and the recommendations of this study show that several combinations have to be submitted to the Gradient Ratio test to validate this new retention criterion for alternating flow.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xix
LISTE DES ANNEXES	xxii
 CHAPITRE 1 INTRODUCTION	 1
1.1 Critères généraux de sélection d'un géotextile	2
1.2 Influence d'un écoulement alterné	4
 CHAPITRE 2 MÉCANISMES ET CRITÈRES DE FILTRATION	 7
2.1 Mécanismes de filtration.....	7
2.1.1 Comportements en filtration	8
2.1.1.1 Lessivage	8
2.1.1.2 Structure avec pontage ou formation d'arches	10
2.1.1.3 Auto-colmatage avec les sols suffosifs	11
2.1.2 Stabilité interne des sols	14
2.2 Critères de filtre en conditions d'écoulement unidirectionnel.....	16
2.2.1 Influence du rapport de rétention.....	17
2.2.2 Influence du nombre de constriction.....	21
2.3 Critères de filtre en conditions d'écoulement alterné	24
2.4 Critères de performance et évolution du test du rapport des gradients.....	31

2.5 Critères de sélection	38
CHAPITRE 3 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	40
3.1 Objectifs et hypothèses de travail	40
3.2 Matériaux utilisés	41
3.2.1 Les sols	41
3.2.2 Les géotextiles	45
3.3 Filtramètre pour un écoulement alterné	45
3.3.1 Inversion de l'écoulement	48
3.3.2 Collecte des particules passantes au sommet et à la base de l'échantillon	49
3.3.3 Application d'une contrainte de confinement sur l'échantillon et mesure des tassements	50
3.3.4 Capteurs de pression différentielle	51
3.4 Procédure expérimentale	52
3.4.1 Calibrage des capteurs de pression	52
3.4.2 Saturation des géotextiles	52
3.4.3 Mise en place du sol	53
3.4.4 Application des gradients hydrauliques et déroulement de l'essai	54
3.5 Compilation des résultats	55
3.5.1 Perméabilité du système géotextile-sol	56
3.5.2 Rapport des gradients GR_{ASTM}	57
3.5.3 Masse volumique initiale et comprimée du sol sec	58
3.5.4 Masse de sol passant les géotextiles	58
3.5.5 Masse de sol coincé dans les géotextiles	59
CHAPITRE 4 BILAN DES RÉSULTATS ET DISCUSSION	60
4.1 Programme d'essais	60
4.2 Critères d'interprétation des résultats	66

4.2.1 Perméabilité du système géotextile-sol.....	66
4.2.2 Distribution de la charge hydraulique dans le sol et GR_{ASTM}	67
4.2.3 Tassement du sol.....	68
4.2.4 Quantité de sol passant les géotextiles.....	68
4.3 Résultats des essais.....	69
4.4 Comportements typiques des systèmes géotextile-sol étudiés.....	75
4.4.1 Comportement du mélange de billes de verre (sol B).....	75
4.4.2 Comportement du mélange lavé de farine de pierres concassées (sol F).....	83
4.4.2.1 Géotextile BF60.....	83
4.4.2.2 Géotextile BSF8.....	87
4.4.3 Comportement du sol instable (sol I).....	88
4.4.3.1 Géotextile BSF8.....	88
4.4.3.2 Géotextile NTP.....	93
4.5 Synthèse du comportement des systèmes géotextile-sol étudiés.....	94
4.6 Discussion et comparaison des résultats.....	96
4.6.1 Influence du rapport de rétention.....	96
4.6.2 Influence de l'intensité du confinement et du gradient hydraulique sur l'équilibre du système.....	98
4.6.3 Influence de la direction de l'écoulement.....	100
4.6.4 Influence de la stabilité interne du sol.....	102
4.6.5 Influence de la forme des particules du sol.....	104
4.6.6 Influence du nombre de constriction du géotextile.....	107
4.6.7 Influence du confinement sur la rétention des sols (M_P).....	108
4.7 Validation des critères de filtration existants.....	110
4.8 Modification aux critères de filtration en conditions d'écoulement alterné.....	113
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	115

RÉFÉRENCES	118
ANNEXES	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Comparaison des critères de filtre en conditions d'écoulement unidirectionnel et alterné	25
Tableau 2.2	Revue des critères de rétention en conditions d'écoulement alterné	25
Tableau 3.1	Caractéristiques des sols utilisés	44
Tableau 3.2	Propriétés des géotextiles testés	45
Tableau 4.1	Programme des essais du rapport des gradients en écoulement alterné ...	63
Tableau 4.2	Observations et mesures correctives apportées à la procédure expérimentale des essais du rapport des gradients en écoulement alterné	64
Tableau 4.3	Conditions d'essais et de mise en place des sols	70
Tableau 4.4	Résultats des essais du rapport des gradients en écoulement alterné	72
Tableau 4.5	Rapports GR_{ASTM} pour chacun des gradients imposés aux systèmes	74
Tableau 4.6	Ouvertures de filtration proposées pour la rétention des sols F, C et I en conditions d'écoulement alterné	110

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Développement d'une structure stable	3
Figure 1.2	Colmatage interne et externe d'un géotextile.....	4
Figure 1.3	Utilisation des géotextiles dans les revêtements des structures côtières.....	5
Figure 1.4	Battement du géotextile ou « Geotextile flapping »	6
Figure 2.1	Lessivage des particules de sol.....	9
Figure 2.2	Structure avec pontage du sol.....	11
Figure 2.3	Colmatage interne du géotextile.....	12
Figure 2.4	Colmatage externe du géotextile.....	12
Figure 2.5	Auto-colmatage avec les sols suffosifs	13
Figure 2.6	Évaluation de la stabilité interne des sols.....	16
Figure 2.7	Profils de courbe granulométrique	18
Figure 2.8	Modèle proposé par Lafleur <i>et al.</i> (1989) pour évaluer la migration interne des fines d'un sol sans cohésion et à granulométrie étalée	18
Figure 2.9	Critères de sélection d'un géotextile en filtration.....	20
Figure 2.10	Relation entre les distributions des ouvertures de filtration et de constrictions d'un géotextile non tissé.....	22
Figure 2.11	Effet du nombre de constrictions sur le comportement en filtration des géotextiles non tissés	23
Figure 2.12	Critère de rétention pour un écoulement alterné.....	26
Figure 2.13	Critère de rétention en conditions d'écoulement alterné	27
Figure 2.14	Variation du rapport O_{90}/d_{50} en fonction de C_u pour $i = \pm 1$	28
Figure 2.15	Montage utilisé pour simuler un écoulement cyclique perpendiculaire	29
Figure 2.16	Stabilité de l'interface en fonction de la contrainte effective et du gradient cyclique	30
Figure 2.17	Perméamètre de Calhoun en 1972.....	32

Figure 2.18	Perméamètre de l'essai du rapport des gradients selon l'ASTM.....	33
Figure 2.19	Perméamètre de l'essai du rapport des gradients modifié.....	34
Figure 2.20	Perméamètre avec contrainte verticale	36
Figure 2.21	Filtramètre de l'essai du rapport des gradients SAGEOS.....	36
Figure 2.22	Perméamètre de l'essai du rapport des gradients en conditions d'écoulement alterné.....	37
Figure 2.23	Critères de filtration.....	39
Figure 3.1	Courbes granulométriques des sols utilisés.....	43
Figure 3.2	Courbes de stabilité des sols étudiés.....	44
Figure 3.3	Description schématique des filtramètres utilisés	46
Figure 3.4	Filtramètre pour un écoulement unidirectionnel ascendant et alterné.....	48
Figure 3.5	Schéma des capteurs de pression utilisés avec le filtramètre.....	51
Figure 4.1	Tassement du sol dû à l'application de la contrainte de confinement.....	71
Figure 4.2	Distribution des pressions dans le sol B pour le système BF60-B-D (essai 1).....	77
Figure 4.3	Perméabilités en fonction du temps pour le système BF60-B-D (essai 1) ..	77
Figure 4.4	Évolution du rapport des gradients pour le système BF60-B-D (essai 1) ..	78
Figure 4.5	Masse de sol passant et tassement en fonction du temps pour le système BF60-B-D (essai 1)	78
Figure 4.6	Tassement du sol B en fonction du temps (essais 2 à 4) pour le système BF60-B	80
Figure 4.7	Perméabilités en fonction du temps pour le système BF60-B	81
Figure 4.8	Évolution du rapport des gradients pour le système BF60-B (essais 3 et 4)	82
Figure 4.9	Distribution des pressions dans le sol B pour le système BF60-B	82
Figure 4.10	Tassement du sol F en fonction du temps (essais 8 et 9) pour le système BF60-F.....	83

Figure 4.11	Tassement du sol F en fonction du temps pour les systèmes BF60-F (essai 10) et BSF8-I (essai 11).....	85
Figure 4.12	Évolution du rapport des gradients pour les systèmes BF60-F (essai 10) et BSF8-F (essai 11).....	85
Figure 4.13	Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes BF60-F et BSF8-F.....	86
Figure 4.14	Distribution des pressions dans le sol F pour les essais no. 10 et 11.....	87
Figure 4.15	Tassement du sol I en fonction du temps pour les systèmes BSF8-I (essai 14) et NTP-I (essai 16).....	90
Figure 4.16	Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes BSF8-I et NTP-I.....	91
Figure 4.17	Évolution du rapport des gradients pour les systèmes BSF8-I (essai 14) et NTP-I (essai 16).....	92
Figure 4.18	Distribution des pressions dans le sol I pour les essais no. 14 et 16.....	92
Figure 4.19	Influence du rapport de rétention sur la masse de sol passant les géotextiles.....	97
Figure 4.20	Perméabilité des systèmes pour les sols I et F.....	99
Figure 4.21	Influence de l'intensité du confinement et du gradient hydraulique sur la stabilité du système BF60-F.....	100
Figure 4.22	Perméabilités du système BF60-B et du sol B selon la direction de l'écoulement unidirectionnel.....	102
Figure 4.23	Influence de la stabilité interne du sol sur la masse passante.....	103
Figure 4.24	Perméabilités des systèmes selon la stabilité interne du sol.....	105
Figure 4.25	Masses de sol passant le géotextile NTT pour les sols B et F.....	106
Figure 4.26	Perméabilités des systèmes selon la forme des particules du sol.....	107
Figure 4.27	Influence du nombre de constriction sur le comportement en filtration des géotextiles non tissés.....	108
Figure 4.28	Influence du confinement sur la rétention des sols.....	109
Figure 4.29	Intervalle acceptable du rapport de rétention selon la stabilité interne du sol.....	113

Figure 4.30 Proposition d'un critère de rétention en conditions d'écoulement**Alterné pour les sols pulvérulents 114**

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AOS	« Apparent Opening Size », obtenu par tamisage à sec
ASTM	« American Society for Testing and Materials »
C_B	coefficient d'étalement du sol
C_c	coefficient de courbure
C_u	coefficient d'uniformité
C_x	taille d'une constriction correspondant à x% de passant
C_0	constriction la plus petite d'un géotextile
C_{100}	constriction la plus grande d'un géotextile
d_I	diamètre indicatif du sol
D_R	poids spécifique des grains
d_x	diamètre des grains correspondant à x% de passant
e	indice des vides
FOS	« Filtration Opening Size », obtenu par tamisage hydrodynamique
GR	rapport des gradients
GR_{ASTM}	rapport des gradients selon l'ASTM
GR_{SAGEOS}	rapport des gradients selon SAGEOS
H	hauteur ou longueur de l'échantillon de sol
ΔH	tassement du sol
Δh	différence de charge
i	gradient hydraulique
i_{i-y}	gradient hydraulique mesuré entre les positions x et y
I_P	indice de plasticité
k	perméabilité
k_B	perméabilité de la base
k_F	perméabilité du filtre

$k_{interface}$	perméabilité de l'interface géotextile-sol
k_{sol}	perméabilité du sol
$k_{système}$	perméabilité du système géotextile-sol
L	longueur de l'échantillon de sol
m	nombre de constriction
M	masse de sol sec déposé sur le géotextile par unité de surface
M_P	masse de sol passant le géotextile par unité de surface
$M_P \text{ inf.}$	masse de sol passant le géotextile inférieur par unité de surface
$M_P \text{ sup.}$	masse de sol passant le géotextile supérieur par unité de surface
$M_P \text{ tot.}$	masse totale de sol passant les géotextiles par unité de surface
M_T	masse de sol coincé dans le géotextile par unité de surface
$M_T \text{ inf.}$	masse de sol coincé dans le géotextile inférieur par unité de surface
$M_T \text{ sup.}$	masse de sol coincé dans le géotextile supérieur par unité de surface
n	porosité
O_F	ouverture de filtration du géotextile
O_x	ouverture des pores correspondant à x% de passant
O_0	ouverture la plus petite des pores d'un géotextile
O_{100}	ouverture la plus grande des pores d'un géotextile
Q	débit
R_R	rapport de rétention
S	surface perpendiculaire à l'écoulement
T_g	épaisseur du géotextile
V	volume
W_P	masse du sol qui a traversé le géotextile
W_T	masse de sol retenu dans le géotextile
μ	masse surfacique du géotextile
$\rho_{d \text{ comp}}$	masse volumique comprimée du sol sec
$\rho_{d \text{ init}}$	masse volumique initiale du sol sec

σ'	contrainte effective
σ_{conf}	contrainte de confinement
ω	teneur en eau

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Propriétés mesurées des géotextiles F60 et SF8 de Bidim.....	124
Annexe B	Application de la contrainte de confinement sur les échantillons	127
Annexe C	Description du comportement en filtration des systèmes géotextile-sol étudiés.....	139

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

L'utilisation des géosynthétiques en génie civil remonte aux années 1950. À cette époque, ils étaient principalement utilisés dans les ouvrages afin de contrôler l'érosion et remplaçaient parfois les filtres granulaires. À la fin des années 60, leur utilisation connaît une croissance et une diversification, surtout en Europe et aux États-Unis. Utilisés pour les routes non revêtues et les digues en terre, ces produits synthétiques remplissent alors de nouvelles fonctions, comme celles de séparateur et de matériel de renforcement. Aujourd'hui, les géotextiles sont utilisés et reconnus à travers le monde.

Au cours de leur demi-siècle d'existence, de nouveaux types de géotextiles ont fait leur apparition et de nouvelles fonctions leur ont été désignées. Cependant, leur comportement complexe en filtration, leur interaction avec les sols et les conditions d'écoulement font que le choix d'un géotextile pour une application particulière doit être étudié attentivement. Il existe en effet une distinction importante entre un écoulement unidirectionnel et un écoulement alterné. Sous un écoulement unidirectionnel, une structure avec pontage est induite dans la couche de sol adjacente au géotextile. Sous l'influence d'un écoulement bidirectionnel, ce réseau peut ne pas se développer parce que l'alternance de la direction de l'écoulement agit pour déstabiliser un tel réseau.

Afin de mieux comprendre le comportement en filtration d'un système géotextile-sol soumis à des conditions d'écoulement alterné, cette étude présente dans un premier

temps les critères généraux de sélection des géotextiles et les effets d'un écoulement alterné. Dans un second temps, nous expliquons les comportements en filtration d'un système composé d'un géotextile et d'un sol. Le phénomène de suffosion et la stabilité interne des sols sont également décrits. Par la suite, nous révisons l'influence du rapport de rétention et les critères de filtre établis pour des conditions d'écoulement unidirectionnel et d'écoulement alterné.

Pour évaluer la compatibilité d'un sol et d'un géotextile, cette étude s'appuie sur les résultats d'une procédure expérimentale inspirée du « Test du rapport des gradients » de l'ASTM. Cinq sols et cinq géotextiles ont été utilisés pour étudier le comportement en filtration en conditions d'écoulement alterné. Les essais mettent en évidence l'influence du rapport de rétention, de la direction et de l'intensité du gradient hydraulique ainsi que du confinement sur l'équilibre des systèmes géotextile-sol. La comparaison des résultats montre aussi l'effet de la stabilité interne des sols et de la forme de leurs particules sur la rétention des sols par des géotextiles non tissés. Par la suite, nous vérifions la validité des critères théoriques existants et nous proposons un nouveau critère de rétention des sols en conditions d'écoulement alterné. Le rapport présente finalement la conclusion de cette étude et les recommandations à envisager pour améliorer la compréhension du comportement en filtration des géotextiles soumis à un écoulement alterné.

Mais d'abord, ce chapitre traite des critères généraux de sélection des géotextiles et de l'influence d'un écoulement alterné sur leur comportement en filtration.

1.1 Critères généraux de sélection d'un géotextile

Pour atteindre leur performance optimale, les géotextiles employés comme filtres doivent répondre à deux conditions contradictoires : retenir les particules de sol tout en permettant l'écoulement de l'eau. Le filtre doit donc entraver faiblement l'écoulement de

l'eau et doit aussi prévenir la destruction de la structure du sol par érosion. Plusieurs auteurs ont étudié et effectué une revue de ces principes pour les systèmes géotextile-sol soumis à un écoulement unidirectionnel. Ce sont notamment Christopher et Fischer (1992) et Giroud (1996). Les cinq critères de sélection d'un géotextile respectant ces principes sont les critères de rétention, de perméabilité, de durabilité et de résistance au colmatage et aux procédures d'installation.

Le critère de rétention exige que les ouvertures du filtre doivent être suffisamment petites pour permettre au sol de développer une structure stable à long terme (figure 1.1) et prévenir le lessivage important des plus petites particules. Néanmoins, ces ouvertures doivent être suffisamment grandes pour ne pas provoquer d'accumulation des particules fines à l'interface du filtre.

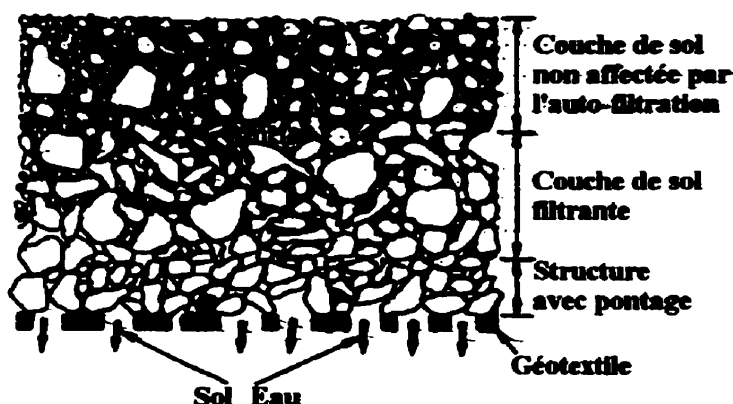


Figure 1.1 Développement d'une structure stable (adaptée de Lawson, 1982)

Le critère de perméabilité constitue la deuxième contrainte et exige que le géotextile permette au fluide de passer sans restreindre l'écoulement. Pour respecter ce critère, le géotextile ne doit pas occasionner de perte de charge et sa présence ne doit pas occasionner de diminution significative du débit du système. Cependant, la satisfaction de ces deux critères n'assure pas nécessairement le bon fonctionnement du filtre, puisque le système pourrait ne pas vérifier le critère de résistance au colmatage (Carroll, 1983).

Le colmatage interne est le résultat du piégeage des particules dans la structure du géotextile et le colmatage externe résulte de la formation d'une couche moins perméable à l'interface du géotextile, due à l'accumulation des grains du côté amont du filtre (figure 1.2). Le colmatage externe est essentiellement lié à la stabilité interne du sol à retenir (voir section 2.1.2). Le géotextile doit de plus résister aux procédures d'installation (ou « survivability criteria » en anglais). Enfin, le critère de durabilité s'assure du maintien dans le temps des propriétés mécaniques et hydrauliques des géotextiles, telles leur résistance en traction, leur rigidité et leur conductivité hydraulique.

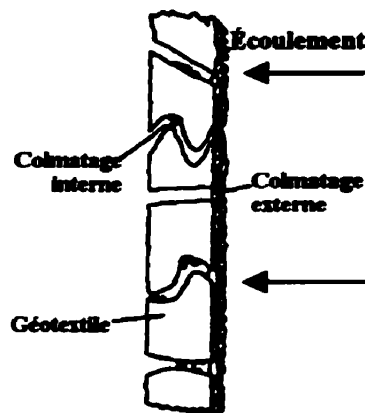


Figure 1.2 Colmatage interne et externe d'un géotextile
(adaptée de Christopher et Fischer, 1992)

1.2 Influence d'un écoulement alterné

Les berges des rivières et les côtes des mers sont soumises à l'action des vagues causées par le vent, les marées ou le passage des bateaux. Pour les protéger de l'érosion, des revêtements couvrent habituellement le talus des voies navigables et le rivage des mers. Dans ces structures de protection côtières, un régime d'écoulement permanent n'est pas atteint puisque le niveau d'eau varie dans le temps sous l'action des vagues. Ce mouvement d'avancement et de retrait des vagues impose des gradients hydrauliques alternés et élevés qui peuvent causer des pressions de soulèvement nuisibles au

revêtement ou le lessivage du sol du banc de protection à travers le revêtement adjacent (Ingold, 1994). Pour cette raison, des géotextiles sont utilisés dans ce type d'applications entre le sol de la digue et le revêtement pour contrôler les effets de l'alternance des gradients hydrauliques (figure 1.3). La fonction principale de ces géotextiles est la filtration et la séparation des matériaux constitue leur rôle secondaire (Frobel *et al.*, 1987).

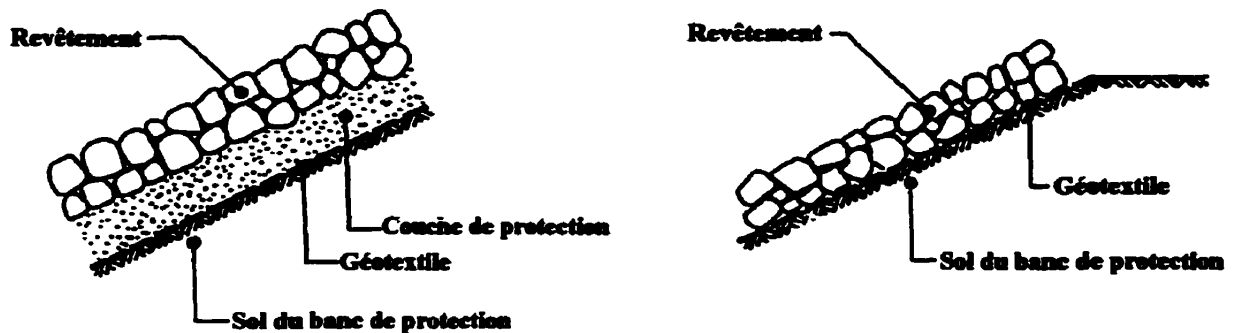


Figure 1.3 Utilisation des géotextiles dans les revêtements des structures côtières (adaptée de Cazzuffi *et al.*, 1996)

Une distinction importante existe entre un écoulement unidirectionnel et un écoulement alterné dans les critères de filtration (Fannin et Hameiri, 1999). Sous un écoulement unidirectionnel, une structure avec pontage est induite dans la couche de sol adjacente au géotextile : une zone filtrante se développe progressivement à l'intérieur du sol qui est en fait un filtre granulaire inversé. Ce réseau peut ne pas se développer sous l'influence d'un écoulement bidirectionnel, où le changement de direction de l'écoulement et les forces qui y sont associées agissent pour déstabiliser un tel réseau. Certains auteurs attribuent cette déstabilisation à la variation de la contrainte de confinement qui peut provoquer une liquéfaction partielle du sol. Ce concept, nommé battement du géosynthétique (ou « fabric flapping » en anglais), introduit la possibilité pour le géotextile de se déplacer librement par rapport au sol sous-jacent sous l'effet de charges cycliques (Cazzuffi *et al.*, 1996). Le sol n'est alors plus confiné et se liquéfie sous l'action de l'écoulement de l'eau (figure 1.4).

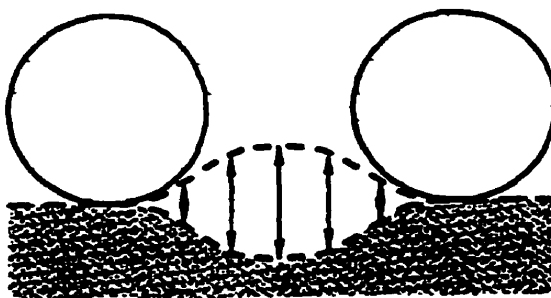


Figure 1.4 Battement du géotextile ou « Geotextile flapping »
(adaptée de Cazzuffi *et al.*, 1996)

D'autres chercheurs ont plutôt assimilé un comportement semblable au tamisage aux interfaces géotextile-sol soumis à un écoulement turbulent et cyclique (Giroud, 1982). Cela signifie que les particules qui sont plus petites que les ouvertures du filtre et qui ne sont pas confinées dans la structure primaire du sol passent à travers le filtre.

Ces différents effets d'un écoulement alterné sur le comportement à l'interface d'un géotextile en contact avec un sol mettent en évidence le fait que les critères de filtre conventionnels ou unidirectionnels ne peuvent pas s'appliquer dans ce cas (Oumeraci, 1996; Ingold, 1994). Par conséquent, l'ouverture de filtration du géotextile requise pour assurer la rétention d'un sol soumis à écoulement alterné peut être plus petite que celle pour un écoulement unidirectionnel.

CHAPITRE 2

MÉCANISMES ET CRITÈRES DE FILTRATION

Deux niveaux de critères peuvent être utilisés pour la sélection d'un géotextile en filtration : le critère théorique et le critère de performance. Le critère théorique constitue un critère général et universel qui s'appuie sur le fait que l'ouverture de filtration O_F du géotextile soit inférieure à la taille des particules d_I qui favorisent la rétention du sol et un minimum de lessivage. Le rapport entre ces deux quantités, le rapport de rétention R_R , doit être voisin de l'unité pour l'obtention d'un comportement acceptable. Quant au critère de performance, il permet d'étudier la compatibilité d'un sol en contact avec un géotextile. Ce critère étant valide uniquement pour chaque combinaison de matériaux, on ne peut appliquer de règle universelle pour ce critère. Cependant, les tests de performance permettent d'observer directement le comportement en filtration du système. Ce chapitre explique dans un premier temps les comportements en filtration d'un système composé d'un géotextile et d'un sol. Par la suite, le phénomène de suffosion et une méthode d'évaluation de la stabilité interne des sols sont décrits. Finalement, ce chapitre présente une revue des critères de filtre en conditions d'écoulement unidirectionnel et alterné ainsi que l'évolution du critère de performance.

2.1 Mécanismes de filtration

Sous l'influence de forces d'écoulement, un réarrangement des particules au niveau de l'interface géotextile-sol et une modification de la structure et/ou de la granulométrie du

sol à l'amont du filtre peuvent survenir. Trois types de comportement en filtration ont été proposés pour expliquer ces phénomènes : le lessivage, la structure avec pontage et le colmatage. Ces comportements sont influencés par le rapport de rétention R_R , le profil de la courbe granulométrique et la stabilité interne du sol (suffosion).

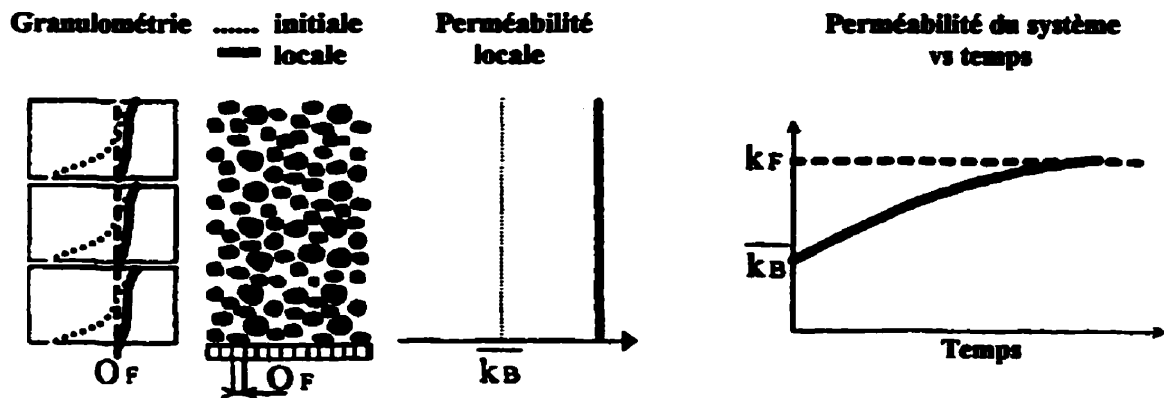
2.1.1 Comportements en filtration

L'écoulement de l'eau dans un sol provoque le déplacement des particules. Le réarrangement de ces particules au niveau de l'interface du sol et du géotextile peut prendre la forme de trois types de comportements en filtration. Plusieurs auteurs ont étudié ces phénomènes : Austin *et al.* (1997), Lafleur (1999) et Rollin et Lombard (1988). Les types de comportement en filtration observés par ces auteurs sont le lessivage, la formation d'une structure stable à l'interface avec pontage ou formation d'arches et l'auto-colmatage avec les sols suffosifs. Un sol est suffosif lorsque ses particules fines peuvent se déplacer à l'intérieur de la structure formée par les particules grossières (voir section 2.1.2). Ce type de sol est peu fréquent dans la nature. L'auto-colmatage et le lessivage sont des phénomènes indésirables qui peuvent provoquer respectivement un drainage difficile et un affaissement ou des cavités ou des cavernes. La formation d'arches mène à l'équilibre du système.

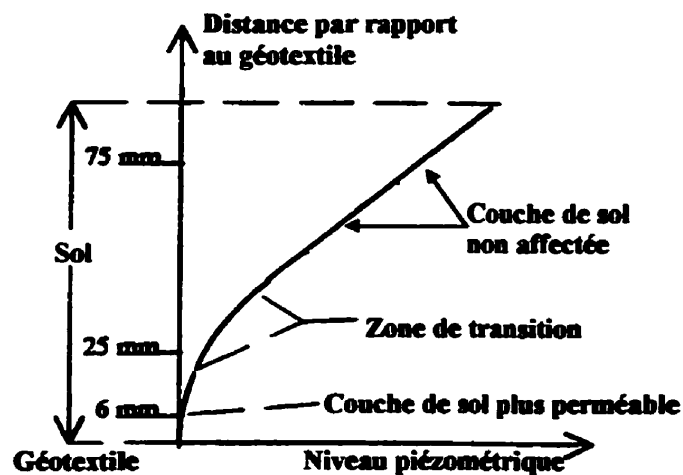
2.1.1.1 Lessivage

On désigne par lessivage le passage d'une quantité inacceptable de sol à travers le filtre, ce qui entraîne une condition d'instabilité. Ce phénomène peut se produire lorsque les ouvertures des pores du filtre sont trop grandes par rapport à la dimension des particules de sol. Le rapport de rétention R_R est alors beaucoup plus grand que l'unité. Le lessivage des particules fines du sol provoque d'abord l'augmentation de la perméabilité locale du sol directement en contact avec le géotextile et occasionne l'augmentation

graduelle de la perméabilité du système en fonction du temps. À l'équilibre, la perméabilité du système tend vers la perméabilité du filtre k_F dans le cas des sols suffosifs ou, vers l'infini, dans le cas d'un lessivage complet. La figure 2.1 montre les changements de la granulométrie du sol et de la perméabilité du système lorsqu'un lessivage survient. Selon Austin *et al.* (1997), la distribution typique de la charge hydraulique dans un sol lessivé présente l'allure illustrée à la figure 2.1 b.



a) Variation de la granulométrie du sol et de la perméabilité du système
(tirée de Lafleur, 1999)



b) Distribution de la charge hydraulique dans le sol (adaptée de Austin *et al.*, 1997)

Figure 2.1 Lessivage des particules de sol

Il faut noter que nous attribuons plutôt cette distribution à une structure avec pontage puisque cette figure indique la présence d'une zone de sol non affectée par l'écoulement et que la zone lessivée de ses particules fines se limite à la couche adjacente au géotextile. En effet, lorsqu'un lessivage des particules d'un sol survient, toute la masse de sol est affectée par ce phénomène.

2.1.1.2 Structure avec pontage ou formation d'arches

Une structure avec pontage s'établit lorsque le géotextile provoque à l'interface géotextile-sol la formation d'une couche filtrante, c'est-à-dire que le sol se filtre. Ce mécanisme d'auto-filtration se décrit ainsi. Sous l'influence d'un gradient hydraulique, les particules plus petites que l'ouverture de filtration du géotextile et situées à l'interface du sol et du filtre sont évacuées du système. Pendant que ces particules expulsées du sol sont transportées à travers le géotextile, les particules plus grossières migrent vers le géotextile pour être éventuellement arrêtées par ce dernier. Ces grains grossiers sont graduellement mis en contact les uns sur les autres et arrêtent à leur tour des particules plus petites, ces dernières entravant également la migration de particules plus fines. C'est ainsi, qu'à l'intérieur de la couche du sol adjacente au filtre, les particules grossières retenues filtrent des particules plus fines, qui filtrent à leur tour des particules plus fines qu'elles-mêmes. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la migration des particules de sol cesse. Le sol a alors acquis une stabilité structurale suffisante pour pouvoir permettre à l'eau de s'écouler sans entraîner de particules.

Avec le lessivage des particules fines dans la zone inférieure du sol, la formation d'arches augmente la perméabilité locale dans cette couche. L'épaisseur de cette couche inférieure de sol est fonction du rapport de rétention R_R et du coefficient d'étalement de la base C_B (Lafleur *et al.*, 1989). À l'équilibre, la perméabilité du système demeure constante. Elle est inférieure à celle du filtre k_F mais supérieure à celle du sol

initialement. La figure 2.2 illustre cette variation de la perméabilité et la structure du sol à l'amont du filtre lors de la formation d'une structure avec pontage. Ce type de structure peut se former lorsque la valeur du rapport de rétention R_R est voisine de l'unité. Le diamètre d'ouverture de filtration O_F a une valeur semblable à celle du diamètre indicatif du sol d_i .

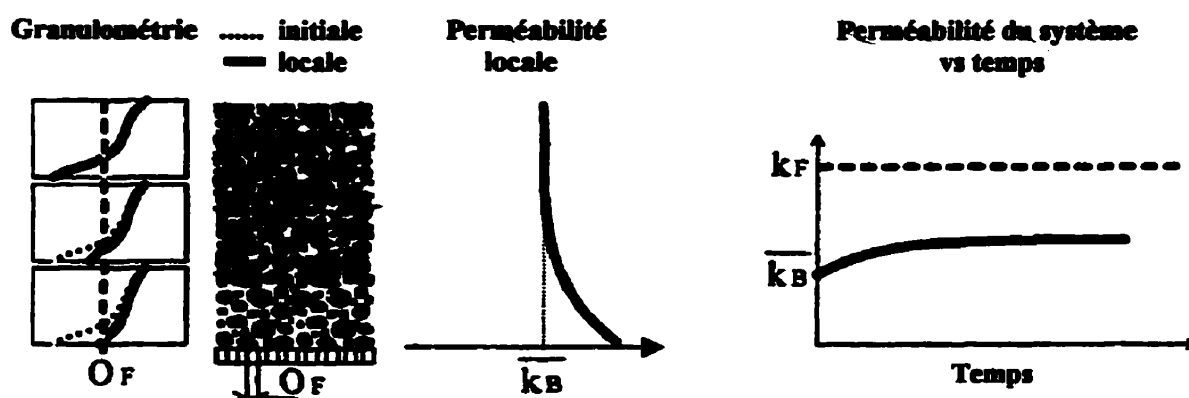


Figure 2.2 Structure avec pontage du sol (tirée de Lafleur, 1999)

2.1.1.3 Auto-colmatage avec les sols suffosifs

L'auto-colmatage se produit lorsque les pores du géotextile sont trop petits pour permettre aux particules fines du sol suffosif de traverser le filtre. Les particules fines d'un sol suffosif peuvent se déplacer entre les particules plus grossières. Ces plus petits grains mobiles sont alors arrêtés et tassés à l'interface amont ou à l'intérieur du filtre. Le phénomène impliqué est désigné par les mécanismes d'obstruction (colmatage interne) et d'accumulation des grains à l'interface du géotextile (colmatage externe). Un colmatage interne ou colmatage de la structure du géotextile provoque une diminution de la perméabilité du système (Blond, 1995). Ce phénomène résulte de l'accumulation de particules du sol dans le géotextile (figure 2.3). Le colmatage externe ou le colmatage de surface résulte de l'accumulation des particules fines du sol à l'amont du géotextile. La zone supérieure du sol est d'abord lessivée de ces petites particules qui se déplacent dans

la zone intermédiaire pour s'agglomérer finalement dans la zone inférieure (figure 2.4). Elles forment à cet endroit une couche de sol beaucoup moins perméable et la perte de charge à cet endroit sera plus élevée. Il en résulte une diminution de la perméabilité du système géotextile-sol avec le temps.

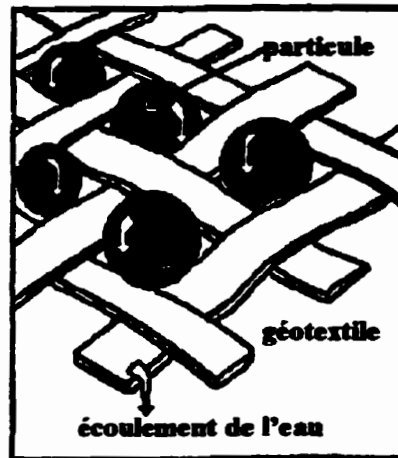


Figure 2.3 Colmatage interne du géotextile (adaptée de Rollin et Lombard, 1988)

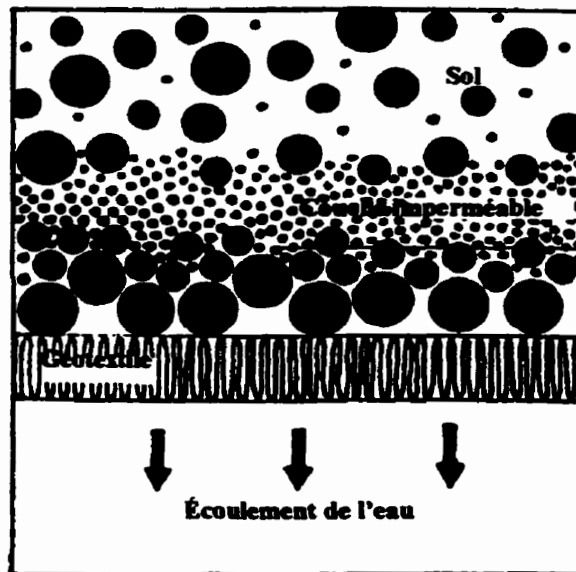
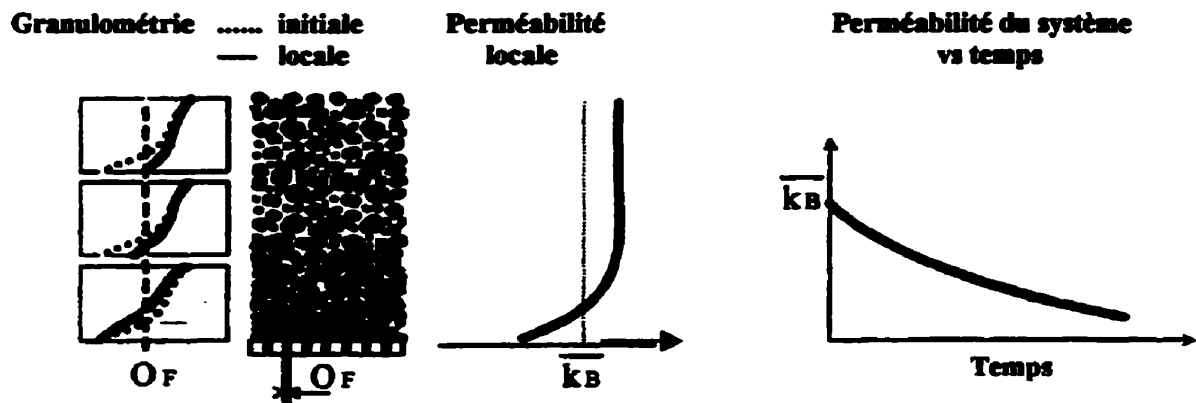
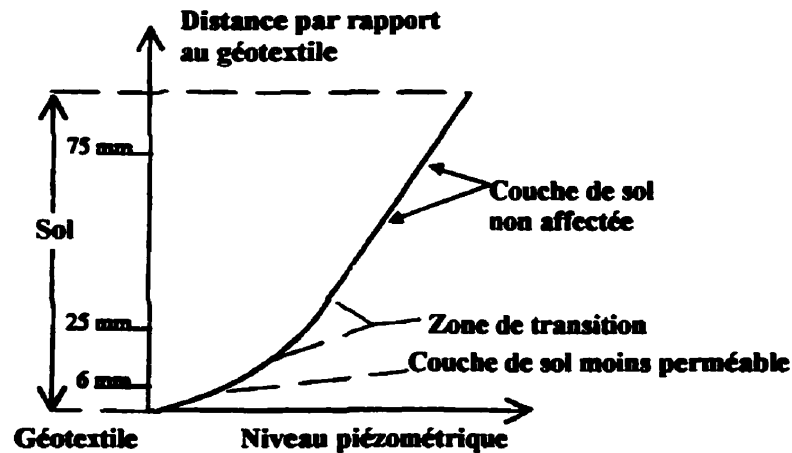


Figure 2.4 Colmatage externe du géotextile (adaptée de Rollin et Lombard, 1988)

La distribution granulométrique et la perméabilité des diverses couches de sol lors de l'auto-colmatage des sols suffosifs sont illustrées à la figure 2.5. Ce comportement d'auto-colmatage a tendance à se produire lorsque l'ouverture de filtration du filtre est plus petite que les plus petites particules de sol, le rapport de rétention étant largement inférieur à l'unité.



a) Variation de la granulométrie du sol et de la perméabilité du système
(tirée de Lafleur, 1999)



b) Distribution de la charge hydraulique dans le sol
(adaptée de Austin *et al.*, 1997)

Figure 2.5 Auto-colmatage avec les sols suffosifs

2.1.2 Stabilité interne des sols

La stabilité interne d'un sol résulte de sa capacité à prévenir la migration de ses propres particules fines sous l'effet de forces perturbatrices telles que l'écoulement ou la vibration. Kenney et Lau (1985) ont étudié ce phénomène en effectuant des essais de percolation. Leurs travaux ont permis d'établir une méthode d'évaluation de la stabilité interne des sols et leurs principales conclusions sont présentées ci-dessous.

Dans les pores de la structure d'un sol pulvérulent et sans cohésion, on retrouve des particules libres qui, sous l'influence d'un écoulement, peuvent être mobilisées. Les principaux facteurs affectant la mise en transport de ces particules sont la forme de la courbe granulométrique du sol, sa porosité ou sa masse volumique et l'intensité des forces perturbatrices. Ainsi, un système soumis à des contraintes de confinement importantes est moins susceptible à l'érosion de ses particules, le confinement favorisant la formation d'arches à l'interface géotextile-sol et assurant un bon contact entre le géotextile et le sol (Brochier, 1984). Les sols dont la granulométrie est uniforme sont stables quelle que soit leur masse volumique ou l'intensité de la percolation.

De plus, le potentiel à l'instabilité interne augmente avec l'étalement de la courbe granulométrique et avec la puissance des forces appliquées. Dans un sol instable ou suffosif, les petites particules libres peuvent se déplacer à l'intérieur des vides de la structure formée par les particules grossières. Ces sols comportent habituellement une granulométrie étalée dans la portion inférieure de leur courbe granulométrique.

Kenney et Lau (1985) ont proposé une méthode graphique pour évaluer le risque d'instabilité des grains des sols à partir de leur courbe granulométrique. Pour chaque diamètre de particules fines du sol, ils font correspondre le pourcentage de particules de diamètre inférieur à un diamètre D , appelé F , à un pourcentage de particules dont le

diamètre est compris entre D et $4D$, appelé H . Un graphe illustrant la relation de H en fonction de F est ensuite tracé (figure 2.6). Cette méthode d'évaluation de la stabilité interne provient de l'observation suivante : une carence en particules de diamètre compris entre D et $4D$ permet aux particules dont la taille est inférieure à D de circuler dans la structure constituée des particules de diamètre supérieur à D . Ainsi, une valeur de H faible par rapport à celle de F est indicatrice de l'instabilité interne du sol.

Les travaux de Loebotsjkov en 1969 et les résultats de leurs essais ont permis à Kenney et Lau (1986) de définir la droite limite $H = F$. Un sol dont la courbe de stabilité de H en fonction de F passe sous cette droite limite présente un potentiel d'instabilité tandis qu'une courbe de stabilité située au-dessus de cette limite caractérise un sol intrinsèquement stable. Cependant, ces considérations ne sont applicables que pour les particules fines du sol. Les résultats de Kenney et Lau ont permis d'établir les valeurs limites de F pour lesquelles l'emplacement de la courbe de stabilité par rapport à la droite limite $H = F$ doit être considéré :

- pour les sols à granulométrie uniforme ($C_u < 3$) : F critique entre 0 et 0,3;
- pour les sols à granulométrie étalée ($C_u > 3$) : F critique entre 0 et 0,2.

Ces valeurs critiques de F sont obtenues en considérant que la masse totale d'un sol est constituée de la fraction occupée par la structure primaire, f_p , et de la fraction des particules fines à l'intérieur des vides de la structure primaire, f_i , de sorte que $f_p + f_i = 1$. Le terme f_p peut être exprimé en fonction de l'indice des vides de la structure primaire, e_p , et de la porosité moyenne des particules fines à l'intérieur des vides de la structure primaire, n_i , selon la relation suivante :

$$f_p \geq \frac{1}{1 + e_p(1 - n_i)} \quad (2.1)$$

Pour les sols à granulométrie uniforme, le contenu maximum de particules fines à l'intérieur des vides de la structure primaire compacte est donc inférieur à 30% ($e_p \approx 0,7$ et $n_i \approx 0,4$). Pour les sols à granulométrie étalée, ce pourcentage est inférieur à 20% ($e_p \approx 0,4$ et $n_i \approx 0,4$). La figure 2.6 illustre la courbe de stabilité de Kenney et Lau et présente les divers paramètres nécessaires à l'évaluation de la stabilité interne des sols. Un sol peut montrer un potentiel d'instabilité si seulement une partie de sa courbe de stabilité se situe sous la droite limite de $H = F$ dans la zone critique de F .

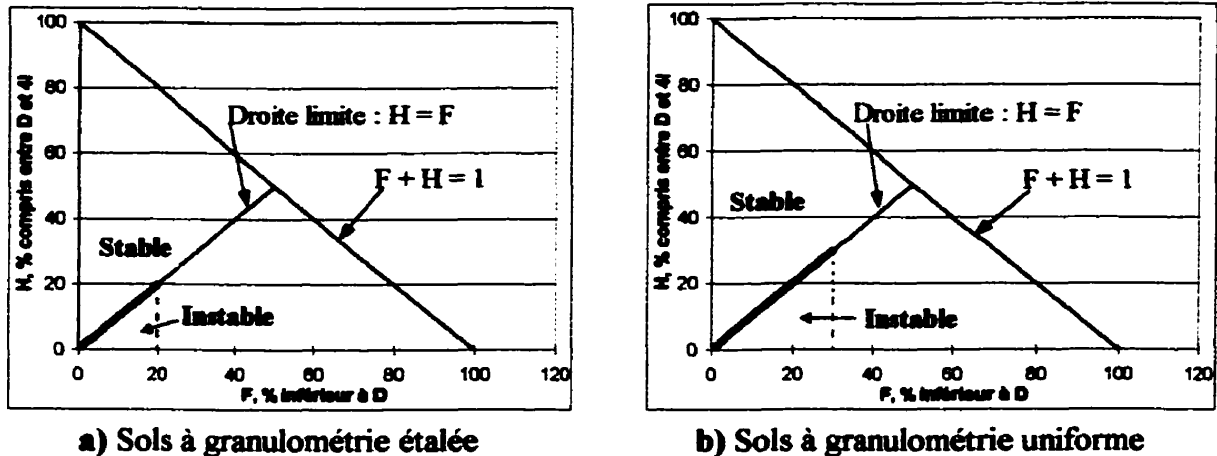


Figure 2.6 Évaluation de la stabilité interne des sols selon Kenney et Lau (1985 et 1986)

2.2 Critères de filtre en conditions d'écoulement unidirectionnel

Les premiers travaux sur l'établissement d'un critère de filtre sont l'œuvre de Terzaghi en 1922. Ils concernaient les sols uniformes. Depuis ce temps, plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce sujet et sur la filtration complexe des sols non uniformes. Ces travaux cernent davantage l'influence de la courbe granulométrique du sol et de l'ouverture de filtration du géotextile sur le comportement en filtration de ce système géotextile-sol. Cette section présente d'abord l'influence d'un paramètre nommé rapport de rétention

établi pour un système composé d'un géotextile et d'un sol soumis à des conditions d'écoulement unidirectionnel. En plus de l'ouverture de filtration, une autre propriété des géotextiles intervient sur leur comportement en filtration : le nombre de constriction qui est par la suite expliqué.

2.2.1 Influence du rapport de rétention

Des essais ont montré que les caractéristiques granulométriques des sols et l'ouverture de filtration des géotextiles intervenaient dans le mécanisme de filtration d'un système géotextile-sol. Le rapport de rétention R_R , proposé par Lafleur *et al.* (1989), tient compte de ces caractéristiques et il est défini par le quotient du diamètre d'ouverture de filtration du géotextile O_F sur un diamètre indicatif du sol d_I :

$$R_R = \frac{O_F}{d_I} \quad (2.2)$$

D'abord, l'influence des dimensions du sol d_{10} et d_{85} et de l'ouverture de filtration du géotextile sur le rendement à long terme du système géotextile-sol a été étudiée par un groupe de chercheurs. Rollin *et al.* (1989) ont montré que la masse de sol passant le géotextile et le débit du système sont particulièrement sensibles à ces propriétés du sol et du géotextile. Suite à ces travaux, la notion de taille indicatrice des sols a été approfondie par ce même groupe de chercheurs. Lafleur *et al.* (1989) ont montré que la taille des particules qui favorisent la rétention des sols sans cohésion d_I correspond sur la figure 2.7 à

- $d_I = d_{85}$ pour les sols uniformes;
- $d_I = d_{50}$ dans le cas d'un sol à granulométrie étalée et linéaire;
- $d_I = d_{30}$ pour un sol ayant une granulométrie concave vers le haut;
- $d_I = d_G$, d_G étant le diamètre de la portion inférieure de la discontinuité de la courbe granulométrique d'un sol à granulométrie discontinue.

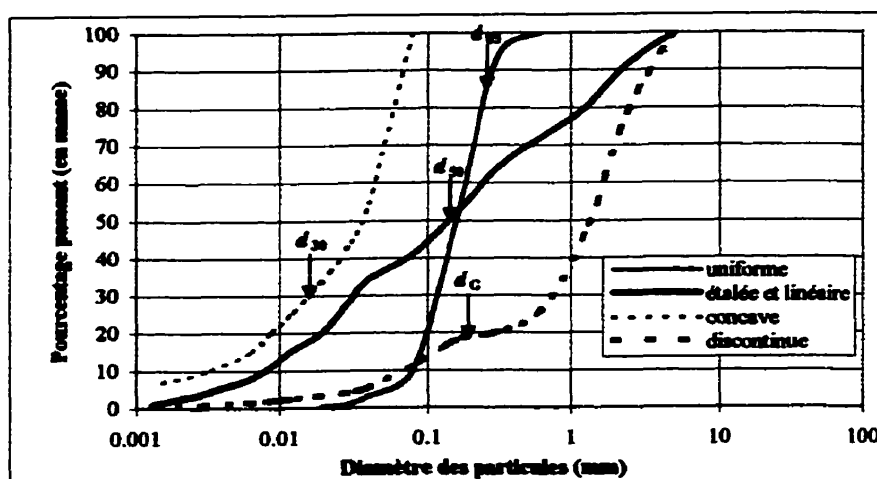


Figure 2.7 Profils de courbe granulométrique

Afin d'étudier l'impact du profil de la courbe granulométrique sur la migration interne des particules fines d'un sol, un modèle théorique a également été proposé par Lafleur *et al.* (1989) pour évaluer la masse de sol passant le géotextile et l'épaisseur de la couche affectée par le mécanisme d'auto-filtration. Cette étude a porté sur des sols sans cohésion et à granulométrie étalée. La figure 2.8 illustre les paramètres considérés dans ce modèle : la quantité de particules expulsées du système, M , le tassement ΔH du sol résultant de ce lessivage et l'épaisseur de la couche de sol restructuré, H_{SF} .

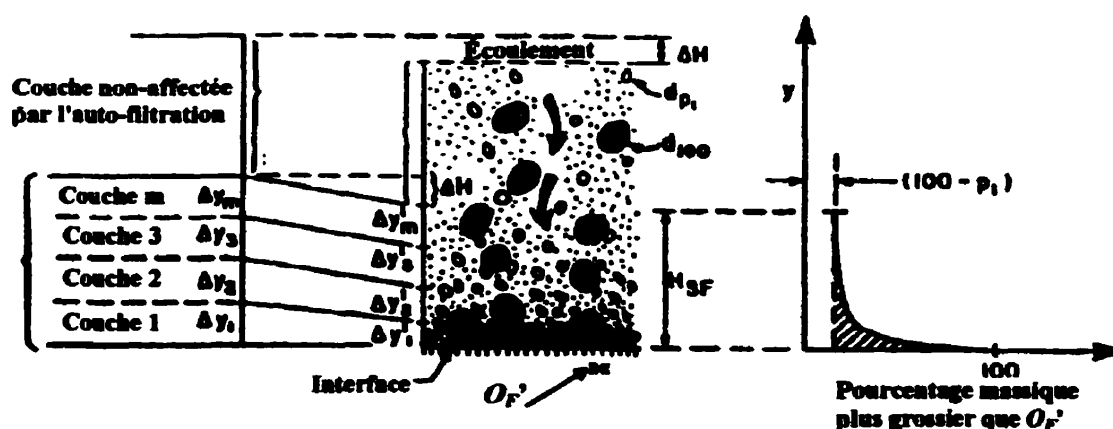


Figure 2.8 Modèle proposé par Lafleur *et al.* (1989) pour évaluer la migration interne des fines d'un sol sans cohésion et à granulométrie étalée

Les résultats des essais en laboratoire montrent que les deux variables M et H_{sf} sont affectées par le profil de la courbe granulométrique et le coefficient d'étalement du sol C_B . Ce coefficient d'étalement est représenté par le quotient de l'ouverture de filtration réelle du géotextile O_F' par la taille minimale des particules d_0 . Les données ont également permis de quantifier la masse de sol passant le géotextile délimitant la stabilité des systèmes étudiés. Cette quantité a été évaluée à 2 500 g/m².

De plus, des études ont confirmé l'importance de la valeur du rapport de rétention R_R sur le comportement en filtration d'un géotextile. En étudiant le réarrangement des particules au niveau de l'interface géotextile-sol, Rollin et Lombard (1988) et Lafleur (1999) ont observé trois types de comportement en filtration : le lessivage, la formation d'une structure stable à l'interface et l'auto-colmatage avec certains sols (section 2.1.1).

En analysant l'occurrence des comportements en filtration en fonction du rapport de rétention, Lafleur (1999) a établi un intervalle acceptable pour la valeur de R_R . Pour les combinaisons de géotextiles et de sols utilisées, un comportement en filtration acceptable des géotextiles a été obtenu lorsque :

- $R_R < 1$ pour un sol stable;
- $1 < R_R < 5$ pour un sol suffosif.

Ainsi, cet auteur a proposé un nouveau critère de rétention qui tient compte de l'étalement de la granulométrie et de la stabilité interne du sol. Ce critère est résumé à la figure 2.9.

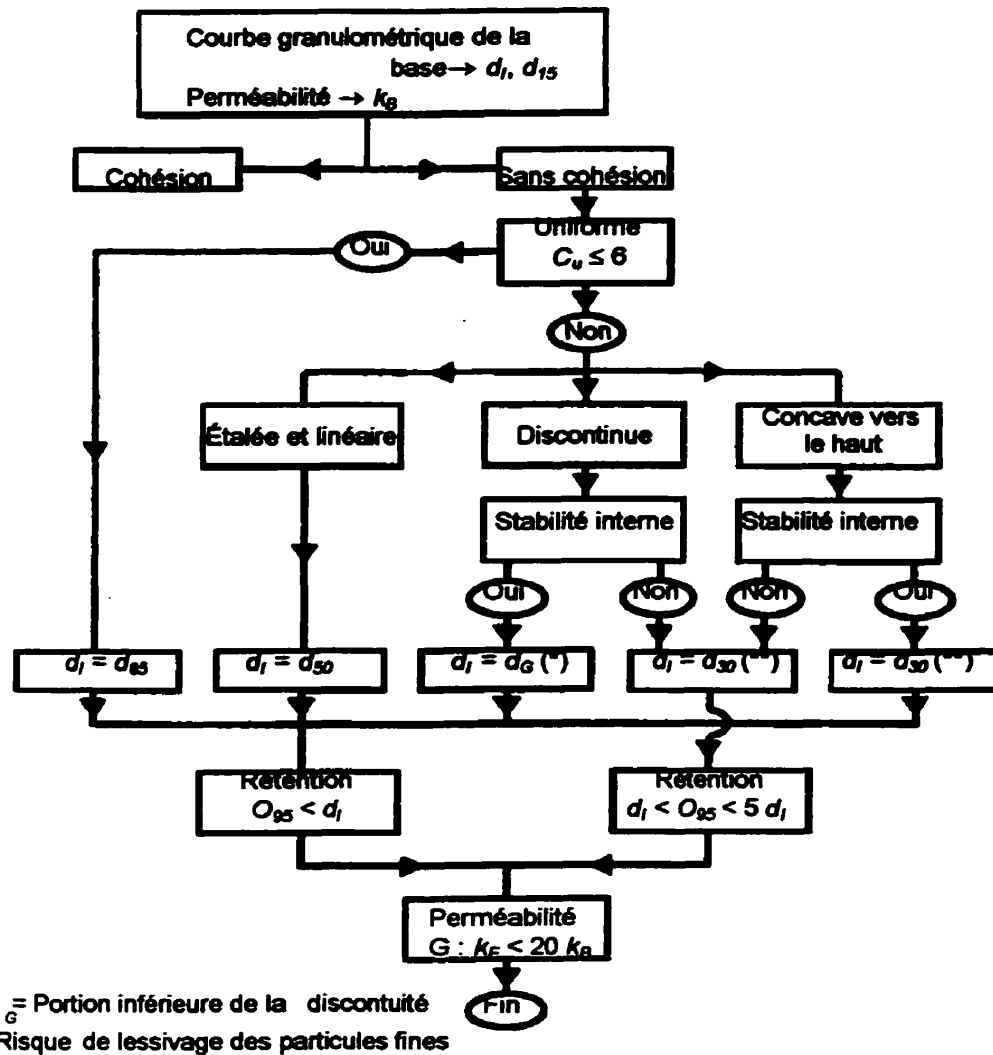


Figure 2.9 Critères de sélection d'un géotextile en filtration
(adaptée de Lafleur, 1999)

Lafleur (1998) a également mis en évidence la portée du rapport de rétention sur la masse de sol passant le géotextile, M_P . Une relation expérimentale a été identifiée entre ces deux paramètres. Elle est linéaire pour les sols à granulométrie étalée tandis qu'elle présente un coude autour de R_R égal à l'unité pour les sols uniformes. Il a démontré de plus que la porosité affectait le réarrangement des particules du sol près de l'interface du géotextile. Une porosité du géotextile faible entraîne l'expulsion d'une quantité moindre

de particules puisqu'il y a une plus grande surface solide pour retenir les particules du sol. La formation d'une structure avec pontage et la rétention du sol sont alors favorisées.

2.2.2 Influence du nombre de constrictions

Plusieurs travaux démontrent que l'ouverture de filtration d'un géotextile n'est pas le seul paramètre à considérer pour prédire correctement son comportement en filtration (Bouthot *et al.*, 2000; Delmas *et al.*, 2000). Ces auteurs expliquent les comportements divergents de géotextiles non tissés d'ouvertures de filtration voisines à l'aide du concept de nombre de constrictions m proposé par Giroud (1996) et Giroud *et al.* (1998). Ce concept fait intervenir les notions de constrictions C et d'ouvertures de filtration O d'un géotextile non tissé. Les interstices délimités par trois ou plusieurs fibres et par lesquels peuvent circuler les grains de sol constituent les constrictions C d'un géotextile non tissé. Quant aux ouvertures de filtration O , elles représentent les plus petites constrictions composant les différents trajets de filtration.

Giroud *et al.* (1998) expliquent que la relation entre les distributions des ouvertures de filtration et de constrictions d'un géotextile est fonction de son épaisseur. Pour un filtre d'épaisseur infinie, un nombre infini de constrictions compose chaque trajet de filtration. La probabilité que la constriction la plus étroite du filtre C_0 soit présente dans chacun des trajets de filtration est alors égale à 100%. Par conséquent, la plus petite constriction ou l'ouverture de filtration de l'ensemble des trajets de filtration d'un filtre d'épaisseur infinie est égale à C_0 et la distribution des ouvertures O prend la forme d'une droite verticale pour laquelle $C_0 = O_0 = O_{100}$ (figure 2.10, courbe 1). À l'opposé, pour un filtre infiniment mince, chaque trajet de filtration ne comporte qu'une seule constriction dont la taille correspond également à l'ouverture de filtration de ce trajet. Un filtre infiniment mince comporte alors une distribution des ouvertures de filtration identique à celle des

constrictions (figure 2.10, courbe 3). La distribution des ouvertures de filtration d'un filtre d'épaisseur finie se situe entre ces deux cas limites (figure 2.10, courbe 2). Cette courbe O_0-O_{100} comporte les caractéristiques suivantes : $O_0 = C_0 < O_{100} < C_{100}$.

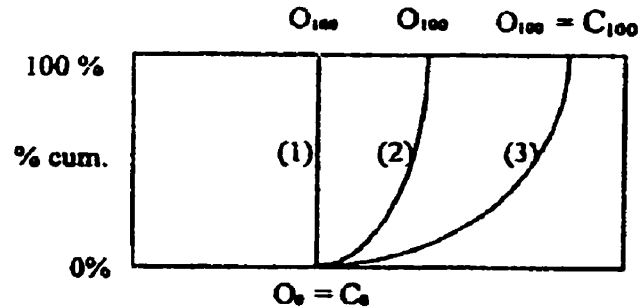


Figure 2.10 Relation entre les distributions des ouvertures de filtration et de constrictions d'un géotextile non tissé (tirée de Bouthot *et al.*, 2000)

Cette distribution des ouvertures de filtration d'un géotextile non tissé est liée au nombre de constrictions m . Ce paramètre est défini à l'équation 2.3. Ainsi, une augmentation de l'épaisseur T_g du géotextile ou une diminution de sa porosité n ou du diamètre des fibres d_f entraînent un accroissement du nombre de constrictions.

$$m = \sqrt{1-n} \cdot \frac{T_g}{d_f} \quad (2.3)$$

Le modèle proposé suggère que plus un géotextile non tissé est épais, plus le nombre de constrictions est important et plus la distribution des ouvertures de filtration est homogène (écart O_0-O_{100} plus faible). Ces divers propos nous permettent d'expliquer l'influence du nombre de constrictions m sur le comportement en filtration des géotextiles non tissés. La figure 2.11 présente les distributions des ouvertures de filtration et de constrictions de deux géotextiles possédant des ouvertures de filtration (O_{100}) identiques mais le filtre A, plus mince, comporte un nombre de constrictions inférieur à celui de B. Nous pouvons constater que le filtre B comportant un nombre élevé de constrictions aura davantage tendance à retenir les grains de sol ayant un diamètre d_2 supérieur à O_{100} à l'intérieur de sa structure (piégeage) plutôt qu'à sa surface (rétention). Si ces grains

forment le squelette du sol, un nombre élevé de constriction a pour conséquence d'augmenter les risques de lessivage du sol et de colmatage interne du géotextile. Quant aux particules plus petites que O_{100} , une quantité plus importante de particules ne seront pas retenues (passant) par le filtre comportant le plus grand nombre de constriction, d'où le risque d'un lessivage inacceptable du sol.

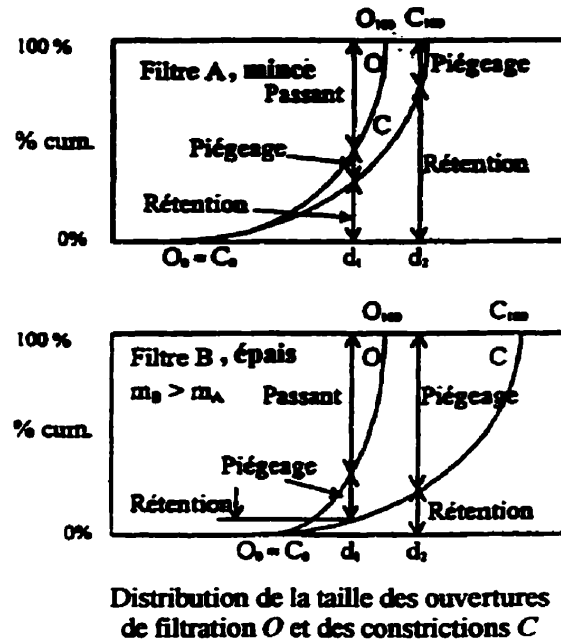


Figure 2.11 Effet du nombre de constriction sur le comportement en filtration des géotextiles non tissés (tirée de Bouthot *et al.*, 2000)

En tenant compte de ces observations et du nombre minimal de constriction suggéré par Giroud *et al.* (1998) pour assurer l'homogénéité des propriétés d'un géotextile non tissé, Bouthot *et al.* (2000) ont établi un intervalle acceptable pour les valeurs de m . Ainsi, les résultats de leurs essais de filtration suggèrent une rétention optimale du sol lorsque le nombre de constriction m d'un géotextile non tissé est compris entre 25 et 40. Ces critères de filtre ayant été établis pour des conditions d'écoulement unidirectionnel, nous présentons à la section suivante les critères de filtre proposés pour des géotextiles en contact avec des sols subissant une alternance de la direction des gradients hydrauliques.

2.3 Critères de filtre en conditions d'écoulement alterné

Comme nous l'avons mentionné au chapitre précédent, un écoulement alterné déstabilise la formation d'une structure avec pontage au contact du sol avec le géotextile. Ces conditions d'écoulement étant plus sévères, les critères de filtre établis pour un écoulement alterné sont plus stricts que ceux proposés pour un écoulement unidirectionnel.

Il faut noter que, dans cette section, nous utilisons l'expression « écoulement alterné » lorsque les auteurs cités invoquent une alternance de la direction des gradients hydrauliques dans leurs études. Lorsque les termes « conditions dynamiques » sont employés, cela implique plutôt des systèmes géotextile-sol soumis à des pulsations ou des chargements dynamiques.

Pour les applications impliquant un écoulement dynamique ou cyclique, la Société Canadienne de Géotechnique (1992) tient compte de ce fait ainsi que Holtz *et al.* (1997). Ces critères de rétention présentés au tableau 2.1, nous permettent de constater qu'une plus petite ouverture de filtration est recommandée pour un géotextile en contact avec un sol soumis à un écoulement dynamique ou cyclique. En effet, dans le manuel de la S.C.G., le diamètre du sol qui intervient dans le choix du géotextile est d_{15} dans le cas d'un écoulement dynamique ou cyclique comparativement à d_{85} dans le cas d'un écoulement unidirectionnel. Quant à Holtz *et al.*, ils recommandent une ouverture de filtration au moins deux fois plus petite lorsque l'écoulement est dynamique ou cyclique. Il faut noter que la valeur de O_{95} mentionnée précédemment est obtenue par tamisage hydrodynamique (FOS) dans le cas de la S.G.C. et par tamisage à sec (AOS) dans le cas de Holtz *et al.*

Tableau 2.1 Comparaison des critères de filtre en conditions d'écoulement unidirectionnel et dynamique

Conditions d'écoulement	Critères de rétention tirés de C.G.S. (1992)		Critères de rétention tirés de Holtz <i>et al.</i> (1997)	
Écoulement en régime permanent	$FOS < 1,5 d_{85}$	Sols uniformes	Tissés : $AOS \leq d_{85} \leq 0,3 \text{ mm}$	Sols fins ($d_{50} \leq 0,074 \text{ mm}$)
	$FOS < 3,0 d_{85}$	Sols étalés mais non discontinus	Non tissés : $AOS \leq 1,8 d_{85} \leq 0,3 \text{ mm}$	
	$FOS < 0,3 \text{ mm}$	$d_{10} \leq 0,074 \text{ mm}$		
Écoulement dynamique	$FOS < d_{15}$	$d_{50} > 0,074 \text{ mm}$	$AOS \leq 0,5 d_{85}$	Sols stables selon Kenney et Lau (1985 et 1986)
	$FOS < 0,5 d_{15} < 0,3 \text{ mm}$	Sols fins ($d_{50} \leq 0,074 \text{ mm}$)		

Depuis une dizaine d'années, quelques critères de rétention ont été élaborés pour caractériser le comportement des géotextiles sous un écoulement alterné. Tout comme pour un écoulement unidirectionnel, ces critères font intervenir des paramètres semblables, soit une dimension caractéristique du sol et l'ouverture de filtration du géotextile, mais en proportion différente. Plusieurs auteurs, dont Luettich *et al.* (1992), Ingold (1994), Fannin et Hameiri (1999) et Mlynarek (2000), ont effectué une revue des critères de filtration en conditions d'écoulement alterné. Ces critères sont présentés au tableau 2.2 et aux figures 2.12 et 2.13.

Tableau 2.2 Revue des critères de rétention en conditions d'écoulement alterné

Source	Critère de rétention	Remarques
Christopher et Holtz ¹ en 1985 et Holtz ¹ en 1998	$O_{50} \leq 0,5 d_{85}$	$d_{50} < 0,074 \text{ mm}$
	$AOS \leq d_{15}$	$d_{50} \geq 0,074 \text{ mm}$
PIANC ² en 1987	$0,05 \text{ mm} < O_{90} < 0,7 d_{90}$	$C_u < 5$
	$0,05 \text{ mm} < O_{90} < d_{90}$	$C_u > 5$
Lawson ² en 1982	$O_{90} < d_{50}$	$C_u < 5$

¹ Critères cités par Fannin et Hameiri (1999)

² Critères cités par Ingold (1994)

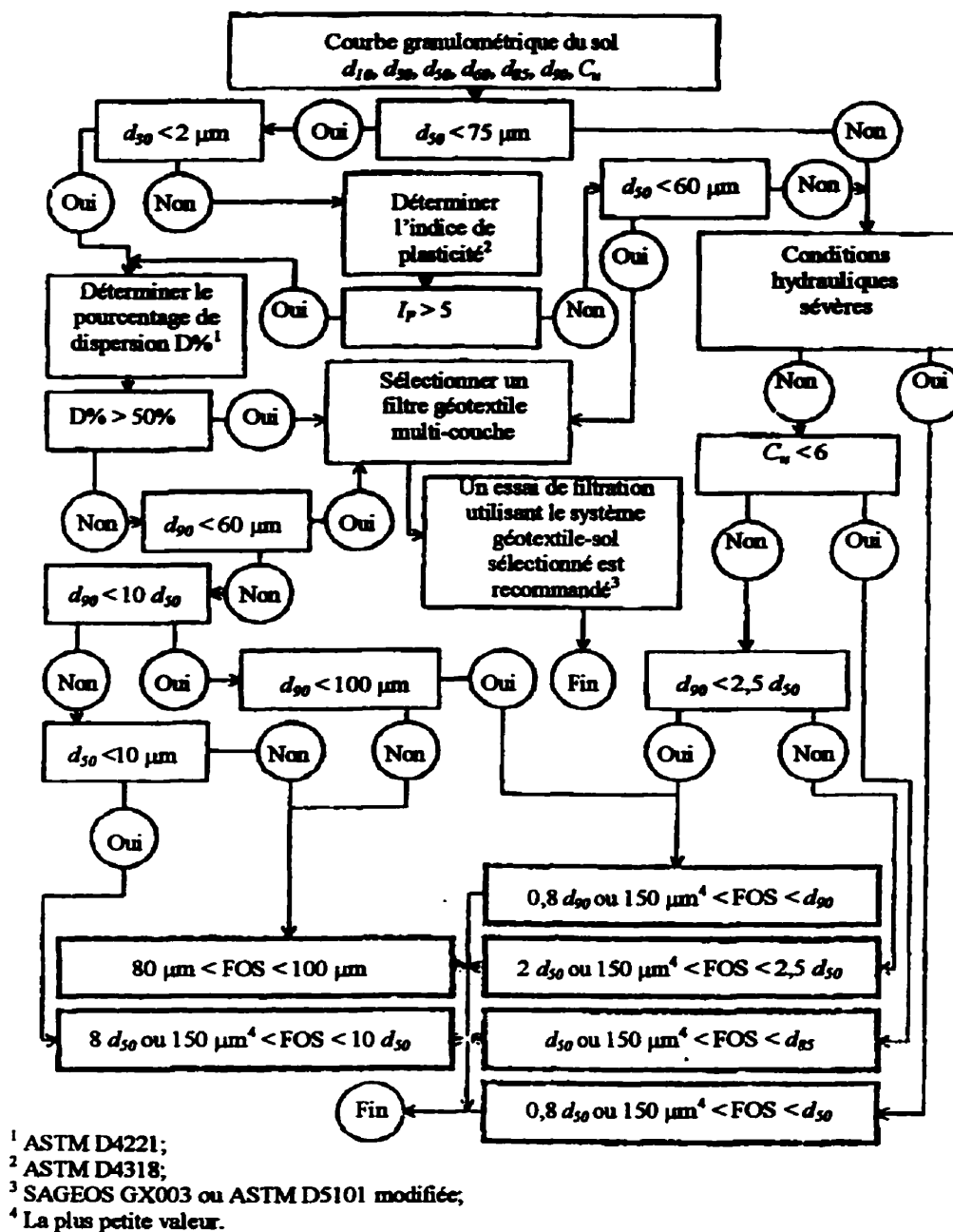


Figure 2.12 Critère de rétention pour un écoulement alterné
(adaptée de Mlynarek, 2000)

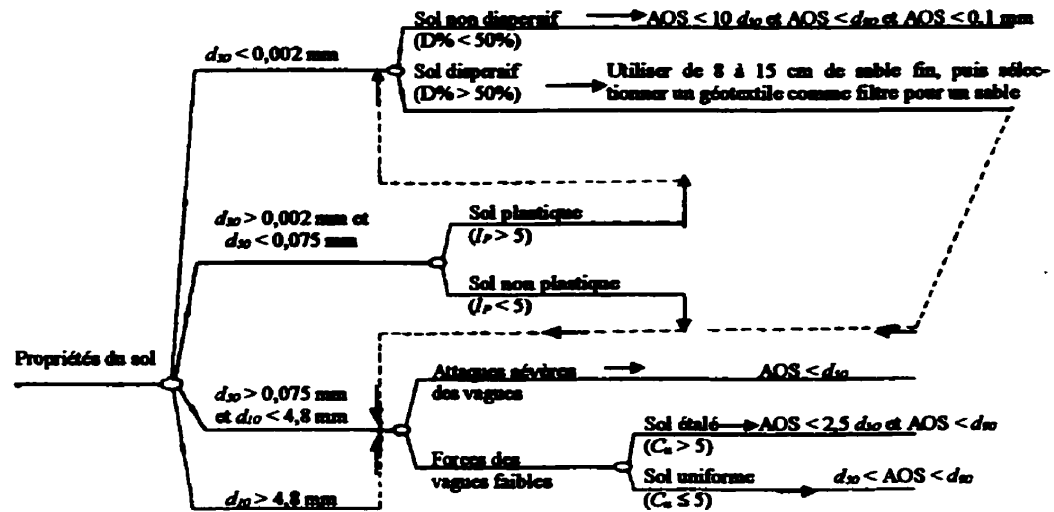


Figure 2.13 Critère de rétention en conditions d'écoulement alterné (adaptée de Luetlich *et al.*, 1992)

En plus de ces critères de filtration qui relient une dimension caractéristique du sol et l'ouverture de filtration du géotextile, certains chercheurs ont plutôt considéré l'influence d'autres paramètres sur la rétention des sols soumis à un écoulement alterné. D'abord, Ingold (1985) a étudié expérimentalement l'influence du coefficient d'uniformité C_u du sol et du gradient hydraulique i sur la quantité de sol expulsé. Pour ce faire, l'alternance du gradient hydraulique a été simulée par des cycles d'immersion et d'émersion et l'étude a porté sur le comportement de géotextiles tissés.

Cet auteur a observé que la réduction du gradient hydraulique ou du coefficient d'uniformité entraîne une masse de sol passant le géotextile plus faible. Il a alors établi le critère de rétention suivant qui assure une quantité de sol expulsé inférieure à 1% de la masse de sol à retenir :

$$\frac{O_{90}}{d_{50}} = \alpha \cdot C_u^{(1 - \sqrt{2/C_u})} \quad (2.4)$$

$$\frac{O_{90}}{d_{90}} = \alpha \cdot C_u^{(0,2 - \sqrt{2/C_u})} \quad (2.5)$$

où α est égal à l'unité pour $i = 0,5$;

et $\alpha = (|i| - 0,5)^{\sqrt{C_u}/4}$ pour $0,5 < i \leq 1$.

Il faut noter que la valeur de O_{90} mentionnée précédemment a été obtenue par tamisage à sec de billes de verre. La variation du rapport O_{90}/d_{90} en fonction du coefficient d'uniformité est illustrée à la figure 2.14 pour un gradient hydraulique égal à l'unité. Cette figure montre que les valeurs admissibles du rapport O_{90}/d_{90} augmentent avec le coefficient d'uniformité jusqu'à $C_u \approx 50$. Pour des valeurs plus élevées de C_u , le rapport O_{90}/d_{90} diminue de 2 à 0,15 pour $C_u \approx 50$ à $C_u \approx 500$. Cet auteur suggère donc que la taille des particules qui favorise une migration inférieure à 1% (en masse) est influencée de façon importante par le coefficient d'uniformité.

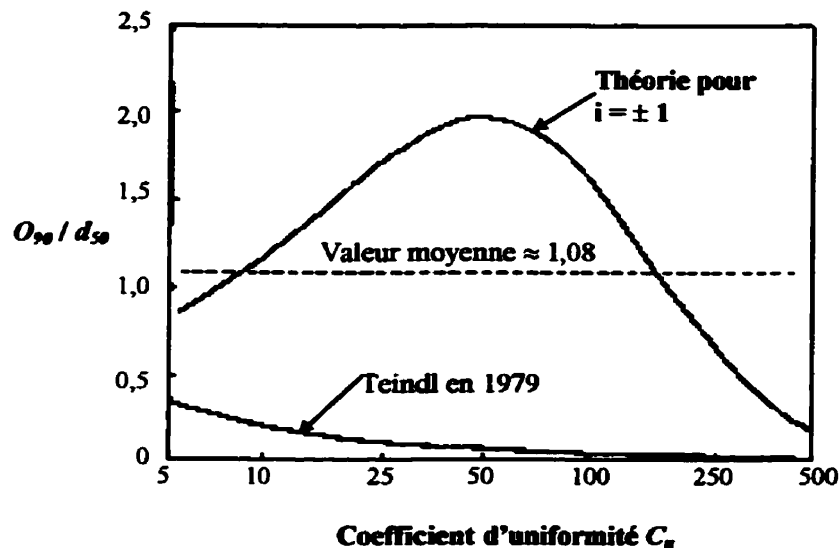


Figure 2.14 Variation du rapport O_{90}/d_{90} en fonction de C_u pour $i = \pm 1$
(adaptée de Ingold, 1985)

Quant au groupe de Cazzuffi *et al.* (1999), ils ont considéré l'influence des conditions hydrauliques et frontalières sur la rétention des sols soumis à un écoulement cyclique perpendiculaire à l'interface géotextile-sol. Ils ont utilisé un montage (figure 2.15) qui permet notamment d'étudier l'impact de l'intensité du gradient hydraulique et de la contrainte normale effective sur la quantité de particules lessivées. L'écoulement cyclique est simulé par un mouvement de va-et-vient d'un piston qui pousse un débit constant d'eau à travers l'échantillon. Une période variant entre 5 et 20 secondes a été imposée. La contrainte effective est appliquée au sommet de l'échantillon de sol. L'utilisation d'un cylindre déformable près de l'interface géotextile-sol réduit le frottement entre le sol et le cylindre puisqu'ils se déplacent ensemble sous l'application de la pression. La contrainte est donc transmise uniformément de l'échantillon de sol à l'interface.

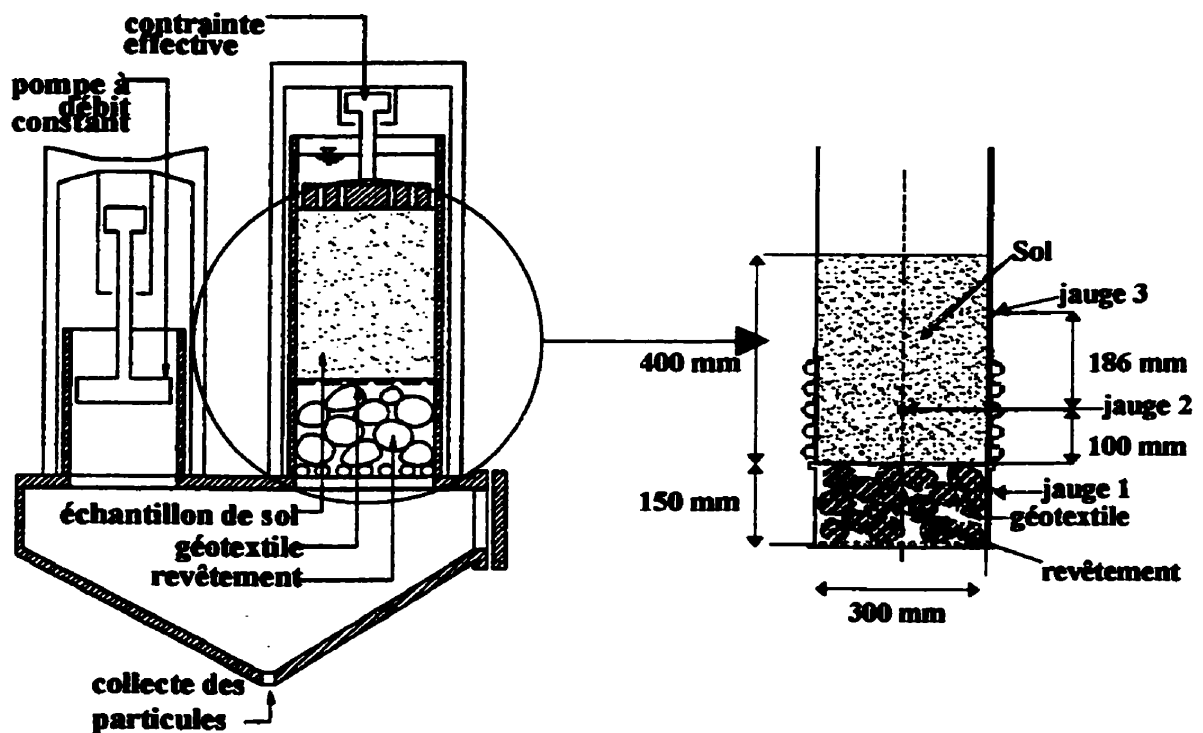


Figure 2.15 Montage utilisé pour simuler un écoulement cyclique perpendiculaire
(adaptée de Cazzuffi *et al.*, 1999)

Les résultats de leurs essais montrent que l'application d'une contrainte normale effective plus élevée ou d'un gradient hydraulique plus faible entraîne le lessivage d'une quantité moindre de particules. Cette influence du gradient hydraulique et de la contrainte normale sur la capacité de rétention des géotextiles est illustrée à la figure 2.16. Ainsi, une interface géotextile-sol stable peut devenir instable dans le cas où le contact entre le géotextile et la base du sol n'est pas toujours maintenu (cheminement de S à I1) tout comme si une augmentation du gradient hydraulique survient (cheminement de S à I2). Finalement, ces mêmes auteurs n'ont pas observé de réduction significative de la conductivité hydraulique de l'interface lorsqu'un écoulement cyclique est appliqué. Les essais montrent donc que le colmatage externe du géotextile ne survient pas puisque l'écoulement alterné tend à dégager les pores.

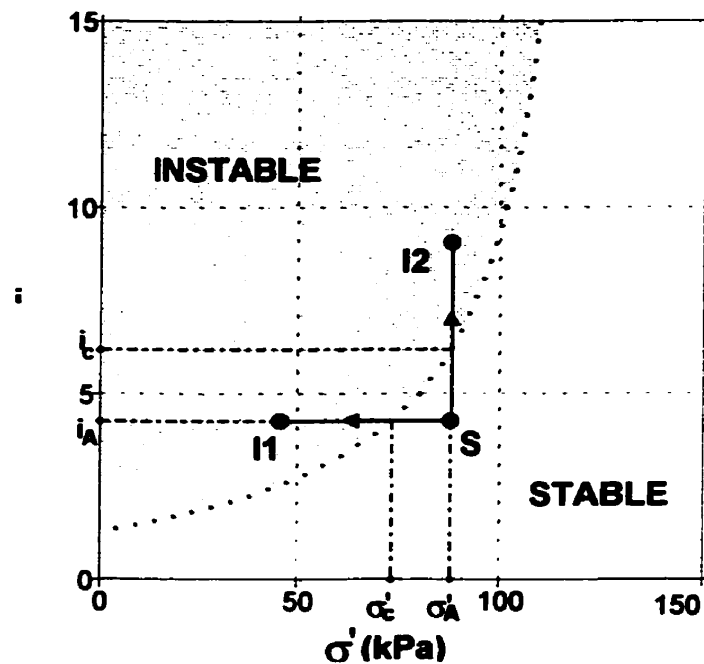


Figure 2.16 Stabilité de l'interface en fonction de la contrainte effective et du gradient cyclique (adaptée de Cazzuffi *et al.*, 1999)

Les critères de filtre établis pour des écoulements unidirectionnel et alterné ont été présentés. Voyons maintenant l'évolution du critère de performance.

2.4 Critères de performance et évolution du test du rapport des gradients

Pour évaluer la compatibilité d'un géotextile et d'un sol, des essais en laboratoire de courte durée sont réalisés. Ces tests permettent d'observer le comportement en filtration d'un système et d'évaluer son potentiel au colmatage et/ou au lessivage. Plusieurs méthodes sont employées pour déterminer la performance des géotextiles en filtration dont, entre autres, le test du rapport des gradients (ASTM, 1997), l'essai du rapport des conductivités hydrauliques (Williams et Abouzakhm, 1989) et le test de filtration à long terme (Koerner et Ko, 1982). L'historique et l'évolution du test du rapport des gradients sont évoqués dans cette section.

Calhoun a mené en 1972 des recherches sur le potentiel au colmatage et au lessivage des géotextiles en mesurant les charges hydrauliques à différents endroits dans un système géotextile-sol (Haliburton et Wood, 1982; Williams et Abouzakhm, 1989). Pour effectuer ces expériences, Calhoun a utilisé des sols sensibles au lessivage et à la migration des particules fines. L'appareil utilisé comportait 8 piézomètres répartis sur deux côtés et à tous les 25 mm dans l'échantillon de sol (figure 2.17).

En se basant sur les travaux de Calhoun, le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis a établi en 1977 une méthode pour mesurer directement le potentiel au colmatage d'un géotextile qui s'intitule le test du rapport des gradients. Le rapport du gradient hydraulique mesuré entre le géotextile et la couche inférieure de sol (0-25) sur celui mesuré dans la couche adjacente de 50 mm (25-75) est défini comme étant le rapport des gradients (GR). Un rapport supérieur à trois résultait en un colmatage du géotextile et cette limite fût établie pour accepter un géotextile dans un système de drainage.

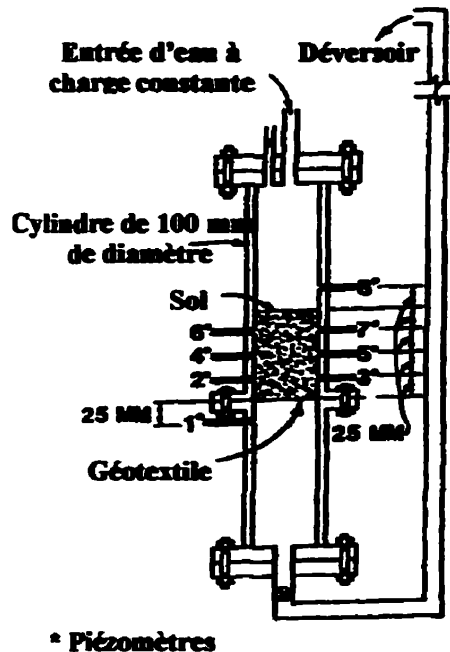


Figure 2.17 Perméamètre de Calhoun en 1972
(adaptée de Haliburton et Wood, 1982)

En 1982, Haliburton et Wood ont utilisé le même appareil pour étudier la résistance au colmatage de géotextiles tissés et non tissés. Les résultats obtenus ont montré que le potentiel au colmatage de tous les textiles augmentait lorsque la proportion des particules fines dans le sol devenait plus importante. Ces chercheurs ont également validé la valeur de trois comme valeur limite acceptable du rapport des gradients. L'appareil subit quelques modifications jusqu'à l'adoption en 1990 par l'ASTM d'une norme régissant cet essai (figure 2.18). Le but visé par cet essai demeure la détermination du potentiel au colmatage et de la perméabilité du système géotextile-sol.

En considérant les limites du test du rapport des gradients, un appareil a été développé par Rao *et al.* (1991) pour combiner l'essai du GR et le test de filtration à long terme. L'expérience mise au point a permis de déterminer le rapport des gradients à long terme ainsi que l'influence de la masse volumique du sol et de la proportion de particules fines.

Les résultats obtenus ont révélé que la valeur du rapport des gradients augmente lorsque le pourcentage de fines augmente ou que la masse volumique du sol diminue. L'augmentation du GR dans ce dernier cas a été attribuée à la présence d'une quantité plus grande de particules mobiles dans un sol moins compact, ce qui a entraîné un colmatage plus important du géotextile.

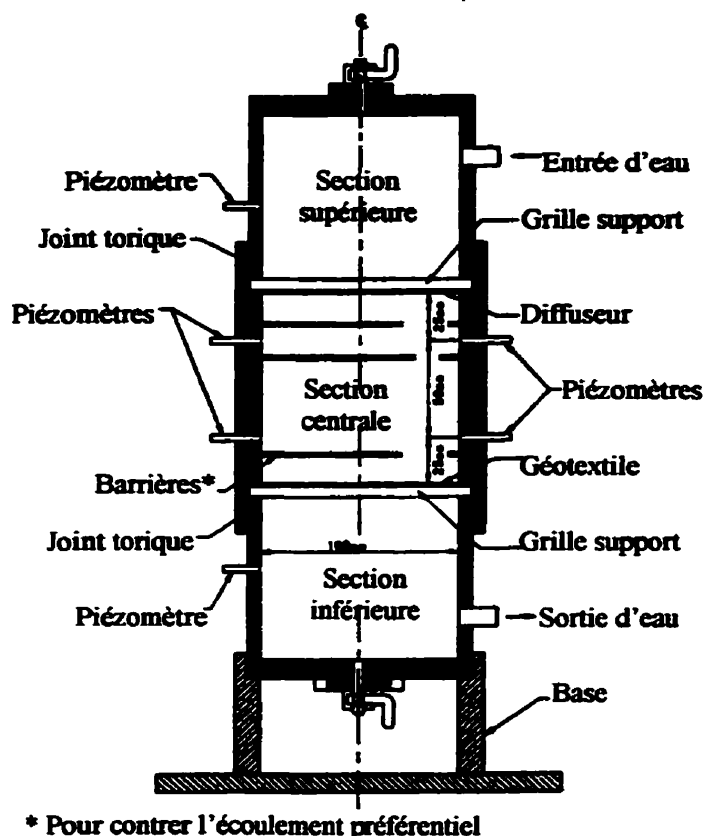


Figure 2.18 Perméamètre de l'essai du rapport des gradients selon l'ASTM (adaptée de ASTM D-5101-96)

En 1994, Fannin *et al.* ont également repris l'essai du rapport des gradients en apportant quelques modifications à l'appareil (figure 2.19). Ces changements consistent en la récupération des particules passant le géotextile et en l'ajout de piézomètres afin de vérifier l'homogénéité du sol et la possibilité de définir un rapport des gradients modifié.

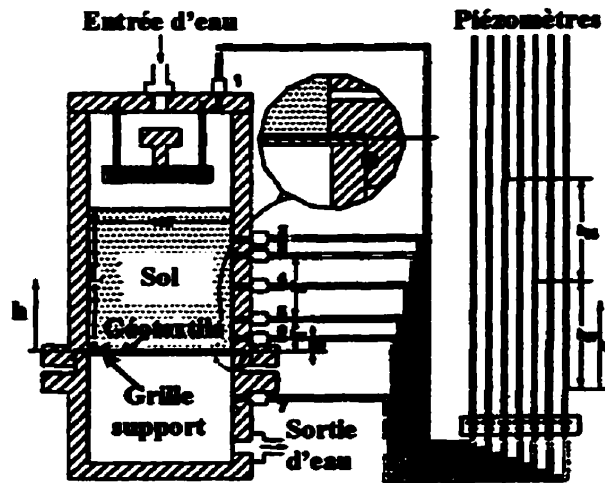


Figure 2.19 Perméamètre de l'essai du rapport des gradients modifié (adaptée de Fannin *et al.*, 1994)

D'abord, ils ont proposé de tenir compte de l'épaisseur du géotextile T_g dans le calcul du gradient hydraulique du système i_{17} :

$$i_{17} = \frac{h_{17}}{L + T_g} \quad (2.6)$$

où L est la hauteur de l'échantillon de sol.

Ce groupe de recherche a également suggéré un rapport des gradients modifié qui tient compte des mesures de pression du piézomètre no. 6 au lieu du no. 5, tel que recommandé par l'ASTM. Le piézomètre no. 6 étant plus proche de l'interface géotextile-sol, 8 mm au lieu de 25 mm, il permet une meilleure détection de la perte de charge et de la restriction de l'écoulement à travers la mince couche du composite géotextile-sol (Shi *et al.*, 1996). Le rapport modifié devrait alors donner une meilleure évaluation du gradient hydraulique dans le composite.

$$GR_{ASTM} = \frac{i_{57}}{i_{35}} = \frac{l_{35}}{l_{57}} * \frac{h_{57}}{h_{35}} \quad (2.7)$$

$$GR_{mod} = \frac{i_{67}}{i_{35}} = \frac{l_{35}}{l_{67}} * \frac{h_{67}}{h_{35}} \quad (2.8)$$

Dans le cas d'une distribution linéaire de la perte de charge entre les piézomètres no. 2 et no. 6, les rapports des gradients GR_{ASTM} et GR_{mod} sont reliés par la relation linéaire suivante :

$$GR_{mod} = 3,2 * GR_{ASTM} - 2,2 \quad \text{et} \quad GR_{ASTM} > 0, GR_{mod} > 0 \quad (2.9)$$

Les résultats de l'étude de Fannin *et al.* (1994) ont permis d'apporter des modifications au critère de rétention du sol pour prévenir le lessivage des particules fines. À la suite de ces essais, Fannin en collaboration avec Palmeira et Vaid (1996) ont étudié le comportement en filtration de combinaisons plutôt sévères de géotextiles et de sols. Ces expériences ont permis de valider le critère de rétention mentionné précédemment et la valeur limite de 3 du rapport des gradients pour un comportement en filtration acceptable. De plus, à l'aide d'un appareil conçu pour appliquer une contrainte verticale lors des essais (figure 2.20), ils ont montré que les valeurs du rapport des gradients modifié et selon l'ASTM semblaient être insensibles à l'application d'une contrainte verticale atteignant jusqu'à 200 kPa.

En 1996, le centre des technologies géosynthétiques SAGEOS apporte quelques modifications au montage de l'ASTM et propose une norme incorporant les améliorations apportées par Fannin et ses collaborateurs en 1994. En plus de l'ajout d'un piézomètre, situé à 6 mm de l'interface géotextile-sol, SAGEOS étudie le comportement de système géotextile-sol à granulométrie fine sous des conditions d'écoulement descendant et ascendant (Austin *et al.*, 1997). Le filtramètre modifié par SAGEOS est présenté à la figure 2.21. De plus, à cause de la proximité du nouveau piézomètre par rapport à celui de l'ASTM, ces auteurs ont proposé de réduire les valeurs acceptables des rapports des gradients ASTM et SAGEOS afin de tenir compte de l'évaluation des gradients hydrauliques à seulement 6 mm de l'interface. L'intervalle précédemment accepté, comportant les valeurs de 0,75 (GR_{ASTM}) ou 0,5 (GR_{SAGEOS}) à 3,0, est ainsi modifié :

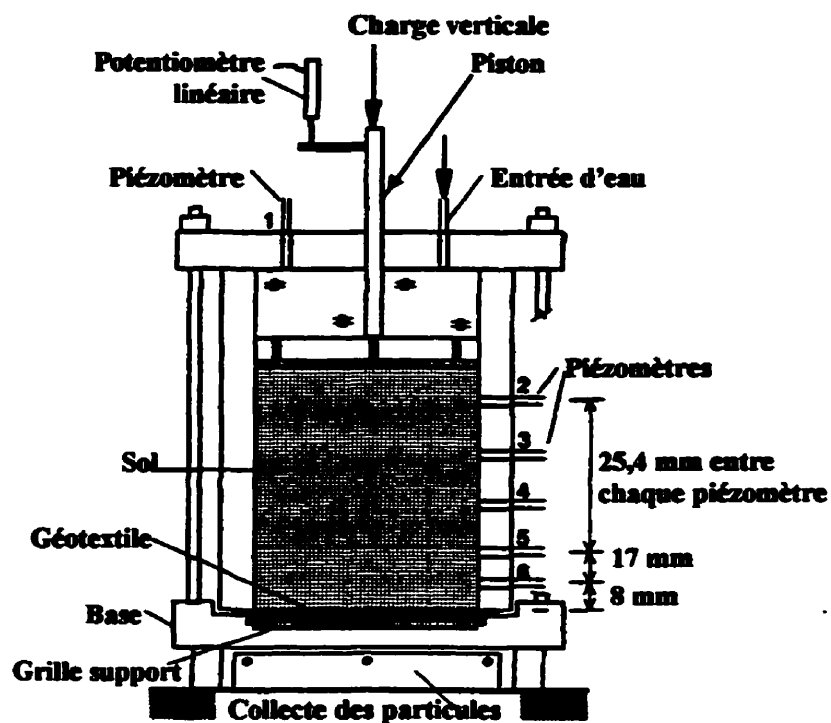


Figure 2.20 Perméamètre avec contrainte verticale (adaptée de Palmeira *et al.*, 1996)

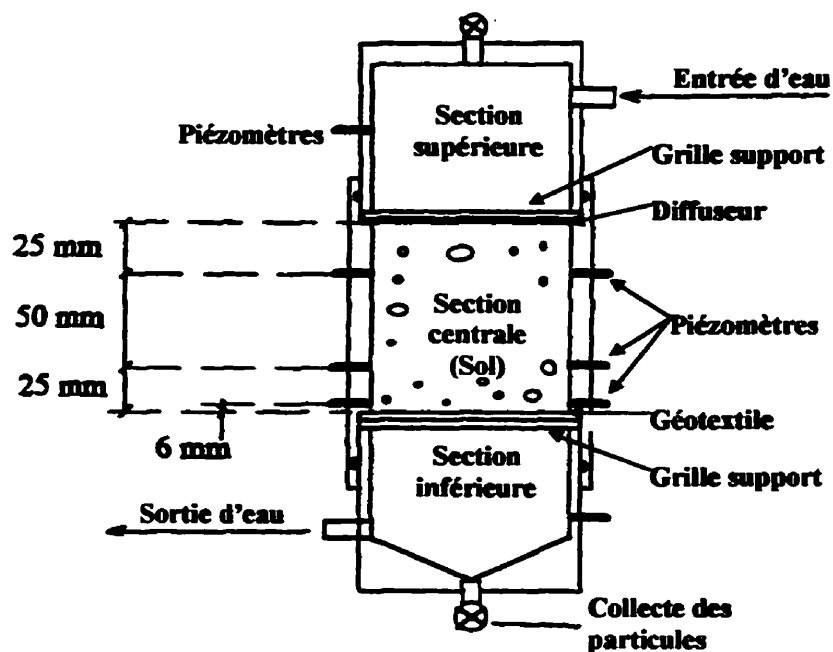


Figure 2.21 Filtramètre de l'essai du rapport des gradients SAGEOS (adaptée de Austin *et al.*, 1997)

$$0,95 < GR_{ASTM} < 1,5 \quad \text{où } GR_{ASTM} = \frac{i_{0-25 \text{ mm}}}{i_{25-75 \text{ mm}}} \quad (2.10)$$

$$0,8 < GR_{SAGEOS} < 1,0 \quad \text{où } GR_{SAGEOS} = \frac{i_{0-6 \text{ mm}}}{i_{25-75 \text{ mm}}} \quad (2.11)$$

Finalement, le groupe de recherche de l'Université de la Colombie-Britannique (Fannin et Hameiri, 1999) a adapté leur perméamètre de l'essai du rapport des gradients modifié dans le but d'étudier la compatibilité d'un géotextile et d'un sol soumis à un écoulement alterné. Leur montage, présenté à la figure 2.22, utilise trois trop-pleins à charge constante pour inverser la direction de l'écoulement à travers le système géotextile-sol.

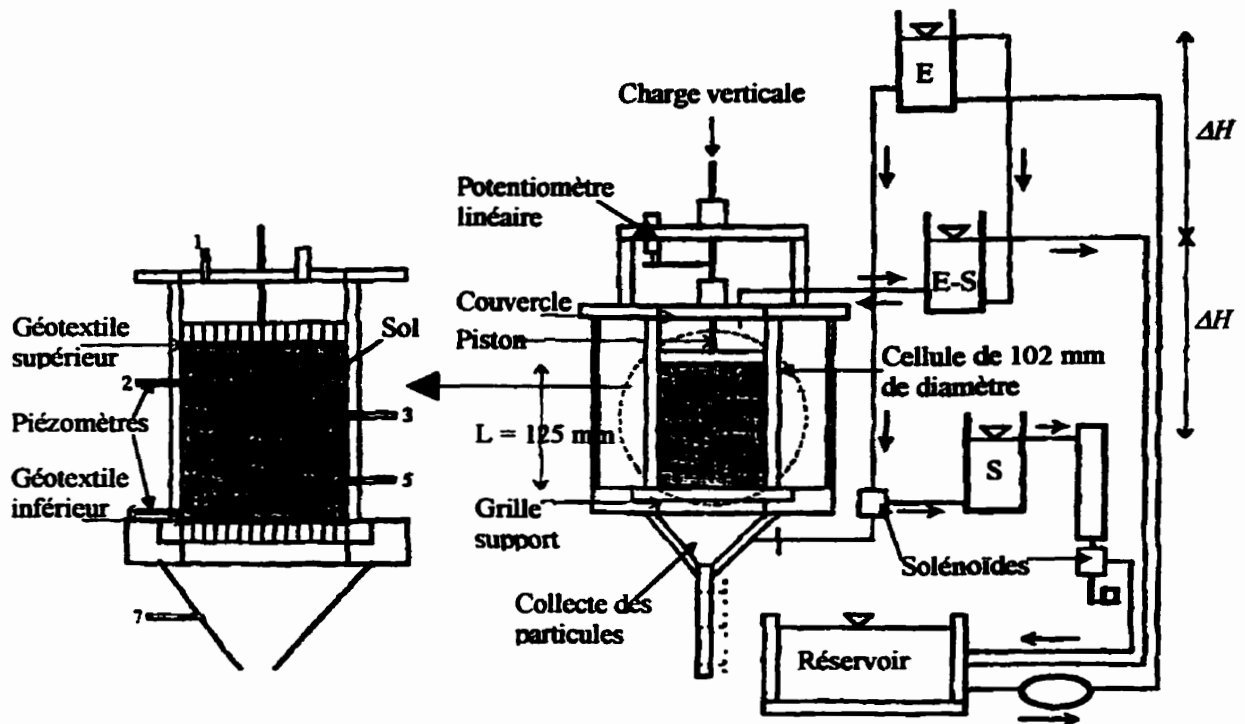


Figure 2.22 Perméamètre de l'essai du rapport des gradients en conditions d'écoulement alterné (adaptée de Fannin et Hameiri, 1999)

Le gradient hydraulique imposé au système est contrôlé par la même différence de charge Δh qui sépare les trois trop-pleins et par la longueur de l'échantillon L . Une valve de type solénoïde, contrôlée par le système d'acquisition, est utilisée pour changer la direction de l'écoulement. Un écoulement vers le bas est imposé lorsque l'eau circule du récipient entrée-sortie (E-S) vers le haut de la cellule, traverse l'échantillon, puis se dirige de la base de la cellule au récipient (S). L'ouverture du solénoïde impose un écoulement vers le haut. L'eau circule alors du récipient entrée (E) vers le bas de la cellule, circule à travers le sol et est vidangée par le trop-plein (L) du récipient entrée-sortie (E-S).

De plus, les résultats de leurs essais préliminaires montrent l'importance d'utiliser des capteurs de pression pour mesurer en continu la distribution de la charge dans l'échantillon de sol plutôt que des lectures ponctuelles aux piézomètres. En effet, les capteurs nécessitent un faible volume d'eau et détectent par conséquent rapidement les changements de pression.

2.5 Critères de sélection

En résumé, la masse de sol passant le géotextile est relativement importante au cours d'un lessivage tandis qu'elle est plutôt faible au cours d'un colmatage externe. Si un colmatage interne survient, la masse de sol coincé dans la structure du géotextile sera élevée. La figure 2.23 résume l'interprétation des mécanismes de filtration en fonction de la valeur des rapports des gradients ASTM et SAGEOS, la perméabilité du système et la masse de sol passant le géotextile.

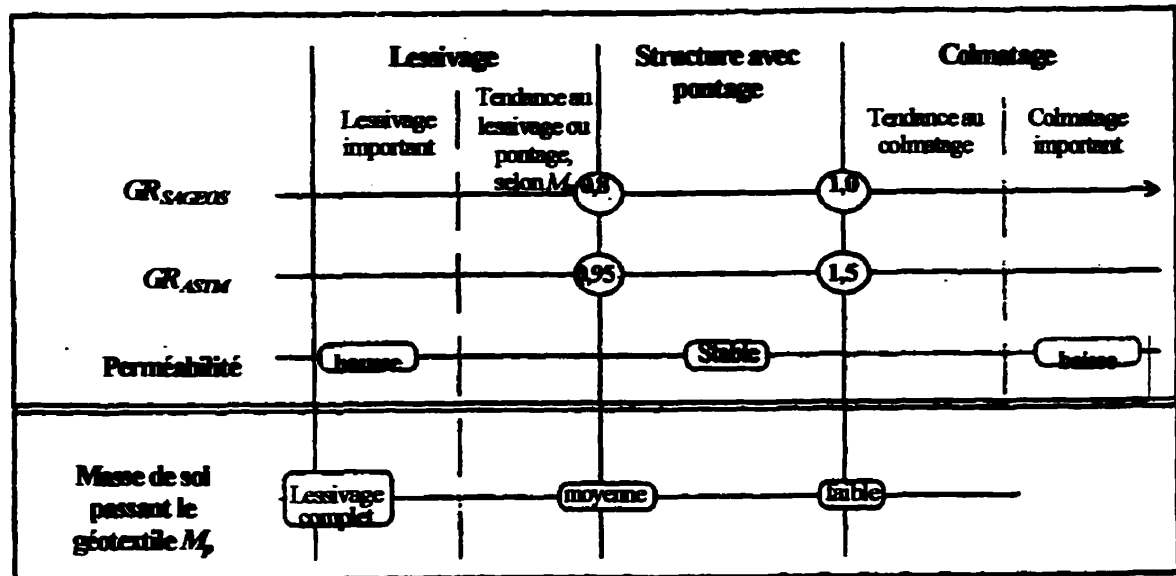


Figure 2.23 Critères de filtration adaptés de Austin *et al.* (1997)

Afin de déterminer l'applicabilité de l'essai du rapport des gradients en conditions d'écoulement alterné, l'étude expérimentale est décrite au chapitre suivant.

CHAPITRE 3

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

L'étude expérimentale utilise un test du rapport des gradients inspiré de la norme ASTM D-5101 afin d'étudier la compatibilité en filtration d'un géotextile et d'un sol. Un écoulement alterné est imposé au système et cette alternance des gradients hydrauliques a pour but de simuler les conditions dynamiques qui prévalent dans les ouvrages de protection contre l'érosion des berges. L'objectif de cette étude consiste à déterminer l'influence d'un écoulement alterné sur le comportement en filtration de plusieurs systèmes géotextile-sol. Pour réaliser cette étude, la procédure expérimentale et le montage de l'ASTM ont été modifiés. Un essai du rapport des gradients exige d'abord la préparation des matériaux utilisés, soit le sol et le géotextile. Par la suite viennent le montage et la préparation de l'essai. Finalement, la compilation des résultats permet d'évaluer la compatibilité des géotextiles en contact avec des sols soumis à des conditions d'écoulement alterné.

3.1 Objectifs et hypothèses de travail

L'essai du rapport des gradients a pour objectif d'évaluer la compatibilité en filtration d'un sol et d'un géotextile. Des essais ont été réalisés antérieurement par SAGEOS (Projet S 159-007) en imposant aux systèmes géotextile-sol des conditions d'écoulement unidirectionnel descendant. Nous avons reproduit ces essais en appliquant cette fois une alternance de la direction des gradients hydrauliques pour simuler l'action des vagues

dans les ouvrages de protection des berges. Dans le cadre de ce projet, nous étudions le comportement en filtration d'un système géotextile-sol soumis à des conditions d'écoulement alterné. De plus, la procédure expérimentale employée, soit un écoulement unidirectionnel ascendant d'une durée de quatre heures qui précède et qui suit un écoulement alterné imposé pendant seize heures, permet de comparer directement l'influence de l'écoulement alterné à une valeur de gradient donnée.

L'analyse des résultats se base sur les hypothèses suivantes :

- le rapport des gradients est utilisé comme une indication du potentiel au colmatage;
- la perméabilité du système est indicatrice de colmatage lorsque celle-ci diminue au cours de l'essai ou révèle une tendance au lessivage si elle augmente;
- la distribution de la charge hydraulique dans le sol indique une tendance au colmatage ou au lessivage lorsqu'elle n'est pas linéaire dans tout l'échantillon de sol;
- la masse de sol passant le géotextile permet de vérifier l'importance du lessivage du sol et la masse de sol coincé dans le géotextile révèle le degré de colmatage du filtre.

3.2 Matériaux utilisés

Les essais du rapport des gradients ont été réalisés en utilisant cinq sols et cinq géotextiles possédant des caractéristiques différentes. Les sections suivantes contiennent la description de ces matériaux.

3.2.1 Les sols

D'abord, nous avons prélevé au début du projet un silt à Ormstown afin de comparer nos résultats avec ceux de SAGEOS (Projet S 159-007). Ce sol naturel, représenté par la courbe N à la figure 3.1, s'est avéré nettement plus argileux que le sol testé antérieurement par SAGEOS (courbe visée). Un essai préliminaire a été réalisé avec ce

sol N et les résultats indiquent que sa perméabilité est trop faible pour que ceux-ci soient exploitables. La granulométrie du silt d'Ormstown a donc été reconstituée dans un premier temps à partir d'un mélange de billes de verre et d'argile de type kaolin (courbe B). La sédimentométrie de ce sol B a été réalisée sur deux échantillons à l'aide d'un hydromètre de type 152H. Le poids spécifique des grains D_R a été déterminé selon la procédure pour les échantillons secs. Pour les calculs de l'analyse granulométrique, nous avons utilisé la valeur $D_R = 2,450$.

De plus, nous avons également tenté de reconstituer la granulométrie du silt d'Ormstown à partir d'un agrégat routier concassé appelé « farine de pierres » (courbe O) pour étudier l'influence de la forme des grains. Puisque le mélange original de la farine de pierres est plus fin que la granulométrie visée, nous avons entrepris de le laver pour enlever la portion excédentaire de particules fines. Pour ce faire, environ 1 kg du mélange original est brassé et mis en suspension dans un récipient contenant approximativement 7 litres d'eau. Un temps de déposition de 3 minutes est nécessaire pour conserver les particules les plus grossières du mélange. Après ce délai, l'eau contenant les particules les plus fines en suspension est versée pour ne conserver que les particules qui se sont déposées au fond du récipient. Ce processus de lavage est répété trois fois pour obtenir la granulométrie identifiée par la courbe F. La figure 3.1 indique que le silt d'Ormstown reconstitué présente une granulométrie étalée et concave vers le haut.

Les granulométries des sols C et I ont été reconstituées respectivement à partir d'une moraine et du mélange original de la farine de pierres concassées. Le tamisage a permis d'obtenir ces sols à granulométrie étalée et concave vers le haut. La procédure de préparation du sol employée respecte les normes ASTM D-5101-96 et SAGEOS GX No.006-96 et assure la stérilisation du sol pour éviter la prolifération de bactéries dans le sol durant l'essai. Les courbes granulométriques des sols étudiés apparaissent à

la figure 3.1. Le tableau 3.1 présente le diamètre caractéristique (d_i) et les indicateurs de forme de ces sols. Nous rappelons ici que la taille indicatrice d'un sol est fonction du profil granulométrique de ce sol et représente la taille des particules qui favorisent la rétention du sol (Lafleur *et al.*, 1989). Les indicateurs de forme sont calculés de la façon suivante :

$$\text{Coefficient d'uniformité : } C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

$$\text{Coefficient de courbure : } C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} * d_{60}} \quad (3.2)$$

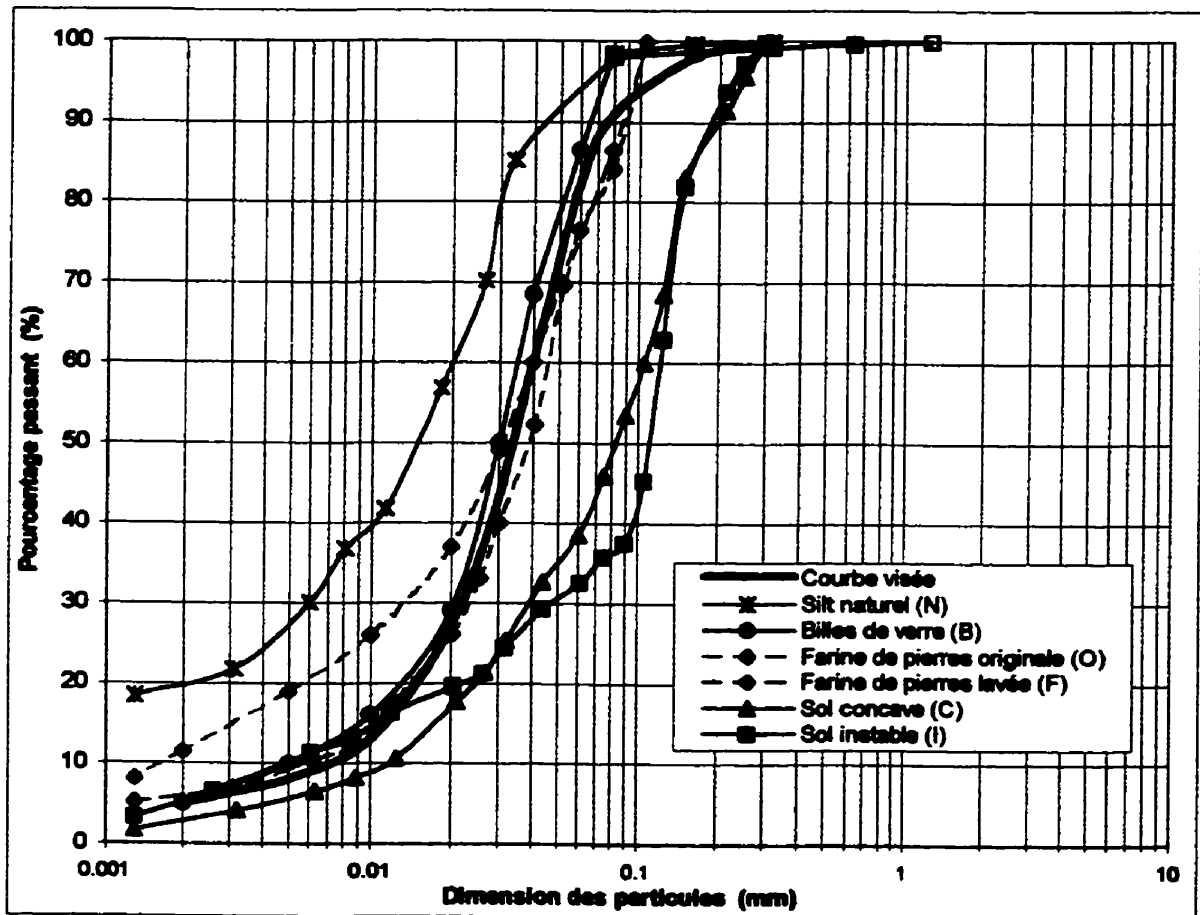


Figure 3.1 Courbes granulométriques des sols utilisés

Tableau 3.1 Caractéristiques des sols utilisés

Sols	Billes (B)	Farine originale (O)	Farine lavée (F)	Sol concave (C)	Sol instable (I)
< 2 μm	4,6%	12%	6%	2,8%	5,2%
< 80 μm	99%	86%	86%	48%	33%
C_u	7,0	25,0	7,5	12,5	24,0
C_c	2,5	2,3	2,0	0,8	3,5
d_I	$d_{30} = 21 \mu\text{m}$	$d_{30} = 12 \mu\text{m}$	$d_{30} = 23 \mu\text{m}$	$d_{30} = 38 \mu\text{m}$	$d_{30} = 46 \mu\text{m}$
Stabilité	Oui	Non	Oui	Oui	Non

La méthode d'évaluation de la stabilité interne des sols de Kenney et Lau (1985) exposée à la section 2.4.1 nous permet d'estimer le potentiel d'instabilité des sols. La figure 3.2 présente les courbes de stabilité des sols étudiés. Puisque la granulométrie de ces sols est étalée, nous avons considéré la courbe pour un F critique variant entre 0 et 20%. Comme une portion de la courbe des sols O et I passe sous la droite limite $H = F$, ces sols présentent un potentiel d'instabilité interne. Pour les autres sols (B, C et F), bien que leur courbe soit située près de la limite, ils peuvent être considérés comme stables.

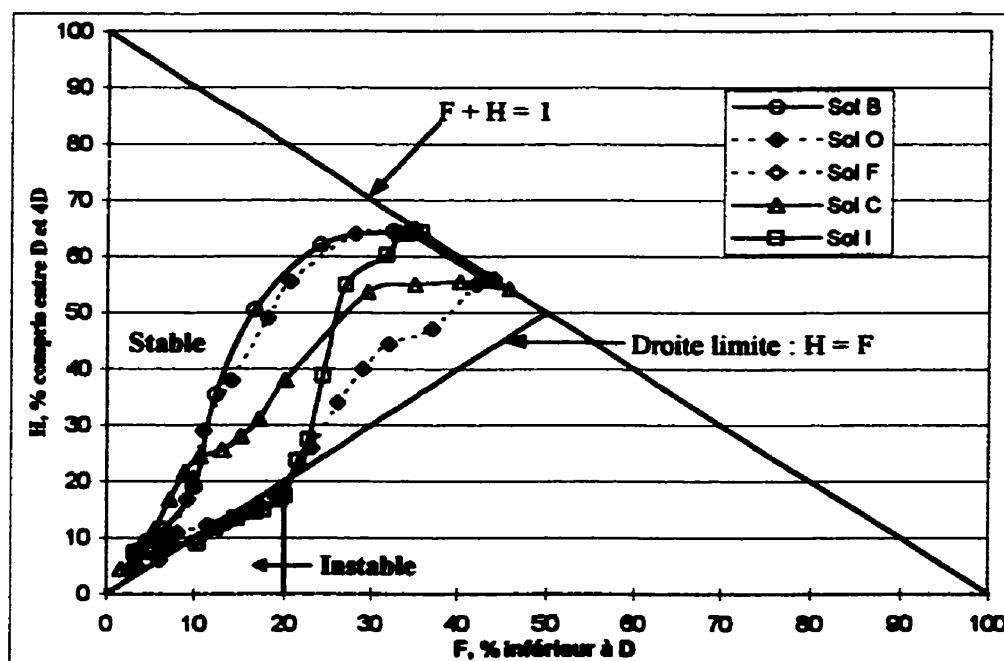


Figure 3.2 Courbes de stabilité des sols étudiés selon Kenney et Lau (1985 et 1986)

3.2.2 Les géotextiles

Les géotextiles utilisés appartiennent à des types de géotextiles différents : trois d'entre eux sont des non tissés monocouches, un est non tissé bi-couche et le dernier est tissé. Les géotextiles T et NTP ont été analysés suivant la norme CAN/CGSB-148.1 No 10-94 (Beaudoin, 1997). Les deux géotextiles fabriqués par Bidim, le F60 et SF8, ont une ouverture de filtration similaire mais comportent un nombre de constriction m différent : m est égal à 25 pour le BF60 et à 50 pour le BSF8. L'épaisseur et la masse surfacique de ces géotextiles ont été mesurées par l'auteur (annexe A). Le NTT a été analysé par la compagnie Texel et ces caractéristiques ont été vérifiées par l'auteur en utilisant la même norme CAN/CGSB (Francoeur, 1998). Les propriétés de ces cinq géotextiles figurent au tableau 3.2. Pour respecter les consignes des normes sur le test du rapport des gradients, les géotextiles secs devaient être placés à la température de la pièce au moins 24 heures avant l'essai.

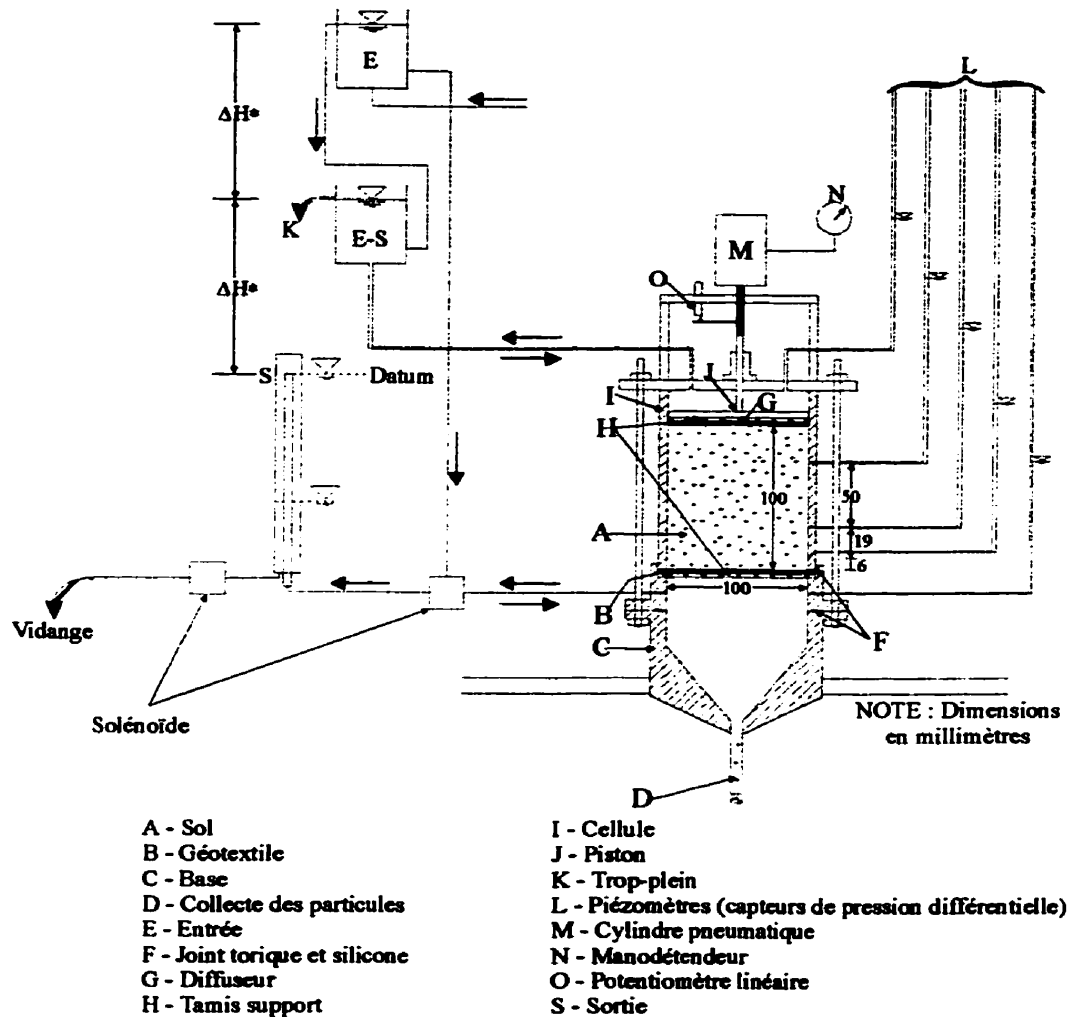
Tableau 3.2 Propriétés des géotextiles testés

Nom	T	NTP	BF60	BSF8	NTT
Type	Tissé	Non tissé Monocouche	Non tissé Bi-couche	Non tissé Monocouche	Non tissé Monocouche
T_r (mm)	0,845	4,350	3,428	6,335	2,864
μ (g/m ²)	213	445	418	895	475
FOS (μ m)	200	106	80	80	< 44

3.3 Filtramètre pour un écoulement alterné

Dans le cadre de cette étude, deux filtramètres ont été employés afin de mieux convenir aux diverses conditions d'écoulement imposées. Le premier filtramètre permet l'application d'un écoulement unidirectionnel descendant et d'un écoulement alterné. Ce filtramètre, présenté à la figure 3.3 a, est semblable à celui de SAGEOS (1996) et il a été utilisé pour les tests préliminaires et l'essai no. 1. À la suite de ces essais, quelques

modifications ont été apportées afin de mieux répondre à nos besoins. Le filtramètre utilisé pour les essais subséquents est schématisé sur la figure 3.3 b. Il permet l'application d'un écoulement unidirectionnel ascendant et d'un écoulement alterné. La cellule I comporte un diamètre intérieur de 115 mm et peut contenir un échantillon de sol de 150 mm de hauteur. L'échantillon de sol A est confiné par deux géotextiles identiques, le diffuseur B1 et le géotextile d'interface de mesure B2.



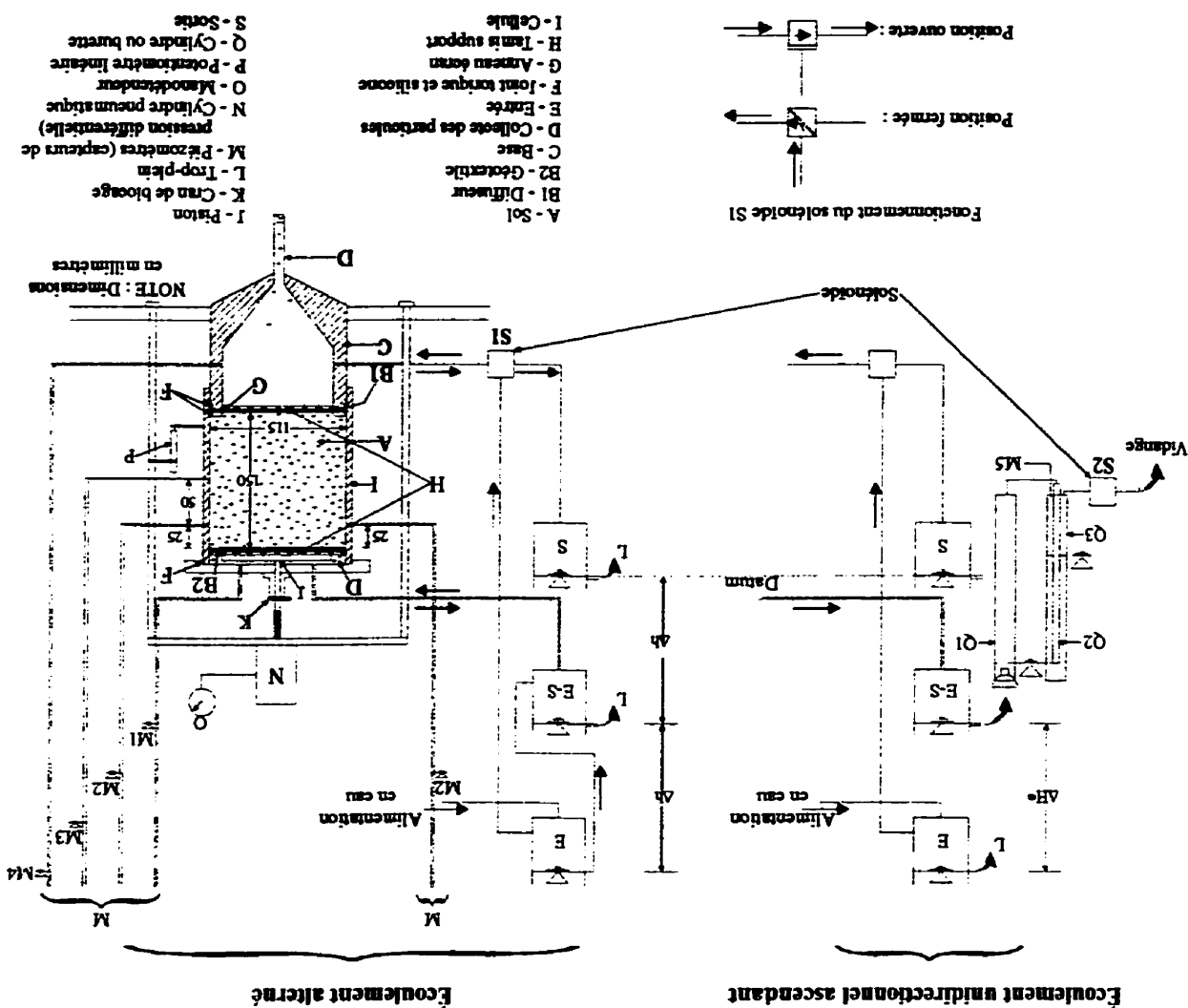
a) Filtramètre pour un écoulement unidirectionnel descendant et un écoulement alterné

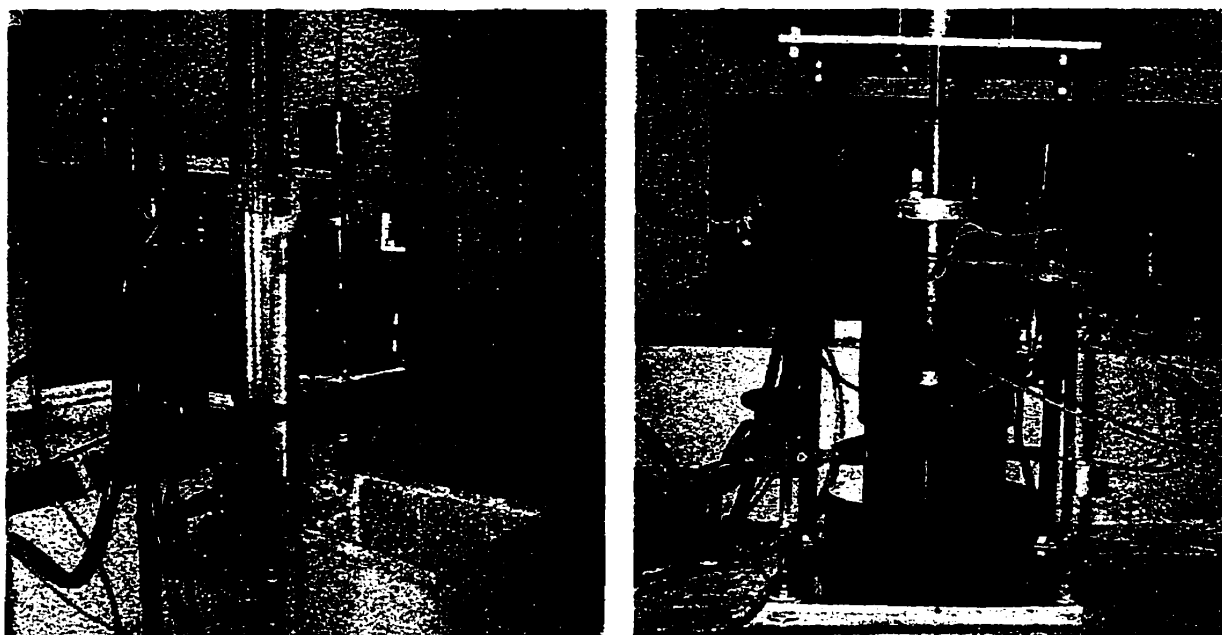
Figure 3.3 Description schématique des filtramètres utilisés

De plus, un anneau écran G contenant un joint torique sur sa circonférence est déposé sur le diffuseur B1 dans le but d'empêcher l'écoulement préférentiel et le passage de particules entre le diffuseur B1 et les parois cylindriques de la cellule I. La figure 3.4 illustre à l'aide de photos numériques le montage employé pour simuler un écoulement unidirectionnel ascendant et un écoulement alterné.

Figure 3.3 Description schématique des filramètres utilisés (suite)

b) Filramètre pour un écoulement unidirectionnel ascendant et un écoulement alterné





a) Vue générale du montage

b) Vue du filtramètre

Figure 3.4 Filtramètre pour un écoulement unidirectionnel ascendant et alterné

Les caractéristiques de cet appareil sont présentées dans les sections suivantes.

3.3.1 Inversion de l'écoulement

Le circuit d'alimentation qui permet l'alternance de la direction des gradients hydrauliques est inspiré du montage de Fannin et Hameiri (1999). Trois récipients à niveau de déversoir constant sont utilisés pour inverser la direction de l'écoulement à travers le système géotextile-sol (portion droite de la figure 3.3 b). Le gradient hydraulique imposé au système est contrôlé par la même différence de niveau Δh entre les trois récipients. Une valve de type solénoïde à trois voies S1, contrôlée par le système d'acquisition, est utilisée pour changer la direction de l'écoulement. Son fonctionnement est illustré en médaillon (figure 3.3 b). Lorsque le solénoïde est fermé, un écoulement ascendant est imposé. L'eau circule du récipient entrée E vers le bas de la cellule puis à

travers le sol et elle est vidangée par le trop-plein L du récipient entrée-sortie E-S. L'ouverture du solénoïde impose un écoulement descendant. Dans ce cas, l'eau circule du récipient entrée-sortie E-S vers le haut de la cellule, puis à travers le sol et elle est vidangée par le trop-plein L du récipient sortie S.

La portion gauche de la figure 3.3 b illustre le circuit d'alimentation qui permet l'application d'un écoulement unidirectionnel ascendant. Le système est alimenté par le récipient E et le solénoïde S1 est maintenu en position fermée. L'eau sortant du système par le trop-plein du récipient E-S, est recueillie dans un entonnoir fixé au sommet d'un cylindre Q1. Ce cylindre est relié par sa base au petit cylindre Q2. Au début de chacun des gradients, les niveaux d'eau dans Q1 et Q2 sont fixés au sommet du cylindre Q2. Donc, l'eau sortant du système tombe dans l'entonnoir et le cylindre Q1, ce qui fait déborder le cylindre Q2, qui est fixé à l'intérieur d'une burette Q3 de plus grand diamètre et fermée à son extrémité inférieure. Un capteur de pression différentielle M5 mesure la hauteur de la colonne d'eau dans cette burette en fonction du temps, ce qui nous permet de mesurer le débit et, par conséquent, la perméabilité du système. Pour éviter que la hauteur de la colonne d'eau dans la burette Q3 ne s'élève au-dessus du sommet du cylindre Q2, une valve de type solénoïde à deux voies S2, contrôlée par le système d'acquisition, vide la burette Q3 de façon périodique. Il faut cependant noter que le débit du système n'est seulement mesuré que lorsque l'écoulement est ascendant. Dans l'autre direction, l'eau sortant du système est évacuée par le trop-plein L du récipient sortie (S).

3.3.2 Collecte des particules passantes au sommet et à la base de l'échantillon

Sous la cellule, un tube transparent D permet de recueillir les particules qui ont traversé le diffuseur B1. Les particules ayant traversé le géotextile B2 sont également recueillies à la fin de l'essai. Puisque la vitesse d'écoulement est faible, les particules qui traversent ce géotextile B2 ne sont pas entraînées par l'eau vers le récipient E-S. Elles restent

plutôt en suspension dans l'espace formé entre le piston J et le couvercle de la cellule I puis elles se déposent sur le tamis support H. Pour recueillir ces particules à la fin de l'essai, nous nettoyons en place la surface du tamis support H et du géotextile B2 à l'aide d'un système d'aspiration.

3.3.3 Application d'une contrainte de confinement sur l'échantillon et mesure des tassements

Un cylindre pneumatique N permet d'appliquer uniformément une pression verticale sur l'échantillon de sol. L'intensité de cette pression est lue sur le manodétendeur O. La pression est appliquée par le cylindre pneumatique N sur le piston J qui est maintenu solidaire de la cellule I par le cran de blocage K. Ainsi, le couvercle et la cellule I, le piston J, le géotextile B2 et le tamis support supérieur H, descendent par rapport à la base du montage C. De cette façon, les distances à l'interface de mesure, entre le géotextile B2 et les piézomètres M, sont conservées.

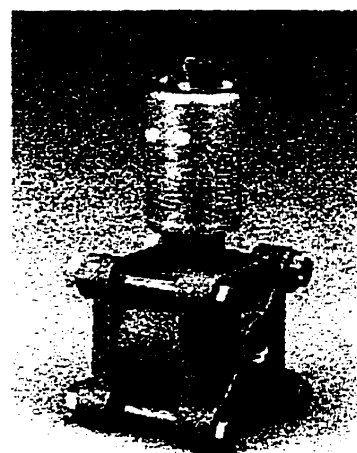
Puisque la cellule descend par rapport à la base, cette dernière agit comme un piston qui comprime l'échantillon de sol A. La contrainte est transmise au sol à son interface inférieure avec le diffuseur B1. Elle est cependant amoindrie par le frottement du sol le long des parois de la cellule I et par le frottement des joints toriques inférieurs (F et anneau écran G). La contrainte qui s'exerce à l'interface supérieure entre le géotextile B2 et le sol ne constitue donc qu'une certaine proportion de la contrainte appliquée sur la cellule I par l'intermédiaire du cran de blocage K. Cette proportion variait d'un essai à l'autre et elle n'a pu être évaluée quantitativement. Finalement, un potentiomètre linéaire P enregistre le mouvement relatif entre le bâti du cylindre pneumatique N et la cellule I. Lorsque la cellule I descend par rapport au bâti, le potentiomètre linéaire P mesure ce mouvement et par conséquent, le tassement du sol.

3.3.4 Capteurs de pression différentielle

Le filtramètre de la figure 3.3 b comporte 6 piézomètres M (figure 3.5). Le piézomètre M1 situé au sommet du filtramètre est un capteur de pression de type Transducteur P3061 fabriqué par la compagnie Schaevitz. Les autres piézomètres sont des capteurs de pression différentielle fabriqués par la compagnie Viatran (modèle #274). Étant donné la disponibilité des capteurs, nous n'avons dupliqué que les mesures de la charge à une distance de 25 mm de l'interface géotextile-sol. Pour tous les capteurs, nous avons évalué leur précision en imposant une charge hydraulique statique. Deux capteurs M3 et M4, situés à 75 mm du géotextile et à la base du filtramètre, ont une capacité de 1 400 mm de hauteur d'eau et une sensibilité de $\pm 0,2$ mm. Le capteur M1 situé au sommet du filtramètre présente également une capacité de 1 400 mm mais une précision de $\pm 0,4$ mm. Les deux capteurs M2 situés à 25 mm du géotextile ont une capacité de 700 mm d'eau, et une précision de $\pm 0,15$ mm. Il faut noter que dans tous les essais ces deux capteurs ont donné des lectures de pression similaires. Quant au capteur M5 qui détermine la hauteur de la colonne d'eau dans la burette Q3, il mesure une hauteur oscillant entre 0 et 520 mm et offre une précision de $\pm 0,01$ mm.



a) Transducteur P3061 par Schaevitz



b) Modèle #274 par Viatran

Figure 3.5 Schéma des capteurs de pression utilisés avec le filtramètre

Les cinq capteurs qui mesurent la pression à différents endroits dans le sol sont utilisés comme capteurs de pression différentielle. Pour ce faire, tous les capteurs sont reliés par leur sortie « Low » à une même burette dont le niveau d'eau peut être ajusté. Dans notre cas, ce niveau correspond à celui du déversoir du récipient S. La sortie « Hi » des capteurs est quant à elle reliée au filtramètre. Chaque capteur mesure donc la différence de pression qu'il existe entre leurs sorties « Low » et « Hi ». Puisque les sorties « Low » des capteurs sont reliées à la même burette, les pressions mesurées sont relatives.

3.4 Procédure expérimentale

Avant d'assembler le montage, plusieurs opérations doivent être effectuées. Celles-ci consistent en le calibrage des capteurs, la saturation des géotextiles et la préparation de l'échantillon de sol.

3.4.1 Calibrage des capteurs de pression

D'abord, le calibrage des capteurs est effectué. Pour ce faire, tous les capteurs sont reliés à une même burette dont le niveau d'eau est ajusté au même niveau que le déversoir du récipient sortie (S). La mesure de référence ou le zéro des capteurs est fixé à ce niveau ou « datum » (voir figure 3.3 b). Par la suite, nous faisons varier le niveau d'eau dans la burette et notons les différentes réponses des capteurs. Ces mesures permettent finalement de déterminer le facteur de conversion des variations de voltage en hauteurs de colonne d'eau exprimées en mm ($\text{mV} \rightarrow \text{mm d'eau}$) de chacun des capteurs.

3.4.2 Saturation des géotextiles

Ensuite, les échantillons de géotextile sont taillés et pesés. L'étape suivante consiste à saturer les géotextiles et à s'assurer qu'aucune bulle d'air ne soit emprisonnée à

l'intérieur. L'eau utilisée est désaérée à un contenu inférieur à 2 ppm d'oxygène dissous et maintenue à la température de la pièce, soit entre 20 et 25°C. Cette restriction permet de limiter ou d'éliminer la formation de bulles d'air dans le filtramètre. Les deux géotextiles B1 et B2 sont préalablement saturés sous vide pendant quelques heures avant leur mise en place dans le filtramètre. Par la suite, les joints d'étanchéité F sont lubrifiés avec de la graisse de silicone. Nous mettons en place la cellule I, le diffuseur B1 et l'anneau-écran G. Pour saturer les tubes reliant le filtramètre aux capteurs, le niveau d'eau dans la cellule est monté jusqu'au niveau de référence précédemment mentionné. Le montage est laissé ainsi quelques heures pour s'assurer de la saturation des tubes et du diffuseur B1. Finalement, nous utilisons un système d'aspiration pour réduire le niveau d'eau dans le filtramètre à un filet d'eau de 2 à 5 mm d'épaisseur au-dessus du diffuseur B1. La saturation complétée, le sol est mis en place.

3.4.3 Mise en place du sol

Le sol est mélangé à l'aide d'un séparateur de sol pour homogénéiser l'échantillon. Pour les sols silteux ou peu perméables ($k < 10^{-5}$ m/s), il est recommandé par SAGEOS (1996) d'utiliser la technique d'imbibition des particules. Pour ce faire, une certaine quantité d'eau est ajoutée au mélange pour obtenir une consistance boueuse. Après une période de repos de 24 heures, le sol est déposé sous forme d'une pâte par tranches de 25 mm dans 2 à 5 mm d'eau pour finalement atteindre une hauteur totale de 150 mm. Le sol est dans un état lâche puisqu'il n'est ni consolidé ni égalisé et une durée minimale de deux heures sépare la déposition de la prochaine couche.

Un cordon de silicone est ensuite déposé au-dessus de l'échantillon de sol avant la mise en place du géotextile supérieur B2. Ce cordon de silicone a pour but de sceller tout espace entre ce géotextile et la paroi de la cellule I et de contrer l'écoulement préférentiel. Finalement, les parties supérieures du filtramètre, soit le géotextile B2, le

tamis support H, le piston J, le couvercle de la cellule et le cran de blocage K, sont mises en place. La contrainte de confinement est ensuite appliquée sur le système, par incréments de 5 à 20 kPa. Le tassement du sol en fonction du temps est mesuré par le potentiomètre linéaire et le système est laissé à ce niveau de contrainte jusqu'à ce qu'il ne varie plus en fonction du temps.

3.4.4 Application des gradients hydrauliques et déroulement de l'essai

Le montage effectué, un gradient hydraulique unidirectionnel ascendant égal à l'unité est d'abord imposé au système pour une période de quatre heures. Par la suite, un écoulement alterné pour une durée de 16 heures est appliqué. Tout comme Fannin et Hameiri (1999), nous imposons au système une période de 50 secondes, c'est-à-dire que l'écoulement est ascendant pendant 25 secondes, puis il est inversé, soit descendant, pendant une autre période de 25 secondes. Finalement, un écoulement unidirectionnel ascendant d'une durée de 4 heures complète les 24 heures à ce gradient.

Cette procédure expérimentale se base sur les observations suivantes. D'abord, le mécanisme d'ouverture et de fermeture du solénoïde occasionne un changement de volume qui fausse la mesure du débit réel qui traverse le système (voir tableau 4.2). La perméabilité ne pouvant pas être estimée pendant l'écoulement alterné, un écoulement unidirectionnel d'une durée de 4 heures est imposé au système et précède un écoulement alterné. Cette durée de 4 heures est minimale pour permettre au système d'atteindre l'équilibre sous un écoulement unidirectionnel. De plus, un canal s'est formé au cours de l'écoulement alterné au dernier gradient et il n'a été observé que lors du démontage (essai 1 - voir tableau 4.2). Un écoulement unidirectionnel est donc imposé avant et après l'écoulement alterné. Cela permet de détecter la présence d'un écoulement préférentiel qui pourrait se former lors de l'écoulement alterné et de comparer directement l'influence de l'écoulement alterné à une valeur de gradient donnée.

À la fin de chaque gradient, le calibrage des capteurs de pression est de nouveau vérifié. Le gradient est ensuite augmenté, passant de 1 à 2,5, à 5 et à 7,5, tel qu'indiqué dans la norme de l'ASTM. La pression sur le piston J est ajustée pour tenir compte de l'augmentation des pressions d'eau à l'intérieur de la cellule I. Durant l'essai, les mesures des pressions en différents endroits dans le sol, du débit qui traverse le système et du déplacement du potentiomètre sont compilées par le logiciel VEE de Hewlett-Packard. Pendant l'écoulement unidirectionnel, des mesures sont enregistrées à toutes les 30 secondes tandis qu'elles le sont à toutes les 5 secondes pendant l'écoulement alterné. À cause du délai aléatoire qui sépare l'activation du solénoïde de la prise de donnée, nous n'avons pas pu exploiter les mesures piézométriques au cours de l'écoulement alterné. Il faut noter que la perméabilité du système est déterminée uniquement lors de l'écoulement unidirectionnel ascendant. À la fin de l'essai, la masse de sol M_P qui a traversé les géotextiles situés au-dessous et au-dessus du sol est récupérée. La surface des géotextiles est également nettoyée puis ceux-ci sont séchés pour mesurer la masse de sol coincé entre leurs fibres M_T .

3.5 Compilation des résultats

Au cours de l'écoulement unidirectionnel ascendant, les mesures du débit, du tassement du sol et des pressions mesurées à différents endroits dans le sol permettent d'évaluer la perméabilité du système géotextile-sol, de l'interface et du sol. Les pressions servent également à calculer le rapport des gradients GR_{ASTM} . Au début de l'essai, les masses volumiques initiale et comprimée du sol sec sont définies comme étant respectivement la masse volumique du sol sec après la mise en place du sol et après l'application de la contrainte de confinement. À la fin de l'essai, les masses de sol passant et coincé dans les géotextiles sont estimées.

3.5.1 Perméabilité du système géotextile-sol

Au cours de l'écoulement unidirectionnel, la perméabilité du système à la température de l'essai est calculée selon la loi de Darcy à l'aide de l'équation suivante:

$$k_{\text{système}} = \frac{Q}{100 * S * \frac{\Delta h}{(H + T_g)}} \quad (3.3)$$

- où $k_{\text{système}}$ est la perméabilité du système à la température de l'essai en m/s,
 Q , le débit du système cm^3/s ,
 S , la surface perpendiculaire à l'écoulement en cm^2 ,
 Δh , la différence de charge hydraulique appliquée à l'échantillon de sol calculée à partir des piézomètres M1 et M4 en mm,
 et $H+T_g$, la hauteur de sol H plus l'épaisseur du géotextile T_g en mm.

Afin d'évaluer le potentiel au colmatage d'un système géotextile-sol, la perméabilité du sol seul et de l'interface géotextile-sol ont été calculées. Idéalement, la perméabilité du sol est indépendante du temps et du gradient hydraulique imposé (Shi, 1993).

$$k_{\text{sol}} = \frac{Q}{100 * S * \frac{(\Delta h_{75} - \Delta h_{25})}{50}} \quad (3.4)$$

$$k_{\text{interface}} = \frac{Q}{100 * S * \frac{(\Delta h_{25} - \Delta h_0)}{(25 + T_g)}} \quad (3.5)$$

- où k_{sol} est la perméabilité du sol en m/s,
 $k_{\text{interface}}$ est la perméabilité de l'interface géotextile-sol en m/s,
 Δh_{25} , la charge mesurée par les piézomètres M2 en mm,
 Δh_{75} , la charge mesurée par le piézomètre M3 en mm,
 et Δh_0 , la charge mesurée par le piézomètre M1 en mm.

3.5.2 Rapport des gradients GR_{ASTM}

Pour chacun des gradients hydrauliques imposés au système, le rapport des gradients GR_{ASTM} est calculé au cours de l'écoulement unidirectionnel ascendant qui précède et suit l'écoulement alterné.

$$GR_{ASTM} = \frac{i_{0-25}}{i_{25-75}} = \frac{\Delta h_{0-25} / L_{0-25}}{\Delta h_{25-75} / L_{25-75}} \quad (3.6)$$

- où Δh_{0-25} est la perte de charge entre le piézomètre M1 situé en haut de l'échantillon et les piézomètres M2 situés à 25 mm du géotextile en mm,
 Δh_{25-75} est la perte de charge entre les piézomètres M2 à 25 mm et le piézomètre M3 situé à 75 mm du géotextile en mm,
 L_{0-25} est la distance entre les piézomètres M1 et M2, soit 25 mm,
 et L_{25-75} est la distance entre les piézomètres M2 et M3, soit 50 mm.

Le rapport des gradients GR_{ASTM} est un indice pour évaluer la compatibilité d'un sol et d'un géotextile et le potentiel au colmatage de ce système. Une interprétation des résultats du GR_{ASTM} peut s'exprimer comme suit. Une valeur de GR_{ASTM} égale à un ou légèrement inférieur est préférable puisqu'elle indique que le géotextile a peu d'effet sur la distribution de la charge hydraulique dans le sol et que celui-ci est stable. Un GR_{ASTM} inférieur à un peut signifier que des particules du sol ont migré à travers le système et qu'une structure avec pontage plus ouverte s'est développée. Par contre, une diminution continue de ce rapport est indicatrice d'un lessivage des particules fines. Quant aux valeurs de GR_{ASTM} supérieures à l'unité, elles indiquent que le système est colmaté et que l'écoulement est restreint. Cependant, l'écoulement résultant peut satisfaire aux exigences de l'ouvrage si l'équilibre est atteint.

3.5.3 Masse volumique initiale et comprimée du sol sec

La masse volumique initiale du sol sec ($\rho_{d \text{ init}}$) s'obtient en divisant la masse de sol sec déposé sur le géotextile (M) par le volume du filtramètre (V). Quant à la masse volumique comprimée du sol sec ($\rho_{d \text{ comp}}$), elle s'obtient en divisant la masse de sol sec déposé sur le géotextile (M) par le volume réduit du filtramètre (V_{rd}). Ce volume réduit tient compte du tassement du sol ΔH dû à l'application de la contrainte de confinement.

$$\rho_{d \text{ init}} = \frac{M}{V} = \frac{M}{\left(\frac{\pi D^2}{4} \cdot H \right)} \quad \text{en kg/m}^3 \quad (3.7)$$

$$\rho_{d \text{ comp}} = \frac{M}{V_{rd}} = \frac{M}{\left(\frac{\pi D^2}{4} \cdot (H - \Delta H) \right)} \quad \text{en kg/m}^3 \quad (3.8)$$

3.5.4 Masse de sol passant les géotextiles

La masse de sol passant les géotextiles B1 et B2 par unité de surface, M_P , est égale à la masse du sol qui a traversé le géotextile (W_P) divisée par la surface perpendiculaire à l'écoulement (S). Comme nous l'avons cité précédemment, une valeur de 2 500 g/m² a été avancée par Lafleur *et al.* (1989) pour délimiter un lessivage excessif des particules fines d'un sol. L'erreur absolue sur la masse de sol est équivalente à deux fois la précision de la balance : une première fois pour la masse du récipient et une deuxième fois pour la masse du récipient et du sol. Puisque la balance est précise à 0,01 g, la précision sur la masse de sol passant est de 0,02 g.

$$M_P = \frac{W_P}{S} \quad \text{en kg/m}^2 \quad (3.9)$$

3.5.5 Masse de sol coincé dans les géotextiles

La différence entre la masse du géotextile sec à la fin de l'essai et après nettoyage du sol collé en surface et sa masse sèche avant l'essai donne la masse de sol retenu dans le géotextile. La masse de sol coincé dans le géotextile par unité de surface, M_T , est calculée en divisant cette masse de sol sec retenu (W_T) par la surface perpendiculaire à l'écoulement (S). Il faut cependant noter que nous considérons qu'il y a une bonne proportion de silicone du montage inclus dans cette mesure. La précision sur la masse de sol coincé dans les géotextiles est de 0,02 g.

$$M_T = \frac{W_T}{S} \quad \text{en kg/m}^2 \quad (3.10)$$

CHAPITRE 4

BILAN DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'étude expérimentale a porté sur la compatibilité en filtration de cinq géotextiles et de cinq sols en adaptant le test du rapport des gradients pour simuler des conditions d'écoulement alterné. Ce chapitre détaille dans un premier temps le programme des essais. Les critères qui servent de base à l'interprétation des résultats ainsi que ces résultats sont par la suite présentés. L'influence du rapport de rétention, de la direction et de l'intensité du gradient hydraulique ainsi que du confinement sur l'équilibre des systèmes géotextile-sol est d'abord mise en évidence. La comparaison des résultats montre aussi l'effet de la stabilité interne des sols et de la forme de leurs particules sur la rétention des sols par des géotextiles non tissés. Finalement, nous vérifions la validité des critères théoriques existants et nous proposons un nouveau critère de rétention des sols en conditions d'écoulement alterné.

4.1 Programme d'essais

Cette étude sur l'applicabilité du test du rapport des gradients en conditions d'écoulement alterné a permis la réalisation de quelques tests préliminaires et de 21 essais. Le programme d'essais vise dans un premier temps à évaluer l'influence du rapport de rétention, de la direction et de l'intensité du gradient hydraulique ainsi que du confinement sur l'équilibre des systèmes géotextile-sol étudiés. Nous étudions également l'effet de la stabilité interne des sols et de la forme de leurs particules sur la rétention des

sols par des géotextiles non tissés. Finalement, le programme d'essais évalue l'importance de paramètres complémentaires au rapport de rétention à considérer pour prédire correctement le comportement en filtration des géotextiles, soit le nombre de constriction des géotextiles non tissés et le confinement.

Le programme d'essais est détaillé dans les paragraphes suivants :

- Pour évaluer l'influence du rapport de rétention sur le comportement en filtration des géotextiles, quatorze systèmes géotextile-sol différents ont été soumis au test du rapport des gradients. Pour tous ces systèmes, le rapport de rétention s'échelonne entre 1 et 7, à l'exception d'un système dont le R_R est inférieur à l'unité.
- Des essais ont été réalisés avec le sol F en contact avec le géotextile BF60 sous diverses conditions hydrauliques et de confinement dans le but de déterminer l'importance de l'intensité du gradient hydraulique et du confinement sur l'équilibre du système BF60-F.
- Afin de déterminer l'influence de la direction de l'écoulement sur la stabilité d'un système géotextile-sol donné, des essais ont été réalisés en utilisant le sol B en contact avec le géotextile BF60 sous des conditions d'écoulement unidirectionnel descendant (essai no. 1) et ascendant (essais no. 2 à 4).
- Pour évaluer l'impact de la stabilité interne des sols sur le comportement en filtration d'un système géotextile-sol, des essais ont été réalisés en utilisant les sols C et I en contact avec les géotextiles BF60 et BSF8 sous les mêmes conditions de confinement. Les granulométries des sols C et I sont assez rapprochées sauf que le sol I présente un potentiel d'instabilité interne tandis que le sol C peut être considéré comme stable selon la méthode de Kenney et Lau (1985 et 1986).
- Afin d'évaluer l'influence de la forme des particules du sol, le comportement en filtration du sol F a été étudié avec le géotextile NTT (essai no. 20) tout en reproduisant les mêmes conditions de confinement que celles imposées au système NTT-B (essai no. 5). Le sol B est constituée de particules sphériques tandis qu'elles

sont anguleuses et aplaties dans le cas du sol F.

- Les deux géotextiles fabriqués par Bidim, le F60 et SF8, ont une ouverture de filtration similaire mais comportent un nombre de constriction m différent : m est égal à 25 pour le BF60 et à 50 pour le BSF8. Pour déterminer l'impact de ce paramètre m sur le comportement en filtration des géotextiles non tissés, des essais ont été réalisés avec les sols F, C et I en contact avec ces deux géotextiles.
- Pour évaluer l'influence du confinement sur la quantité de particules lessivées à travers les géotextiles, deux systèmes ont été étudiés sous deux contraintes de confinement initiales différentes. D'abord, la rétention du sol I par le géotextile BF60 a été analysée sous une contrainte de confinement de 100 et de 200 kPa. Quant au sol F en contact avec le géotextile NTT, ce système a été soumis à une contrainte de confinement initiale de 42 et de 200 kPa.

Pour chacun des paramètres étudiés, le tableau 4.1 résume ces propos en présentant les différents essais ainsi que les sols et les géotextiles que nous avons employés pour caractériser l'influence de ces paramètres. De plus, la colonne intitulée « Conditions d'essais » décrit les conditions qui ont été imposées à chacun des essais afin de comparer les résultats. Le tableau 4.1 indique également qu'un essai peut servir à déterminer l'effet de plusieurs paramètres. Par exemple, l'essai no. 13 combinant le sol I et le géotextile BF60 contribue à caractériser l'impact du rapport de rétention, de la stabilité interne des sols, du nombre de constriction des géotextiles et du confinement. Cependant, il faut noter que nous n'avons pas évalué la reproductibilité des essais puisque aucun essai n'a été réalisé une seconde fois.

Parmi ces 21 expériences, certaines n'ont pas pu être complétées. Nous avons en effet observé plusieurs problèmes expérimentaux dont l'apparition de canaux ou de cavités le long des parois de la cellule. Les difficultés rencontrées d'un essai à l'autre et les mesures correctives apportées sont expliquées au tableau 4.2.

Tableau 4.1 Programme des essais du rapport des gradients en écoulement alterné

Paramètre	Essai	Sol	Géot.	Conditions d'essais
1) Rapport de rétention	5	B	NTT	$R_R < 2,1$
	1 à 4	B	BF60	$R_R = 3,8$
	6	B	BSF8	$R_R = 3,8$
	7	O	BSF8	$R_R = 6,7$
	19 et 20	F	NTT	$R_R < 1,9$
	8 à 10	F	BF60	$R_R = 3,5$
	11	F	BSF8	$R_R = 3,5$
	12	C	BF60	$R_R = 2,1$
	21	C	BSF8	$R_R = 2,1$
	15	I	NTT	$R_R < 1$
	13 et 18	I	BF60	$R_R = 1,7$
	14	I	BSF8	$R_R = 1,7$
2) Intensité du gradient et du confinement	16	I	NTP	$R_R = 2,3$
	17	I	T	$R_R = 4,3$
3) Direction de l'écoulement	8	F	BF60	Sous $\sigma_{conf} = 58$ kPa : lessivage à $i = 2,5$
	9	F	BF60	Sous $\sigma_{conf} = 101$ kPa : lessivage à $i = 7,5$
	10	F	BF60	Sous $\sigma_{conf} = 200$ kPa : pas de lessivage
4) Stabilité interne des sols	1	B	BF60	Écoulement unidirectionnel descendant
	2 à 4	B	BF60	Écoulement unidirectionnel ascendant
	12	C	BF60	Sol C : sol stable Sol I : sol instable
	13	I	BF60	
5) Forme des particules des sols	21	C	BSF8	
	14	I	BSF8	
6) Nombre de constriction des géotextiles	5	B	NTT	Sol B : particules sphériques Sol F : particules allongées et anguleuses
	20	F	NTT	
	10	F	BF60	BF60 : $m = 25$ BSF8 : $m = 50$
	11	F	BSF8	
	12	C	BF60	
	21	C	BSF8	
	13	I	BF60	
	14	I	BSF8	
7) Confinement	13	I	BF60	$\sigma_{conf} = 200$ kPa
	18	I	BF60	$\sigma_{conf} = 100$ kPa
	19	F	NTT	$\sigma_{conf} = 200$ kPa
	20	F	NTT	$\sigma_{conf} = 42$ kPa

Tableau 4.2 Observations et mesures correctives apportées à la procédure expérimentale des essais du rapport des gradients en écoulement alterné

Essai no.	Difficultés rencontrées	Mesures correctives
Tests	• Le silt d'Ormstown prélevé à l'automne 1999 est plus argileux que la granulométrie désirée. • Le mécanisme d'ouverture et de fermeture du solénoïde occasionne un changement de volume qui fausse la mesure du débit réel qui traverse le système (allure du graphique du volume d'eau sortant en fonction du temps en escalier).	⇒ La granulométrie a été reconstituée à partir d'un mélange de billes de verre et de kaolin. ⇒ La perméabilité ne pouvant pas être estimée pendant l'écoulement alterné, un écoulement unidirectionnel vers le bas est imposé pendant 4 heures. Un écoulement alterné d'une durée de 20 heures complète le gradient. La perméabilité est estimée à tous les gradients au cours de l'écoulement unidirectionnel.
1	• Le diffuseur est plus ouvert que le géotextile pour ne pas occasionner de perte de charge supplémentaire. • Pour l'essai no. 1, l'écoulement unidirectionnel est descendant. • La contrainte de confinement a été appliquée en un seul incrément. • Un canal s'est formé au cours de l'écoulement alterné à un gradient hydraulique égal à 10 et il n'a été observé que lors du démontage. • Seules les particules ayant traversé le géotextile situé sous le sol ont été recueillies et pesées. • Des essais antérieurs ont permis de constater que la mesure de la pression à 6 mm de l'interface ne donnait pas plus d'indication sur le comportement en filtration.	⇒ Nous avons décidé d'utiliser le même géotextile au-dessous et au-dessus de l'échantillon de sol. ⇒ Un écoulement ascendant est plus représentatif des conditions d'écoulement dans les revêtements de digues. ⇒ L'application de la contrainte en plusieurs étapes est plus appropriée. ⇒ Un écoulement unidirectionnel est imposé avant et après l'écoulement alterné, ce qui permet de détecter la présence d'un écoulement préférentiel qui pourrait se former lors de l'écoulement alterné. ⇒ Les particules qui traversent le géotextile supérieur sont recueillies à la fin de l'essai en nettoyant la surface du tamis support et du géotextile B2 à l'aide d'un système d'aspiration. ⇒ Deux tubes piézométriques sont installés à 25 mm de l'interface et à 180° l'un de l'autre. Les deux séries de mesures permettent de vérifier l'homogénéité de l'échantillon de sol.

Tableau 4.2 Observations et mesures correctives (suite)

Es	Difficultés rencontrées	Mesures correctives
2	- Des cavités se sont formées dans le sol à l'entrée des tubes reliant les capteurs, ce qui a diminué les pressions mesurées dans le sol. - Au 3^e gradient, la contrainte appliquée s'est avérée insuffisante.	⇒ Pour empêcher la formation de cavités dans le sol à l'entrée des tubes, nous avons mis en place des boudins circulaires à ces endroits. ⇒ Le confinement du sol est augmenté à ce gradient pour le prochain essai.
3	Au 4^e gradient, la contrainte appliquée s'est avérée insuffisante.	⇒ Le confinement du sol est augmenté à ce gradient pour le prochain essai.
4	Un lessivage continu de particules a été observé à travers le géotextile inférieur. La formation d'une cavité puis d'un canal laisse supposer qu'un espace entre le géotextile et la paroi de la cellule est responsable de ce lessivage.	⇒ Un anneau écran, contenant un joint torique sur sa circonférence, est déposé sur le géotextile inférieur. Cet anneau est utilisé pour empêcher l'écoulement préférentiel et le passage de particules entre ce géotextile et les parois du cylindre.
5	Le géotextile plus serré NTT initie une structure avec pontage dans le sol B sous une contrainte de confinement variant de 42 à 80 kPa.	
6	- Les billes de verre qui reconstituent le sol sont de forme sphérique et entraînent des conditions trop critiques et sévères. - Pour chacun des gradients, la contrainte de confinement qui a été utilisée lors de l'essai 5 a été appliquée. Contrairement à cet essai, le sol n'est pas retenu.	⇒ La granulométrie du silt est reconstituée à partir d'un agrégat concassé dont les particules sont anguleuses et allongées. ⇒ Un cordon de silicone est déposé au-dessus du sol avant la mise en place du géotextile supérieur, afin de sceller tout espace entre ce géotextile et la paroi du cylindre.
7	- L'agrégat concassé original est plus argileux et sa perméabilité est un ordre de grandeur inférieur. - Au 3^e gradient, la contrainte appliquée s'est avérée insuffisante.	⇒ Nous avons entrepris de laver ce sol pour enlever la portion excédentaire de particules fines. ⇒ Le confinement du sol est augmenté à ce gradient pour le prochain essai.
8	Au 2^e gradient, la contrainte appliquée s'est avérée insuffisante.	⇒ Le confinement du sol est augmenté à ce gradient pour le prochain essai.
9	Au 4^e gradient, la contrainte appliquée s'est avérée insuffisante.	⇒ Pour les essais subséquents, une contrainte de 200 kPa est utilisée pour évaluer la rétention des sols soumis à une contrainte plus importante.

4.2 Critères d'interprétation des résultats

Afin d'évaluer la compatibilité en filtration d'un sol et d'un géotextile et de déterminer le potentiel au colmatage de ce système, les données suivantes sont produites pour l'ensemble des gradients hydrauliques imposés aux systèmes:

- perméabilité du système, de l'interface et du sol en fonction du temps pendant l'écoulement unidirectionnel;
- distribution des pertes de charge en fonction de la distance des capteurs par rapport à l'interface géotextile-sol à la fin de l'écoulement unidirectionnel, avant et après l'écoulement alterné – cette distribution de la charge est également mise en valeur par le rapport des gradients GR_{ASTM} ;
- tassement du sol en fonction du temps;
- quantité de sol passant les géotextiles.

Cette section détaille ces principaux critères d'interprétation des résultats.

4.2.1 Perméabilité du système géotextile-sol

Globalement, la perméabilité du système est indicatrice de colmatage lorsque celle-ci diminue au cours de l'essai ou révèle une tendance au lessivage, si elle augmente. La comparaison des perméabilités du système et de l'interface à celle du sol révèle les phénomènes suivants. Un système plus perméable que le sol suggère que des particules fines ont été expulsées du système. En plus, une perméabilité de l'interface géotextile-sol supérieure à la fois à celle du sol et à celle du système confirme le lessivage des particules fines de la zone adjacente au géotextile et la formation d'une zone plus perméable à cet endroit (figure 4.16 a). Dans le cas contraire, une interface moins perméable que le sol et le système indique que des particules fines ont d'abord migré à travers le géotextile puis qu'elles s'accumulent à l'interface géotextile-sol. Cependant, si la perméabilité du système varie peu au cours de l'essai ou si elle demeure supérieure à celle du sol, cela

laisse supposer que les particules accumulées à l'interface n'entravent pas ou peu l'écoulement de l'eau à travers le système (figure 4.7 a).

De plus, un système moins perméable que le sol suggère que des obstacles à l'écoulement sont présents à la surface du géotextile. Toutefois, si la perméabilité de l'interface est supérieure à celle du sol, ces perméabilités locales suggèrent la présence d'une zone plus perméable à l'interface (figure 4.13 a). Quant à la perméabilité du sol, elle est indépendante du temps et du gradient hydraulique imposé. Une hausse de cette perméabilité au cours d'un essai indique alors une migration des particules fines de la zone centrale vers la zone adjacente au géotextile (figure 4.16 b).

4.2.2 Distribution de la charge hydraulique dans le sol et GR_{ASTM}

La distribution de la charge hydraulique dans le sol indique une tendance au colmatage ou au lessivage lorsqu'elle n'est pas linéaire dans tout l'échantillon de sol. Un colmatage externe ou de surface est associé à une concentration de la perte de charge dans la zone adjacente au géotextile (figure 4.2). Dans le cas contraire, une faible perte de charge à l'interface géotextile-sol suggère la formation d'une zone plus perméable à cet endroit (figure 4.18 b). De plus, un faible écart entre la distribution des pressions avant et après l'application de gradients alternés signifie qu'il n'y a pas ou peu de modification à la structure causée par l'inversion de l'écoulement (figures 4.14 a et b).

Le rapport des gradients GR_{ASTM} est un indice pour évaluer le potentiel au colmatage d'un système géotextile-sol. Une valeur de GR_{ASTM} égale à un ou légèrement inférieur est préférable puisqu'elle indique que le géotextile a peu d'effet sur la distribution de la charge hydraulique dans le sol et que le système est en équilibre (figure 4.12). Un GR_{ASTM} inférieur à un peut signifier que des particules du sol ont migré à travers le système et qu'une structure avec pontage plus ouverte s'est développée (figure 4.17).

Par contre, une diminution continue de ce rapport est indicatrice d'un lessivage des particules fines. Des valeurs de GR_{ASTM} supérieures à l'unité indiquent que l'écoulement est restreint par des obstacles présents à la surface du géotextile (figure 4.4). Une augmentation du GR_{ASTM} suggère qu'un colmatage progressif du géotextile survient.

Les graphiques des perméabilités locales et du rapport des gradients mesurés avant et après l'application de gradients alternés permettent d'observer l'influence de cet écoulement alterné à l'interface géotextile-sol. Au cours d'un palier de 4 heures, les valeurs ne varient pas beaucoup alors qu'elles peuvent accuser un changement plus marqué lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient (figures 4.7 a et b, 4.8). Dans ce cas, le système géotextile-sol n'a pas atteint l'équilibre. L'écoulement induit un réarrangement des particules et modifie la structure du sol.

4.2.3 Tassement du sol

Enfin, la pente du graphe du tassement du sol en fonction du temps indique l'évolution vers l'équilibre du système géotextile-sol. Une pente élevée suggère que l'écoulement occasionne un réarrangement important de la structure du sol. À la limite, le lessivage du sol se manifeste de façon assez marquée et se traduit par une pente infinie sur le graphique du tassement en fonction du temps (figure 4.6). À l'opposé, la pente s'adoucit lorsque l'écoulement ne semble plus induire de réarrangement et/ou de lessivage de particules (figure 4.11). Le système géotextile-sol évolue alors vers l'équilibre.

4.2.4 Quantité de sol passant les géotextiles

Finalement, un lessivage du sol survient lorsque la masse totale de sol passant les géotextiles est supérieure à la limite acceptable de 2 500 g/m² proposé par Lafleur *et al.*

(1989). Les autres termes employés pour désigner ce phénomène sont le lessivage d'une quantité inacceptable de particules, le géotextile ne retient pas le sol ou le sol n'est pas retenu par le géotextile. Un lessivage d'une masse de sol inférieure à 2 500 g/m² est qualifié de lessivage d'une quantité acceptable de particules. Une M_P acceptable, un GR_{ASTM} égal à l'unité ou légèrement inférieur ainsi que la constance de la perméabilité du système suggèrent que le géotextile initie une structure avec pontage dans le sol. Les termes tels que, le sol est retenu correctement par le géotextile ou le géotextile retient correctement le sol, désigne également ce phénomène.

4.3 Résultats des essais

L'étude expérimentale a porté sur la compatibilité en filtration de cinq géotextiles et de cinq sols soumis à des conditions d'écoulement alterné. Les résultats des essais sont présentés dans cette section. D'abord, le tableau 4.3 indique les conditions imposées à chacun des essais ainsi que les conditions de mise en place des échantillons de sol. Ainsi, le sol employé et sa teneur en eau à la préparation, sa masse volumique initiale, celle après l'application de la contrainte de confinement initiale et l'intensité de cette contrainte sont spécifiés pour chaque essai. Le pourcentage comprimé, $\%_{comp}$, compare les masses volumiques initiale et comprimée du sol. Il s'obtient ainsi :

$$\%_{comp} = \frac{\rho_{d\ comp} - \rho_{d\ init}}{\rho_{d\ init}} \quad (4.1)$$

Ce tableau montre d'abord que la masse volumique initiale du sol C est nettement plus élevée et se situe autour de 1 800 kg/m³. Pour les autres sols, leur $\rho_{D\ init}$ est de l'ordre de 1 600 kg/m³. Nous pouvons également constater que la $\rho_{D\ comp}$ du sol B est plus importante lors de l'essai no. 1. Ceci est explicable par le fait que la contrainte de confinement initiale de 50 kPa a été appliquée sur le sol B en un seul incrément tandis que dans les autres cas, nous avons procédé en plusieurs étapes.

Tableau 4.3 Conditions d'essais et de mise en place des sols

Essai no.	Sol	w	$\rho_{D\text{ init}}$	$\rho_{D\text{ comp}}$	σ_{conf}	% comp
		%	kg/m ³	kg/m ³	kPa	%
Géotextile NTT						
5	B	21	1624	1709	41,8 à 79,5	5,2
15	I	23	1656	1828	200 à 211	10,4
19	F	28	1583	1767	200 à 211	11,6
20	F	28	1600	1733	41,8 à 79,5	8,3
Géotextile BF60						
1	B	21	1676	1837	50,0	9,6
2	B	21	16159	1690	25,7 à 28,3	4,6
3	B	21	1624	1712	25,7 à 41,8	5,4
4	B	21	1574	1682	25,7 à 32,4	6,9
8	F	32	1549	1641	58,0	5,9
9	F	28	1585	1693	58,0 à 101	6,8
10	F	28	1606	1790	200 à 211	11,5
12	C	23	1847	1960	200 à 211	6,1
13	I	24	1659	1839	200 à 211	10,8
18	I	22	1657	1812	100 à 120	9,4
Géotextile BSF8						
6	B	16	1657	1721	41,8 à 63,4	3,9
7	O	26	1566	1697	52,6 à 63,4	8,3
11	F	28	1584	1775	200 à 211	12,1
14	I	23	1626	1824	200 à 211	12,1
21	C	21	1795	1930	200 à 211	7,5
Géotextile NTP						
16	I	23	1648	1822	200 à 211	10,6
Géotextile T						
17	I	21	1679	1796	200 à 211	7,0

Le pourcentage comprimé suggère que les sols utilisés lors de cette étude comportent une compressibilité assez faible. Tous les sols ont été déposés dans un état lâche et un confinement pouvant atteindre 200 kPa n'occasionne qu'une augmentation d'au plus 12% de leur masse volumique. Le tassement subi par les échantillons lors de l'application de la contrainte de confinement initiale est présenté à l'annexe B. La figure 4.1 en présente un exemple.

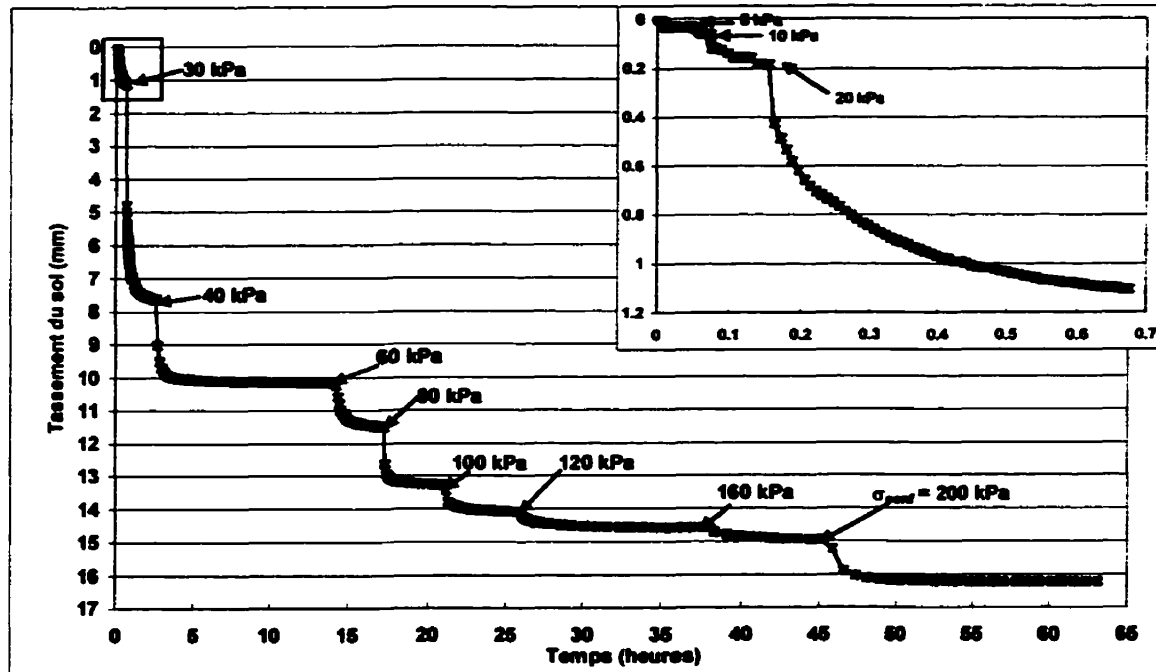


Figure 4.1 Tassement du sol dû à l'application de la contrainte de confinement

Le tableau 4.4 résume les principaux résultats des essais du rapport des gradients en écoulement alterné. Pour chacun des essais, nous présentons le sol et le géotextile employés, le rapport de rétention correspondant, le tassement du sol après l'application de la contrainte de confinement (tassement initial) et à la fin de l'essai (tassement final) et, par unité de surface, les masses de sol passant le géotextile inférieur et le géotextile supérieur, la masse totale de sol passant les géotextiles et les masses de sol coincé dans le géotextile inférieur et dans le géotextile supérieur. Le terme $\%M_p$ permet d'évaluer la proportion du tassement du sol qui est occasionné par le lessivage à travers les géotextiles d'une certaine quantité de particules et celle qui est reliée au compactage du sol mis en place dans un état lâche. Il correspond au rapport entre la masse observée de sol passant sur celle estimée à l'aide du tassement final du sol et de la masse volumique initiale du sol sec.

$$\% M_p = \frac{M_p \text{ observée}}{M_p \text{ estimée}} * 100 = \left(\frac{M_p \text{ observée}}{(\text{tass. final} * \rho_{D \text{ liq}})} \right) * 100 \quad (4.2)$$

Tableau 4.4 Résultats des essais du rapport des gradients en écoulement alterné

Es. no.	Sol	R_R	Tassement (mm)		M_P inf. ¹	M_P sup. ²	M_P tot. ³	M_T inf. ⁴	M_T sup. ⁵	% M_P
			Initial	Final	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	%
Géotextile NTT										
5	B	< 2,1	7,46	9,29	92	364	456	265	155	3,0
15	I	< 1,0	14,09	14,60	17	329	347	185	128	1,4
19	F	< 1,9	15,65	16,16	13	194	207	333	177	0,8
20	F	< 1,9	11,51	14,71	12	210	222	278	122	0,9
Géotextile BF60										
1	B	3,8	9,66	10,44	1150	N.M. ⁶	1150	51	N.M.	6,6
2	B	3,8	6,62					N.M.	N.M.	
3	B	3,8	7,73					146	3	
4	B	3,8	9,65					N.M.	N.M.	
8	F	3,5	8,38					332	275	
9	F	3,5	9,55					232	349	
10	F	3,5	15,42	16,16	22	459	481	371	254	1,9
12	C	2,1	8,65	8,94	123	108	231	329	115	1,4
13	I	1,7	14,67	15,23	41	409	451	256	159	1,8
18	I	1,7	12,84	14,07	25	499	524	317	78	2,2
Géotextile BSF8										
6	B	3,8	5,61					528	263	
7	O	6,7	11,53					N.M.	N.M.	
11	F	3,5	16,21	17,48	59	816	875	512	345	3,2
14	I	1,7	16,24	16,62	26	563	589	469	264	2,2
21	C	2,1	10,51	10,86	105	169	274	718	269	1,4
Géotextile NTP										
16	I	2,3	14,35	14,83	323	412	735	379	86	3,0
Géotextile T										
17	I	4,4	9,81	10,07				81	57	19,5

¹ Masse de sol passant le géotextile inférieur (sous le sol) par unité de surface.

² Masse de sol passant le géotextile supérieur (au-dessus du sol) par unité de surface.

³ Masse totale de sol passant les géotextiles par unité de surface.

⁴ Masse de silicone et de sol coincés dans le géotextile inférieur par unité de surface.

⁵ Masse de silicone et de sol coincés dans le géotextile supérieur par unité de surface.

⁶ Non mesuré.

⁷ Sol lessivé (canaux ou cavités le long des parois de la cellule).

Les cases ombragées mettent en évidence les systèmes géotextile-sol pour lesquels une quantité de sol passant supérieure à la limite acceptable de 2 500 g/m² proposée par

Lafleur *et al.* (1989) a été observée. Nous pouvons constater que ces systèmes sont tous caractérisés par un rapport de rétention R_R supérieur ou égal à 3,5. En excluant l'essai no. 1 dont l'écoulement unidirectionnel est descendant, nos résultats indiquent qu'un rapport de rétention égal ou inférieur à cette valeur de 3,5 est associé à des masses de sol passant acceptables. En ce qui concerne la masse de sol coincé dans les géotextiles, elle est généralement inférieure à 400 g/m². Le tableau 4.4 met en évidence le fait que le géotextile BSF8 a davantage tendance à retenir les grains de sol à l'intérieur de sa structure. En effet, les masses de sol coincé dans ce géotextile (M_T inférieur) sont toutes supérieures à 400 g/m².

Les tassements initiaux ont aussi été notés et ils varient de 5,61 à 16,24 mm, ce qui représente respectivement 4 et 11% de la hauteur de l'échantillon de sol. Pour les systèmes qui ont eu des quantités de sol passant inférieure à 2 500 g/m², les tassements initiaux constitue un fort pourcentage du tassement total, soit entre 78 et 98%. Pour les autres combinaisons, c'est également un pourcentage élevé jusqu'à ce qu'il se produise un lessivage du sol à des gradients subséquents. Ces tassements sont occasionnés d'une part, par le compactage du sol mis en place dans un état lâche et d'autre part, par le lessivage à travers le géotextile d'une certaine quantité de particules. Le $\%M_P$ permet de départager ces deux causes. À l'exception de l'essai no. 17, le rapport entre M_P observée et celle estimée à l'aide du tassement final est compris entre 0,8 et 6,6%. Donc, le tassement observé est principalement causé par le réarrangement des particules du sol et non à la quantité de particules expulsées.

Pour chacun des essais, les rapports des gradients mesurés au cours de l'écoulement unidirectionnel qui précède et qui suit l'écoulement alterné figurent au tableau 4.5. Le sol utilisé est indiqué entre parenthèses avec le numéro de l'essai. Les cases vertes indiquent les systèmes géotextile-sol pour lesquels le sol a été lessivé au cours de l'essai. Les GR_{ASTM} supérieurs à l'unité sont mis en évidence par les cases mauves. : Nous

pouvons constater qu'ils ont pratiquement tous été mesurés avec le sol B avant que le sol ne soit lessivé. Ce lessivage se produit généralement lorsque les gradients hydrauliques alternés atteignent une valeur de 5.

Tableau 4.5 Rapports GR_{ASTM} pour chacun des gradients imposés aux systèmes

Essai no.	GR_{ASTM} à $i = 1,0$ ¹		GR_{ASTM} à $i = 2,5$		GR_{ASTM} à $i = 5,0$		GR_{ASTM} à $i = 7,5$	
	Avant ²	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Géotextile NTT								
5 (B)				0,83	0,61	0,80	0,46	0,49
15 (I)	0,51	0,56	0,49	0,50	0,46	0,47	0,45	0,45
19 (F)	0,66	0,73	0,76	0,76	0,72	0,73	0,74	0,75
20 (F)	0,57	0,63	0,65	0,64	0,66	0,65	0,69	0,67
Géotextile BF60								
1 (B)		N.M. ³		N.M.		N.M.		N.M.
2 (B)	0,84	0,93	0,75	0,66	0,80			
3 (B)						0,86	0,93	
4 (B)								
8 (F)	0,57	0,72	0,84					
9 (F)	0,44	0,24	0,73	0,65	0,64	0,56	0,60	
10 (F)	0,77	0,89	0,81	0,89	0,70	0,82	0,86	0,85
12 (C)	0,66	0,75	0,67	0,72	0,69	0,73	0,74	0,76
13 (I)	0,48	0,57	0,50	0,48	0,50	0,50	0,51	0,51
18 (I)	0,25	0,42	0,33	0,37	0,38	0,41	0,41	0,42
Géotextile BSF8								
6 (B)	0,79	0,93	0,79					
7 (O)	0,98	1,04	0,98	0,83	0,89			
11 (F)	0,94	0,87	0,96	0,94	0,98			
14 (I)	0,55	0,73	0,58	0,58	0,60	0,59	0,60	0,60
21 (C)	0,48	0,49	0,53	0,52	0,67	0,61	0,69	0,63
Géotextile NTP								
16 (I)	0,27	0,39	0,24	0,29	0,25	0,24	0,25	0,25
Géotextile T								
17 (I)	0,24	0,25	0,36	0,41	0,36	0,41	0,41	0,40

¹ À l'exemption de l'essai no. 1, l'écoulement unidirectionnel est ascendant.

² Les termes avant et après réfèrent à l'écoulement unidirectionnel qui précède et qui suit respectivement l'écoulement alterné.

³ Non mesuré.

⁴ Sol lessivé (canaux ou cavités le long des parois de la cellule).

Globalement, les valeurs du rapport des gradients sont comprises entre 0,2 et 1,6 avec une plus forte proportion incluse dans l'intervalle de 0,6 à 0,9. Ces résultats suggèrent que, pour la plupart des systèmes, il y a formation d'une zone plus perméable à l'interface géotextile-sol. Au cours d'un essai, il est également intéressant de noter que les valeurs de GR_{ASTM} ne présentent pas de saut marqué lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient. Cependant, cette observation ne s'applique pas aux essais réalisés avec le sol B et aux combinaisons géotextile-sol lessivées.

4.4 Comportements typiques des systèmes géotextile-sol étudiés

Pour les 21 expériences que comporte cette étude, l'annexe C présente l'interprétation du comportement en filtration de ces systèmes géotextile-sol sous des conditions d'écoulement alterné en utilisant la variation de la perméabilité du système en fonction du temps, la distribution de la charge hydraulique dans l'échantillon de sol, la quantité de sol passant les géotextiles et les rapports des gradients GR_{ASTM} mesurés. Cette section résume les comportements typiques des systèmes géotextile-sol que nous avons observés. Pour les graphiques de la perméabilité et du rapport des gradients, l'échelle de temps utilisée correspond aux heures cumulées d'écoulement unidirectionnel. Les données mesurées au cours de l'écoulement alterné n'y sont pas illustrées.

4.4.1 Comportement du mélange de billes de verre (sol B)

Le comportement du sol B a d'abord été étudié en contact avec le géotextile BF60 sous des conditions d'écoulement unidirectionnel descendant et alterné (essai no. 1). Une contrainte de confinement de 50 kPa a été appliquée directement au sommet du sol et l'interface géotextile-sol étudiée est située sous le sol (figure 3.3 a). Le tableau 4.5 montre que des valeurs de GR_{ASTM} supérieures à l'unité ont été mesurées. Ces résultats

indiquent que des obstacles à l'écoulement sont présents à la surface du géotextile. Ce phénomène est également mis en évidence par la distribution de la charge hydraulique dans l'échantillon de sol (figure 4.2). En effet, l'écoulement unidirectionnel descendant favorise la migration des particules fines de la zone supérieure du sol qui s'accumulent dans les zones centrale et inférieure. Ainsi, la perte de charge dans les zones adjacentes au géotextile est plus grande que celle que nous retrouvons dans la zone supérieure.

Les figures 4.3 et 4.4 permettent d'observer l'influence de l'écoulement alterné à l'interface géotextile-sol. En effet, l'augmentation du rapport des gradients ainsi que la diminution de la perméabilité de l'interface indiquent qu'un colmatage externe progressif du géotextile survient à de faibles gradients ($i = 1$) et à des gradients élevés ($i = 5$ et 10). Cependant, l'alternance d'un gradient égal à 2,5 tend à ouvrir les pores bouchés du géotextile, ce qui est mis en évidence au cours de l'écoulement unidirectionnel qui suit par les valeurs de GR_{ASTM} plus faibles et par la perméabilité de l'interface semblable à celle du sol. Il faut noter que le colmatage externe observé ne semble pas important puisque la perméabilité du système demeure constante au cours de l'essai et que les valeurs mesurées du rapport des gradients ne sont que légèrement supérieures à l'unité.

De plus, la figure 4.5 illustre le tassement du sol et la masse de sol passant le géotextile inférieur en fonction du temps. Cette figure ainsi que les résultats présentés au tableau 4.4 indiquent que le lessivage des particules survient principalement lors de la mise en place du sol et de l'application de la contrainte de confinement. En effet, une masse de sol de près de 994 g/m^2 est passée avant l'application du premier gradient hydraulique tandis qu'à la fin de l'essai, une masse cumulative de $1\,150 \text{ g/m}^2$ a été recueillie. Cette masse cumulative inférieure à la limite de $2\,500 \text{ g/m}^2$ et la constance de la perméabilité du système suggèrent que le géotextile BF60 initialise une structure avec pontage dans le sol B pour les conditions étudiées. Cependant, la formation d'un canal au cours de l'écoulement alterné à un gradient égal à 10 montre qu'une contrainte de

confinement de 50 kPa n'est probablement pas suffisante pour assurer la rétention du sol B par le géotextile BF60 sous des conditions de gradients alternés et élevés.

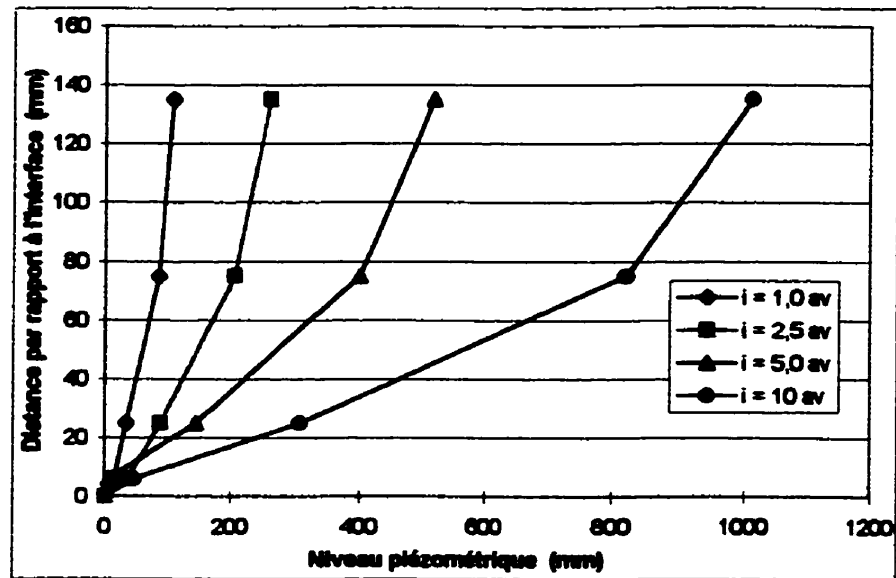


Figure 4.2 Distribution des pressions dans le sol B pour le système BF60-B-D (essai 1)

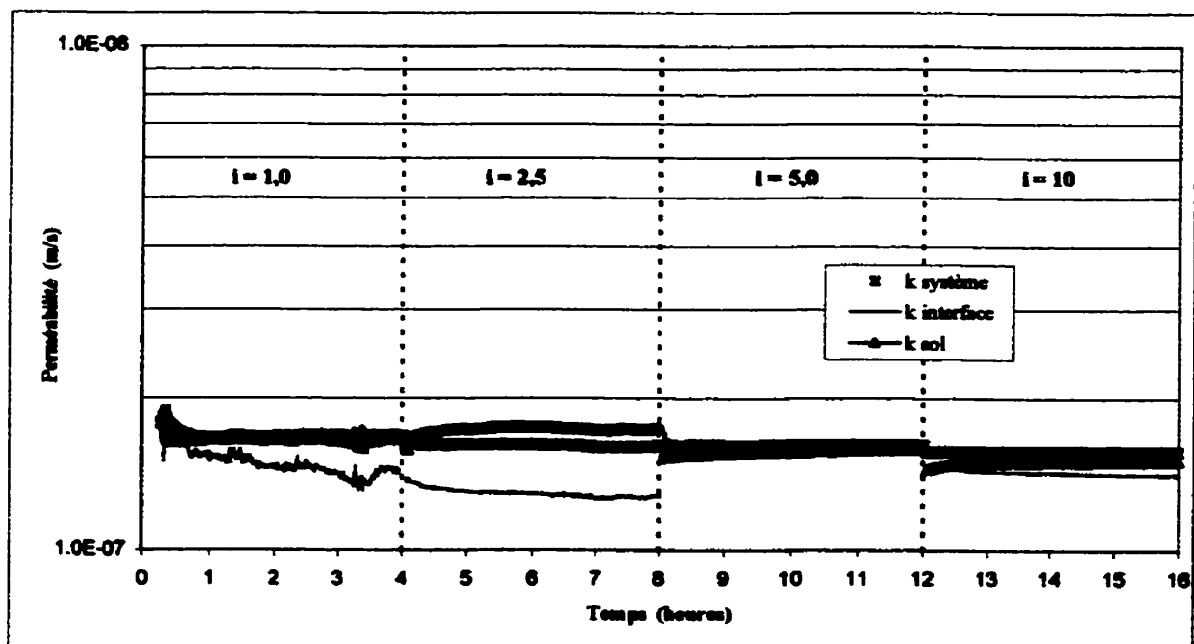


Figure 4.3 Perméabilités en fonction du temps pour le système BF60-B-D (essai 1)

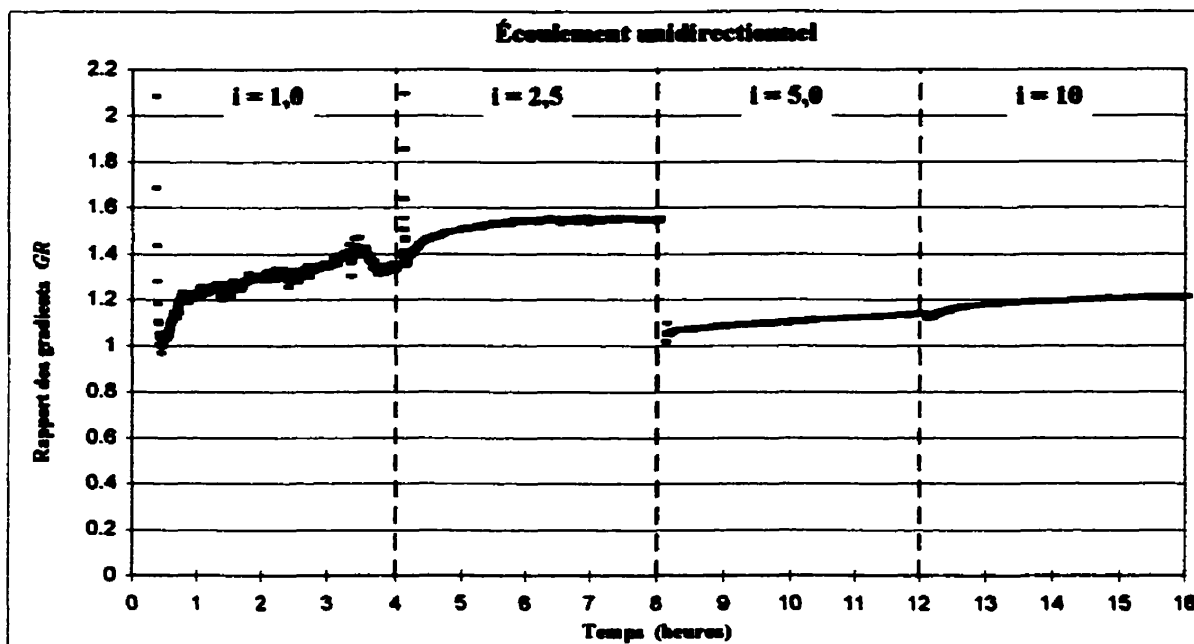


Figure 4.4 Évolution du rapport des gradients pour le système BF60-B-D (essai 1)

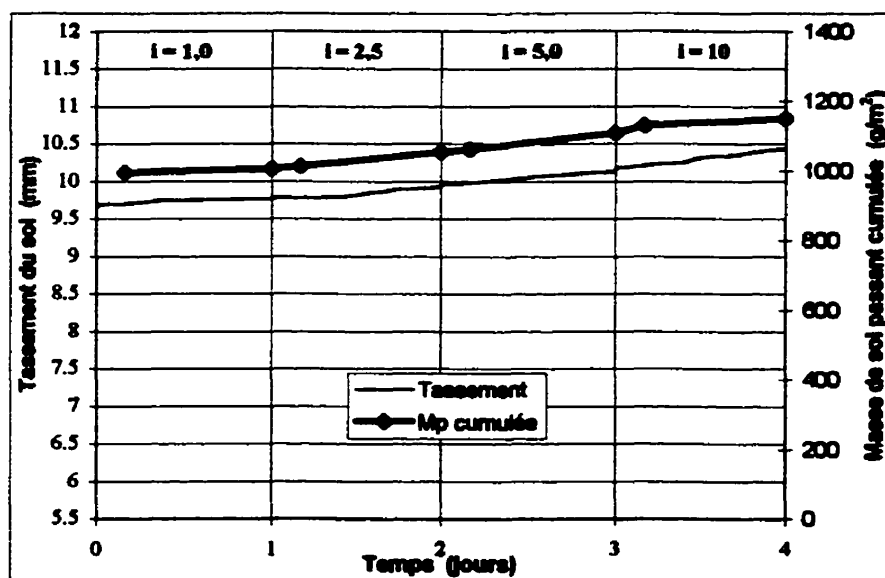


Figure 4.5 Masse de sol passant et tassement en fonction du temps pour le système BF60-B-D (essai 1)

La rétention du sol B par le géotextile BF60 a également été analysée en conditions d'écoulement unidirectionnel ascendant et alterné (essais no. 2 à 4). Une contrainte de confinement initiale de 25,7 kPa a été appliquée sur la cellule et transmise au sol à son interface inférieure avec le diffuseur B1. L'interface de mesure est située au-dessus du sol (figure 3.3 b). Pour l'essai no. 2, nous avons mentionné au tableau 4.2 que des cavités se sont formées dans le sol à l'entrée des tubes reliant les capteurs. Ces vides ont diminué les pressions mesurées dans le sol et faussé les perméabilités locales et les rapports des gradients mesurés au cours de cet essai. Par conséquent, nous n'analyserons que les résultats des essais no. 3 et 4.

Le tableau 4.4 indique que le sol B n'est pas retenu par le géotextile BF60. Le lessivage du sol est initié par la formation de canaux le long des parois de la cellule qui résulte d'une contrainte de confinement insuffisante. La figure 4.6 montre que ce lessivage d'une quantité inacceptable de particules survient généralement au cours de l'écoulement alterné à des gradients hydrauliques élevés ($i = 5$ et $7,5$) et que la courbe du tassement en fonction du temps présente une croissance soudaine et marquée.

Les figures 4.7 a et b indiquent que la perméabilité du système est égale ou légèrement inférieure à celle du sol tandis que l'interface est un peu moins perméable. Il y a donc une accumulation de particules à l'interface géotextile-sol supérieure comme l'indique les rapports GR_{ASTM} supérieurs à l'unité mesurés au cours des écoulements unidirectionnels (figure 4.8). Cependant, la perméabilité du système varie peu au cours des essais, ce qui laisse supposer que les particules accumulées à l'interface n'entravent pas ou peu l'écoulement de l'eau à travers le système.

De plus, les figures 4.7 a et 4.8 montrent que l'alternance d'un gradient hydraulique égal à 2,5 provoque un lessivage des particules fines de la zone inférieure du sol vers la zone supérieure et que ces particules s'accumulent à l'interface. Cela se traduit par une

augmentation de la perméabilité du sol ainsi que du rapport des gradients. Ce colmatage, observé seulement à l'essai no. 3, disparaît lors de l'écoulement alterné à un gradient de 5 puisque la perméabilité de l'interface est par la suite supérieure à celle du sol et que le rapport des gradients diminue à une valeur inférieure à l'unité.

Finalement, la distribution des pressions dans le sol pour les gradients précédant la rupture est illustrée aux figures 4.9 a et b pour les essais no. 3 et 4 respectivement. Contrairement à la distribution obtenue lors de l'écoulement unidirectionnel descendant (essai no. 1), la distribution des pressions mesurées pour l'écoulement ascendant n'indique pas de zones moins perméables à l'interface. Elle est plutôt linéaire dans tout l'échantillon de sol et les pressions sont semblables au cours de l'écoulement unidirectionnel qui précède et suit l'écoulement alterné. Donc, pour les conditions de confinement étudiées, le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol B lorsque ce système est soumis à des gradients hydrauliques faibles ($i = 1$ et 2,5).

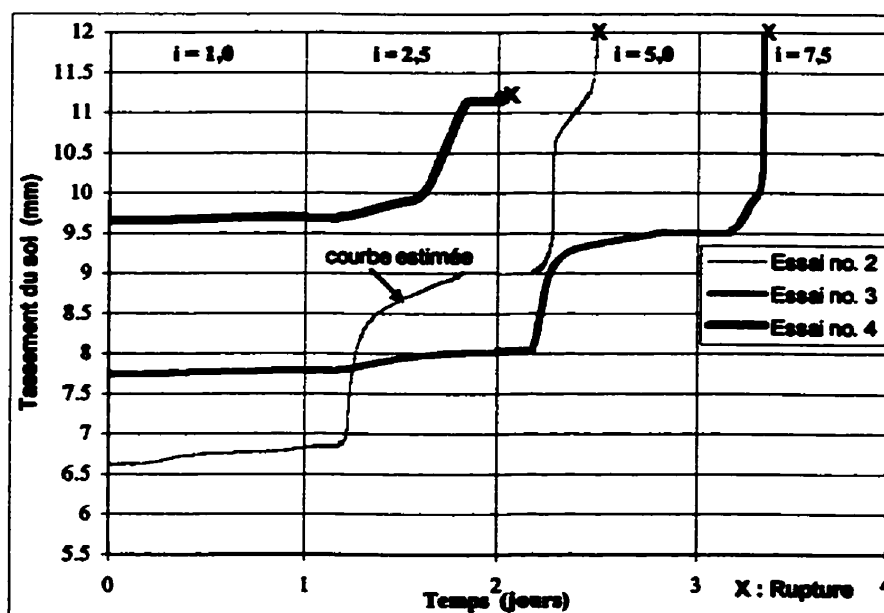
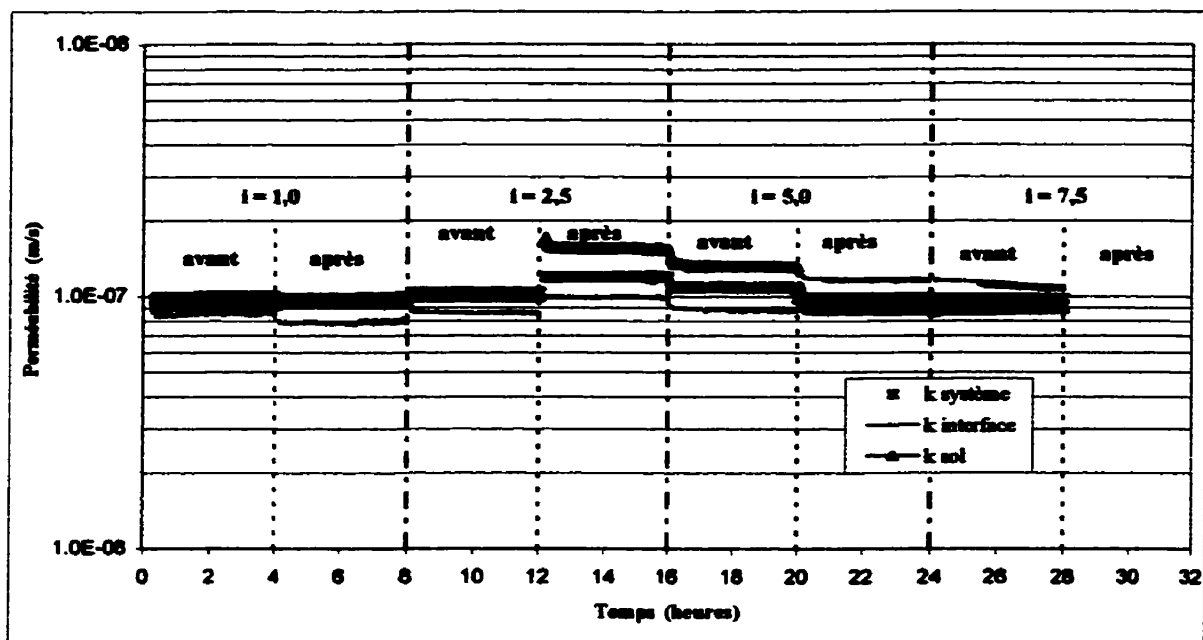
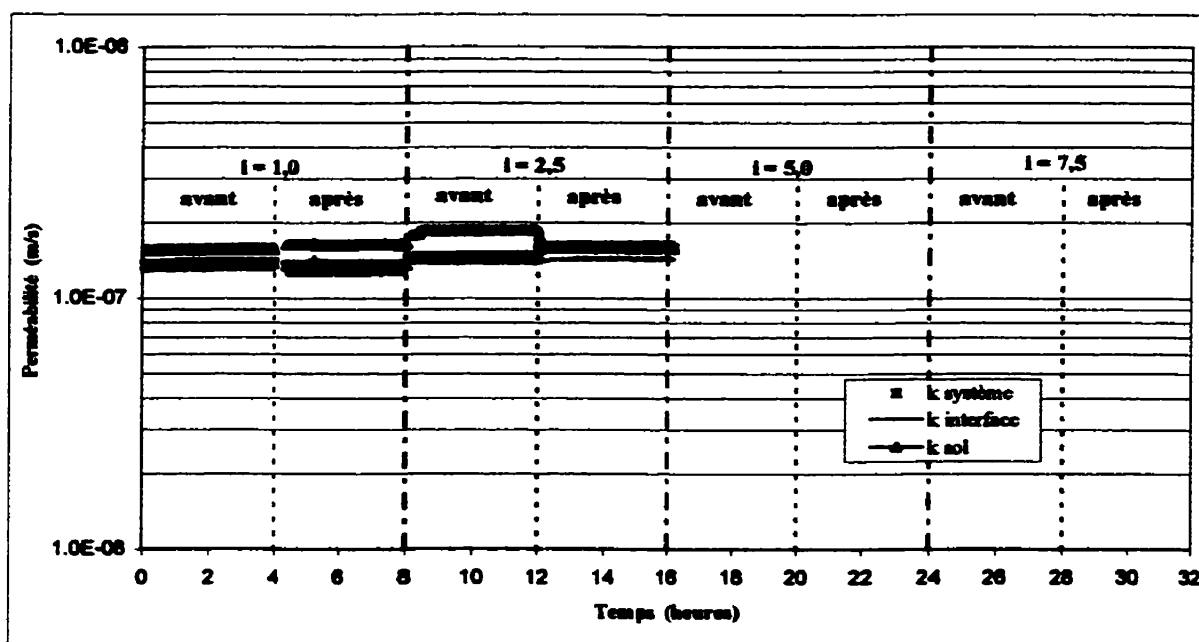


Figure 4.6 Tassement du sol B en fonction du temps (essais 2 à 4) pour le système BF60-B



a) Système BF60-B (essai no. 3)



b) Système BF60-B (essai no. 4)

Figure 4.7 Perméabilités en fonction du temps pour le système BF60-B

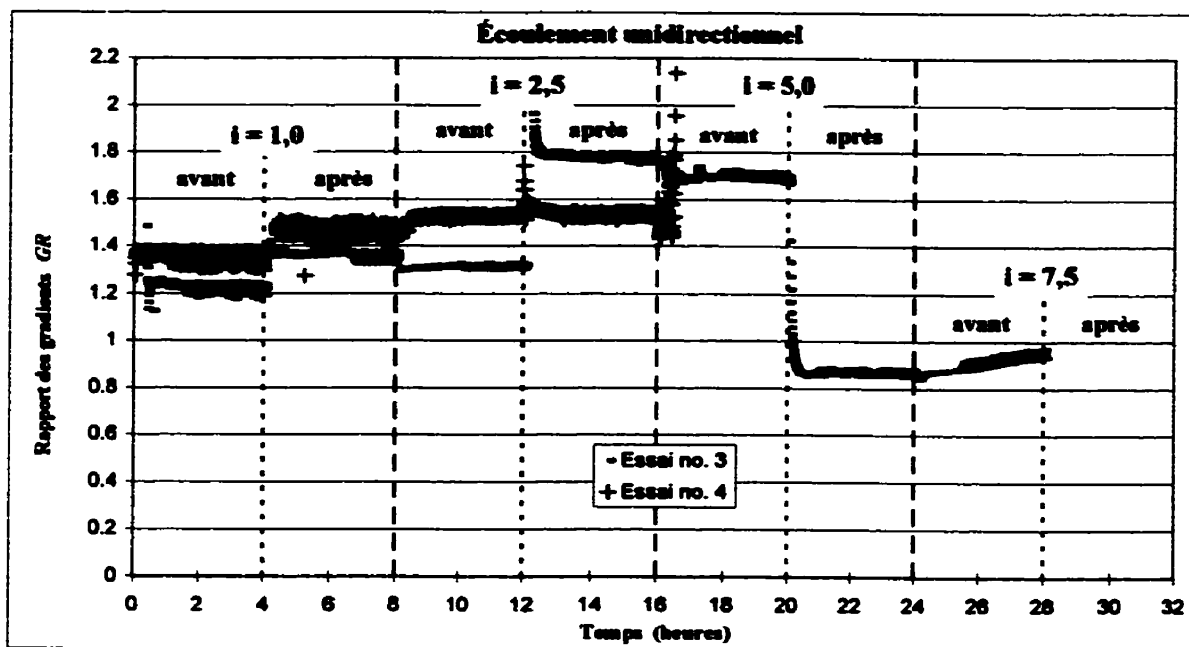


Figure 4.8 Évolution du rapport des gradients pour le système BF60-B (essais 3 et 4)

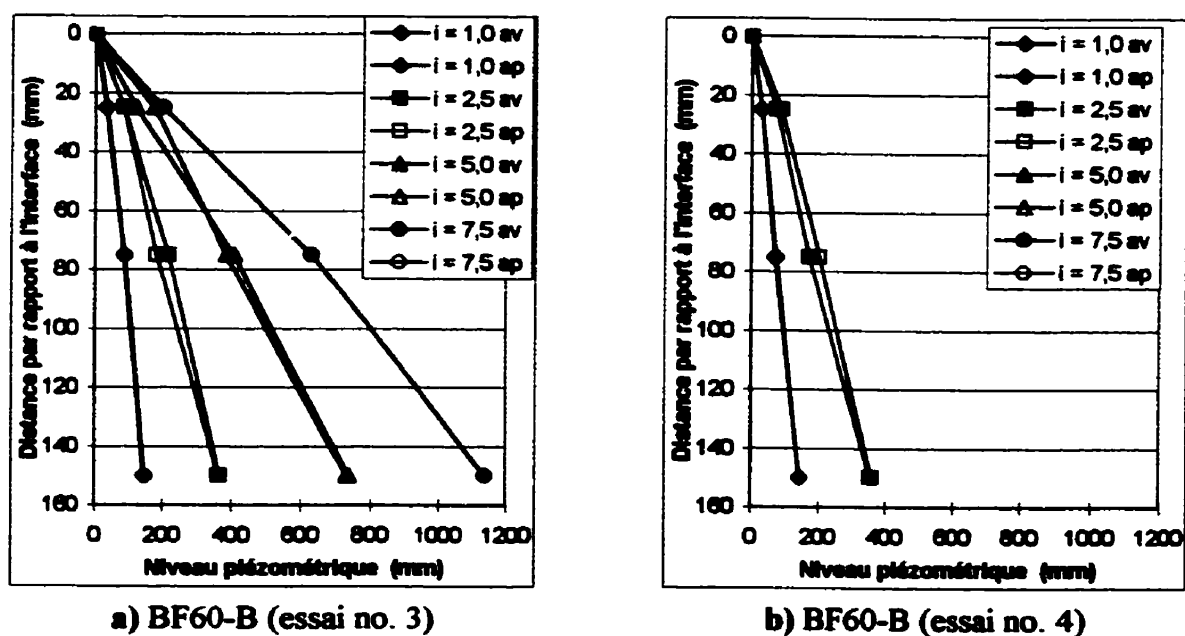


Figure 4.9 Distribution des pressions dans le sol B pour le système BF60-B

4.4.2 Comportement du mélange lavé de farine de pierres concassées (sol F)

Le comportement en filtration du sol F a été étudié sous diverses conditions de confinement et en contact avec trois géotextiles différents, dont le BF60 et le BSF8.

4.4.2.1 Géotextile BF60

Le comportement du sol F a d'abord été étudié en contact avec le géotextile BF60 sous une contrainte de confinement variant entre 58 et 101 kPa. Le tableau 4.4 indique que le sol F n'est pas retenu par ce géotextile au cours des essais no. 8 et 9. La figure 4.10 montre que le lessivage du sol survient au cours de l'écoulement alterné à un gradient égal à 2,5 pour l'essai no. 8 au cours duquel un confinement de 58 kPa est imposée. Pour l'essai no. 9, une contrainte de 101 kPa n'a pas empêché la formation de canaux sous un gradient alterné égal à 7,5. Ces essais révèlent que l'intensité du confinement et du gradient hydraulique alterné influencent d'une façon importante la stabilité du sol F.

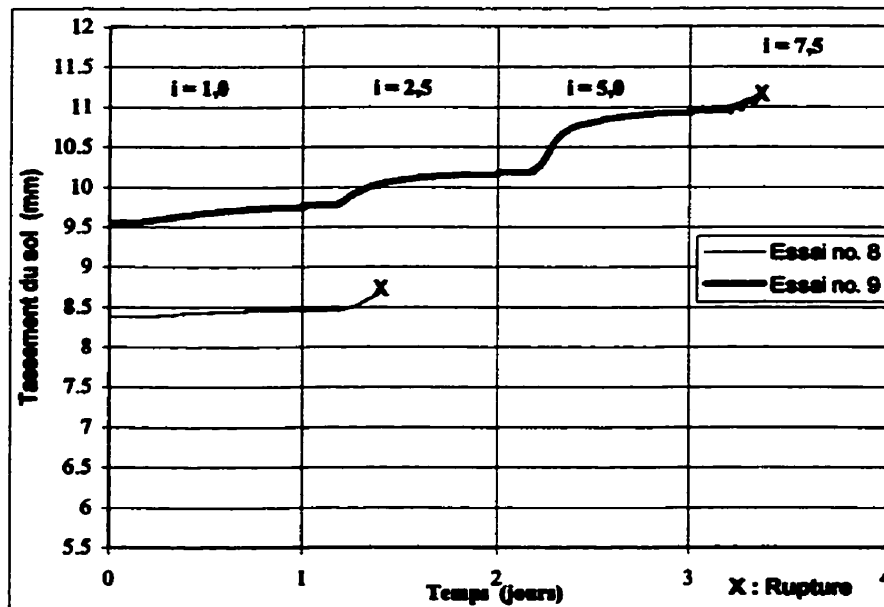


Figure 4.10 Tassement du sol F en fonction du temps (essais 8 et 9) pour le système BF60-F

La rétention du sol F par le géotextile BF60 a également été analysée sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa (essai no. 10). Cette contrainte a été utilisée pour évaluer la rétention du sol F par le géotextile BF60 sous l'effet d'un confinement plus important. Le tableau 4.4 indique en effet que le sol F est retenu correctement par le géotextile BF60 dans ces conditions. Les écoulements alterné et unidirectionnel ascendant imposés au système ont entraîné une masse totale de sol passant acceptable, soit 481 g/m^2 . La figure 4.11 présente le tassement subi par le sol F au cours de cet essai. Le tassement initial de 15,42 mm constitue plus de 95% du tassement total de 16,16 mm.

Les particules du sol F ne s'accumulent pas à la surface du géotextile BF60 au cours de l'essai no. 10. La figure 4.13 a suggère plutôt la présence d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol. La perméabilité du système est constante et varie entre $6 \text{ et } 8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$. Cependant, le système BF60-F est légèrement moins perméable que le sol F sous une contrainte de confinement de 200 kPa. De plus, le tableau 4.5 et la figure 4.12 montrent que des valeurs du rapport des gradients inférieures à l'unité ont été mesurées tout au long de l'essai. Le rapport GR_{ASTM} ne présente pas de saut marqué lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient. Il oscille plutôt autour d'une valeur de 0,8 pour l'ensemble des gradients imposés.

Quant à la distribution des pressions (figure 4.14 a), elle est linéaire dans tout l'échantillon de sol. Il n'y a pas de différence, à toutes fins pratiques, entre la distribution de la perte de charge dans l'échantillon avant et après l'application de gradients alternés. Finalement, la quantité acceptable de particules passant les géotextiles et la constance de la perméabilité du système au cours de l'essai suggèrent que le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol F sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa.

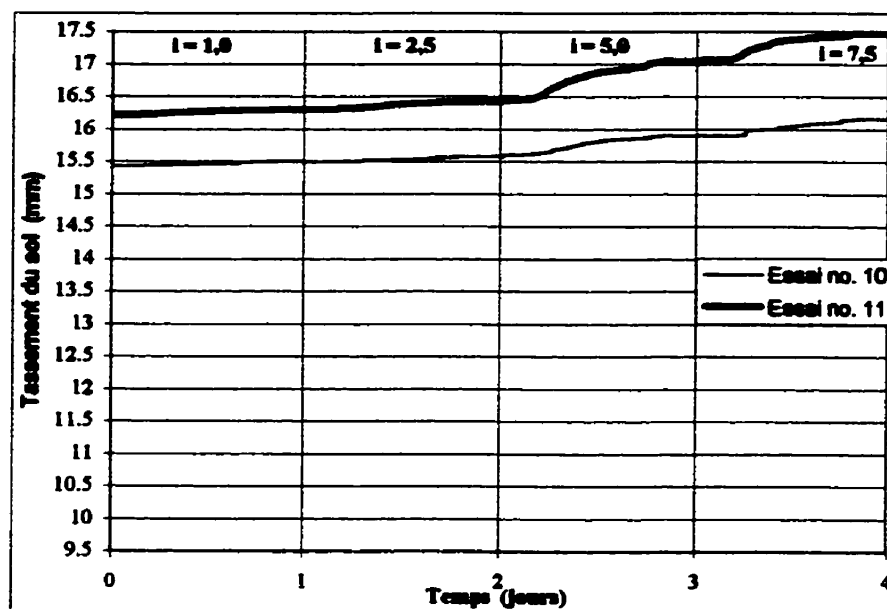


Figure 4.11 Tassement du sol F en fonction du temps pour les systèmes BF60-F (essai 10) et BSF8-F (essai 11)

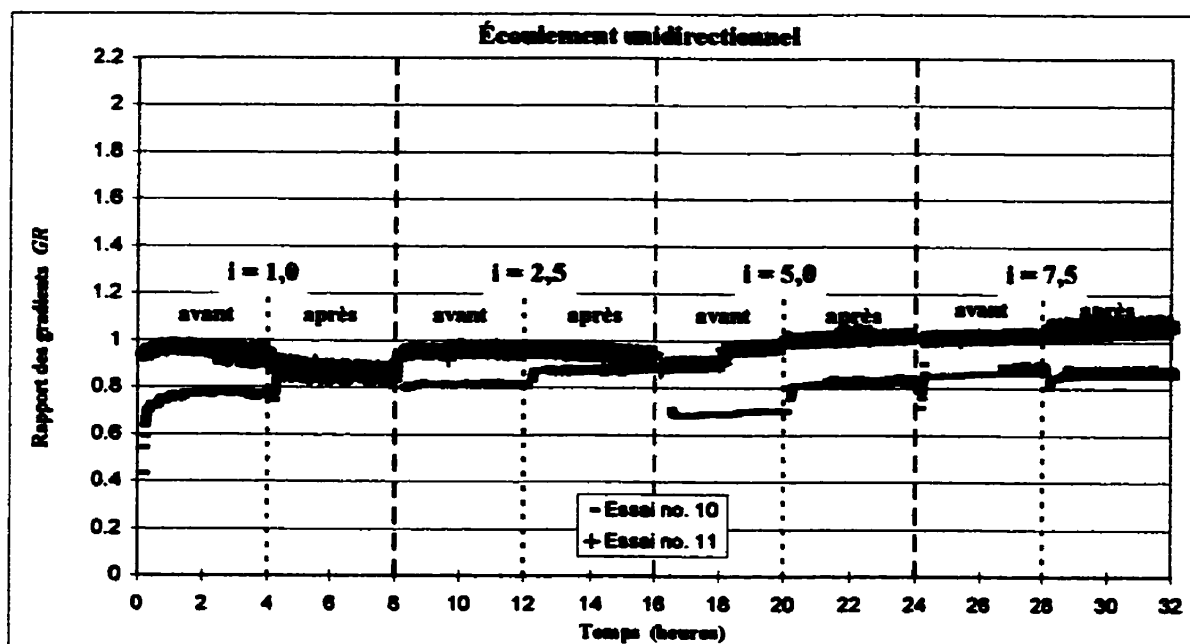
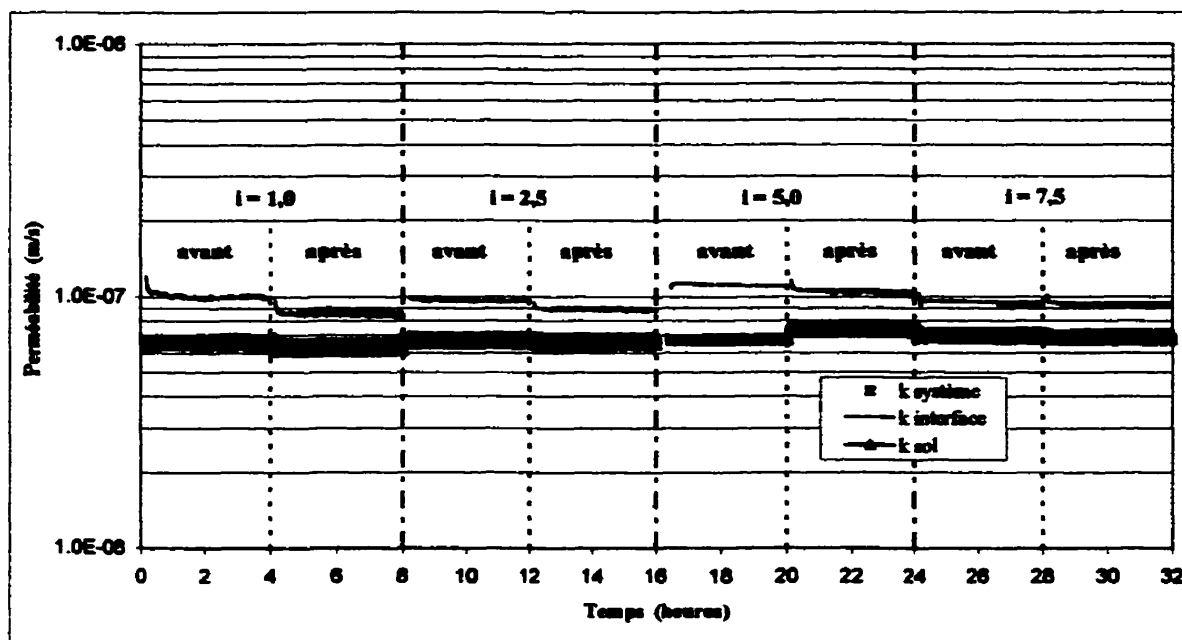
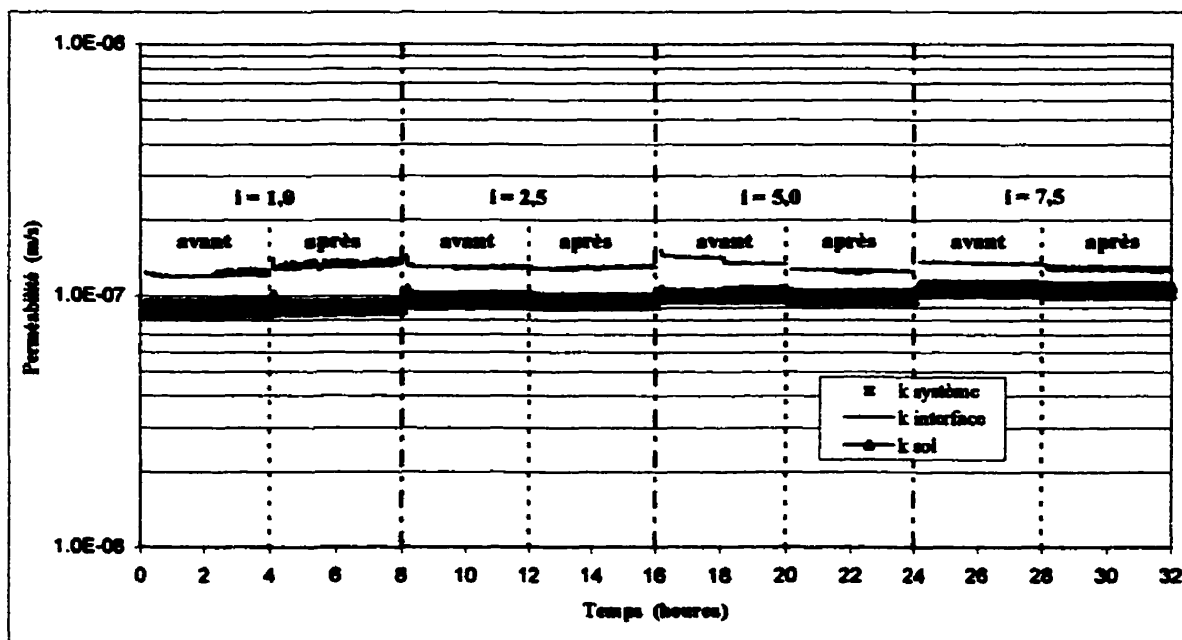


Figure 4.12 Évolution du rapport des gradients pour les systèmes BF60-F (essai 10) et BSF8-F (essai 11)



a) Système BF60-F (essai no. 10)



b) Système BSF8-F (essai no. 11)

Figure 4.13 Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes BF60-F et BSF8-F

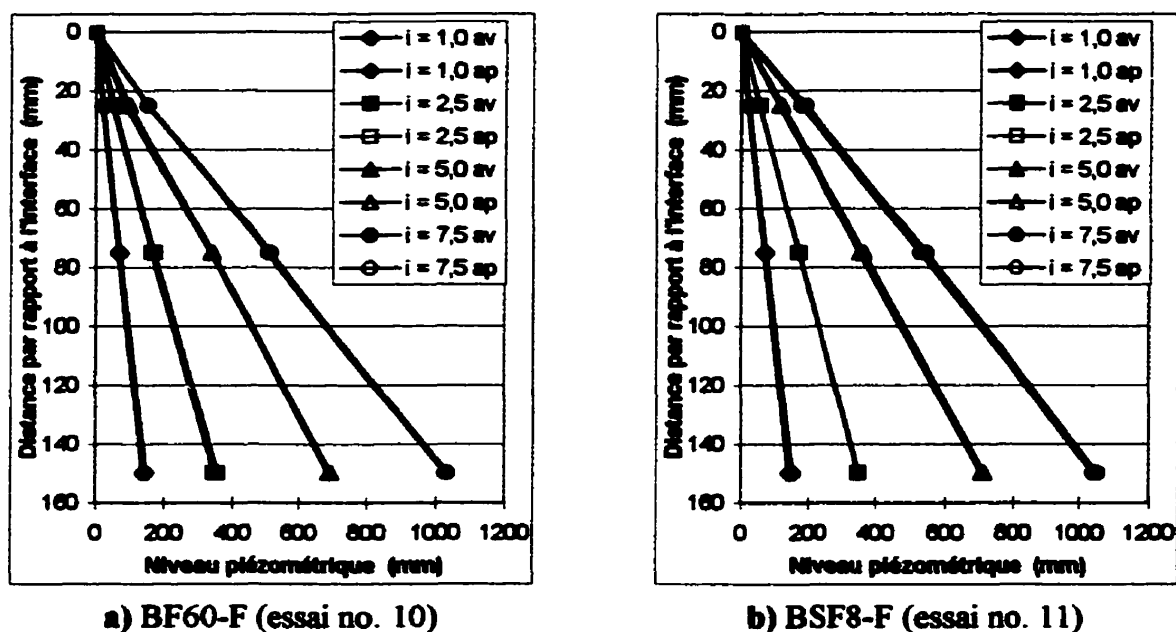


Figure 4.14 Distribution des pressions dans le sol F pour les essais no. 10 et 11

4.4.2.2 Géotextile BSF8

Le comportement en filtration du sol F a également été étudié en contact avec le géotextile BSF8 sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa (essai no. 11). Le tableau 4.4 met en évidence le fait que le sol F est retenu par le géotextile BSF8 qui laisse passer une quantité acceptable de particules, soit une masse totale de sol passant les géotextiles égale à 875 g/m². Le tassement initial de 16,21 mm constitue près de 93% du tassement total de 17,48 mm. De plus, c'est l'alternance de gradients hydrauliques élevés, soit i égal à 5,0 et 7,5, qui occasionne le plus grand remaniement de la structure du sol et/ou un lessivage de particules comme l'illustre la courbe du tassement du sol F en fonction du temps présentée à la figure 4.11.

Tout comme pour les essais précédents (8 à 10), le géotextile BSF8 n'est pas colmaté à sa surface par les particules du sol F. La figure 4.13 b suggère plutôt la présence d'une

zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol. La perméabilité du système est constante entre de 8×10^{-8} et 1×10^{-7} m/s. Tout comme le système BF60-F, le système BSF8-F est légèrement moins perméable que le sol F sous une contrainte de confinement de 200 kPa. De plus, le rapport des gradients est relativement constant pour tous les gradients imposés au système et sa valeur oscille autour de l'unité (figure 4.12). Le GR_{ASTM} est inférieur à un au cours des écoulements unidirectionnels précédents l'alternance d'un gradient égal à 5 tandis qu'il est supérieur à l'unité par la suite.

La distribution des pressions dans le sol F en contact avec le géotextile BSF8 est linéaire dans tout l'échantillon (figure 4.14 b). Il y a peu de différence entre la distribution de la perte de charge dans l'échantillon avant et après l'application de gradients alternés. Finalement, nous pouvons considérer qu'un lessivage de quelques particules suivi de l'établissement d'une structure avec pontage dans le sol caractérise le système BSF8-F sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa.

4.4.3 Comportement du sol instable (sol I)

Le comportement en filtration du sol I a été étudié à l'aide de cinq géotextiles, dont le BSF8 et le T.

4.4.3.1 Géotextile BSF8

Le tableau 4.4 montre que le sol I est retenu correctement par le géotextile BSF8 sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa. Les écoulements alterné et unidirectionnel ascendant imposés au système BSF8-I ont entraîné un lessivage d'une quantité acceptable de particules, soit 589 g/m^2 . La figure 4.15 illustre le tassement subit par le sol I au cours de l'essai no.-14. Tout comme pour les autres essais réalisés avec

une contrainte de confinement initiale de 200 kPa, le tassement initial représente un fort pourcentage du tassement final, soit près de 98% pour le système BSF8-I.

L'écoulement à travers le système BSF8-I favorise la formation d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol (figure 4.16 a). Celle-ci demeure constante au cours de l'essai à une valeur de 1×10^{-7} m/s. Le système BSF8-I est également plus perméable que le sol I et sa perméabilité augmente progressivement de 1 à $1,5 \times 10^{-7}$ m/s. Cette hausse de k_{ys} est perceptible lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient tandis qu'elle est constante au cours d'un même écoulement unidirectionnel d'une durée de 4 heures. Cette observation peut supposer un lessivage continu des particules du sol I à travers le géotextile BSF8. À l'exception de l'écoulement unidirectionnel qui suit l'alternance d'un gradient hydraulique égal à 1, le rapport GR_{ASTM} oscille autour d'une valeur de 0,6 pour l'ensemble des gradients imposés au système BSF8-I (figure 4.17).

Quant à la distribution des pressions (figure 4.18 a), elle indique la présence de zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable. Les particules fines du sol I situées dans la zone adjacente au géotextile sont lessivées à travers le filtre tandis que l'écoulement unidirectionnel ascendant favorise la migration des particules fines de la zone inférieure du sol qui s'accumulent dans la zone centrale. Ce type de distribution des pressions n'a pas été observé dans les autres sols. En effet, le sol I est un sol instable selon Kenney et Lau (1985 et 1986). Il est donc incapable de prévenir la migration de ses propres particules fines et ce n'est plus seulement la zone adjacente au géotextile qui est modifiée par l'écoulement.

De plus, il y a un certain écart entre la distribution des pressions dans l'échantillon avant et après l'écoulement alterné. Pour tous les gradients imposés au système, l'application

de gradients alternés entraînent le lessivage d'une plus grande quantité de particules de la zone inférieure qui s'accumulent dans les zones centrale et supérieure. La distribution des pressions mesurées après l'écoulement alterné montre donc une plus grande perte de charge dans les zones centrale et supérieure ainsi qu'une plus faible perte de charge dans la zone inférieure comparativement à la distribution mesurée avant cet écoulement alterné. Finalement, nous pouvons considérer qu'un lessivage de particules suivi de l'établissement d'une structure avec pontage dans le sol I caractérise le système BSF8-I sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa. Il faut cependant noter que la croissance de la perméabilité du système tout au long de l'essai peut suggérer une certaine tendance au lessivage comme comportement en filtration du sol I en contact avec le géotextile BSF8.

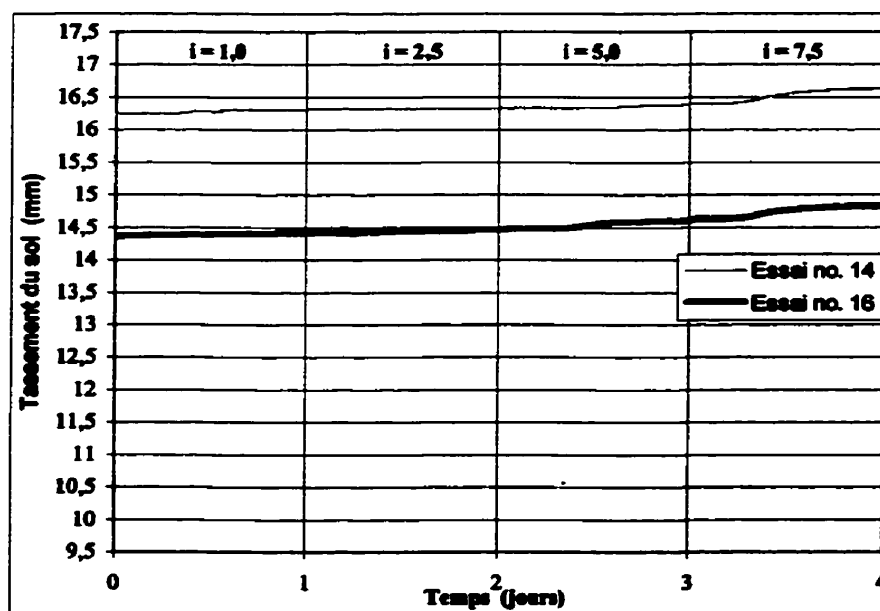
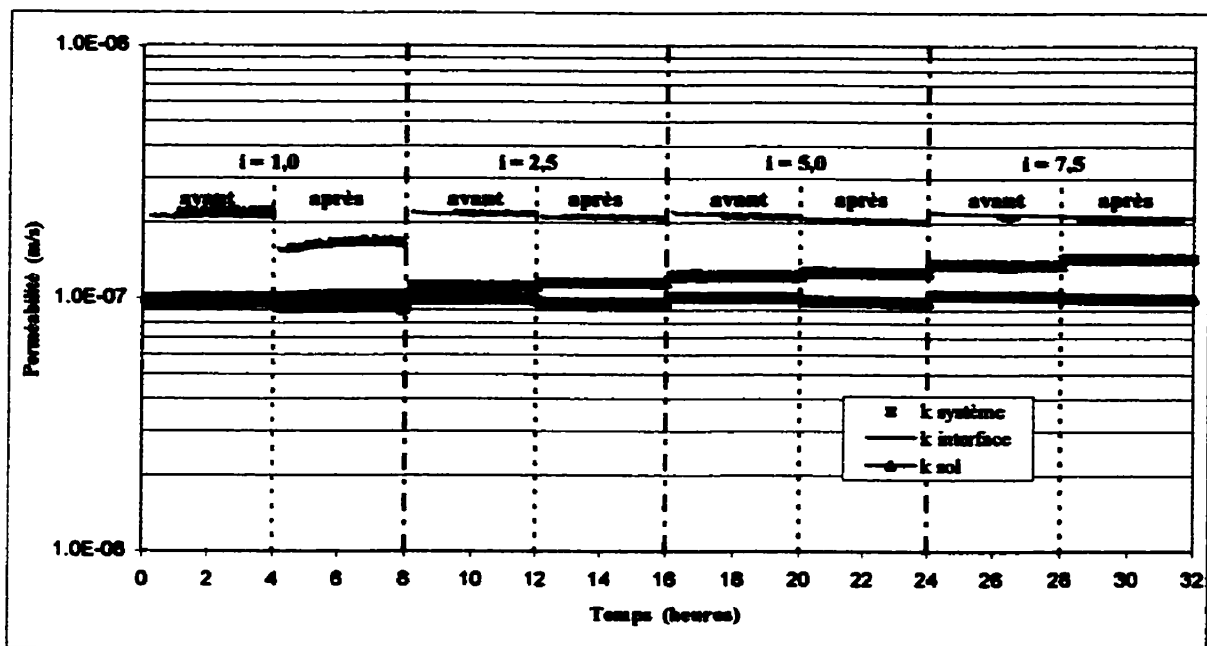
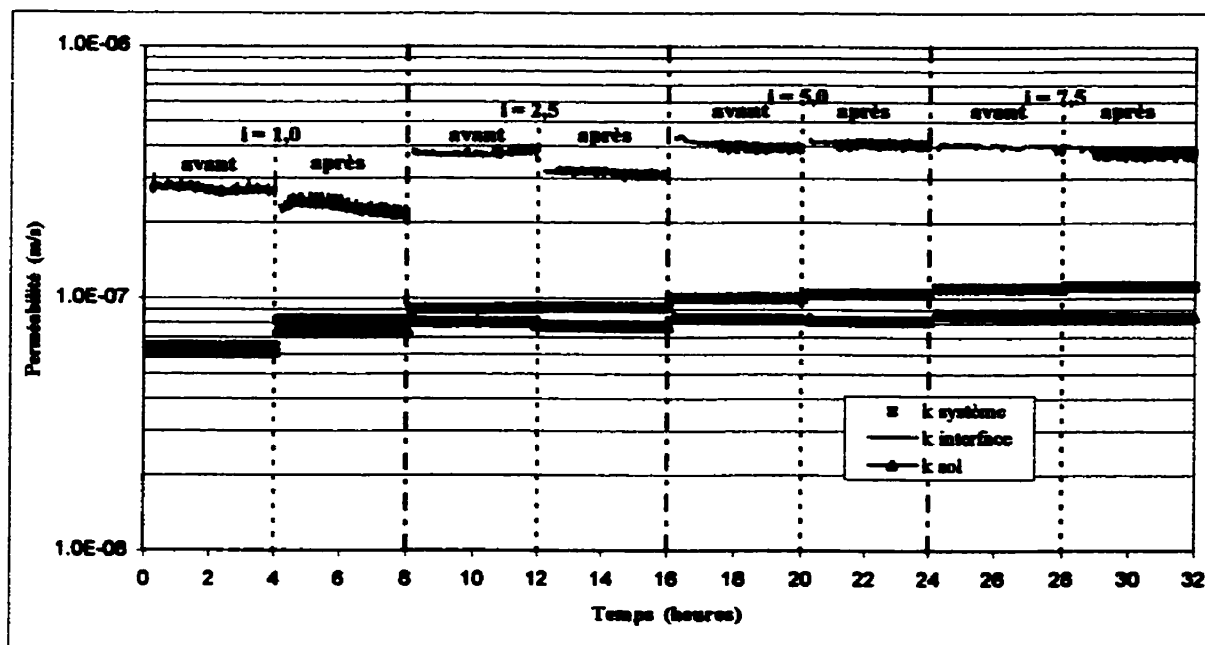


Figure 4.15 Tassement du sol I en fonction du temps pour les systèmes BSF8-I (essai 14) et NTP-I (essai 16)



a) Système BSF8-I (essai no. 14)



b) Système NTP-I (essai no. 16)

Figure 4.16 Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes BSF8-I et NTP-I

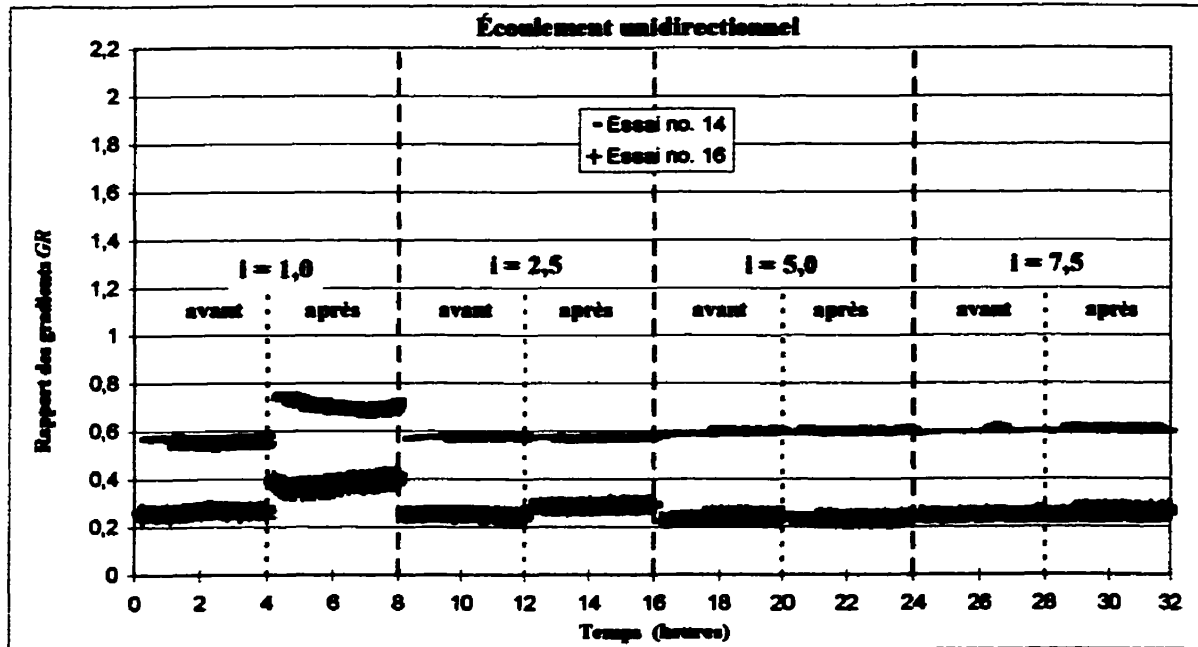


Figure 4.17 Évolution du rapport des gradients pour les systèmes BSF8-I (essai 14) et NTP-I (essai 16)

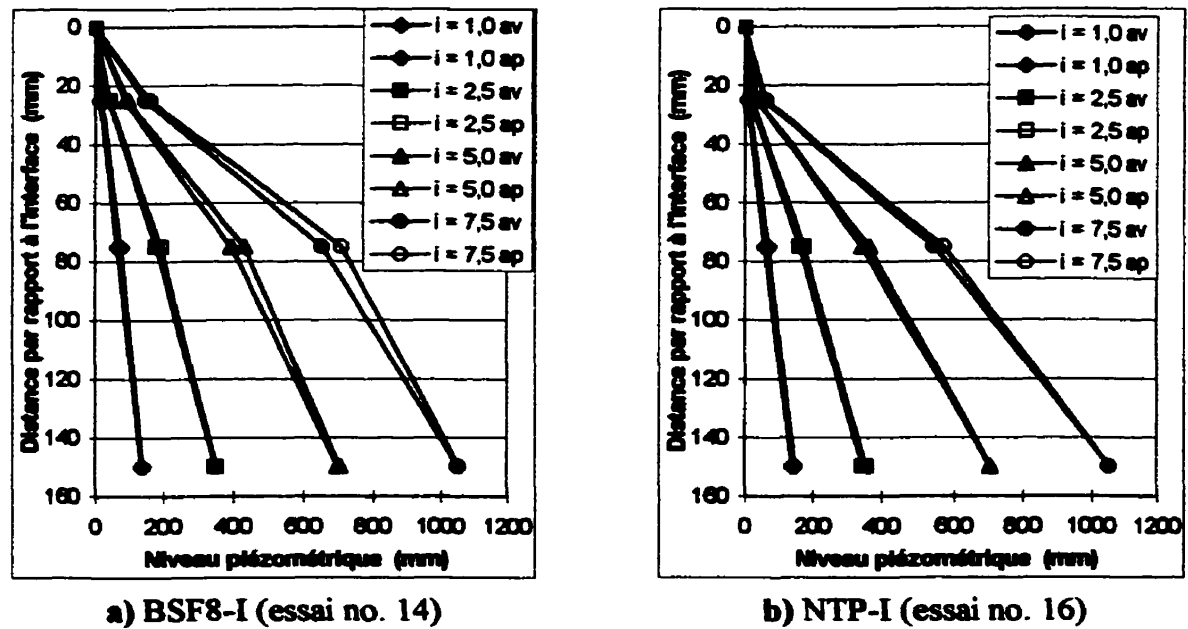


Figure 4.18 Distribution des pressions dans le sol I pour les essais no. 14 et 16

4.4.3.2 Géotextile NTP

Le tableau 4.4 montre que le sol I est retenu correctement par le géotextile NTP sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa. Les écoulements alterné et unidirectionnel ascendant imposés au système NTP-I ont entraîné un lessivage d'une quantité acceptable de particules, soit 735 g/m^2 . Il faut noter que cette masse totale est répartie presque également entre la masse de sol passant le géotextile inférieur (323 g/m^2) et le géotextile supérieur (412 g/m^2). La quantité de particules ayant traversé le géotextile inférieur est plus importante pour l'essai no. 16 par rapport à celle mesurée pour les essais précédents. En effet, le géotextile NTP est plus ouvert et occasionne ainsi un lessivage d'un plus grand nombre de particules lors de la mise en place de l'échantillon de sol. La figure 4.15 illustre le tassement subit par le sol I au cours de l'essai no. 16. Le tassement initial représente près de 97% du tassement total.

L'écoulement à travers le système NTP-I favorise la formation d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface largement supérieure à celle du sol (figure 4.16 b). Celle-ci augmente à la suite de l'écoulement alterné à un gradient égal à un puis elle se stabilise à une valeur de $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$. Cette hausse de la perméabilité du sol au cours du premier gradient indique que des particules fines de la zone centrale du sol migrent vers la zone adjacente au géotextile. Le système NTP-I est plus perméable que le sol I et sa perméabilité augmente progressivement de $6,4 \times 10^{-8}$ à $1,2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, ce qui suggère un lessivage continu des particules du sol I à travers le géotextile NTP. Quant à la figure 4.17, elle présente l'évolution du rapport des gradients en fonction du temps. À l'exception de l'écoulement unidirectionnel qui suit l'alternance d'un gradient hydraulique égal à 1, le rapport GR_{ASTM} oscille autour d'une valeur de 0,25 pour l'ensemble des gradients imposés au système NTP-I.

La distribution des pressions mesurées pour le système NTP-I indique la présence de zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable (figure 4.18 b). Il faut cependant noter que la démarcation entre la pente du niveau piézométrique en fonction de la distance dans la zone centrale et celle dans la zone inférieure est moins marquée que celle observée pour les autres essais réalisés avec le sol instable. Nous pouvons considérer que la figure 4.18 b montre une zone lessivée de ses particules fines à l'interface et une distribution des pressions sensiblement linéaire dans le reste de l'échantillon. Finalement, le lessivage d'une quantité acceptable de particules suivi de l'établissement d'une structure avec pontage dans le sol I caractérise le système NTP-I sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa. Il faut cependant noter que les très faibles valeurs mesurées du rapport des gradients et la croissance de la perméabilité du système tout au long de l'essai peut suggérer une certaine tendance au lessivage comme comportement en filtration du sol I en contact avec le géotextile NTP.

4.5 Synthèse du comportement des systèmes géotextile-sol étudiés

Suite à l'analyse du comportement en filtration des 21 systèmes géotextile-sol étudiés, les observations suivantes sont à retenir. Le sol B est retenu par le géotextile BF60 sous des conditions d'écoulement unidirectionnel descendant et alterné. Une contrainte de confinement de 50 kPa appliquée directement au sommet de l'échantillon de sol a assuré la rétention du sol B par ce géotextile tout en laissant passer une certaine quantité de particules, mais M_p est inférieure à 2 500 g/m². Cependant, en conditions d'écoulement unidirectionnel ascendant et alterné, le sol B n'est pas retenu par les géotextiles BF60 et BSF8 sous une contrainte de confinement pouvant atteindre 63 kPa. Le lessivage du sol est initié par la formation de canaux le long des parois de la cellule qui résulte d'une contrainte de confinement insuffisante. Ce lessivage survient généralement au cours de

l'écoulement alterné à des gradients hydrauliques élevés ($i = 5$ et $7,5$). À l'opposé, le sol B se comporte correctement au contact du géotextile plus fermé NTT sous une contrainte de confinement variant entre 42 et 80 kPa.

Tout comme le sol B, le sol F n'est pas retenu par le géotextile BF60 sous une contrainte de confinement pouvant atteindre 101 kPa. Lorsqu'une contrainte plus élevée (200 kPa) est imposée aux systèmes BF60-F et BSF8-F, ces deux géotextiles dont l'ouverture de filtration égale 80 μm initient une structure avec pontage dans le sol F. Quant au géotextile plus fermé NTT, il retient correctement le sol F tant sous une contrainte de confinement initiale faible et élevée, soit 42 kPa et 200 kPa respectivement. De plus, le sol O, qui est plus argileux que les sols F et B, n'est pas retenu par le géotextile BSF8 sous une contrainte de confinement variant entre 53 et 63 kPa.

Sous une contrainte de confinement de 200 kPa, les géotextiles BF60 et BSF8 initient une structure avec pontage dans le sol C. Quant à la rétention du sol instable I, ce sol se comporte correctement au contact de géotextiles dont les valeurs de O_F sont inférieures à 106 μm et sous l'effet d'un confinement important, soit une contrainte de 200 kPa. Dans les mêmes conditions, le géotextile tissé T, plus ouvert, ne peut retenir le sol I, qui subit alors une perte importante de ses particules fines. De plus, le géotextile BF60 retient correctement le sol I tant sous une contrainte de confinement initiale moyenne et élevée, soit 100 kPa et 200 kPa respectivement.

Finalement, tous les géotextiles ont initié la formation d'une zone plus perméable dans le sol à l'interface géotextile-sol. Les essais montrent donc que le colmatage externe du géotextile ne survient pas puisque l'alternance des gradients hydrauliques tend à dégager les pores.

4.6 Discussion et comparaison des résultats

L'étude expérimentale a caractérisé la compatibilité en filtration de cinq géotextiles et de cinq sols en adaptant le test du rapport des gradients pour simuler des conditions d'écoulement alterné et unidirectionnel descendant (essai no. 1) ou ascendant (essais no. 2 à 21). Les essais permettent d'abord de mettre en évidence l'influence du rapport de rétention, de la direction et de l'intensité du gradient hydraulique ainsi que du confinement sur l'équilibre des systèmes géotextile-sol. Par la suite, la comparaison des résultats montre l'effet de la stabilité interne des sols et de la forme de leurs particules sur la rétention des sols par des géotextiles non tissés. Finalement, nous présentons l'importance de paramètres complémentaires au rapport de rétention à considérer pour prédire correctement le comportement en filtration des géotextiles, soit le nombre de constriction des géotextiles non tissés et le confinement.

4.6.1 Influence du rapport de rétention

Pour déterminer l'influence du rapport de rétention sur le comportement en filtration des géotextiles, quatorze systèmes géotextile-sol différents ont été soumis au test du rapport des gradients. Pour tous ces systèmes, le rapport de rétention s'échelonne entre 1 et 7, à l'exception d'un système dont le R_R est inférieur à l'unité. La relation entre le rapport de rétention et la quantité de particules lessivées d'un sol est présentée à figure 4.19 pour le sol instable et les sols stables. Les cinq systèmes pour lesquels une masse de sol passant supérieure à la limite acceptable de 2 500 g/m² a été notée sont le BF60-F ($R_R = 3,5$), le BF60-B et le BSF8-B ($R_R = 3,8$), le T-I ($R_R = 4,3$), et le BSF8-O ($R_R = 6,7$). À l'exception du système T-I, ils sont représentés à la figure 4.19 par le terme S.L. (sol lessivé) et une flèche indiquant que la masse de sol passant est supérieure à l'échelle de l'axe utilisée.

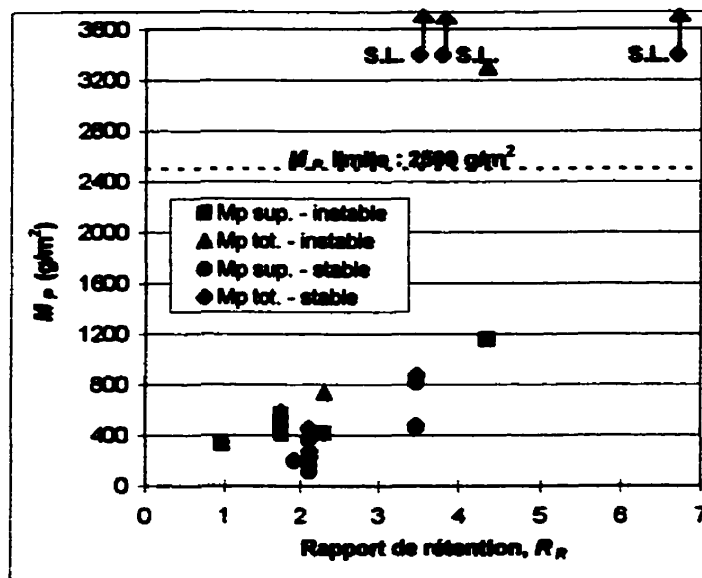


Figure 4.19 Influence du rapport de rétention sur la masse de sol passant les géotextiles

La figure 4.19 nous permet d'abord de vérifier qu'un rapport de rétention croissant entraîne le lessivage d'un plus grand nombre de particules. Les systèmes géotextile-sol caractérisés par un rapport de rétention supérieur à 3,5 subissent un lessivage d'une quantité inacceptable de particules. Pour les systèmes BF60-F et BSF8-F dont le R_R est égal à cette valeur limite de 3,5, une contrainte de confinement plus importante a été nécessaire pour assurer une masse totale de sol passant inférieure à $2\,500\text{ g/m}^2$. De plus, une limite inférieure à l'intervalle acceptable des valeurs de R_R ne peut pas être posée puisque aucun phénomène de colmatage des géotextiles n'a été observé.

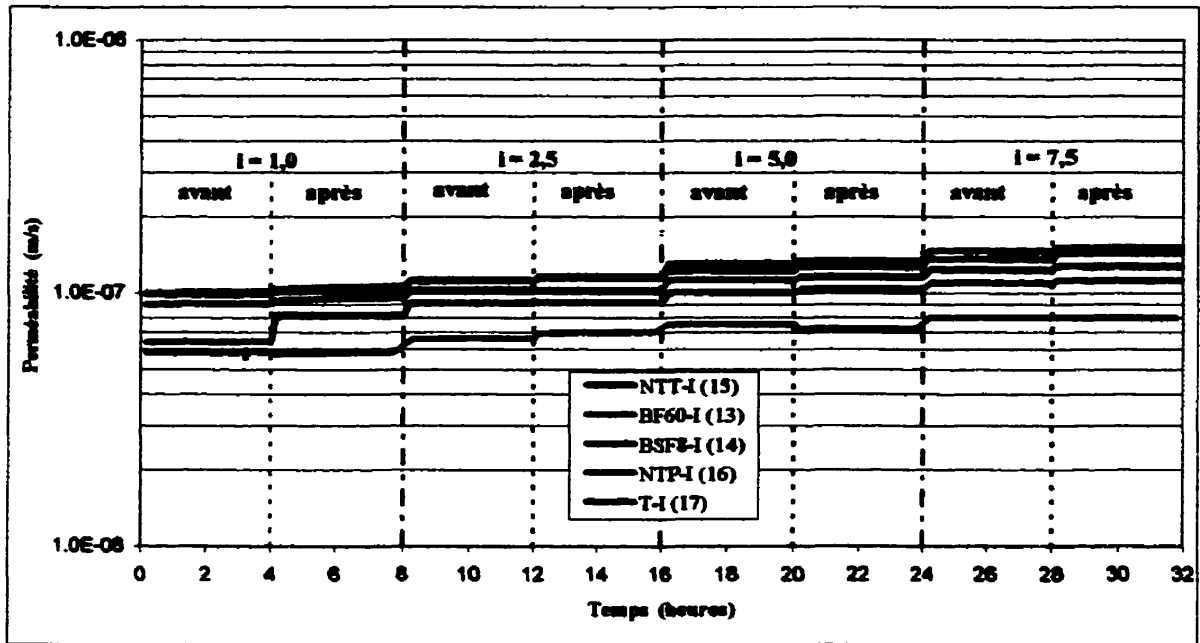
La masse de sol passant le géotextile supérieur augmente également avec le rapport de rétention. Pour le sol instable (sol I), la figure 4.19 indique que, plus le rapport de rétention est grand, plus l'écart entre la masse totale de sol passant et la masse de sol passant le géotextile supérieur est important. Donc, un géotextile plus ouvert laisse passer une quantité plus élevée de particules lors de la mise en place du sol (masse de sol passant le géotextile inférieur) et la proportion de cette masse sur la masse totale croît

également avec l'ouverture de filtration du géotextile et, par conséquent, avec le rapport de rétention. En effet, pour le système NTP-I dont le R_R est de 2,3, la masse de sol passant le géotextile inférieur représente près de 44% de la masse totale de sol passant tandis que pour le système T-I caractérisé par un R_R de 4,3, cette proportion augmente alors à 65%.

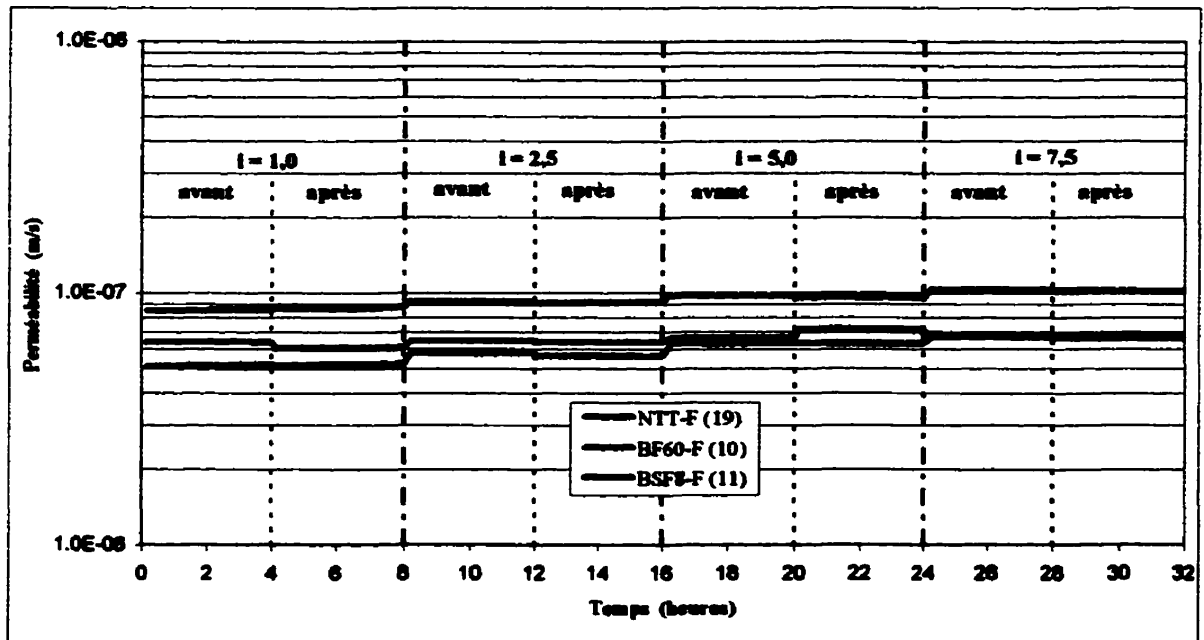
Nous avons également évalué l'influence du rapport de rétention sur la perméabilité du système et sur la distribution des pressions dans l'échantillon de sol. Les figures 4.20 a et b montrent d'abord que la perméabilité des systèmes est principalement contrôlée par celle du sol (les numéros des essais sont indiqués entre parenthèses). En effet, un rapport de rétention variant entre 1 et 4,3 ne semble pas influencer la perméabilité des systèmes qui se situe autour de 1×10^{-7} m/s pour le sol I et de 7×10^{-8} m/s pour le sol F. Quant à la distribution des pressions dans le sol I, les cinq géotextiles employés ont initié la formation de deux zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable (figures 4.18 a et b, C.35 a, C.39 b, C.43 b). De plus, le sol F présente une distribution linéaire des pressions en contact avec les géotextiles NTT, BF60 et BSF8 (figures C.23 a et b, C.27 a). Finalement, ces observations nous permettent de constater que le rapport de rétention influence la quantité de particules expulsées du système. Toutefois, la distribution des pressions dans le sol et la perméabilité du système semblent principalement contrôlées par le type de sol.

4.6.2 Influence de l'intensité du confinement et du gradient hydraulique sur l'équilibre du système

Les essais réalisés avec le sol F en contact avec le géotextile BF60 ont révélé que la contrainte de confinement et l'intensité du gradient hydraulique alterné influençaient d'une façon importante la stabilité du système BF60-F. Tout comme Cazzuffi *et al.* (1999), nous avons établi la courbe limite approximative de la stabilité de ce système.



a) Sol I



b) Sol F

Figure 4.20 Perméabilité des systèmes pour les sols I et F

La figure 4.21 montre l'influence du gradient hydraulique et du confinement sur la capacité de rétention du sol F par le géotextile BF60. Nos différents essais permettent en effet de délimiter deux comportements en filtration pour le système BF60-F : le lessivage du sol ou l'équilibre du système. La figure 4.21 indique que le lessivage d'une quantité inacceptable de particules peut survenir lors de l'application d'un gradient hydraulique alterné égal à 2,5 si une contrainte de confinement inférieure à 60 kPa est imposée (essai no. 8). Pour l'essai no. 9, une contrainte de 101 kPa n'a pas empêché la formation de canaux sous un gradient alterné égal à 7,5. Sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa, le géotextile BF60 peut assurer la rétention du sol F s'il est soumis à un gradient hydraulique alterné atteignant 7,5 (essai no. 10).

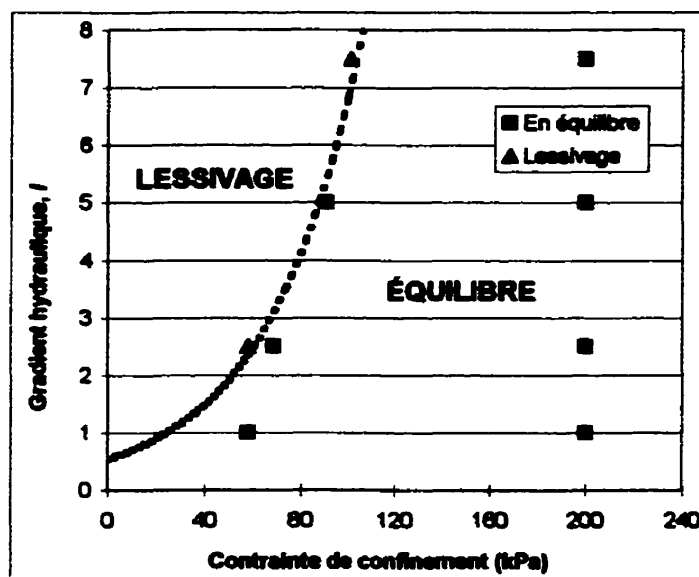


Figure 4.21 Influence de l'intensité du confinement et du gradient hydraulique sur l'équilibre du système BF60-F

4.6.3 Influence de la direction de l'écoulement

Afin de déterminer l'influence de la direction de l'écoulement sur la stabilité d'un système géotextile-sol donné, des essais ont été réalisés en utilisant le sol B en contact avec le géotextile BF60 sous des conditions d'écoulement unidirectionnel descendant (système

BF60-B-D - essai 1) et ascendant (système BF60-B - essais 2 à 4). Les résultats présentés au tableau 4.4 indiquent que le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol B lorsque le système est soumis à un écoulement unidirectionnel descendant et à une contrainte de confinement de 50 kPa. Des gradients hydrauliques atteignant 10 sont imposés et l'interface de mesure est alors située sous le sol. Toutefois, il se produit un lessivage du sol au cours de l'écoulement alterné à des gradients hydrauliques élevés ($i = 5$ et $7,5$) lorsque l'interface géotextile-sol étudiée est située au-dessus du sol et que l'écoulement unidirectionnel est ascendant.

Contrairement à la distribution obtenue lors de l'écoulement unidirectionnel descendant (figure 4.2), la distribution des pressions mesurées au cours de l'écoulement ascendant n'indique pas de zones moins perméables à l'interface pour les gradients précédant la rupture (figures 4.9 a et b). Elle est plutôt linéaire dans tout l'échantillon de sol, indiquant que le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol B lorsque ce système est soumis à des gradients hydrauliques faibles ($i = 1$ et $2,5$). De plus, le système BF60-B et le sol B présentent une perméabilité semblable que l'écoulement unidirectionnel soit descendant ou ascendant. En effet, la figure 4.22 illustre ce phénomène à l'aide des résultats des essais no. 1 et 4 où les numéros des essais sont indiqués entre parenthèses.

Ces observations permettent de constater que la gravité a des effets importants sur le mouvement des particules. Lorsque l'écoulement est descendant, les forces d'écoulement agissent dans la même direction que la gravité. Cet écoulement descendant favorise la migration des particules fines de la zone supérieure du sol. Ces particules sont alors entraînées et s'agglomèrent finalement dans les zones centrale et inférieure. Lorsque l'écoulement est ascendant, les forces d'écoulement étant diminuées de la force due à la gravité, la formation d'une zone moins perméable à l'interface n'est pas observée. Ces résultats nous permettent de conclure qu'un écoulement ascendant

occasionne des conditions d'écoulement plus sévères. Un écoulement descendant favorise la formation d'arches qui maintiennent en place les particules tandis qu'un écoulement vers le haut diminue les contraintes intergranulaires qui s'exerce dans le sol. Les particules sont maintenues plus faiblement ensemble et sont plus susceptibles à l'action des forces d'écoulement (Holtz et Kovacs, 1991).

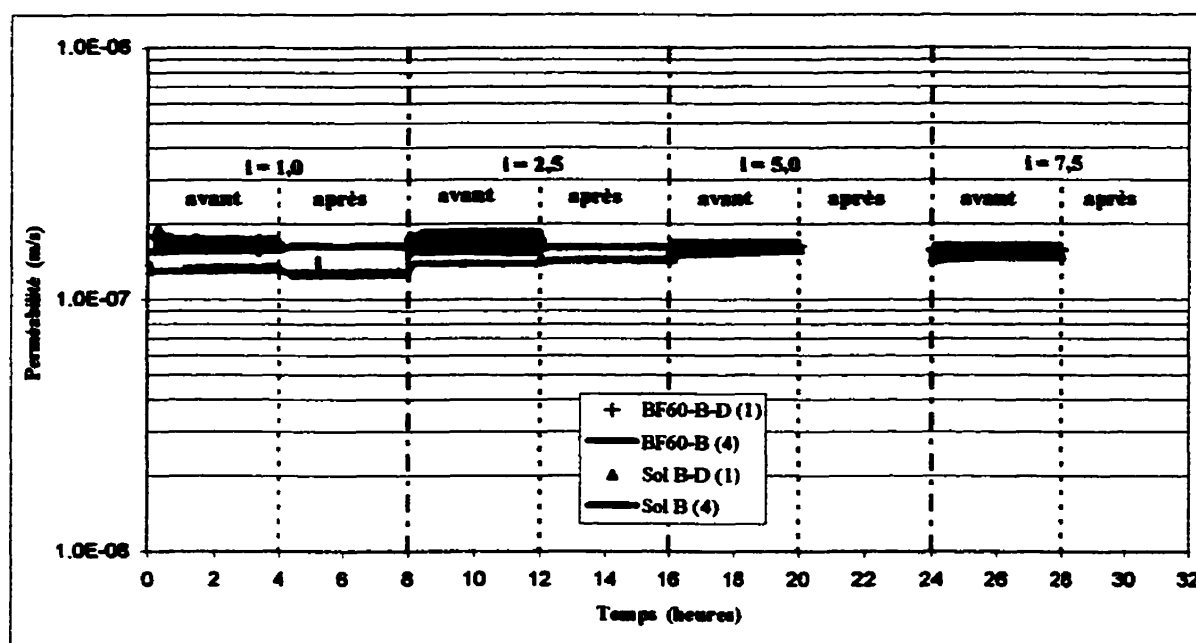


Figure 4.22 Perméabilités du système BF60-B et du sol B selon la direction de l'écoulement unidirectionnel

4.6.4 Influence de la stabilité interne du sol

Les granulométries des sols C et I sont assez rapprochées sauf que le sol I présente un potentiel d'instabilité interne tandis que le sol C peut être considéré comme stable selon la méthode de Kenney et Lau (1985 et 1986). Pour évaluer l'impact de cette stabilité sur le comportement en filtration d'un système géotextile-sol, des essais ont été réalisés en utilisant les sols I et C en contact avec les géotextiles BF60 et BSF8. Les résultats des

essais no. 12 à 14 et 21 ainsi que la variation de la perméabilité du système et la distribution des pressions dans l'échantillon de sol montrent qu'un sol instable se comporte différemment d'un sol stable en contact avec le même géotextile.

D'abord, la figure 4.23 indique que le sol I est moins bien retenu par les géotextiles BF60 et BSF8 que le sol C. En effet, la quantité de particules du sol I qui traversent les géotextiles est deux fois supérieure à celle du sol C. De plus, les distributions des pressions mesurées dans le sol I (figures C.35 a et 4.18 a) indiquent la présence de zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable. Ce type de distribution des pressions n'a pas été observé dans les autres sols. En effet, le sol instable est incapable de prévenir la migration de ses propres particules fines et ce n'est plus seulement la zone adjacente au géotextile qui est modifiée par l'écoulement. Les particules fines du sol I situées dans la zone adjacente au géotextile sont lessivées à travers le filtre tandis que l'écoulement unidirectionnel ascendant favorise la migration des particules fines de la zone inférieure du sol qui s'accumulent dans la zone centrale.

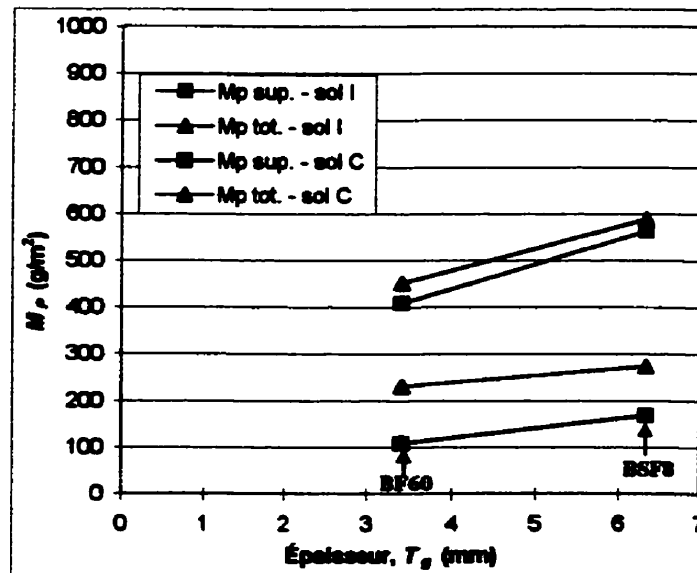


Figure 4.23 Influence de la stabilité interne du sol sur la masse passante

Quant à la distribution des pressions dans le sol C, elle est sensiblement linéaire dans tout l'échantillon tout en indiquant la formation d'une zone plus perméable à l'interface (figures C.31 a et b). Contrairement au sol I, elle présente peu de différence entre la distribution des pressions dans l'échantillon avant et après l'application de gradients alternés. En effet, pour le sol I, l'application de gradients alternés entraîne le lessivage d'une plus grande quantité de particules de la zone inférieure qui s'accumulent dans les zones centrale et supérieure (figures C.35 a et 4.18 a). La distribution des pressions mesurées après l'écoulement alterné montre donc une plus grande perte de charge dans les zones centrale et supérieure ainsi qu'une plus faible perte de charge dans la zone inférieure comparativement à la distribution mesurée avant cet écoulement alterné.

De plus, les systèmes BF60-C et BSF8-C sont près de quatre fois plus perméables que les systèmes BF60-I et BSF8-I (figure 4.24) et ce, malgré le lessivage d'une plus grande quantité de particules du sol instable. De plus, la perméabilité des systèmes comportant le sol instable augmente progressivement tout au long des essais, ce qui indique un lessivage continu des particules du sol I à travers les géotextiles. Finalement, ces observations indiquent que le sol stable C est retenu correctement par les géotextiles BF60 et BSF8. Quant au sol instable I, il est incapable de prévenir la migration de ses propres particules fines, ce qui peut suggérer une certaine tendance au lessivage comme comportement en filtration du sol I en contact avec les géotextiles BF60 et BSF8.

4.6.5 Influence de la forme des particules du sol

Le comportement en filtration du sol F a été étudié avec le géotextile NTT sous une contrainte de confinement variant entre 42 et 80 kPa. L'essai no. 20 reproduit les mêmes conditions de confinement que l'essai no. 5 (système NTT-B) afin d'évaluer l'influence de la forme des particules du sol. En effet, le sol B est constitué de particules sphériques tandis qu'elles sont anguleuses et aplaties dans le cas du sol F.

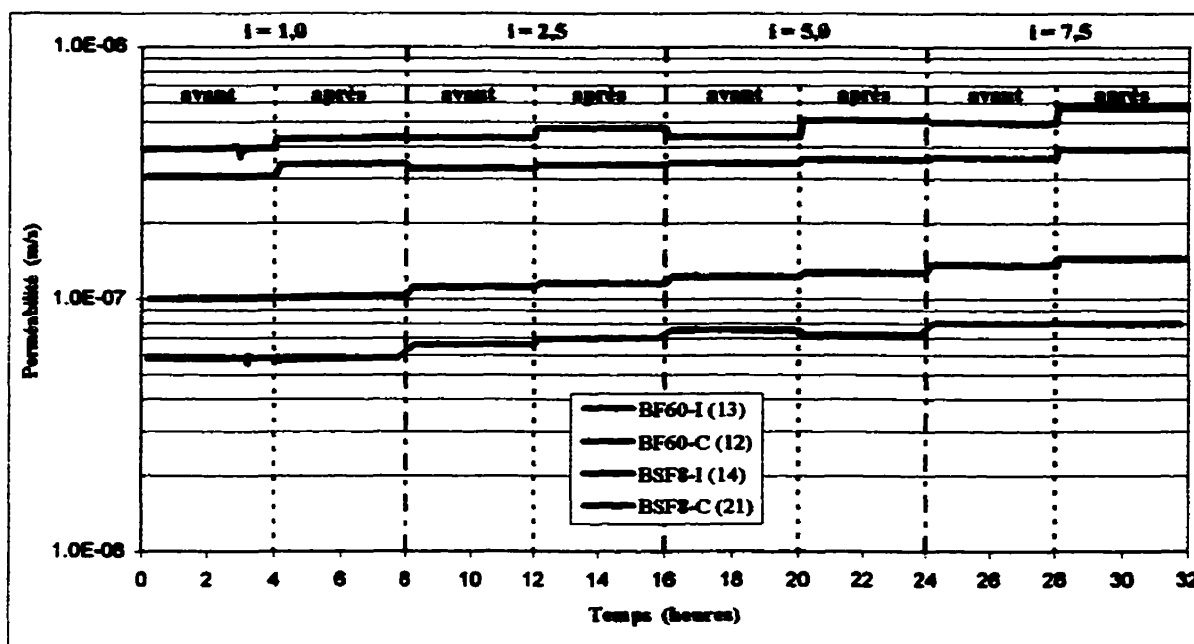


Figure 4.24 Perméabilités des systèmes selon la stabilité interne du sol

Les résultats de ces essais montrent que la forme des particules d'un sol influence son comportement en filtration. D'abord, la figure 4.25 indique que la masse totale de sol passant le géotextile NTT est deux fois plus importante pour le sol B que pour le sol F et ce, pour une masse volumique comprimée du sol sec semblable. De plus, la distribution des pressions dans les sols B et F en contact avec le géotextile NTT révèle la formation d'une zone plus perméable à l'interface et elle est linéaire dans le reste des sols (figures C.12 et C.27 b). Toutefois, l'évolution du rapport des gradients montre que le sol B semble subir un plus grand remaniement de sa structure que le sol F pour les conditions imposées d'écoulement. En effet, pour le système NTT-B, le rapport GR_{ASTM} accuse un changement plus marqué lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient (figure C.11) tandis qu'il est plutôt constant pour tous les gradients imposés au système NTT-F (figure C.26).

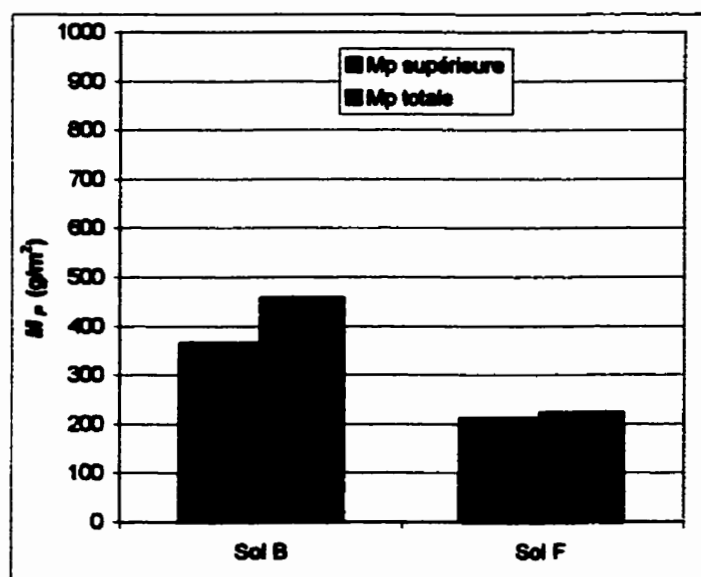


Figure 4.25 Masses de sol passant le géotextile NTT pour les sols B et F

De plus, le sol B et le système NTT-B présentent une perméabilité deux fois plus élevée que le sol F et le système NTT-F (figure 4.26). Ces observations permettent de constater que la forme des particules du sol a des effets importants sur le mouvement de ces particules. En effet, les particules sphériques du sol B opposent une résistance moins grande à l'écoulement de l'eau que les particules allongées et anguleuses du sol F. Cette résistance moins grande à l'écoulement est responsable de la perméabilité plus grande du sol B et du système NTT-B par rapport à celle du sol F et du système NTT-F. De plus, le sol B est alors apte à subir un grand plus réarrangement de sa structure que le sol F, ce qui est illustré par les sauts marqués du rapport des gradients à chacun des paliers d'écoulement unidirectionnel. Finalement, un sol reconstitué à l'aide de particules de forme sphérique est plus susceptible de passer au travers des constriction des géotextiles et présente donc des conditions plus sévères qu'un sol composé de particules anguleuses et aplaties.

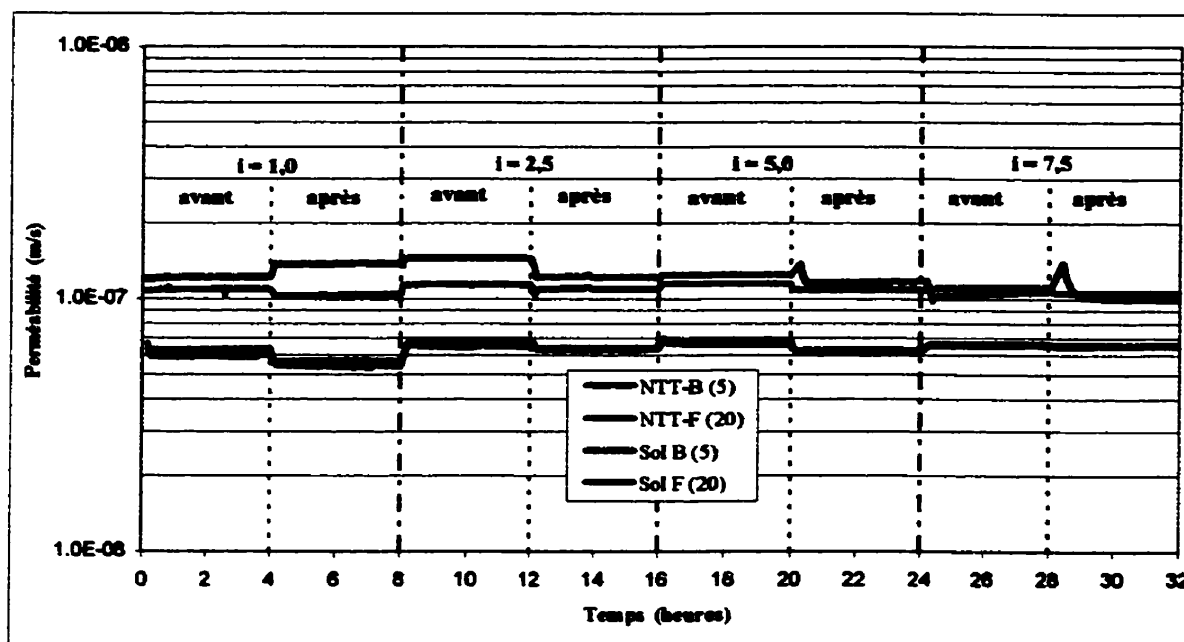


Figure 4.26 Perméabilités des systèmes selon la forme des particules du sol

4.6.6 Influence du nombre de constriction du géotextile

Les deux géotextiles fabriqués par Bidim, le F60 et SF8, ont une ouverture de filtration similaire mais comportent un nombre de constriction m différent : m est égal à 25 pour le BF60 et à 50 pour le BSF8. Pour déterminer l'impact de ce paramètre m sur le comportement en filtration des géotextiles non tissés, les résultats des essais réalisés avec les sols F, C et I en contact avec ces deux géotextiles sont utilisés. La figure 4.27 illustre la relation entre la masse de sol passant les géotextiles et le nombre de constriction du géotextile. Pour chacun des trois sols étudiés, nous pouvons constater que le géotextile BSF8 laisse passer plus de particules que le géotextile BF60. Cette observation vérifie les propos de Bouthot *et al.* (2000) et de Delmas *et al.* (2000) qui sont illustrés à la figure 2.11. Ces auteurs ont d'abord mentionné que, pour les particules plus petites que O_{100} (80 μm), une quantité plus importante de particules ne seront pas retenues (passant) par le filtre comportant le plus grand nombre de constriction.

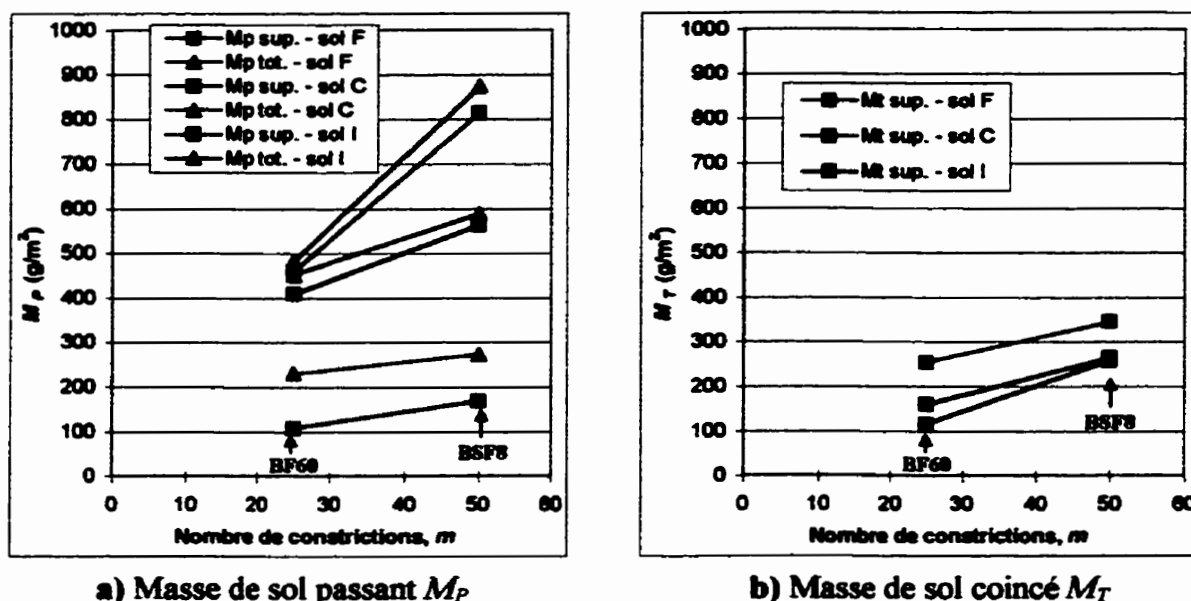


Figure 4.27 Influence du nombre de constrictions sur le comportement en filtration des géotextiles non tissés

Nous avons également vérifié le fait que le filtre comportant un nombre élevé de constrictions aura davantage tendance à retenir les grains de sol ayant des diamètres supérieurs à O_{100} à l'intérieur de sa structure (piégeage) plutôt qu'à sa surface (rétention). En effet, la figure 4.27 b montre que la masse de sol coincé dans le géotextile supérieur est plus importante pour le géotextile BSF8 que pour le géotextile BF60 et ce, pour les trois sols étudiés. Toutefois, il faut noter que la masse de sol coincé dans les géotextiles que nous avons mesurée contient une certaine proportion de silicone du montage.

4.6.7 Influence du confinement sur la rétention des sols (M_P)

Pour évaluer l'influence du confinement sur la quantité de particules lessivées à travers les géotextiles, deux systèmes ont été étudiés sous deux contraintes de confinement initiales différentes. D'abord, la rétention du sol I par le géotextile BF60 a été analysée

sous une contrainte de confinement de 100 et de 200 kPa. La relation entre la masse de sol passant les géotextiles et la contrainte de confinement est illustrée à la figure 4.28. Nous pouvons constater que l'application d'une contrainte de confinement deux fois plus élevée a entraîné une réduction de seulement 18% de la masse de sol passant le géotextile supérieur et une diminution de 14% de la quantité totale de particules lessivées. Quant au sol F en contact avec le géotextile NTT, ce système a été soumis à une contrainte de confinement initiale de 42 et de 200 kPa. Dans ce cas, l'application d'une contrainte de confinement près de quatre fois plus élevée a entraîné une réduction de seulement 8% de la masse de sol passant le géotextile supérieur et une diminution de 7% de la quantité totale de particules lessivées.

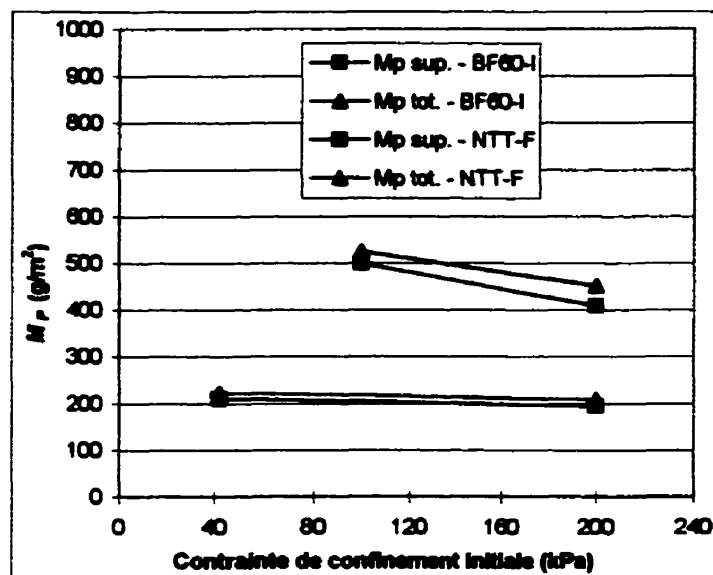


Figure 4.28 Influence du confinement sur la rétention des sols

Lorsque la contrainte de confinement appliquée au système géotextile-sol est suffisante pour maintenir le géotextile en contact avec le sol et pour empêcher la formation de canaux le long des parois de la cellule, ces résultats indiquent que l'augmentation du confinement ne réduit pas substantiellement la quantité de particules lessivées à travers les géotextiles.

4.7 Validation des critères de filtration existants

Suite à cette évaluation de l'influence de certains facteurs sur la rétention des sols, nous confrontons les critères théoriques existants en comparant le comportement observé à celui prédit par les principaux auteurs cités à la section 2.3. Le tableau 4.6 présente les ouvertures de filtration des géotextiles recommandées par ces auteurs pour assurer la rétention des trois principaux sols que nous avons étudiés, soit les sols F, C et I. Le texte coloré en bleu illustre les critères qui sont conservateurs, en vert les critères qui proposent une ouverture de filtration adéquate et en rouge les critères qui occasionnent un échec du système géotextile-sol. En ce qui concerne le texte en noir, nos résultats ne nous permettent pas de porter un jugement.

Tableau 4.6 Ouvertures de filtration proposées pour la rétention des sols F, C et I en conditions d'écoulement alterné

Critères de filtration	Sol F	Sol C	Sol I
1) C.G.S. (1992)	FOS < 6 µm	FOS < 18 µm	FOS < 11 µm
2) Holtz <i>et al.</i> (1997)	AOS ≤ 39 µm	AOS ≤ 80 µm	Test de performance recommandé
3) Luettich <i>et al.</i> (1992)	a) Attaques sévères: AOS < 39 µm b) Vagues faibles: AOS < 87 µm	a) Attaques sévères: AOS < 80 µm b) Vagues faibles: AOS < 200 µm	a) Attaques sévères: AOS < 115 µm b) Vagues faibles: AOS < 185 µm
4) Mlynarek (2000)	Sélectionner un géotextile multi-couche et réaliser un essai de filtration	a) Cond. sévères: 64 µm < FOS < 80 µm b) C. non sévères: 150 µm < FOS < 200 µm	a) Cond. sévères: 92 µm < FOS < 115 µm b) C. non sévères: 148 µm < FOS < 185 µm
5) Christopher et Holtz ¹ en 1985 et Holtz ¹ en 1998	$O_{50} \leq 39 \mu\text{m}$	AOS < 18 µm	AOS < 11 µm
6) Lafleur (1999) ²	FOS < 23 µm	FOS < 38 µm	46 µm < FOS < 230 µm

¹ Critères cités par Fannin et Hameiri (1999)

² Critères établis pour un écoulement unidirectionnel

L'analyse globale de ces critères permet d'abord de constater que, même si certains auteurs font intervenir le type de conditions hydrauliques pour la détermination de l'ouverture de filtration du géotextile, ces auteurs ne mentionnent pas l'importance du confinement du sol et du maintien du contact entre le géotextile et le sol. Nos résultats nous indiquent clairement que l'intensité de la contrainte de confinement a un impact important sur l'équilibre du système géotextile-sol. De plus, l'ouverture de filtration du géotextile prend une valeur différente selon la méthode employée, soit le tamisage à sec (AOS) ou hydrodynamique (FOS). Malgré cela, le tableau 4.6 montre qu'il y a une dispersion importante entre les valeurs d'ouverture de filtration proposées.

Le comportement en filtration des systèmes géotextile-sol que nous avons étudiés nous permet de mentionner que les critères proposés par la Société canadienne de Géotechnique (C.G.S., 1992), Holtz *et al.* (1997), Christopher et Holtz en 1985 ainsi que Holtz en 1998 (Fannin et Hameiri, 1999) sont trop conservateurs. Pour la plupart de ces critères, il n'existe pas de géotextile possédant une ouverture de filtration aussi petite. De plus, les résultats de nos essais indiquent que l'utilisation d'un géotextile plus ouvert que l'ouverture recommandée favorise la formation d'une structure avec pontage dans les sols tout en laissant passer une quantité acceptable de particules. Rappelons que le géotextile le plus ouvert que nous avons utilisé et qui initie un comportement en filtration adéquat possède une ouverture de filtration de 80 μm pour les sols F et C et de 106 μm pour le sol I. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le sol C subit moins de perte de particules que le sol I en contact avec le même géotextile. Pour cette raison, nous supposons qu'un géotextile plus ouvert que 80 μm retiendrait correctement le sol C. Par conséquent, le critère proposé par Holtz *et al.* (1997) nous semble conservateur pour ce sol.

En considérant que l'alternance de gradients hydrauliques de 5 et 7,5 représente une attaque sévère des vagues, nous pouvons affirmer que le critère proposé par Luetlich *et*

al. (1992) est trop limitatif pour les sols F et C. Cependant, l'ouverture du géotextile recommandée pour retenir le sol F correspond à nos résultats expérimentaux. En ce qui concerne l'abaque de Mlynarek (2000), l'intervalle des ouvertures de filtration suggéré mène à un comportement correct du système géotextile-sol pour les sols C et I soumis à des conditions hydrauliques sévères. Cependant, l'intervalle proposé est trop restreint pour le sol C et, sans l'avoir expérimenté, il pourrait comporter des ouvertures tant plus petites que plus grandes. Quant au sol I, l'intervalle proposé est également limité puisque nos essais montrent qu'un géotextile dont l'ouverture de filtration est inférieure à 44 μm retient correctement ce sol.

Finalement, les critères de sélection d'un géotextile en écoulement unidirectionnel de Lafleur (1999) sont présentés au tableau 4.6. En appliquant ces critères à nos résultats obtenus en conditions d'écoulement alterné, les observations suivantes sont émises. Un rapport de rétention inférieur à l'unité pour les sols stables (S) entraîne une restriction importante de l'ouverture de filtration du géotextile (figure 4.29). En effet, nos résultats indiquent que des rapports de rétention compris entre 1,9 et 3,5 correspondent à des systèmes pour lesquels des masses de sol passant acceptables ont été observées. Les combinaisons géotextile-sol caractérisées par un rapport de rétention supérieur à 3,5 subissent un lessivage d'une quantité inacceptable de particules.

Quant à l'intervalle de R_R suggéré pour les sols instables (I), la limite supérieure de 5 entraîne un lessivage d'une quantité inacceptable de particules lorsqu'un géotextile tissé est utilisé. La relation illustrée à la figure 4.29 suggère plutôt qu'un rapport de rétention inférieur à environ 4 peut être imposé comme limite supérieure pour les sols instables.

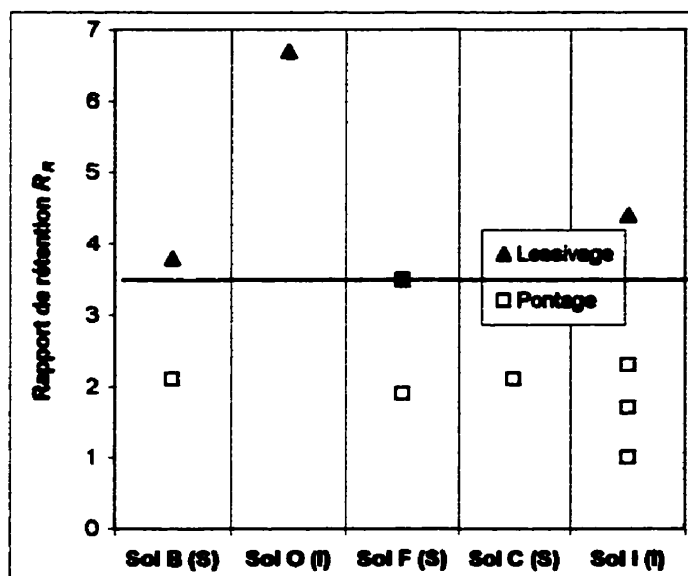


Figure 4.29 Intervalle acceptable du rapport de rétention selon la stabilité interne du sol

4.8 Modification aux critères de filtration en conditions d'écoulement alterné

La discussion des résultats ainsi que la vérification des critères de filtration existants nous permettent de proposer un nouveau critère de rétention des sols en conditions d'écoulement alterné (figure 4.30). Ce critère reprend des éléments des critères établis par Lafleur (1999), Luettich *et al.* (1992) et Mlynarek (2000) en plus de tenir compte des conditions hydrauliques et de confinement imposées aux systèmes géotextile-sol.

Les commentaires suivants sont émis. D'abord, les ouvertures proposées ne s'appliquent qu'à des géotextiles non tissés. De plus, ce nouveau critère tient compte de la recommandation de Bouthot *et al.* (2000) qui suggèrent un nombre de constriction m du géotextile non tissé compris entre 25 et 40. Nos résultats ont en effet montré qu'un géotextile non tissé comportant une ouverture de filtration semblable mais un nombre de constriction plus élevé laissait passer une plus grande quantité de particules. Finalement, l'intensité du gradient hydraulique alterné et du confinement influence la stabilité du

système géotextile-sol (section 4.6.2). Pour cette raison, nous suggérons qu'un essai du rapport des gradients soit réalisé selon la contrainte de confinement et le gradient hydraulique alterné prévus sur le terrain. Nous considérons que l'alternance de gradients hydrauliques de 5 et 7,5 représente une attaque sévère des vagues.

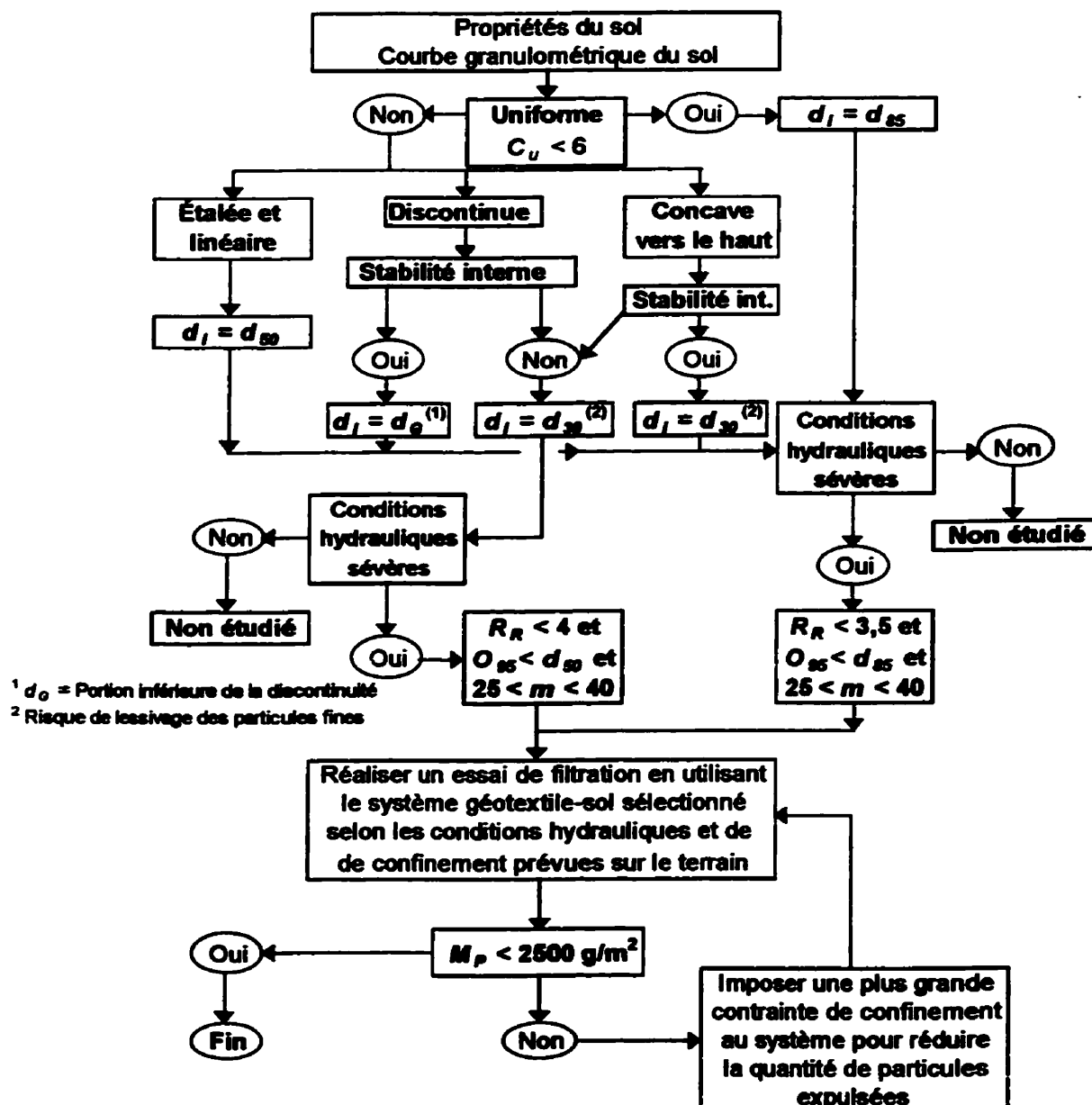


Figure 4.30 Proposition d'un critère de rétention en conditions d'écoulement alterné pour les sols pulvérulents

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a porté sur la compatibilité en filtration de systèmes composés d'un géotextile et d'un sol soumis à des conditions d'écoulement alterné. Nous avons présenté dans un premier temps les effets d'un écoulement alterné, les comportements en filtration d'un système géotextile-sol et l'évaluation de la stabilité interne d'un sol. Par la suite, les critères de filtre établis pour des conditions d'écoulement unidirectionnel et d'écoulement alterné ont été traités. L'étude expérimentale a porté sur la compatibilité en filtration de cinq géotextiles et de cinq sols en adaptant le test du rapport des gradients pour simuler des conditions d'écoulement alterné.

Tous les géotextiles ont initié la formation d'une zone plus perméable dans le sol à l'interface géotextile-sol. Le colmatage externe du géotextile ne survient donc pas puisque les sollicitations associées à l'alternance des gradients hydrauliques tendent à dégager les pores du sol près de l'interface. Les résultats des essais montrent d'abord qu'un rapport de rétention croissant entraîne le lessivage d'un plus grand nombre de particules. Les systèmes géotextile-sol caractérisés par un rapport de rétention supérieur à 3,5 subissent un lessivage d'une quantité inacceptables de particules.

Cette étude a également mis en évidence l'importance de la direction de l'écoulement, de l'intensité du confinement et du gradient hydraulique sur l'équilibre des systèmes géotextile-sol. En effet, nos résultats indiquent qu'un écoulement ascendant impose des

conditions plus critiques qu'un écoulement descendant et que l'équilibre de l'interface géotextile-sol n'est assuré que sous certaines conditions hydrauliques et de confinement interdépendantes. Un confinement plus important du sol réduit la quantité de particules expulsées.

La comparaison des résultats a aussi montré l'influence de la stabilité interne des sols et de la forme de leurs particules. En contact avec le même géotextile, un sol instable subit une plus grande perte de particules qu'un sol stable présentant une granulométrie assez rapprochée. De plus, un sol reconstitué à l'aide de particules de forme sphérique est plus susceptible de passer au travers des constriction des géotextiles et présente donc des conditions plus sévères qu'un sol composé de particules anguleuses et aplaties. Finalement, pour une ouverture de filtration donnée, un géotextile comportant un nombre de constriction plus élevé laisse passer plus de particules.

La validation des critères de filtration existants a indiqué que la plupart des critères cités dans la littérature sont trop conservateurs. De plus, ces auteurs ne mentionnent pas l'importance du confinement du sol et du maintien du contact entre le géotextile et le sol. Nous avons donc proposé un nouveau critère de rétention des sols en conditions d'écoulement alterné qui tient compte du rapport de rétention, de la stabilité interne des sols et des conditions hydrauliques et de confinement imposées au système géotextile-sol sélectionné.

Afin de valider ce nouveau critère de rétention, les recommandations suivantes sont formulées.

- Des essais du rapport des gradients devraient être réalisés avec des géotextiles non tissés dont les ouvertures de filtration se situent entre 80 et 105 μm pour le sol F, entre 80 et 170 μm pour le sol C et entre 106 et 210 μm pour le sol I. Les résultats de ces essais permettraient de déterminer le géotextile le plus ouvert qui initie un

comportement en filtration adéquat pour chacun des trois sols F, C et I, c'est-à-dire la limite supérieure de l'intervalle acceptable du rapport de rétention.

- Pour mieux cerner le comportement des sols en contact avec des géotextiles tissés, de nouveaux échantillons comportant une ouverture de filtration inférieure à celle du géotextile T, soit 200 μm , devraient être également utilisés.
- Des conditions hydrauliques moins sévères, soit des gradients alternés égaux à 1 ou 2,5, pourraient être appliquées aux sols F, C et I pour déterminer le géotextile le plus ouvert qui initie une structure avec pontage dans ces conditions.

Les conclusions et les recommandations de cette étude montrent donc que plusieurs combinaisons doivent être soumises au test du rapport des gradients afin de valider ce nouveau critère de rétention des sols en conditions d'écoulement alterné.

RÉFÉRENCES

ASTM D-5101-96 (1997). Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 9, ASTM, Philadelphia, 1016-1023.

AUSTIN, D.N., MLYNAREK, J. and BLOND, E. (1997). Expanded Anti-clogging Criteria for Woven Filtration Geotextiles. Proceedings of Geosynthetics '97, Long Beach, U.S.A., Industrial Fabrics Association International, USA, Vol. 2, 1123-1144.

BEAUDOIN, A. (1997). Applicabilité de l'essai GR pour la sélection des géotextiles en filtration. Projet de fin d'étude, École Polytechnique de Montréal, Canada.

BLOND, E. (1995). Comportement en filtration des sols étalés et des géotextiles non tissés. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

BOUTHOT, M., VERMEERSCH, O.G., BLOND, E. and MLYNAREK, J. (2000). Effet du nombre de constriction sur le comportement en filtration des géotextiles non tissés. Proceedings of Geofilters 2000, Edited by W. Wolski and J. Mlynarek, Warsaw, 159-165.

BROCHIER, P. (1984). Comportement des géotextiles en filtration et en séparation. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

CARROLL Jr., R.G. (1983). Geotextile Filter Criteria. Transportation Research Record, No. 916, National Research Council, Washington, D.C., 46-53.

CAZZUFFI, D., MAZZUCATO, A., MORACI, N. and TONDELLO, M. (1999). A New Test Apparatus for the Study of Geotextiles Behaviour as Filters in Unsteady Flow Conditions: Relevance and Use. Geotextiles and Geomembranes, **17**, 313-329.

CAZZUFFI, D., MAZZUCATO, A., MORACI, N. and TONDELLO, M. (1996). A New Test Apparatus for the Study of Geotextiles Behaviour as Filters in Unsteady Flow Conditions. Proceedings of Geofilters'96, Edited by Jean Lafleur & André L. Rollin, Montréal, Canada, 183-191.

CHRISTOPHER, B.R. and FISCHER, G.R. (1992). Geotextile Filtration Principles, Practices and Problems. Geotextiles and Geomembranes, **11**, 337-353.

DELMAS, Ph., ARTIÈRES, O., SCHÖRGENHUBER, H. and LUGMAYR, R. (2000). Development of a New Geotextile Filtration System. Proceedings of Geofilters 2000, Edited by W. Wolski and J. Mlynarek, Warsaw, 51-58.

FANNIN, R.J. and HAMEIRI, A. (1999). A Gradient Ratio Device for Compatibility Testing in Cyclic Flow. Proceedings of Geosynthetics' 99, Boston, Vol. 2, 1033-1042.

FANNIN, R.J., VAID, Y.P. and SHI, Y.C. (1994). Filtration Behaviour of Nonwoven Geotextiles. Canadian Geotechnical Journal, **31**, 555-563.

FRANCOEUR, J. (1998). Essais du rapport des gradients pour la sélection des géotextiles en filtration, Projet de fin d'étude, École Polytechnique de Montréal, Canada.

FROBEL, R.K., WERNER, G. and WEWERKA, M. (1987). Geotextiles as Filters in Erosion Control. Geotextile Testing and the Design Engineer, ASTM Special Technical Publication 952, ASTM, Philadelphia, 45-54.

GIROUD, J.P. (1996). Granular Filters and Geotextile Filters. Proceedings of Geofilters'96, Edited by Jean Lafleur & André L. Rollin, Montréal, Canada, 565-680.

GIROUD, J.P. (1982). Filter Criteria for Geotextiles. Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Industrial Fabrics Association International, Las Vegas, 103-108.

GIROUD, J.P., DELMAS, P. and ARTIÈRES, O. (1998). Theoretical Basis of the Development of a Two-Layer Geotextile Filter. Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 2, Atlanta, 1037-1044.

HALIBURTON, T.A. and WOOD, P.D. (1982). Evaluation of the U.S. Army Corps of Engineer Gradient Ratio Test for Geotextile Performance. Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Industrial Fabrics Association International, Las Vegas, 97-101.

HOLTZ, R.D., CHRISTOPHER, B.R. and BERG, R.R. (1997). Geosynthetic Engineering, BiTech Publishers Ltd., Richmond, Canada.

HOLTZ, R.D. and KOVACS, W.D. (1991). Introduction à la géotechnique, traduit par Jean Lafleur, Édition de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

INGOLD, T.S. (1994). The Geotextiles and Geomembranes Manual, 1st Edition, Elsevier Science Publishers, Great Britain.

INGOLD, T.S. (1985). A Theoretical and Laboratory Investigation of Alternating Flow Criteria for Woven Structures. Geotextiles and Geomembranes, 2, 31-45.

KENNEY, T.C. and LAU, D. (1986). Internal Stability of Granular Filters : Reply. Canadian Geotechnical Journal, 23, 420-423.

KENNEY, T.C. and LAU, D. (1985). Internal Stability of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal, 22, 215-225.

KOERNER, R.M. and KO, F.K. (1982). Laboratory Studies on Long-Term Drainage Capability of Geotextiles. Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Industrial Fabrics Association International, Las Vegas, 91-95.

LAFLEUR, J. (1999). Selection of Geotextile to Filter Broadly Graded Cohesionless Soils. Geotextiles and Geomembranes, 17, 299-312.

LAFLEUR, J. (1998). Particles Washout Associated with the Retention of Broadly Graded Soils by Geotextiles. Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 2, Atlanta, 1001-1004.

LAFLEUR, J., MLYNAREK, J. and ROLLIN, A.L. (1989). Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, 115, 1747-1768.

LAWSON, C.R. (1982). Filter Criteria for Geotextiles : Relevance and Use. Journal of Geotechnical Engineering, 108, 1300-1317.

LUETTICH, S.M., GIROUD, J.P. and BACHUS, R.C. (1992). Geotextile Filter Design Guide. Geotextiles and Geomembranes, 11, 355-370.

MLYNAREK, J. (2000). Geo Drains and Geo Filters – Retrospective and Future Trends. Proceedings of Geofilters 2000, Edited by W. Wolski and J. Mlynarek, Warsaw, 27-47.

OUMERACI, H. (1996). Filters in Coastal Structures. Proceedings of Geofilters'96, Edited by Jean Lafleur & André L. Rollin, Montréal, Canada, 337-348.

PALMEIRA, E.M., FANNIN, R.J. and VAID, Y.P. (1996). A Study on the Behaviour of Soil-Geotextile Systems in Filtration Tests. Canadian Geotechnical Journal, **33**, 899-912.

RAO, G.V., GUPTA, K.K. and PRADHAN, M.P.S. (1991). Long-Term Filtration Behaviour of Soil-Geotextile System. Geotechnical Testing Journal, **15**, 238-247.

ROLLIN, A.L. and LOMBARD, G. (1988). Mechanisms Affecting Long-Term Filtration Behavior of Geotextiles. Geotextiles and Geomembranes, **7**, 119-145.

ROLLIN, A.L., LAFLEUR, J., MLYNAREK, J., FAURE, Y. and GOURC, J.P. (1989). Long Terme Behaviour of Geotextiles in Drainage Systems. Proceedings of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, A.A. BALKEMA, Netherlands, 1683-1687.

SAGEOS (1998). Rapport d'essais « Gradient Ratio » sur géotextiles. Projet S 159-007, par J. Mlynarek et E. Blond, Juin 1998, 14 pages.

SAGEOS GX No 006 (1996). Geosynthetics Testing Method Mesuring the Soil-Geotextile System Clogging and Piping Potential by the Gradient Ratio for Gravels, Sands and Silts. SAGEOS Standards, 1-9.

SHI, Y.C. (1993). Filtration Behaviour of Non-Woven Geotextiles in the Gradient Ratio Test, M.A.Sc.thesis, University of British Columbia, Canada.

SHI, Y.C., FANNIN, R.J. and VAID, Y.P. (1996). Evaluation of Geotextile Filter Behaviour Using the Gradient Ratio Test. Proceedings of Geofilters'96, Edited by Jean Lafleur & André L. Rollin, Montréal, Canada, 469-480.

SOCIÉTÉ CANADIENNE DE GÉOTECHNIQUE (1992). Canadian Foundation Engineering Manual. 3rd edition, BiTech Publishers Ltd., Richmond, Canada.

WILLIAMS, N.D., and ABOUZAKHM, M.A. (1989). Evaluation of Geotextile/Soil Filtration Characteristics Using the Hydraulic Conductivity Ratio Analysis. Geotextiles and Geomembranes, 8, 1-26.

ANNEXE A

PROPRIÉTÉS MESURÉES
DES GÉOTEXTILES
F60 ET SF8 DE BIDIM

Les valeurs mesurées du diamètre, de l'épaisseur et de la masse pour les quatre échantillons du géotextile bi-couche **F60** de **BIDIM** sont présentées au tableau A.1.

Tableau A.1 Caractéristiques des échantillons du géotextile F60 de Bidim

Échantillon	Diamètre (mm)	Épaisseur nominale (mm)	Masse (grammes)
1	114	3,647	4,32
	114	3,642	
	113	3,627	
	Moyenne	3,639	
2	113	3,620	4,62
	115	3,510	
	116	3,866	
	Moyenne	3,665	
3	113	3,190	3,97
	115	3,142	
	113	3,200	
	Moyenne	3,178	
4	111	3,254	4,05
	113	3,216	
	114	3,218	
	Moyenne	3,229	

La moyenne des principales propriétés mesurées du géotextile **BIDIM F60** est présentée au tableau A.2.

Tableau A.2 Propriétés du géotextile Bidim F60

Échantillon	Épaisseur nominale (mm)	Masse surfacique (g/m ²)
1	3,639	425,7
2	3,665	447,4
3	3,178	391,2
4	3,229	406,2
Moyenne :	3,428	417,6

Les valeurs mesurées du diamètre, de l'épaisseur et de la masse pour les quatre échantillons du géotextile SF8 de BIDIM sont présentées au tableau A.3.

Tableau A.3 Caractéristiques des échantillons du géotextile SF8 de Bidim

Échantillon	Diamètre (mm)	Épaisseur nominale (mm)	Masse (grammes)
1	112	6,203	8,69
	115	6,134	
	112	6,040	
Moyenne	113	6,126	
2	113	6,655	9,62
	112	6,723	
	114	6,810	
Moyenne	113	6,729	
3	112	6,688	9,37
	112	6,525	
	112	6,604	
Moyenne	112	6,606	
4	114	5,779	8,02
	112	5,994	
	112	5,867	
Moyenne	113	5,880	

La moyenne des principales propriétés mesurées du géotextile BIDIM SF8 est présentée au tableau A.4.

Tableau A.4 Propriétés du géotextile Bidim SF8

Échantillon	Épaisseur nominale (mm)	Masse surfacique (g/m ²)
1	6,126	866,5
2	6,729	959,2
3	6,606	951,1
4	5,880	804,4
Moyenne :	6,335	895,3

ANNEXE B

APPLICATION DE LA CONTRAINTE DE CONFINEMENT SUR LES ÉCHANTILLONS

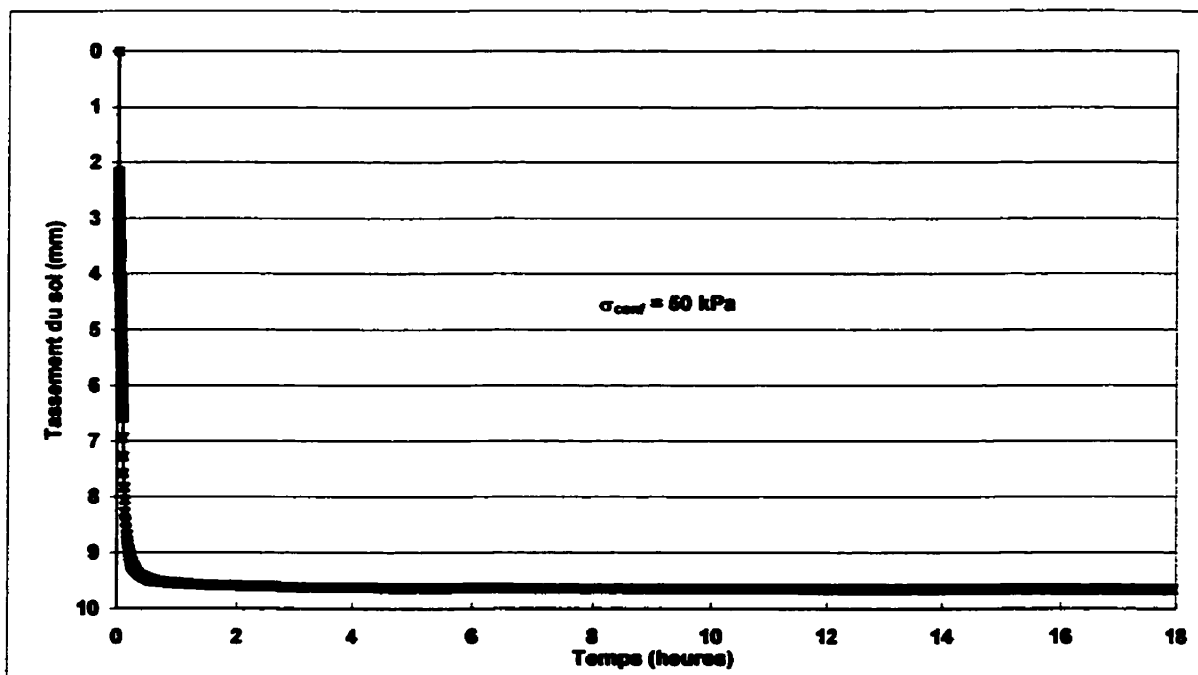


Figure B.1 Application d'une contrainte de confinement de 50 kPa en une étape (essai no. 1)

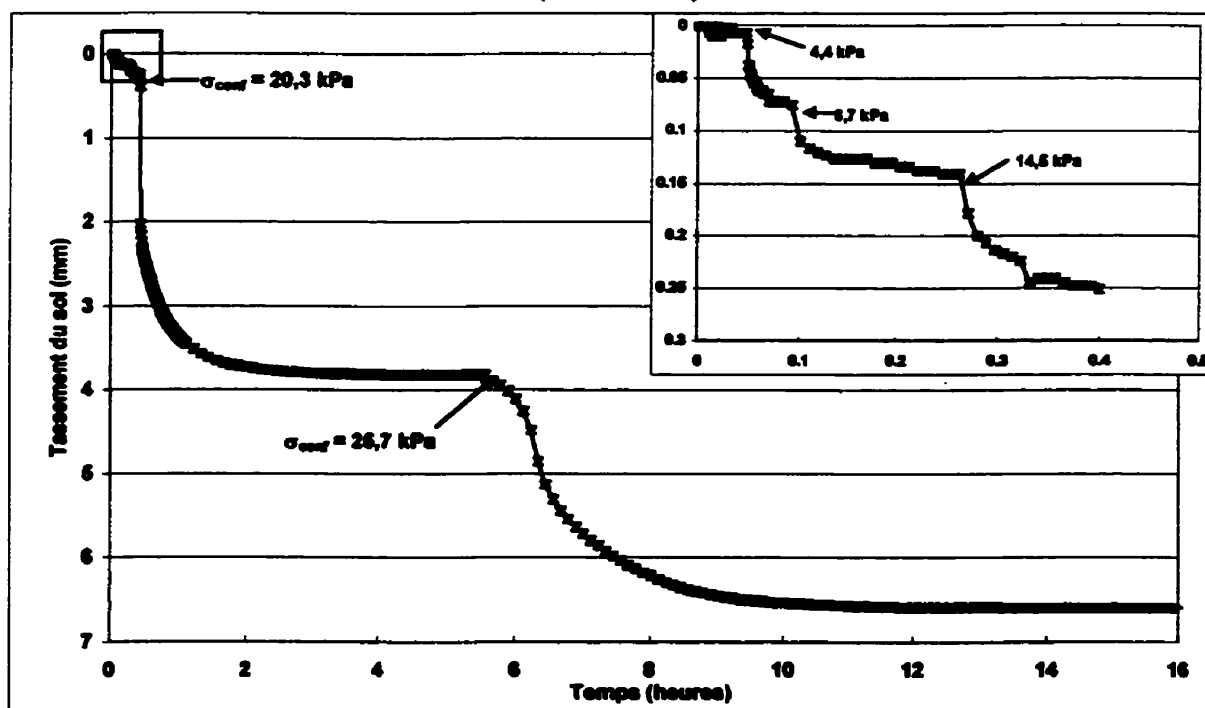


Figure B.2 Application d'une contrainte de confinement de 25,7 kPa en 5 étapes (essai no. 2)

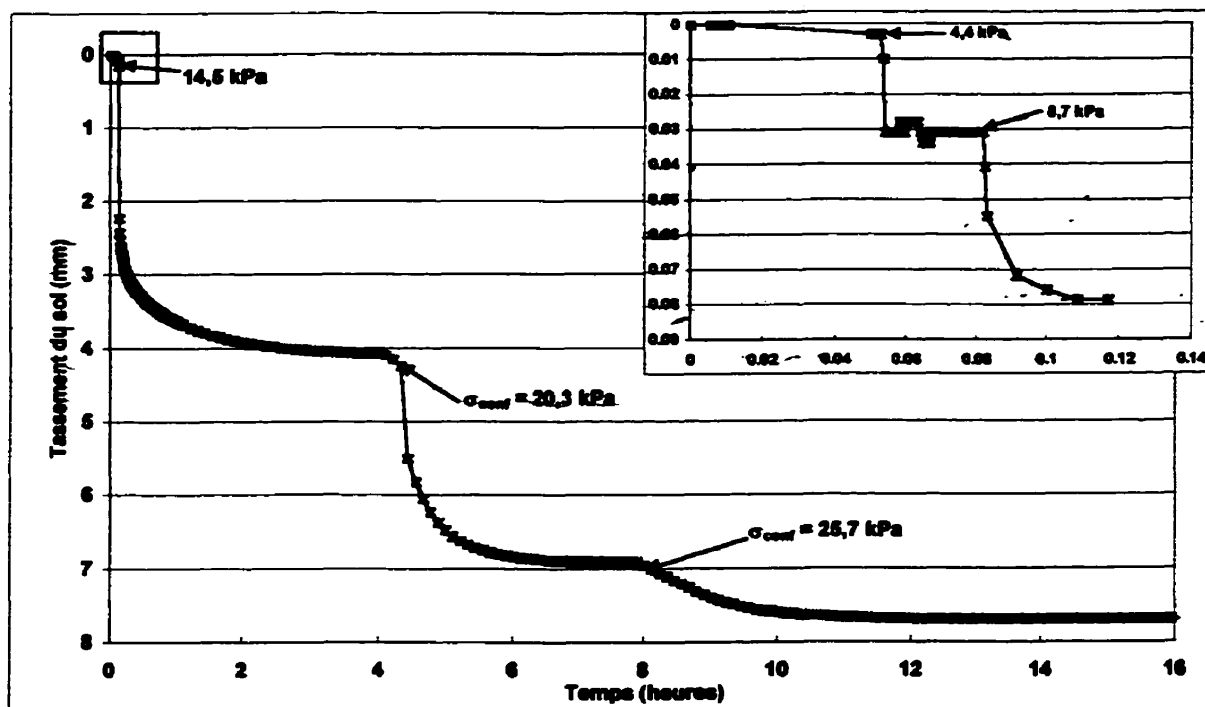


Figure B.3 Application d'une contrainte de confinement de 25,7 kPa en 5 étapes (essai no. 3)

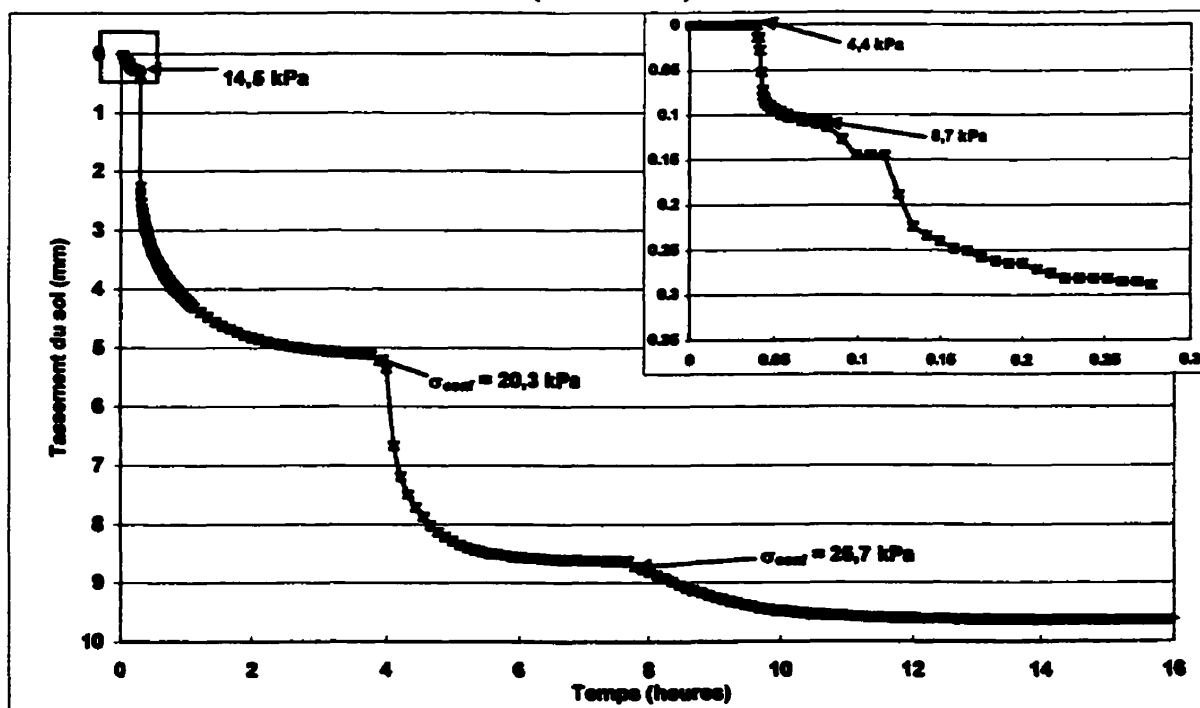


Figure B.4 Application d'une contrainte de confinement de 25,7 kPa en 5 étapes (essai no. 4)

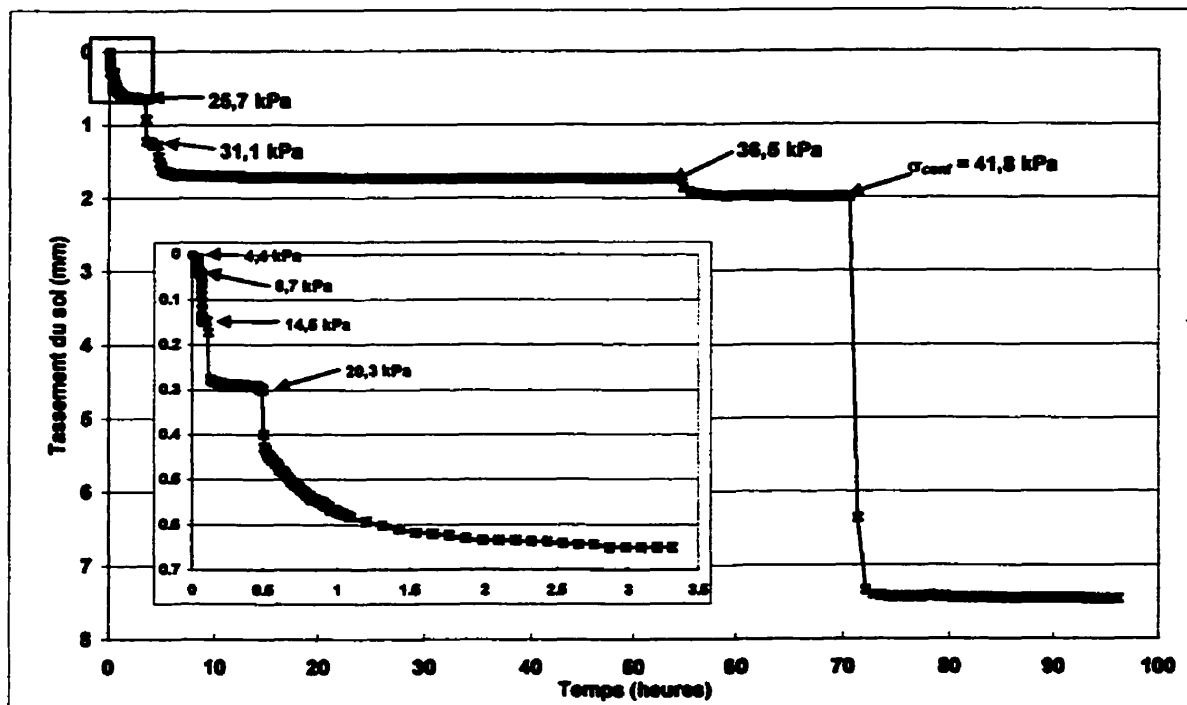


Figure B.5 Application d'une contrainte de confinement de 41,8 kPa en 8 étapes (essai no. 5)

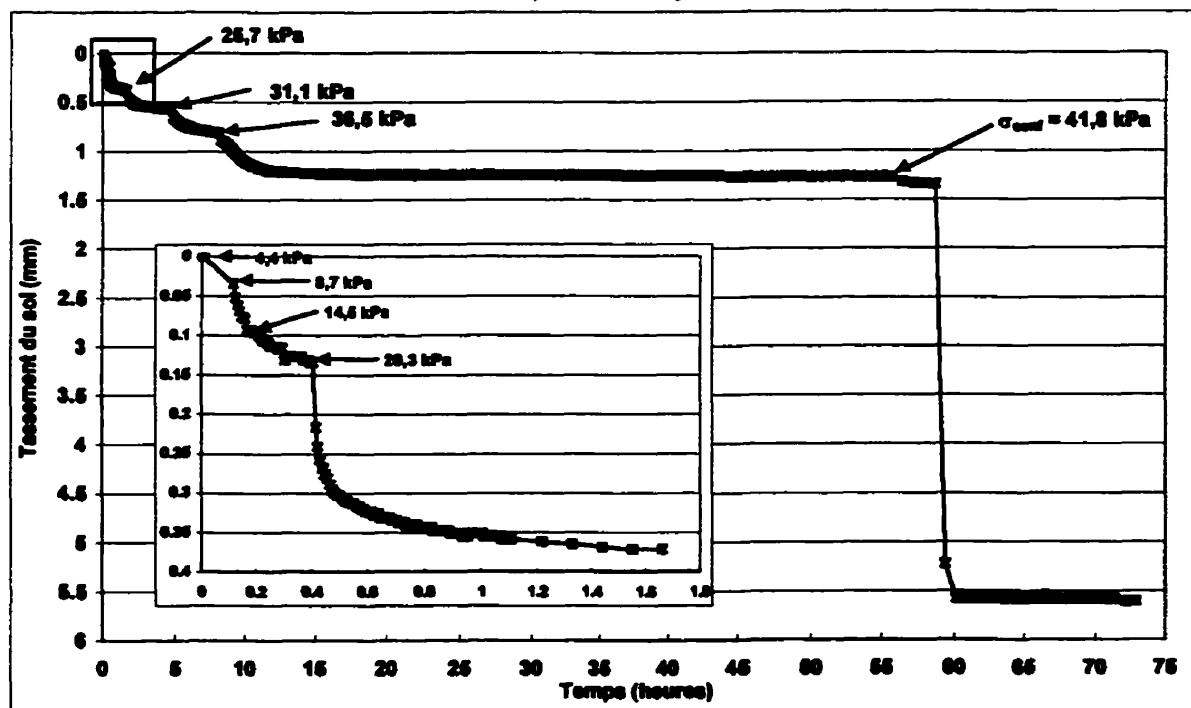


Figure B.6 Application d'une contrainte de confinement de 41,8 kPa en 8 étapes (essai no. 6)

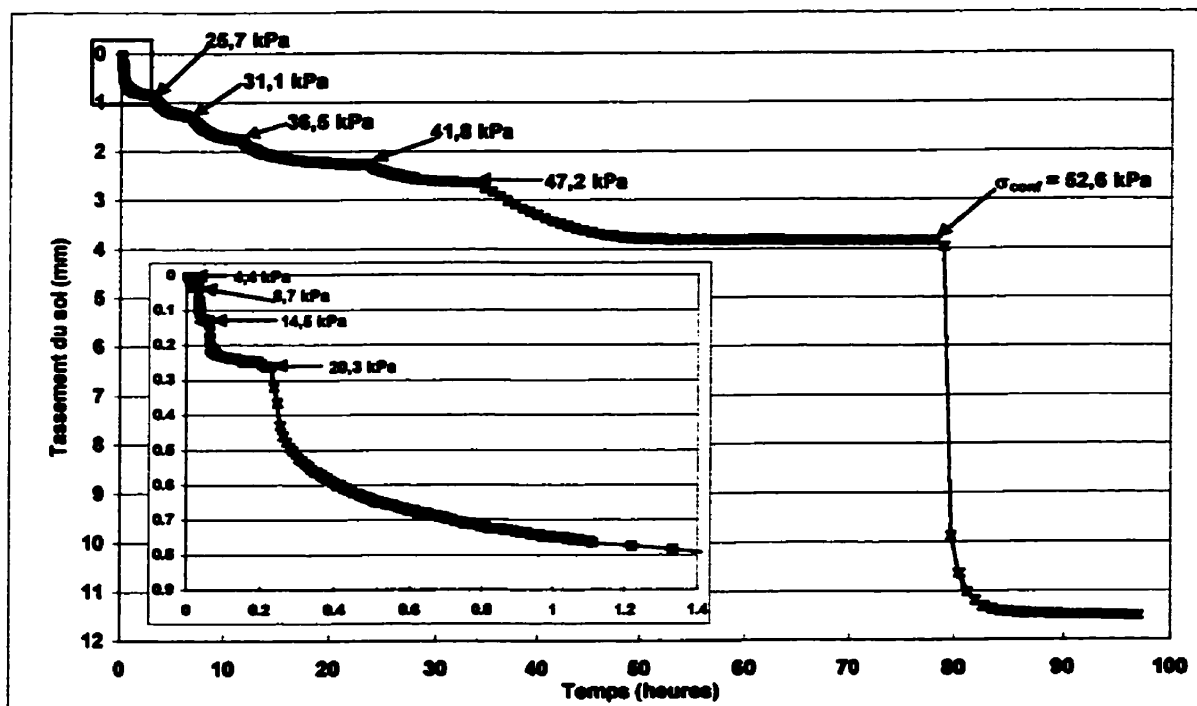


Figure B.7 Application d'une contrainte de confinement de 52,6 kPa en 10 étapes (essai no. 7)

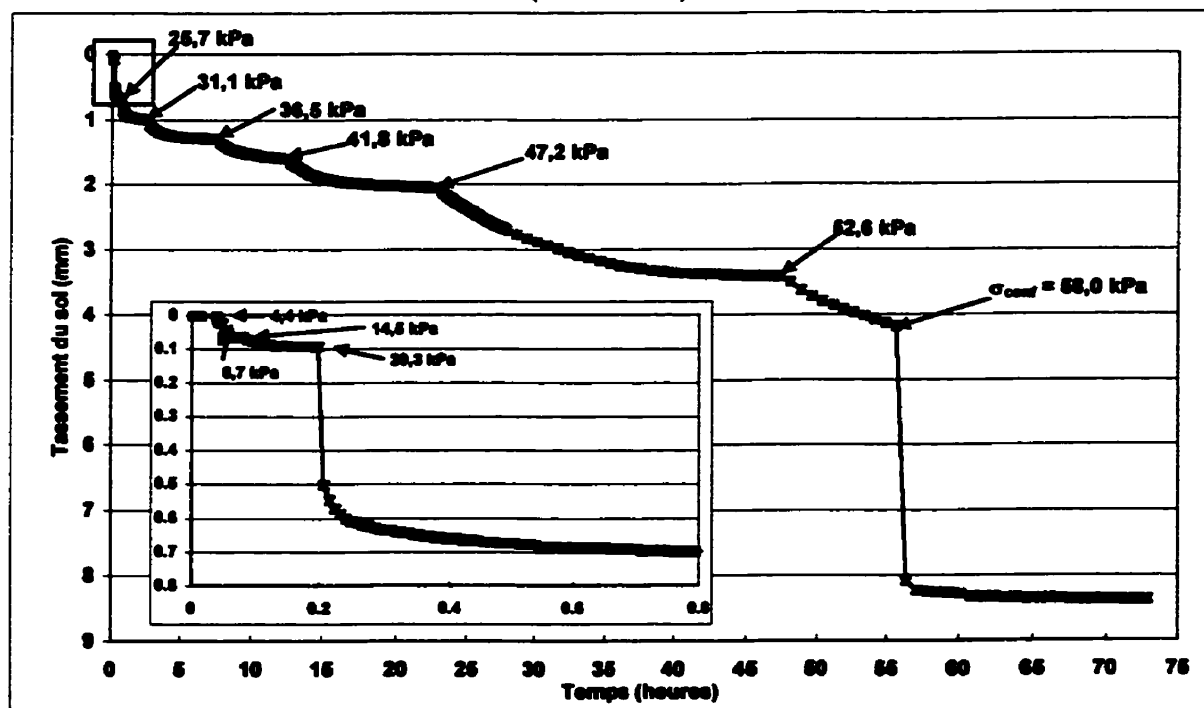


Figure B.8 Application d'une contrainte de confinement de 58,0 kPa en 11 étapes (essai no. 8)

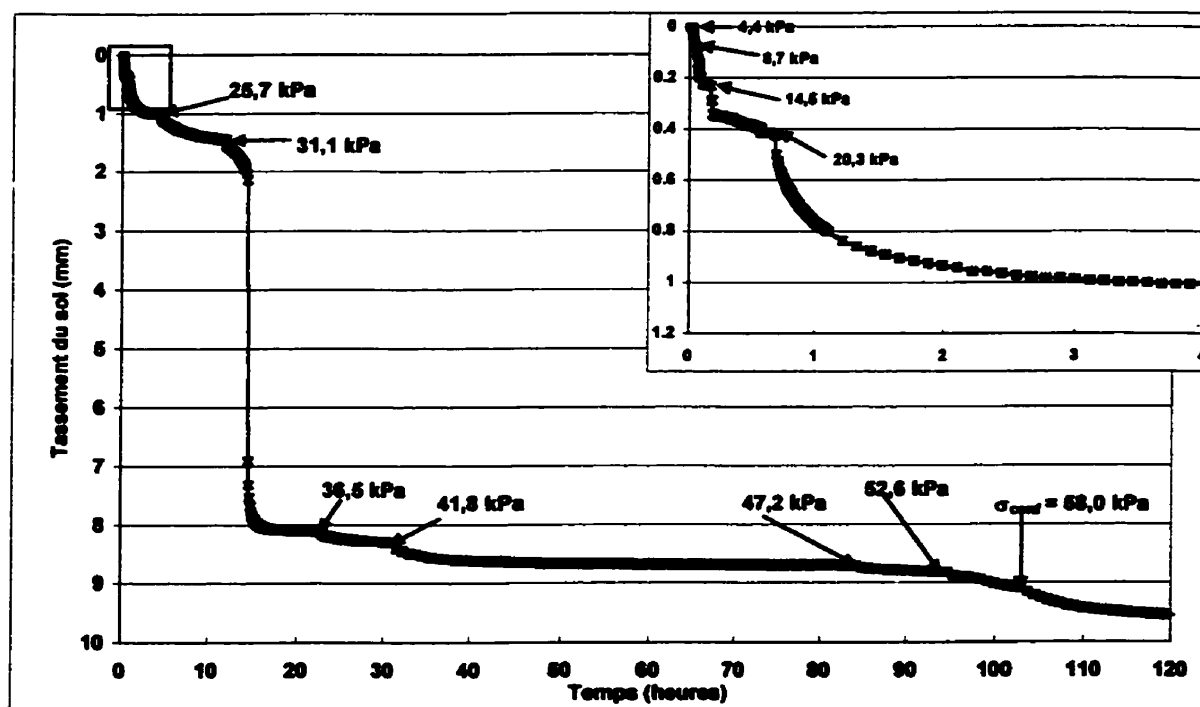


Figure B.9 Application d'une contrainte de confinement de 58,0 kPa en 11 étapes (essai no. 9)

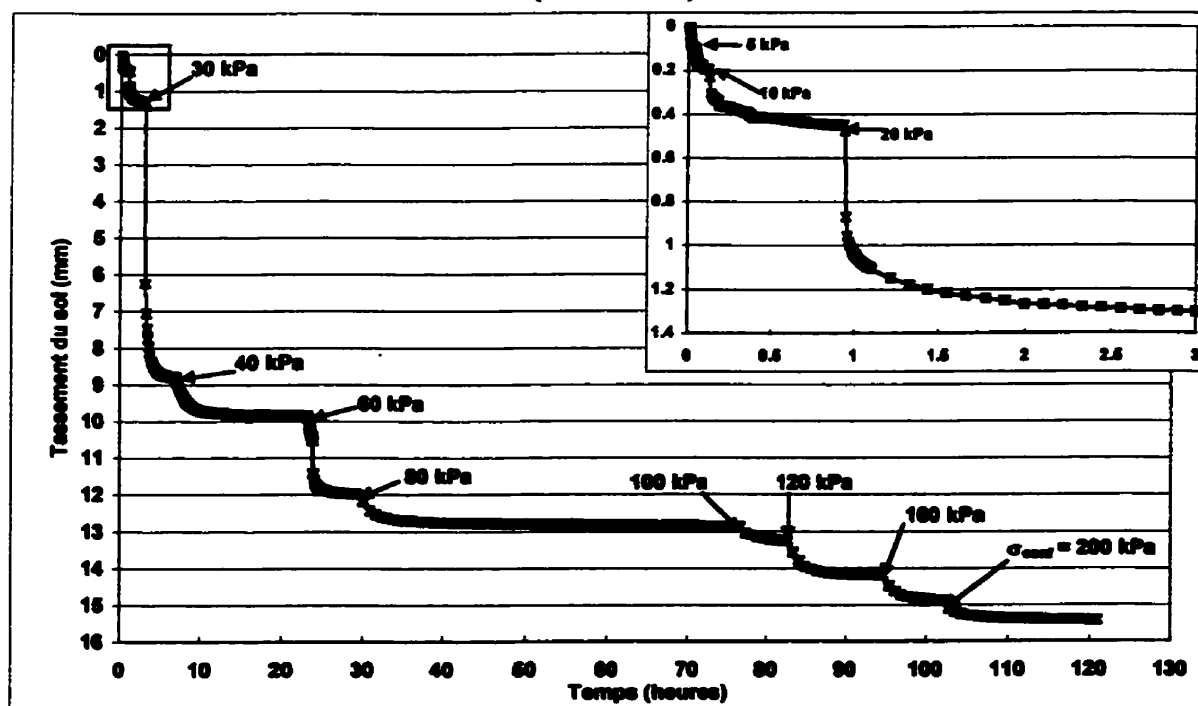


Figure B.10 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 10)

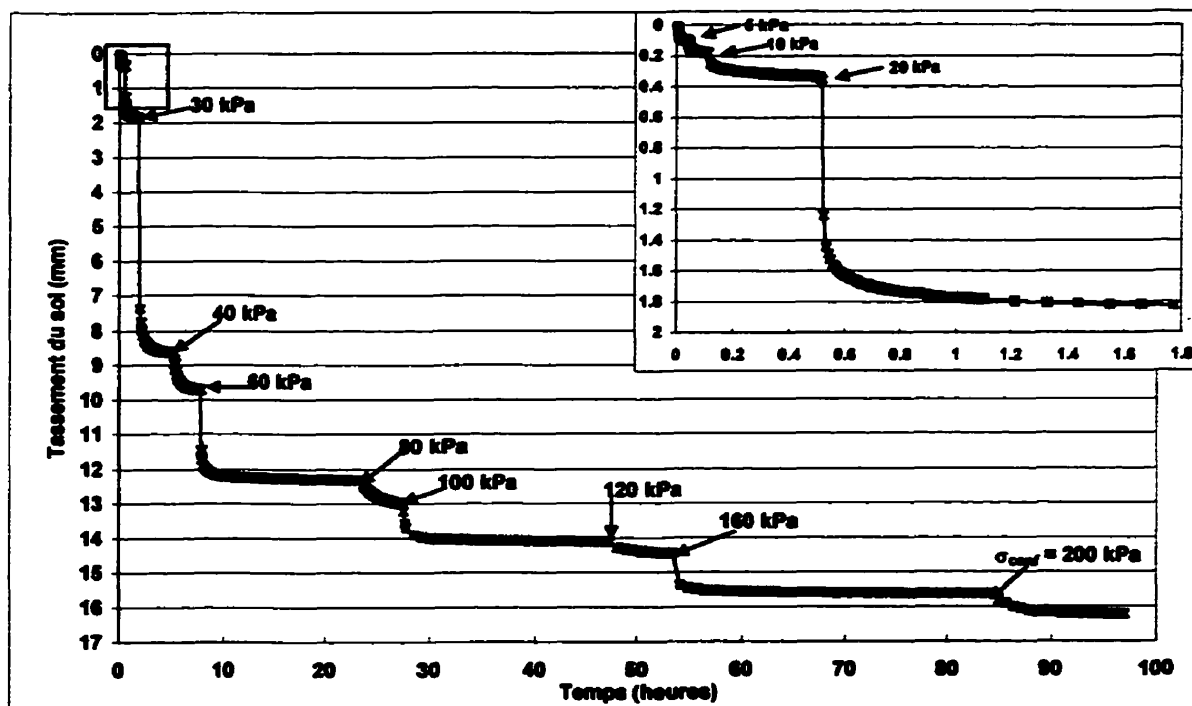


Figure B.11 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 11)

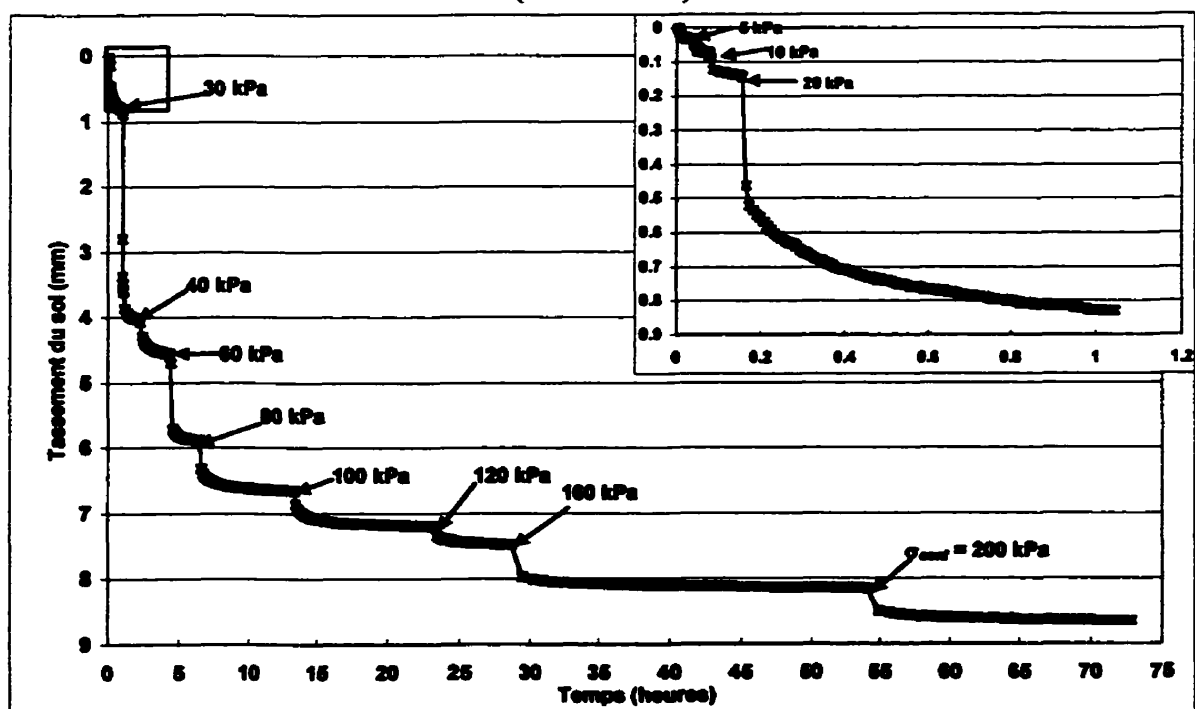


Figure B.12 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 12)

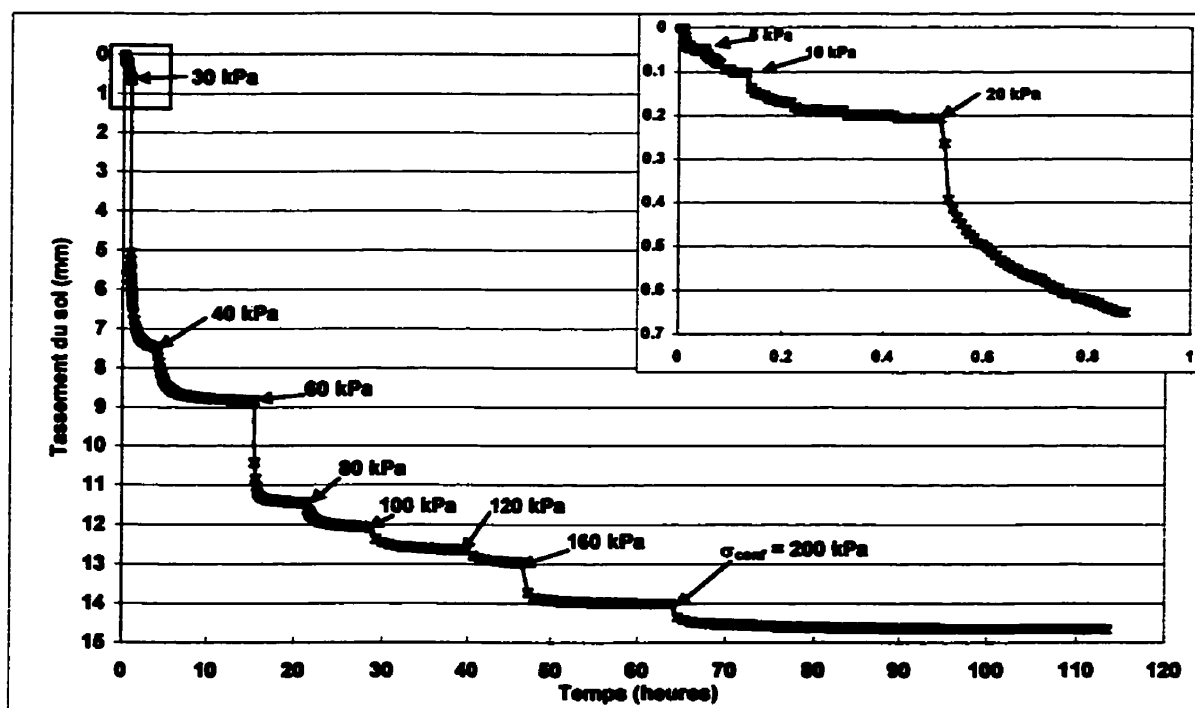


Figure B.13 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 13)

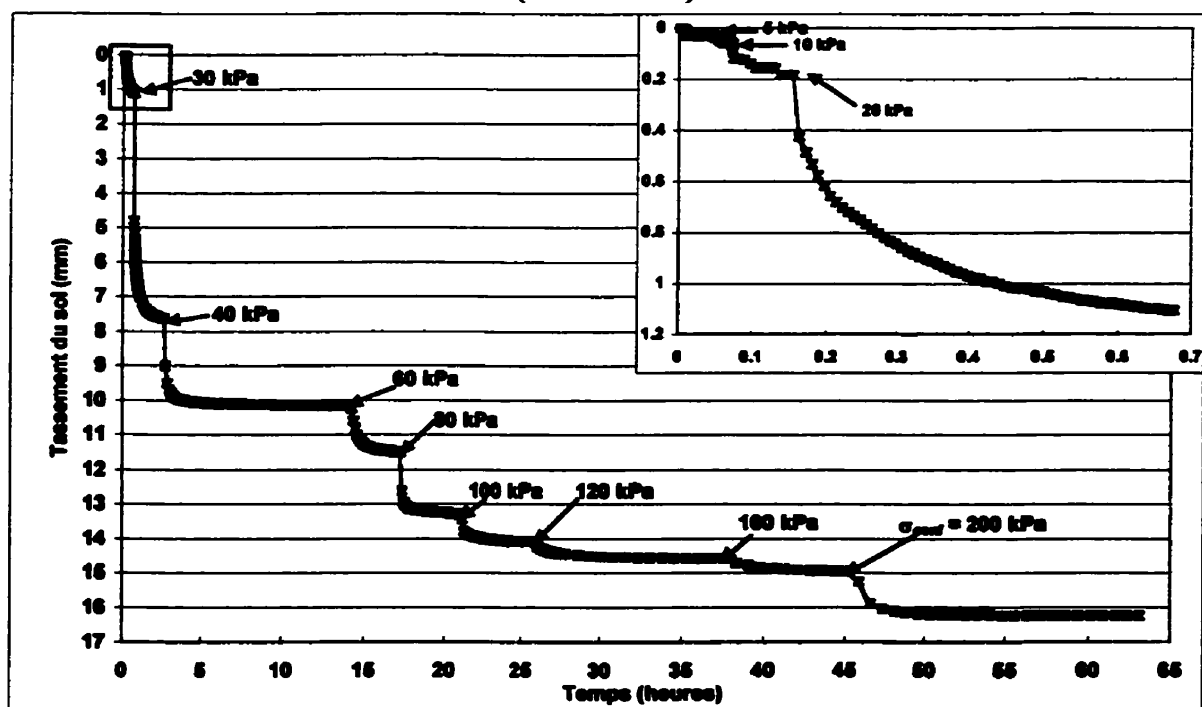


Figure B.14 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 14)

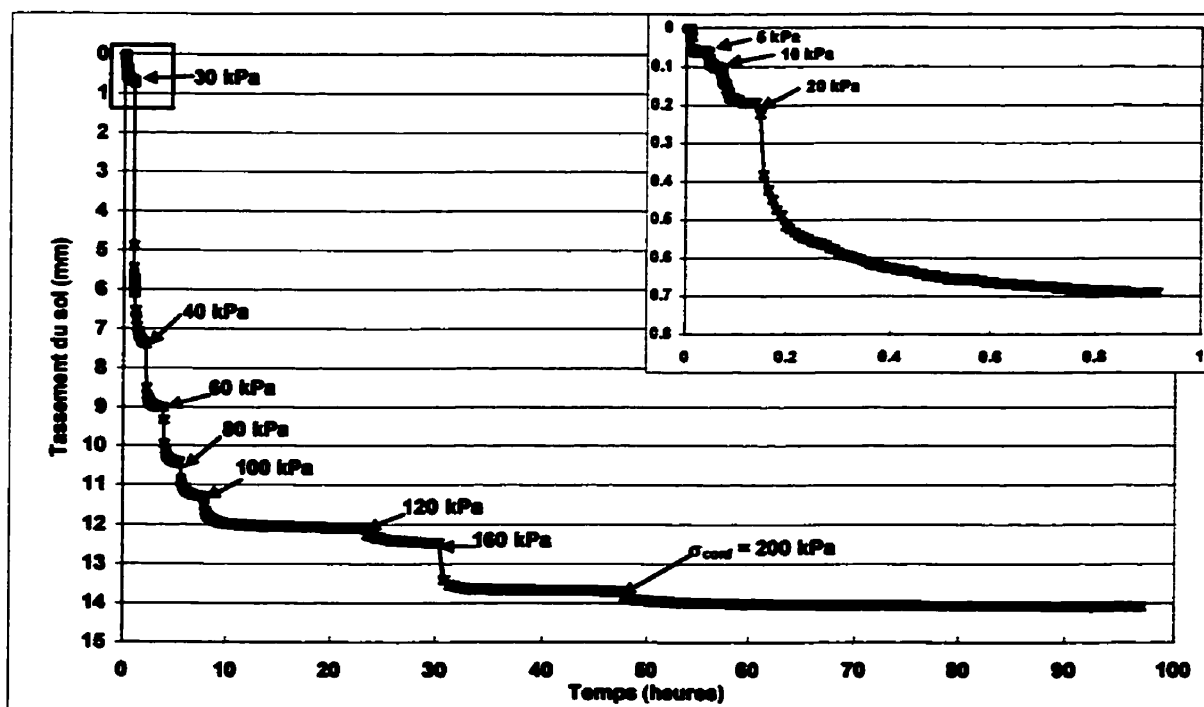


Figure B.15 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 15)

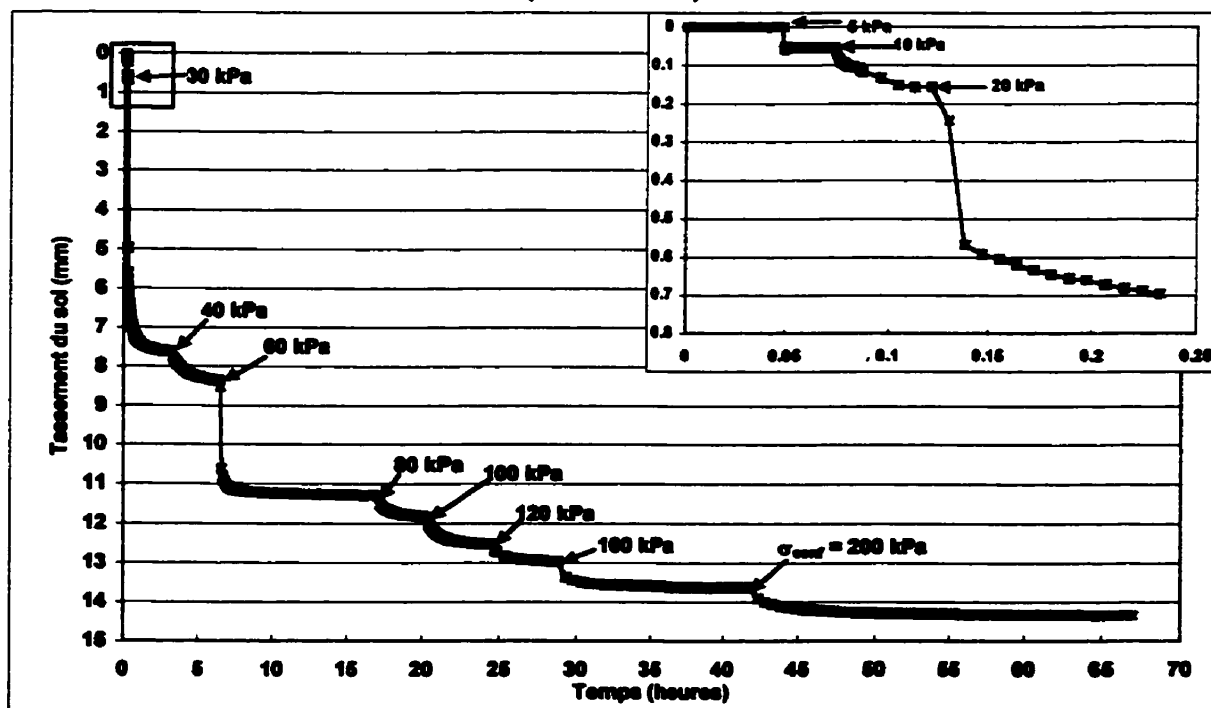


Figure B.16 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 16)

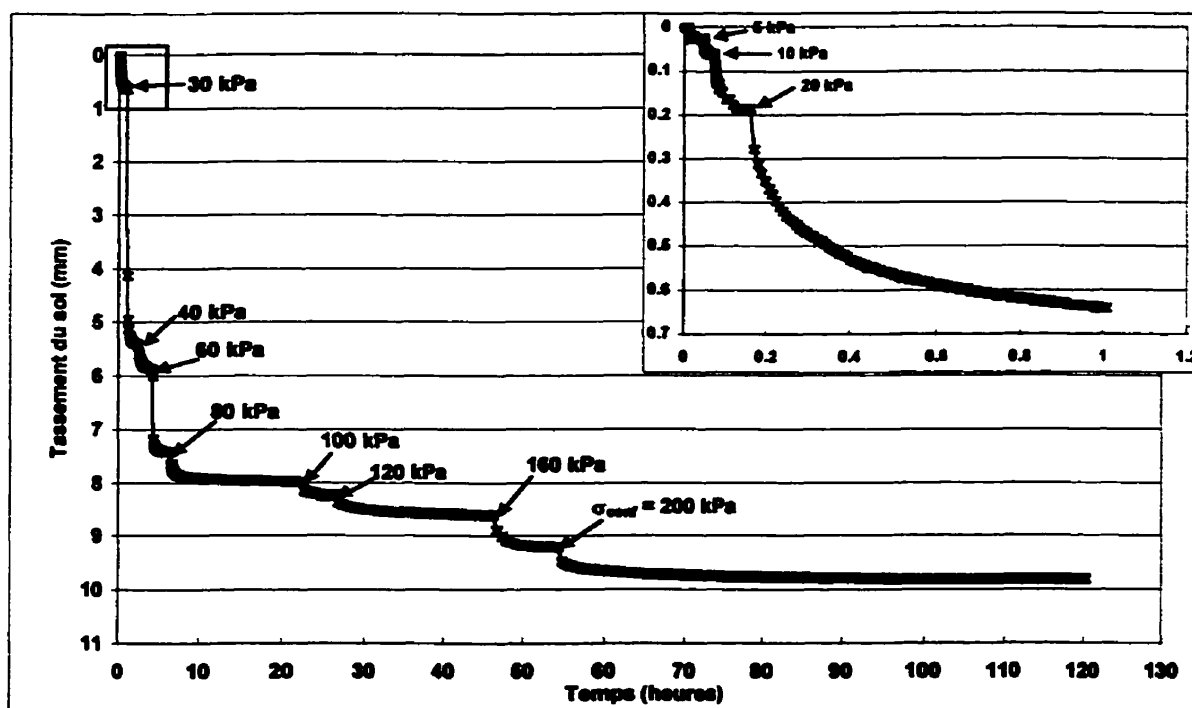


Figure B.17 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 17)

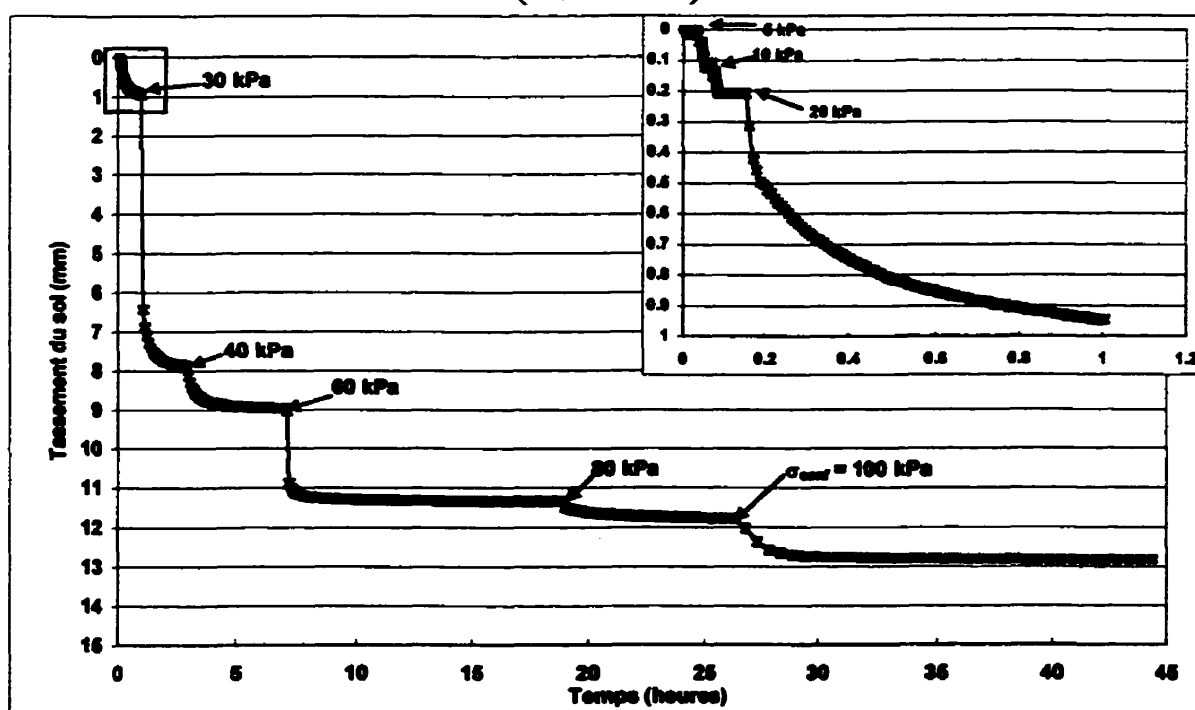


Figure B.18 Application d'une contrainte de confinement de 100 kPa en 8 étapes (essai no. 18)

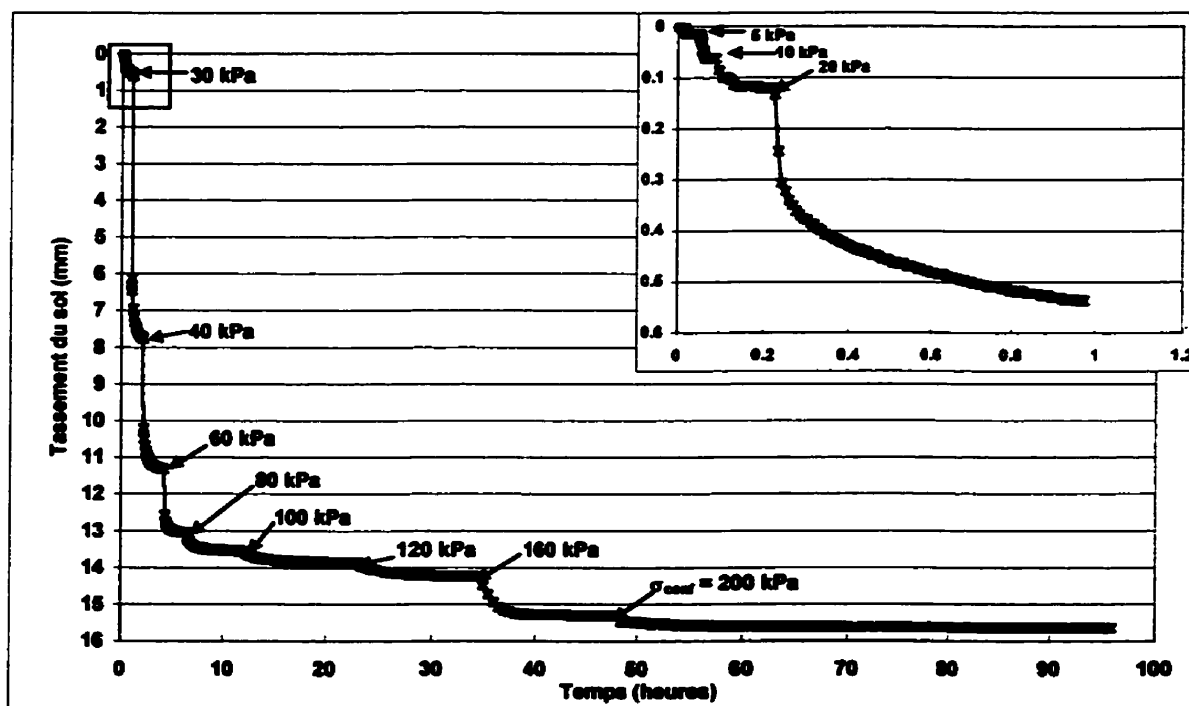


Figure B.19 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 19)

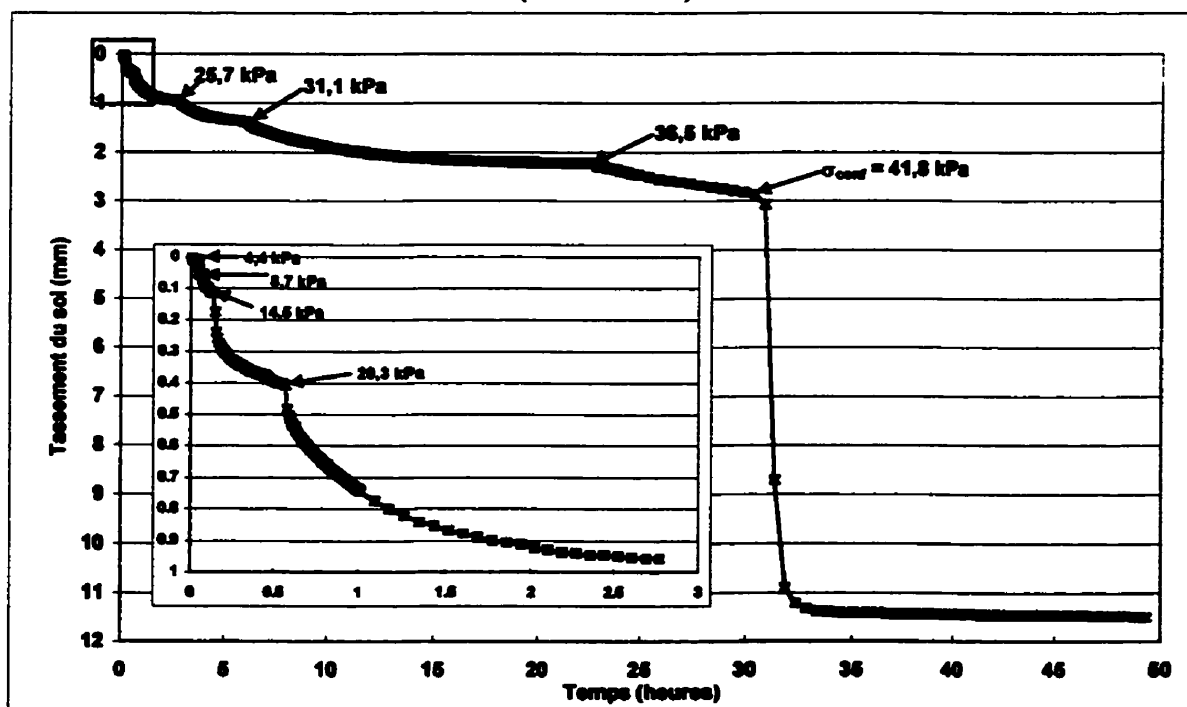


Figure B.20 Application d'une contrainte de confinement de 41,8 kPa en 8 étapes (essai no. 20)

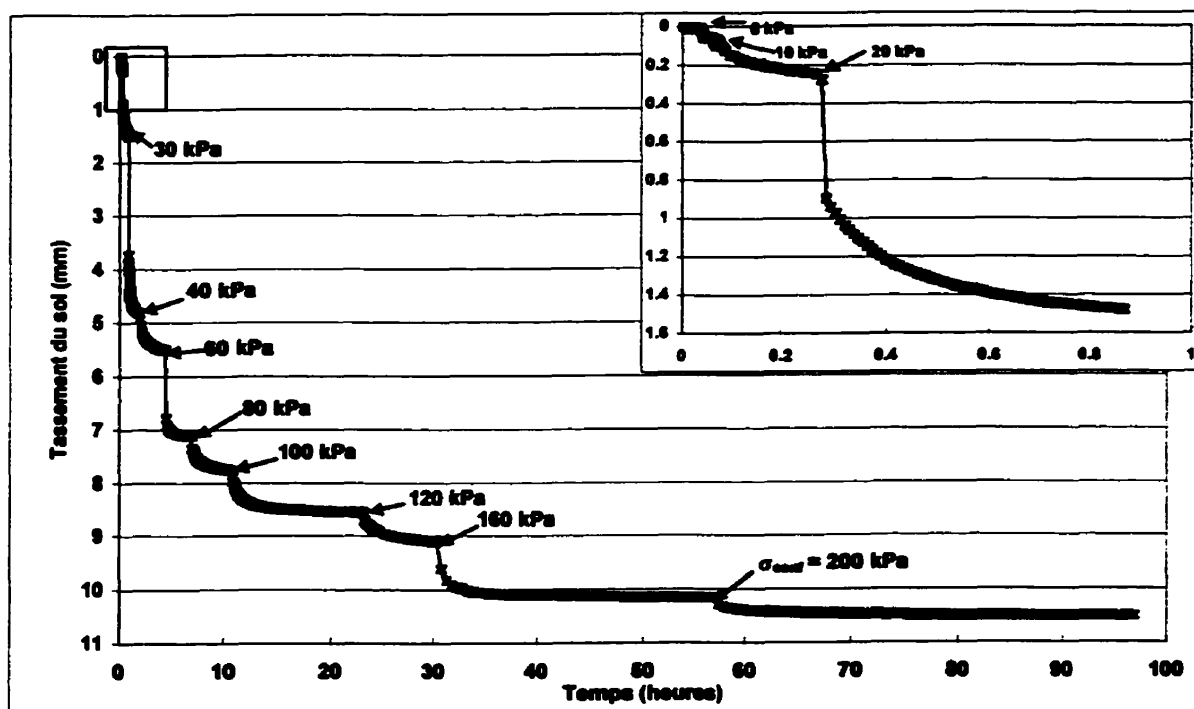


Figure B.21 Application d'une contrainte de confinement de 200 kPa en 11 étapes (essai no. 21)

ANNEXE C

**DESCRIPTION DU
COMPORTEMENT EN
FILTRATION DES SYSTÈMES
GÉOTEXTILE-SOL
ÉTUDIÉS**

C.1 Comportement du mélange de billes de verre (sol B)

Le comportement en filtration du sol B a été étudié à l'aide de trois géotextiles différents.

C.1.1 Géotextile BF60

Le comportement du sol B a d'abord été étudié en contact avec le géotextile BF60 sous des conditions d'écoulement unidirectionnel descendant et alterné (essai no. 1). Une contrainte de confinement de 50 kPa a été appliquée directement au sommet de l'échantillon de sol et l'interface géotextile-sol étudiée est située sous le sol (voir figure 3.3 a). Le tableau 4.5 montre que des valeurs de GR_{ASTM} supérieures à l'unité ont été mesurées. Ces résultats indiquent que des obstacles à l'écoulement sont présents à la surface du géotextile. Ce phénomène est également observable sur le graphique de la distribution de la charge hydraulique dans l'échantillon de sol (figure C.1). En effet, l'écoulement unidirectionnel descendant favorise la migration des particules fines de la zone supérieure du sol qui s'accumulent dans les zones centrale et inférieure. Ainsi, la perte de charge dans les zones adjacentes au géotextile est plus grande que celle que nous retrouvons dans la zone supérieure.

Les figures C.2 et C.3 permettent d'observer l'influence de l'écoulement alterné à l'interface géotextile-sol. En effet, l'augmentation du rapport des gradients ainsi que la diminution de la perméabilité de l'interface indiquent qu'un colmatage externe progressif du géotextile survient à de faibles gradients ($i = 1$) et à des gradients élevés ($i = 5$ et 10). Cependant, l'alternance d'un gradient égal à 2,5 tend à ouvrir les pores bouchés du géotextile, ce qui est mis en évidence au cours de l'écoulement unidirectionnel qui suit par les valeurs de GR_{ASTM} plus faibles et par la perméabilité de l'interface géotextile-sol semblable à celle du sol seul. Il faut également noter le colmatage externe observé ne semble pas important puisque la perméabilité du système

mesurée à tous les gradients hydrauliques demeure constante et que les valeurs mesurées du rapport des gradients ne sont que légèrement supérieures à l'unité.

De plus, la figure C.4 illustre le tassement du sol et la masse de sol passant le géotextile inférieur en fonction du temps. Cette figure ainsi que les résultats présentés au tableau 4.4 indiquent que le lessivage des particules survient principalement lors de la mise en place du sol et de l'application de la contrainte de confinement. En effet, une masse de sol de près de 994 g/m^2 est passée avant l'application du premier gradient hydraulique tandis qu'à la fin de l'essai, une masse cumulative de $1\,150 \text{ g/m}^2$ a été recueillie. Cette masse cumulative inférieure à la limite acceptable de $2\,500 \text{ g/m}^2$ proposée par Lafleur *et al.* (1989) et la constance de la perméabilité du système suggèrent que le géotextile BF60 initialise une structure avec pontage dans le sol B pour les conditions étudiées. Cependant, la formation d'un canal au cours de l'écoulement alterné à un gradient hydraulique égal à 10 montre qu'une contrainte de confinement de 50 kPa n'est probablement pas suffisante pour assurer la rétention du sol B par le géotextile BF60 sous des conditions d'alternance de gradients hydrauliques élevés.

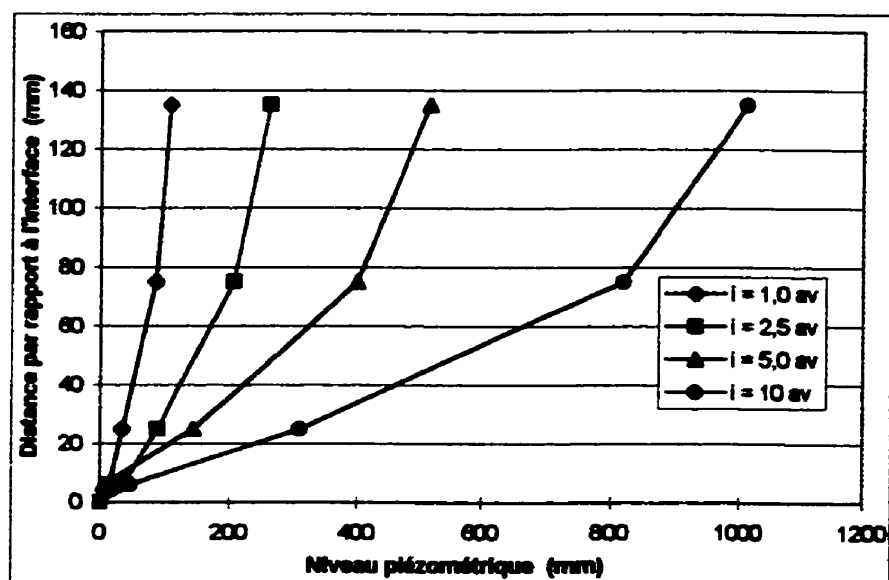


Figure C.1 Distribution des pressions dans le sol B pour le système BF60-B-D (essai 1)

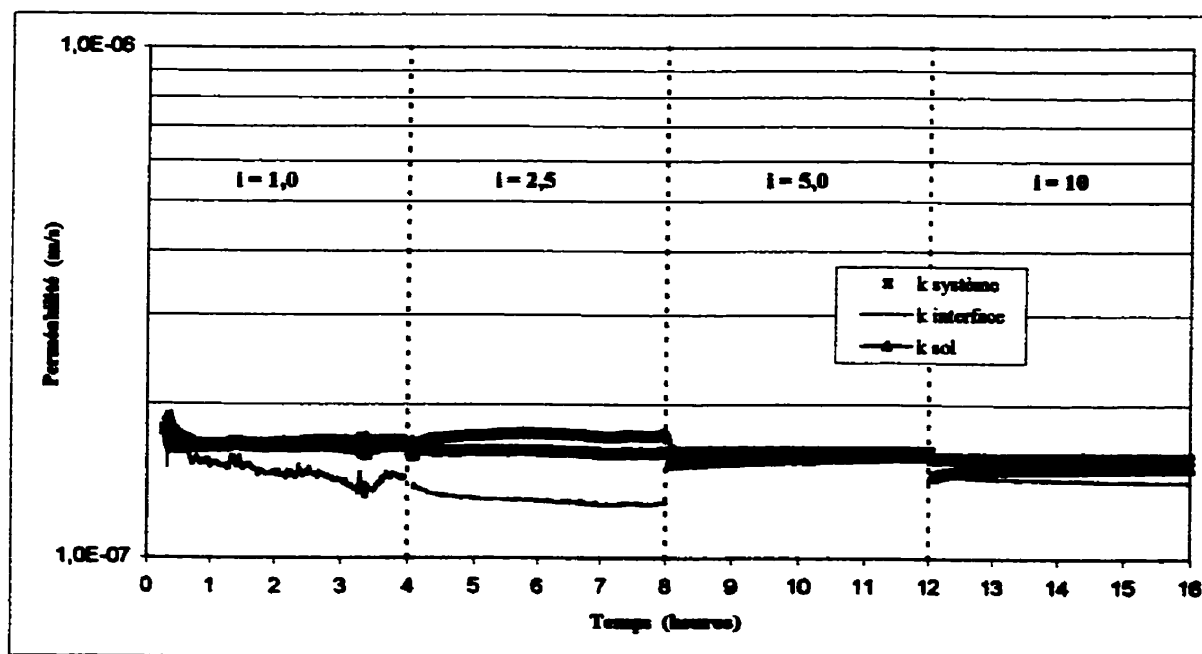


Figure C.2 Perméabilités en fonction du temps pour le système BF60-B-D (essai 1)

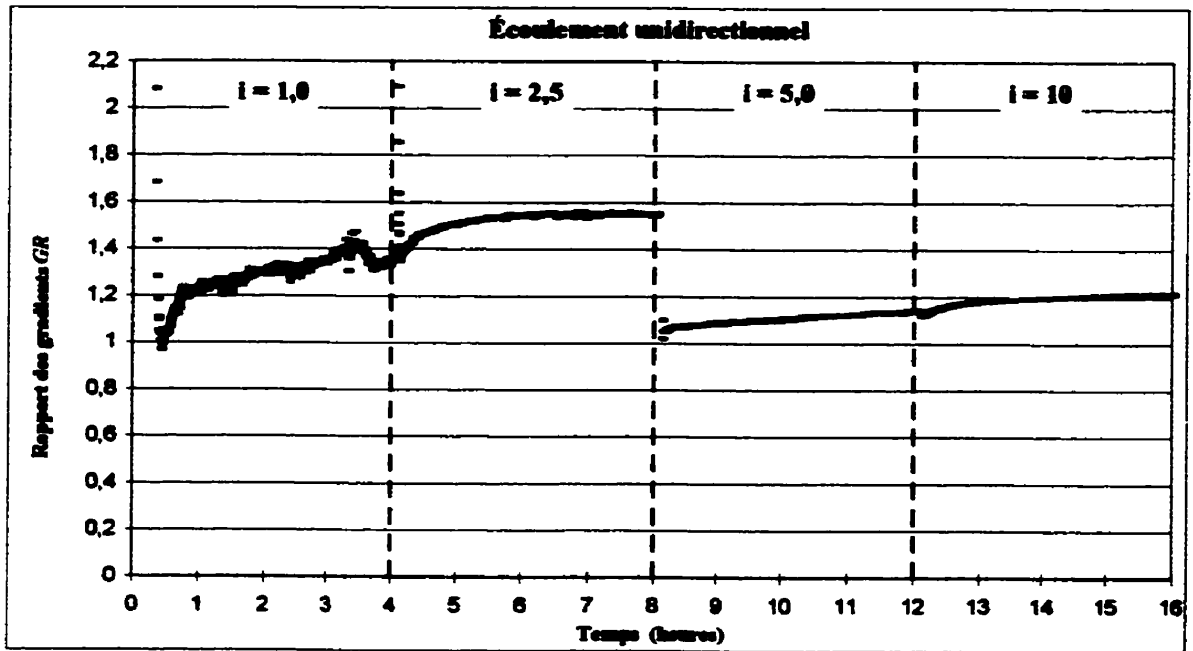


Figure C.3 Évolution du rapport des gradients pour le système BF60-B-D (essai 1)

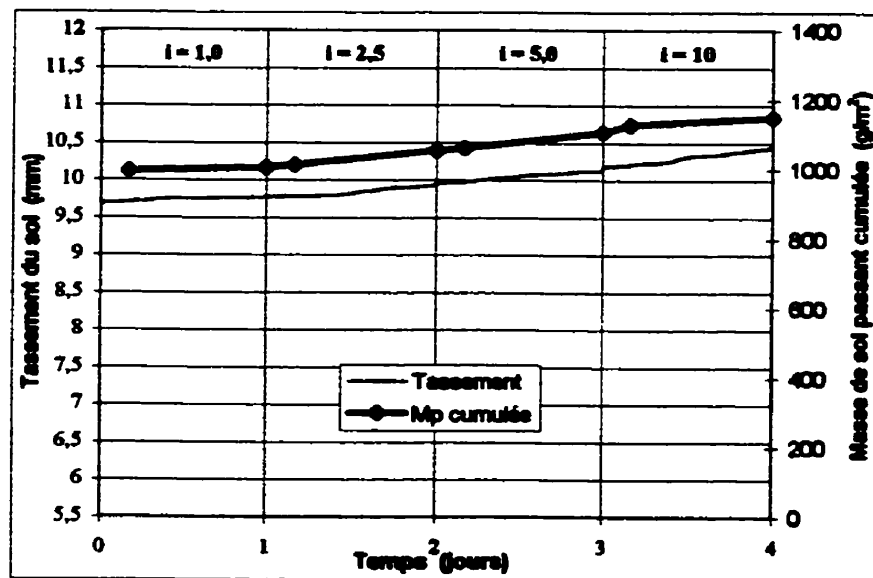


Figure C.4 Masse de sol passant et tassement en fonction du temps pour le système BF60-B-D (essai 1)

La rétention du sol B par le géotextile BF60 a également été analysée en conditions d'écoulement unidirectionnel ascendant et alterné (essais no. 2 à 4). Une contrainte de confinement initiale de 25,7 kPa a été appliquée sur la cellule et transmise au sol à son interface inférieure avec le diffuseur B1. L'interface de mesure est située au-dessus du sol (voir figure 3.3 b). Pour l'essai 2, nous avons mentionné au tableau 4.2 que des cavités se sont formées dans le sol à l'entrée des tubes reliant les capteurs. Ces vides ont diminué les pressions mesurées dans le sol et faussé les perméabilités locales et les rapports des gradients mesurés au cours de cet essai. Par conséquent, nous n'analyserons que les résultats des essais no. 3 et 4. Le tableau 4.4 indique que le sol B n'est pas retenu par le géotextile BF60. Le lessivage du sol est initié par la formation de canaux le long des parois de la cellule qui résulte d'une contrainte de confinement insuffisante. La figure C.5 montre que ce lessivage d'une quantité inacceptable de particules survient généralement au cours de l'écoulement alterné à des gradients hydrauliques élevés ($i = 5$ et $7,5$) et que la courbe du tassement en fonction du temps présente une croissance soudaine et marquée.

Les figures C.6 a et b ne mettent pas en évidence la présence d'un colmatage de la surface du géotextile pour les gradients précédant la rupture. En effet, la perméabilité du système est égale ou légèrement inférieure à celle du sol tandis que l'interface est un peu moins perméable. Il y a donc une accumulation de particules à l'interface géotextile-sol supérieure comme l'indique les rapports GR_{ASTM} supérieurs à l'unité mesurés au cours des écoulements unidirectionnels (figure C.7). Cependant, la perméabilité du système varie peu au cours des essais, ce qui laisse supposer que les particules accumulées à l'interface n'entravent pas ou peu l'écoulement de l'eau à travers le système. De plus, les figures C.6 a et C.7 montrent que l'alternance d'un gradient hydraulique égal à 2,5 provoque un lessivage des particules fines de la zone inférieure du sol vers la zone supérieure et ces particules s'accumulent à l'interface. Cela se traduit par une augmentation de la perméabilité du sol ainsi que du rapport des gradients. Ce colmatage, observé seulement à l'essai no. 3, disparaît lors de

l'écoulement alterné à un gradient de 5 puisque la perméabilité de l'interface est par la suite supérieure à celle du sol et que le rapport des gradients diminue à une valeur inférieure à l'unité.

Finalement, la distribution des pressions dans le sol pour les gradients précédant la rupture est illustrée aux figures C.8 a et b pour les essais no. 3 et 4 respectivement. Contrairement à la distribution obtenue lors de l'écoulement unidirectionnel descendant (essai no. 1), la distribution des pressions mesurées pour l'écoulement ascendant n'indique pas de zones moins perméables à l'interface. Elle est plutôt linéaire dans tout l'échantillon de sol et les pressions sont semblables au cours de l'écoulement unidirectionnel qui précède et suit l'écoulement alterné. Donc, pour les conditions de confinement étudiées, le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol B lorsque ce système est soumis à des gradients hydrauliques faibles ($i = 1$ et $2,5$).

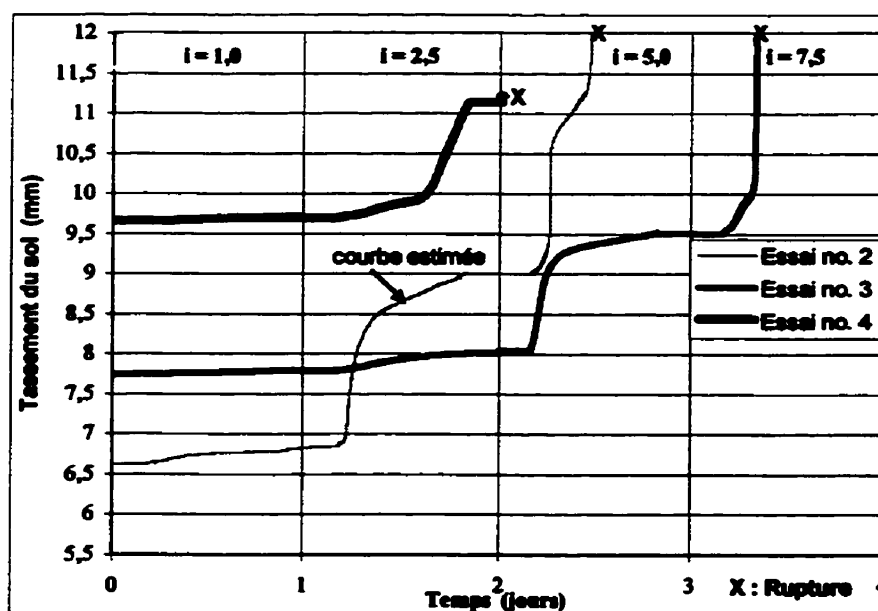
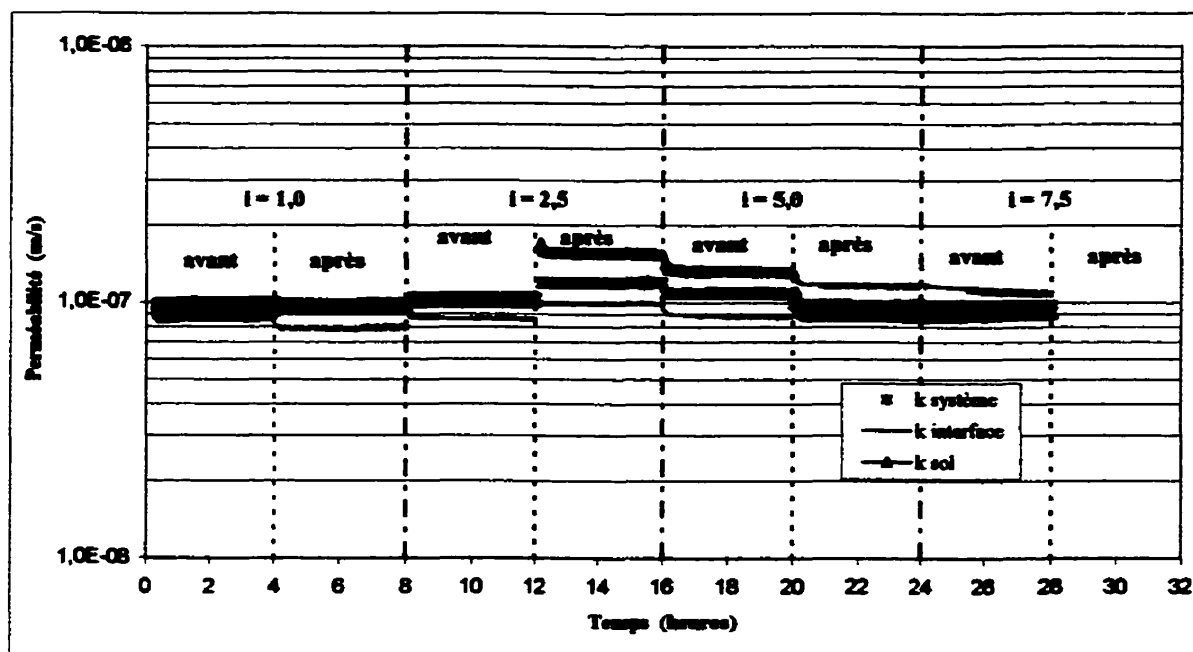
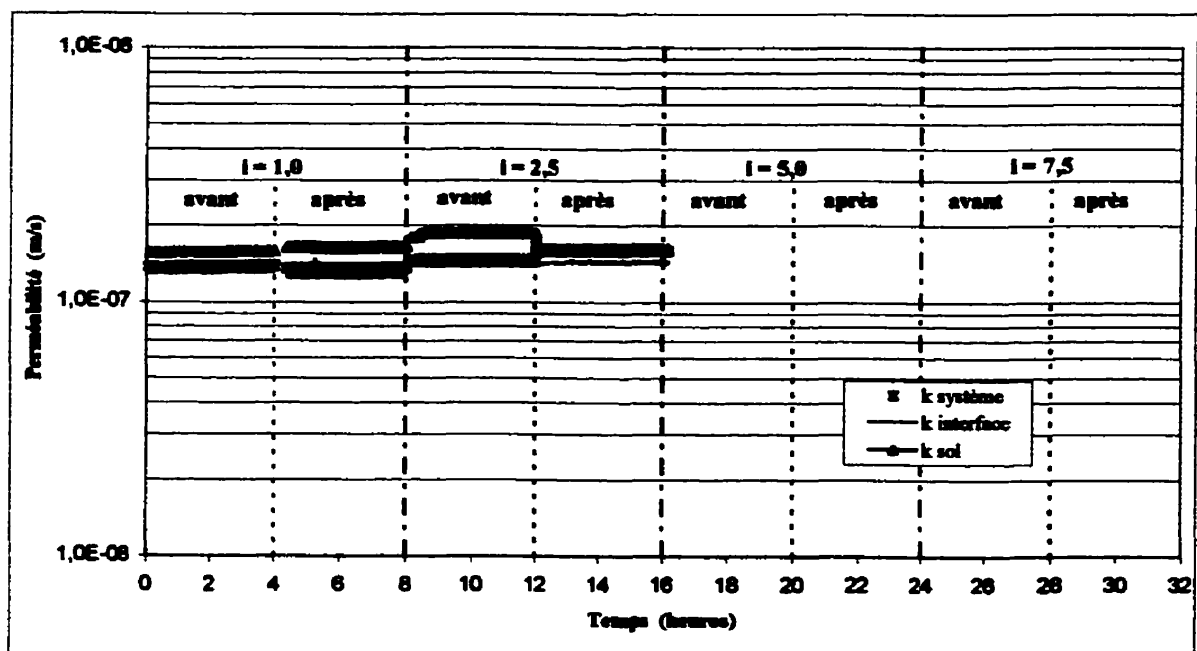


Figure C.5 Tassement du sol B en fonction du temps pour le système BF60-B (essais 2 à 4)



a) Système BF60-B (essai no. 3)



b) Système BF60-B (essai no. 4)

Figure C.6 Perméabilités en fonction du temps pour le système BF60-B

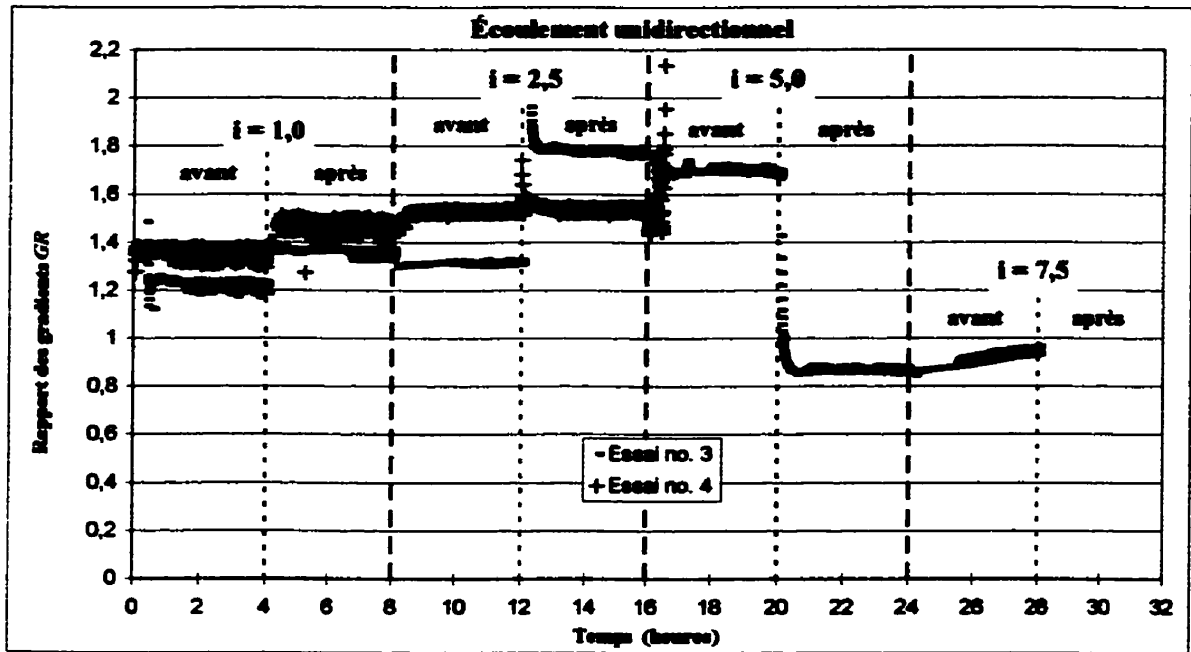


Figure C.7 Évolution du rapport des gradients pour le système BF60-B (essais 3 et 4)

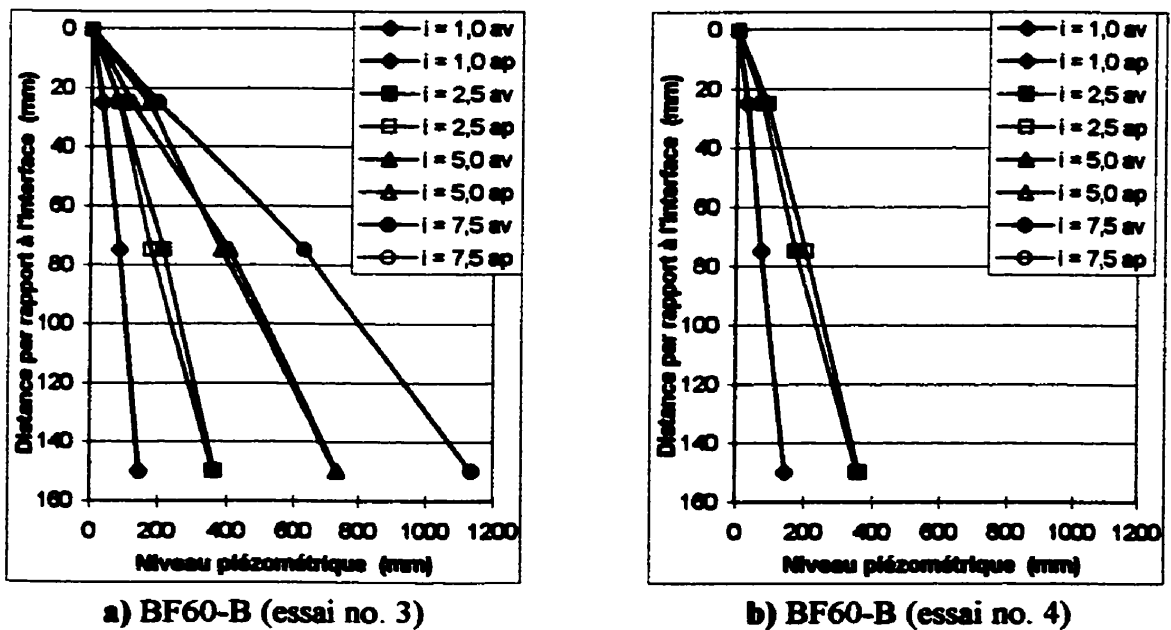


Figure C.8 Distribution des pressions dans le sol B pour le système BF60-B

C.1.2 Géotextile NTT

Le sol B est retenu correctement par le géotextile NTT sous une contrainte de confinement variant entre 42 et 80 kPa. Les conditions d'écoulement alterné et unidirectionnel ascendant imposées au système ont entraîné une masse totale de sol passant (inférieure et supérieure) acceptable, soit 456 g/m^2 . La figure C.9 présente le tassement subit par le sol B au cours de cet essai. Le tassement initial de 7,46 mm constitue plus de 80% du tassement total de 9,29 mm. De plus, un gradient hydraulique alterné égal à 5 semble induire un plus grand remaniement de la structure du sol et/ou un lessivage de particules puisque 68% du tassement subit par le sol au cours des différents écoulements se produit à ce gradient.

Les figures C.10 et C.11 indiquent d'abord que l'alternance d'un gradient hydraulique égal à l'unité provoque une accumulation de particules à l'interface géotextile-sol. La perméabilité de l'interface est semblable à celle du sol avant l'écoulement alterné à ce gradient tandis qu'elle en est inférieure après. Cela se traduit également par une augmentation du rapport des gradients entre les valeurs mesurées avant et après l'écoulement alterné (figure C.11). L'alternance d'un gradient de 2,5 occasionne plutôt le phénomène inverse en établissant une zone plus perméable à l'interface, comme l'indique les rapports des gradients inférieurs à l'unité. Pour les gradients subséquents, la perméabilité de l'interface demeure plus grande que celle du sol (figure C.10). De plus, les perméabilités du sol et du système demeurent relativement constantes entre 1 et $2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ tout au long de l'essai.

Au début de l'écoulement unidirectionnel qui suit l'écoulement alterné à des gradients plus élevés que 5, il faut noter une diminution rapide du rapport des gradients et de la perméabilité du sol jusqu'à l'obtention de valeurs constantes. À la fin de l'écoulement alterné, les pressions mesurées à 25 et 75 mm du géotextile sont semblables. À 75 mm

du géotextile, cette position se situe au centre de l'échantillon de sol et elle est la plus éloignée des extrémités. Les effets de l'écoulement prennent plus de temps avant que le capteur situé à 75 mm du géotextile ne les détecte. C'est donc l'augmentation graduelle de la pression mesurée à cet endroit qui est responsable de cette diminution du rapport des gradients au début de l'écoulement unidirectionnel à des gradients supérieurs à 5 (figure C.11).

Quant à la distribution des pressions (figure C.12), elle présente une zone plus perméable à l'interface et elle est linéaire dans le reste du sol. Il y a peu de différence entre la distribution de la perte de charge dans l'échantillon avant et après l'application de gradients alternés. Finalement, la faible quantité de particules passant les géotextiles et la constance de la perméabilité du système au cours de l'essai suggèrent que le géotextile NTT initie une structure avec pontage dans le sol B sous une contrainte de confinement variant entre 42 et 80 kPa.

C.1.3 Géotextile BSF8

La rétention du sol B a également été étudiée en contact avec le géotextile BSF8 (essai no. 6). Pour chacun des gradients, la contrainte de confinement qui a été utilisée lors de l'essai 5 a été appliquée sur le système BSF8-B. Contrairement au géotextile NTT, le géotextile BSF8 ne retient pas le sol B dans ces mêmes conditions de confinement. La figure C.9 montre que ce lessivage d'une quantité inacceptable de particules survient au cours de l'écoulement alterné à des gradients hydrauliques élevés ($i = 5$) et que la courbe du tassement en fonction du temps présente une croissance soudaine.

La figure C.13 a ne met pas en évidence la présence d'un colmatage de la surface du géotextile pour les gradients précédant la rupture. En effet, la perméabilité du système est égale ou légèrement supérieure à celle du sol et ces perméabilités sont

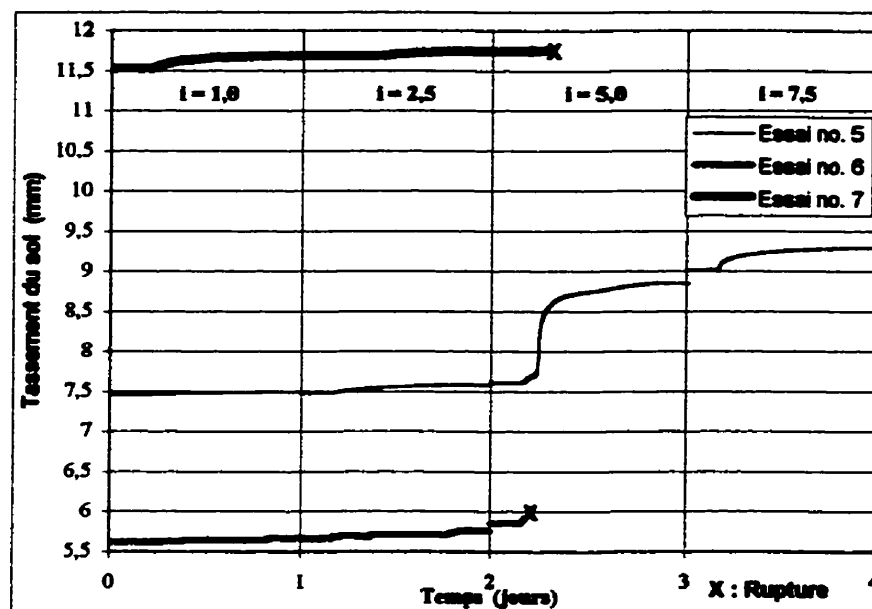


Figure C.9 Tassement du sol B en fonction du temps pour les systèmes NTT-B (essai 5), BSF8-B (essai 6) et BSF8-O (essai 7)

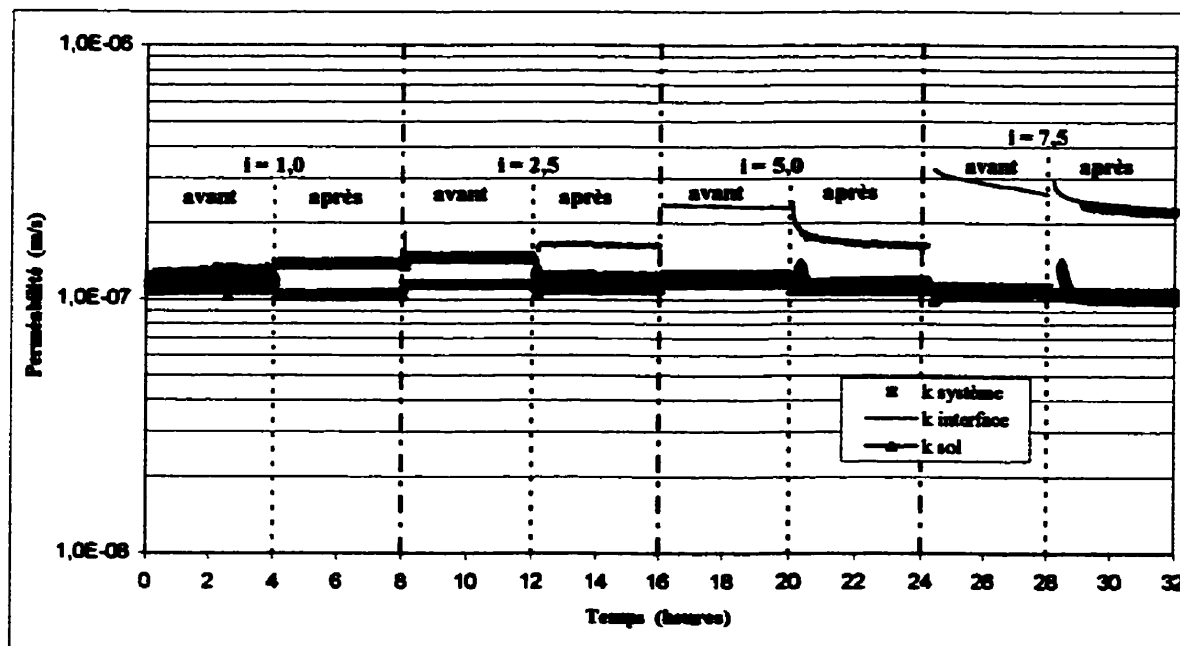


Figure C.10 Perméabilités en fonction du temps pour le système NTT-B (essai no. 5)

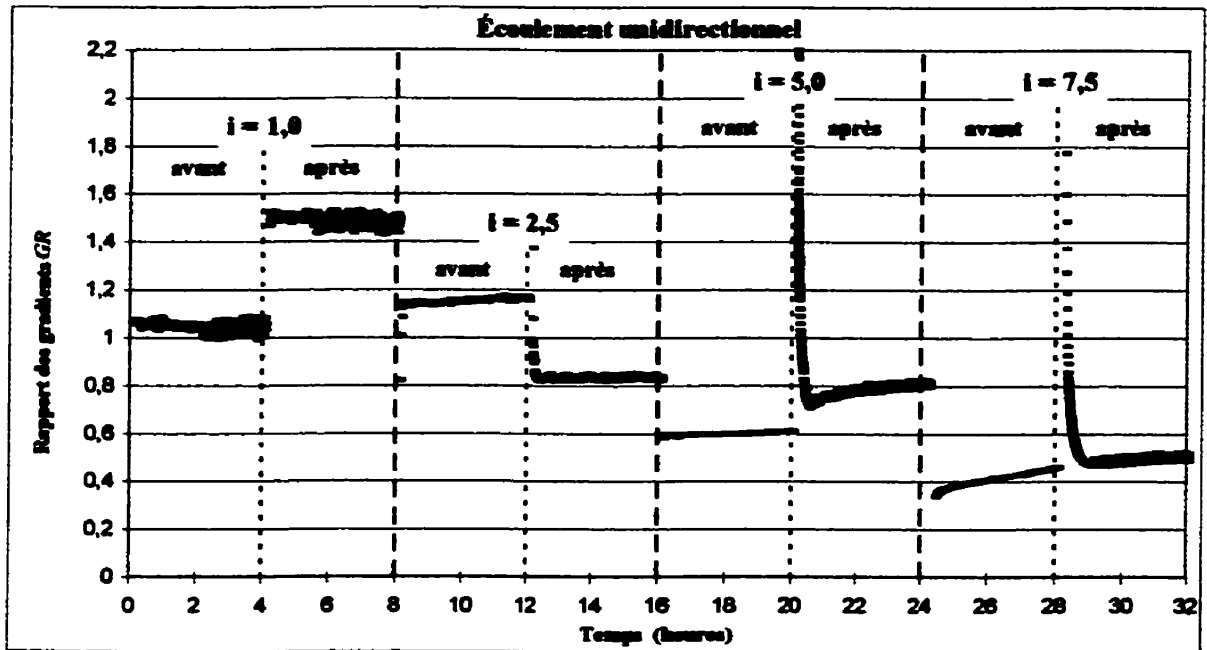


Figure C.11 Évolution du rapport des gradients pour le système NTT-B (essai no. 5)

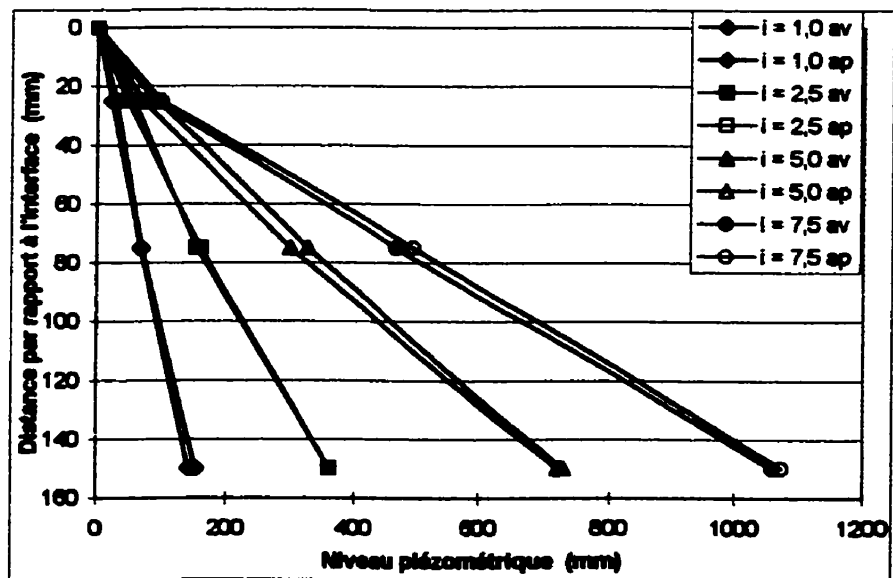


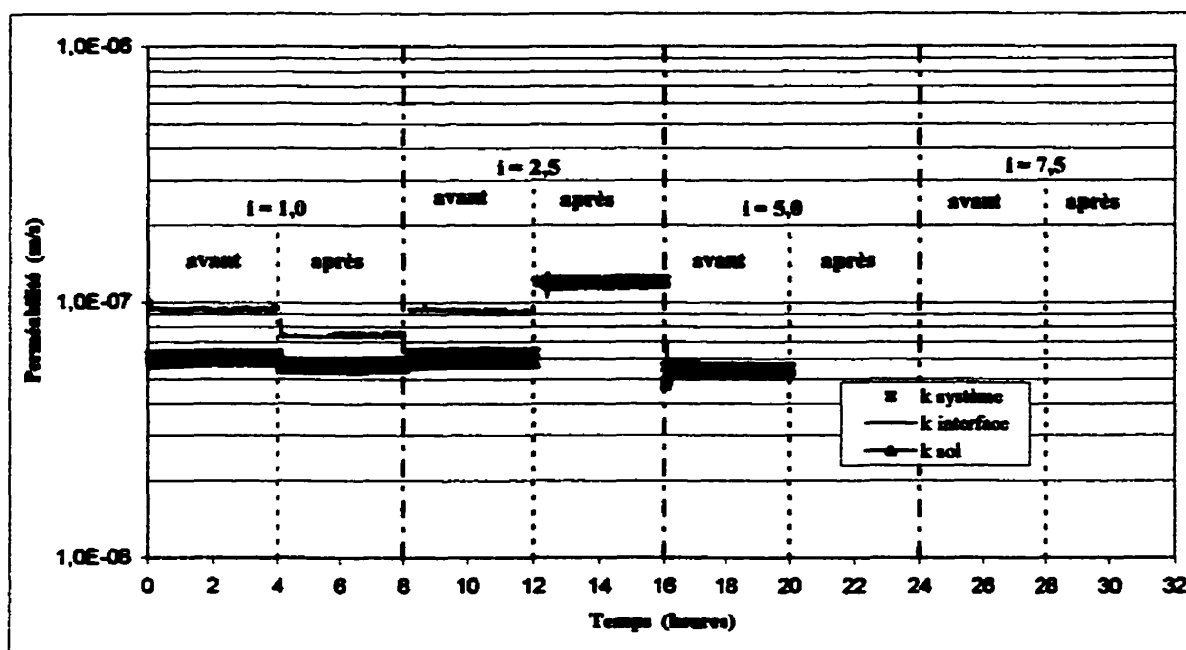
Figure C.12 Distribution des pressions dans le sol B pour le système NTT-B

constantes au cours de l'essai entre 5 et 7×10^{-8} m/s à l'exception des mesures prises à la suite de l'écoulement alterné à un gradient égal à 2,5. Une cavité s'est formée près de l'entrée du capteur 25 mm bis à la suite de cet écoulement alterné mais elle n'a été visible qu'au gradient suivant. Cette cavité a engendré un débit traversant le système deux fois plus grand au cours de l'écoulement unidirectionnel suivant l'écoulement alterné et fausse par conséquent les mesures subséquentes de perméabilité. Avant l'application d'un gradient alterné égal à 2,5, il y a formation d'une zone plus perméable à l'interface, comme l'indique les rapports GR_{ASTM} légèrement inférieurs à l'unité (figure C.14) et la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol (figure C.13 a). Par la suite, l'alternance d'un gradient hydraulique égal à 2,5 provoque une certaine accumulation de particules à l'interface géotextile-sol supérieure, comme l'indique les valeurs du rapport des gradients supérieures à l'unité.

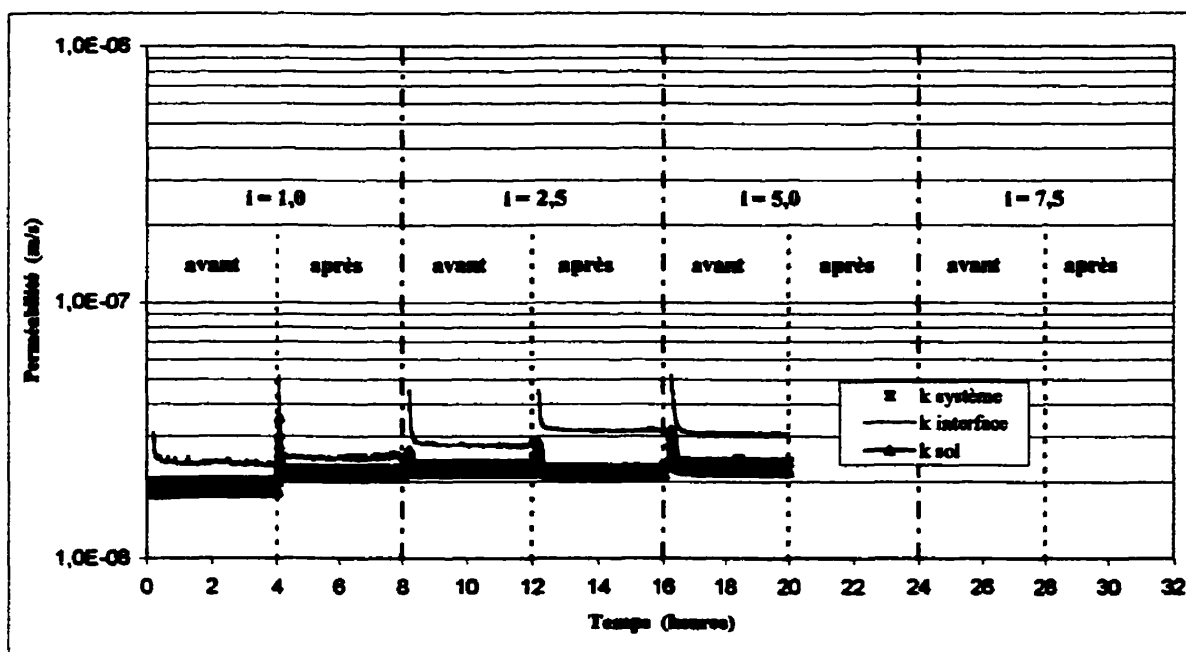
Finalement, la distribution des pressions dans le sol pour les gradients précédants la rupture est illustrée à la figure C.15 a. Elle est plutôt linéaire dans tout l'échantillon de sol et les pressions sont semblables au cours de l'écoulement unidirectionnel qui précède et suit l'écoulement alterné. Donc, pour les conditions de confinement étudiées, le géotextile BSF8 initie une structure avec pontage dans le sol B lorsque ce système est soumis à des gradients hydrauliques faibles ($i = 1$ et 2,5).

C.2 Comportement du mélange original de farine de pierres concassées (sol O)

Le comportement en filtration du sol O a été étudié à l'aide du géotextile BSF8 au cours de l'essai no. 7. Le sol O, qui est plus argileux que le sol B, n'a pas été retenu par le géotextile BSF8 sous une contrainte de confinement variant entre 53 et 63 kPa. La figure C.9 montre que ce lessivage d'une quantité inacceptable de particules survient également au cours de l'écoulement alterné à des gradients hydrauliques élevés ($i = 5$).



a) Système BSF8-B (essai no. 6)



b) Système BSF8-O (essai no. 7)

Figure C.13 Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes BSF8-B et BSF8-O

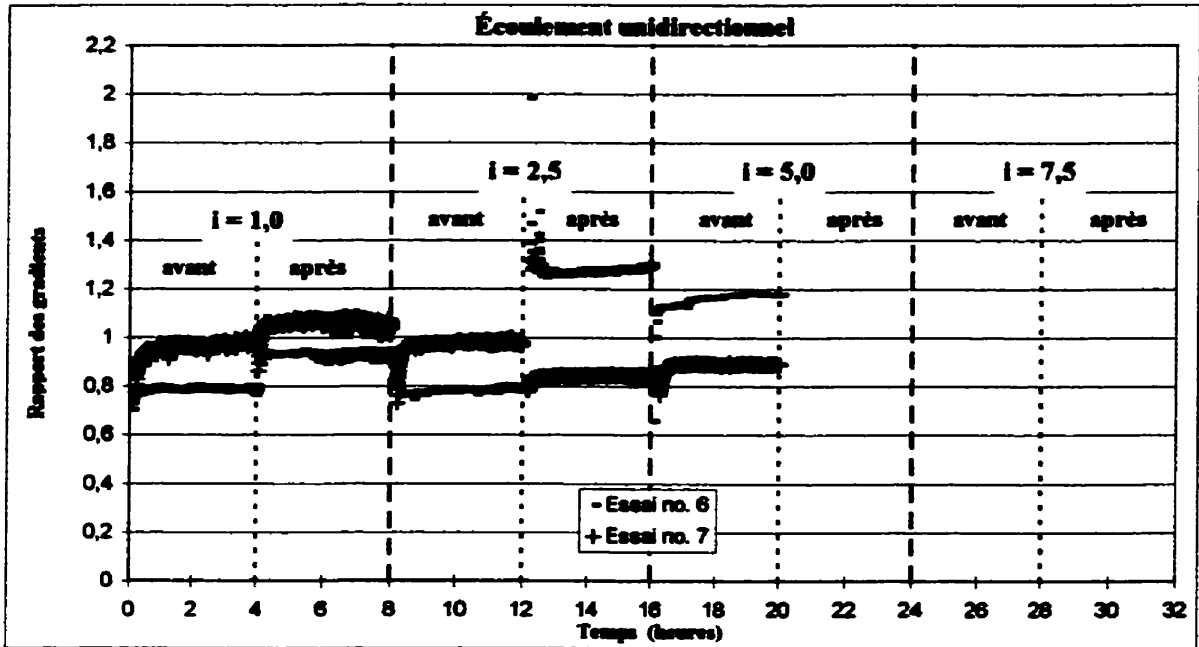


Figure C.14 Évolution du rapport des gradients pour les systèmes BSF8-B (essai 6) et BSF8-O (essai 7)

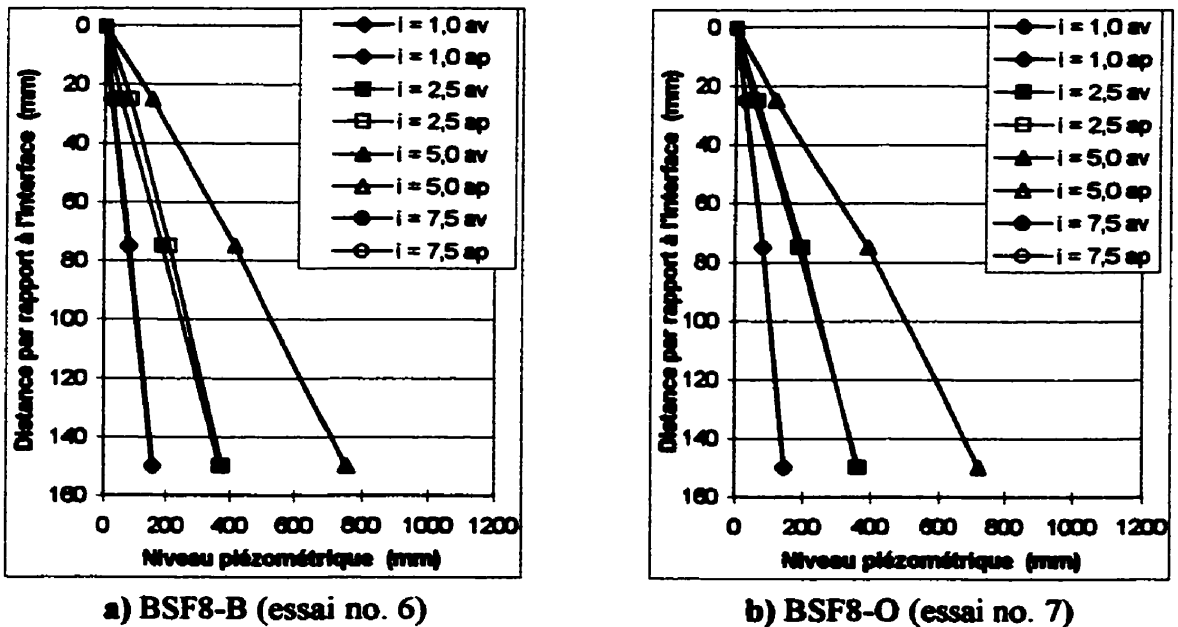


Figure C.15 Distribution des pressions dans les sols B (essai no. 6) et O (essai no. 7)

En comparant les figures C.13 a et b, nous pouvons remarquer que la perméabilité du sol O plus argileux est près d'un ordre de grandeur inférieur à celle du sol B et qu'elle se situe autour de 2×10^{-8} m/s. Les perméabilités locales présentées à la figure C.13 b ne montrent pas de colmatage de la surface du géotextile BSF8 par les particules du sol O. La perméabilité du système est égale ou légèrement supérieure à celle du sol et ces perméabilités sont constantes au cours de l'essai. La perméabilité de l'interface est supérieure à celle du sol pour tous les gradients imposés au système. De plus, les valeurs du rapport des gradients varient peu en fonction du gradient hydraulique et l'écoulement alterné ne provoque pas de changement marqué entre les rapports GR_{ASTM} mesurés au cours des écoulements unidirectionnels à un même gradient (figure C.14). Ces valeurs sont généralement inférieures à l'unité à l'exemption de celles mesurées au cours de l'écoulement unidirectionnel qui suit l'application d'un gradient alterné égal à 1, où elles sont légèrement supérieures à un.

Finalement, la distribution des pressions dans le sol O pour les gradients précédant la rupture est illustrée à la figure C.15 b. Cette distribution est semblable à celle que nous avons mesurée dans le sol B en contact avec le même géotextile, soit le BSF8. Elle est plutôt linéaire dans tout l'échantillon de sol. De plus, il y a peu de différence entre les pressions mesurées avant et après l'application de gradients alternés. Donc, pour les conditions de confinement étudiées, le géotextile BSF8 initie une structure avec pontage dans le sol O lorsque ce système est soumis à des gradients hydrauliques faibles ($i = 1$ et $2,5$).

C.3 Comportement du mélange lavé de farine de pierres concassées (sol F)

Le comportement en filtration du sol F a été étudié en contact avec trois géotextiles différents et sous diverses conditions de confinement.

C.3.1 Géotextile BF60

Le comportement du sol F a d'abord été étudié en contact avec le géotextile BF60 sous une contrainte de confinement variant entre 58 et 101 kPa. Le tableau 4.4 indique que le sol F n'est pas retenu par le géotextile BF60 puisque la contrainte de confinement s'est avérée insuffisante pour empêcher l'écoulement préférentiel le long des parois de la cellule. La figure C.16 montre que ce lessivage d'une quantité inacceptable de particules survient au cours de l'écoulement alterné à un gradient hydraulique égal à 2,5 pour l'essai no. 8 au cours duquel une contrainte de confinement de 58 kPa est imposée. Pour l'essai no. 9, c'est une contrainte de 101 kPa qui n'a pas empêché la formation de canaux sous un gradient alterné égal à 7,5.

Sous de faibles contraintes de confinement, le géotextile BF60 ne provoque pas une accumulation de particules à sa surface pour les gradients précédents la rupture. Les figures C.17 a et b indiquent plutôt qu'il y a formation d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol au cours des essais no. 8 et 9. La perméabilité du système est constante au cours de ces deux essais. Cependant, elle est légèrement supérieure ou égale à celle du sol pendant l'essai no.8 tandis que le système BF60-F est moins perméable que le sol F au cours de l'essai no. 9. De plus, les figures C.17 a et C.18 nous permettent de constater que la perméabilité de l'interface diminue et que le rapport des gradients augmente entre les différents paliers d'écoulement unidirectionnel au cours de l'essai no. 8. Ce phénomène n'est pas observé à l'essai no. 9 (figures C.17 b et C.18). L'alternance d'un gradient hydraulique égal à un provoque plutôt un lessivage des particules fines dans la zone adjacente au géotextile. Les gradients subséquents imposés au système ne semblent pas induire de réarrangement des particules. En effet, la perméabilité de l'interface et les valeurs de GR_{ASTM} ne présentent pas de changement marqué lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient.

Finalement, la distribution des pressions dans le sol pour les gradients précédant la rupture est illustrée aux figures C.19 a et b pour les essais no. 8 et 9 respectivement. Elle est linéaire dans tout l'échantillon de sol au cours de l'essai no. 8 mais présente plutôt une zone plus perméable à l'interface pendant l'essai no. 9. Dans les deux cas, les pressions sont semblables au cours de l'écoulement unidirectionnel qui précède et suit l'écoulement alterné. Donc, pour les conditions de confinement étudiées et pour les gradients précédant la rupture, le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol F. Ces essais révèlent que la contrainte de confinement et l'intensité du gradient hydraulique alterné influencent d'une façon importante la stabilité du sol F.

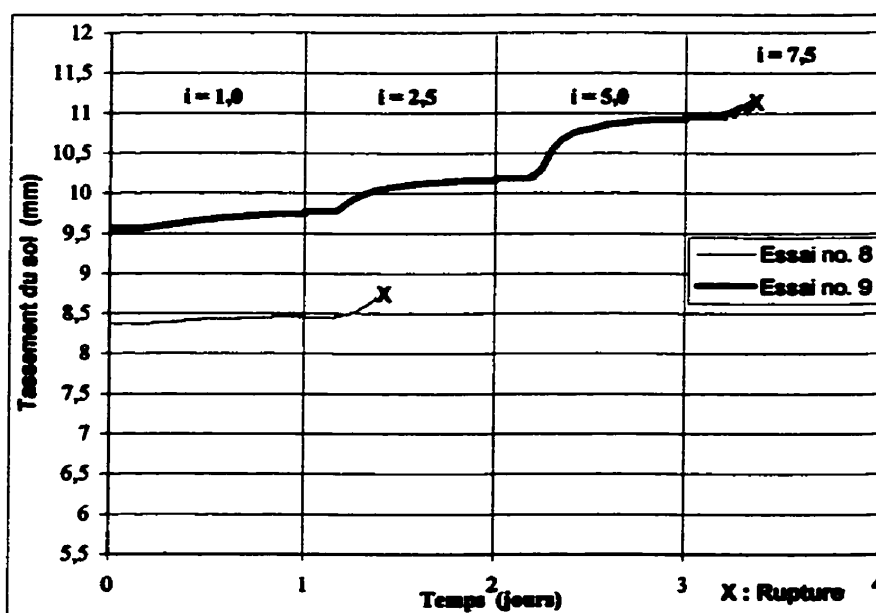
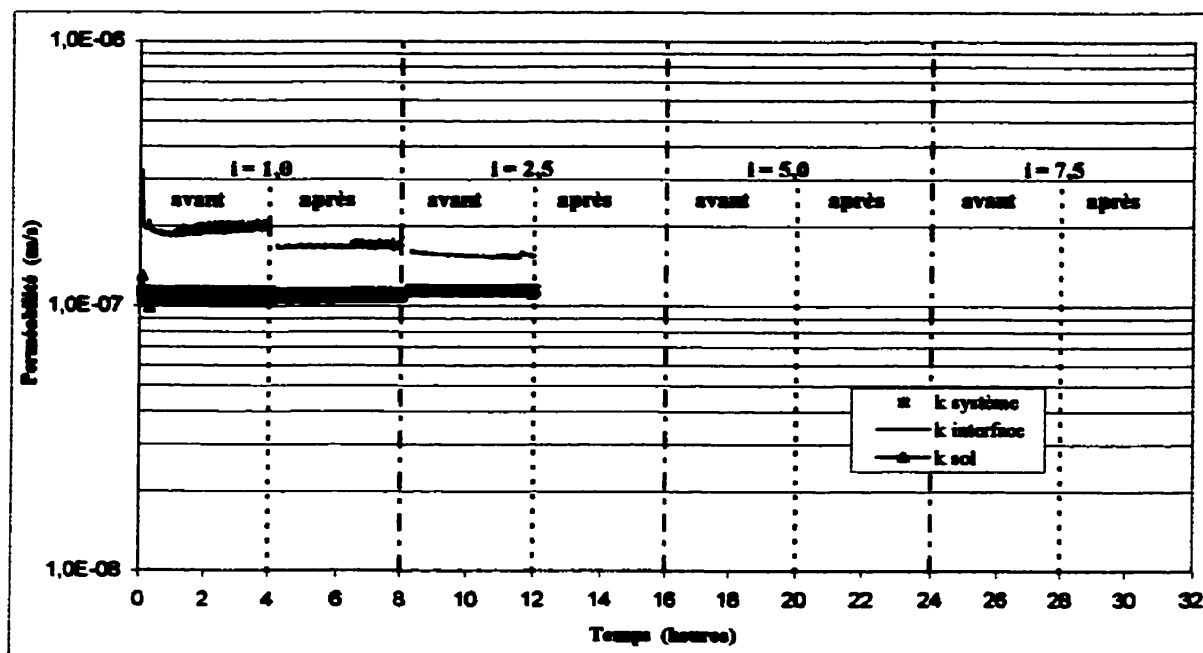
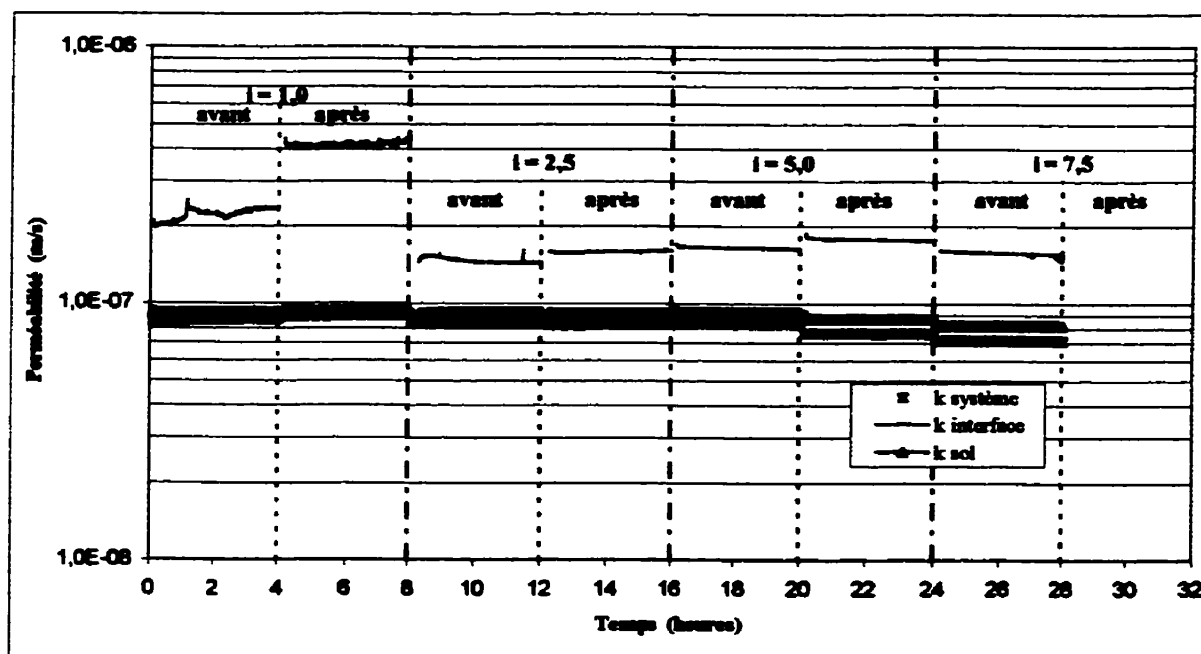


Figure C.16 Tassement du sol F en fonction du temps pour le système BF60-F (essais 8 et 9)



a) Système BF60-F (essai no. 8)



b) Système BF60-F (essai no. 9)

Figure C.17 Perméabilités en fonction du temps pour le système BF60-F (essais 8 et 9)

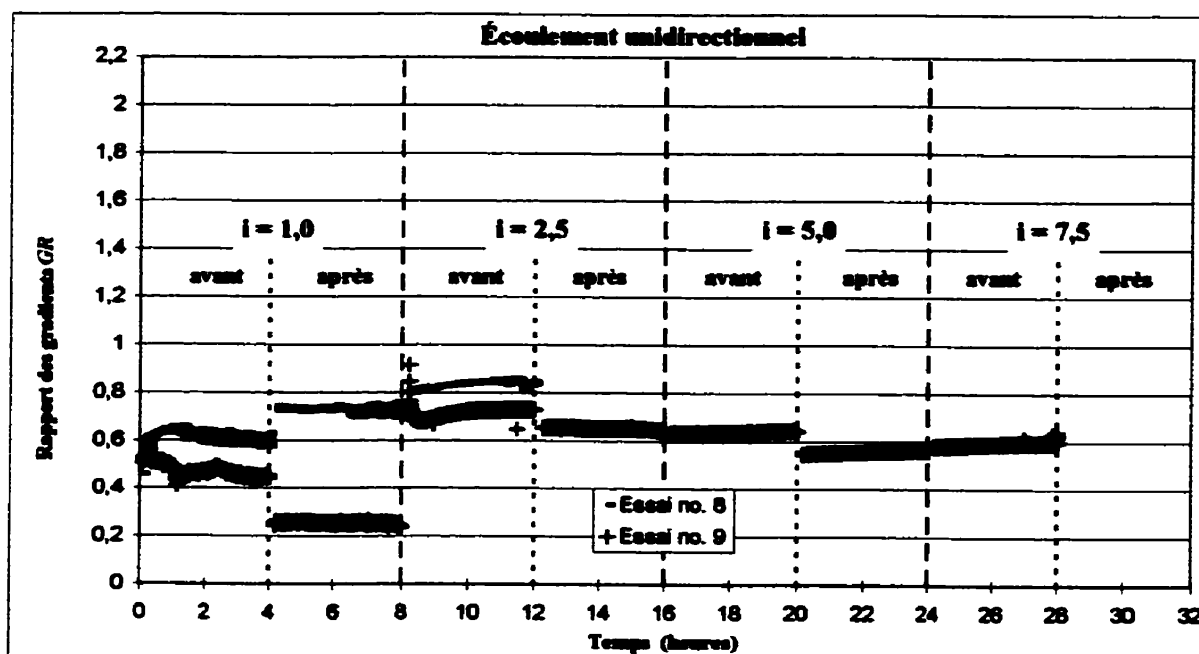
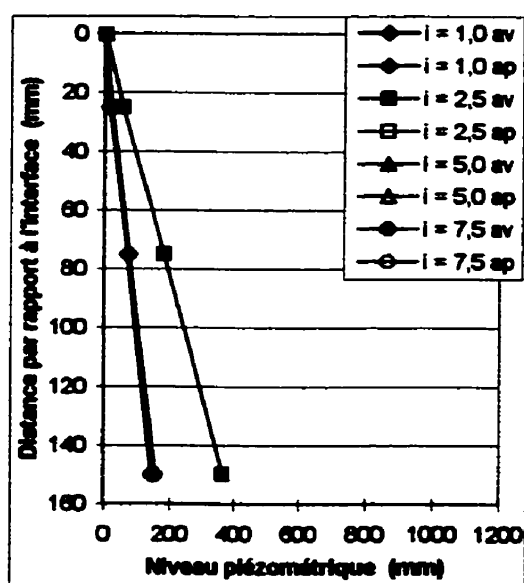
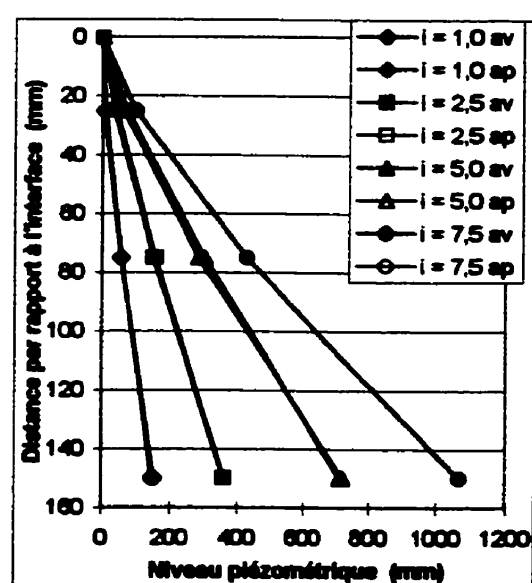


Figure C.18 Évolution du rapport des gradients pour le système BF60-F (essais 8 et 9)



a) BF60-F (essai no. 8)



b) BF60-F (essai no. 9)

Figure C.19 Distribution des pressions dans le sol F pour le système BF60-F

La rétention du sol F par le géotextile BF60 a également été analysée sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa. Cette contrainte a été utilisée pour évaluer la rétention du sol F par le géotextile BF60 sous l'effet d'un confinement plus important. Le tableau 4.4 indique en effet que le sol F est retenu correctement par le géotextile BF60 dans ces conditions de confinement. Les écoulements alterné et unidirectionnel ascendant imposés au système ont entraîné une masse totale de sol passant acceptable, 481 g/m². La figure C.20 présente le tassement subit par le sol F au cours de cet essai. Le tassement initial de 15,42 mm constitue plus de 95% du tassement total de 16,16 mm.

Tout comme pour les essais no. 8 et 9, les particules du sol F ne s'accumulent pas à la surface du géotextile BF60 au cours de l'essai no. 10. La figure C.22 a suggère plutôt la présence d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol. La perméabilité du système est constante et varie entre 6 et 8 x 10⁻⁸ m/s. Cependant, le système BF60-F est légèrement moins perméable que le sol F sous une contrainte de confinement de 200 kPa. De plus, le tableau 4.5 et la figure C.21 montrent que des valeurs du rapport des gradients inférieures à l'unité ont été mesurées tout au long de l'essai. Le rapport GR_{ASTM} ne présente pas de saut marqué lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient. Il oscille plutôt autour d'une valeur de 0,8 pour l'ensemble des gradients imposés au système.

Quant à la distribution des pressions (figure C.23 a), elle est linéaire dans tout l'échantillon de sol. Il y a peu de différence entre la distribution de la perte de charge dans l'échantillon avant et après l'application de gradients alternés. Finalement, la quantité acceptable de particules passant les géotextiles et la constance de la perméabilité du système au cours de l'essai suggèrent que le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol F sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa.

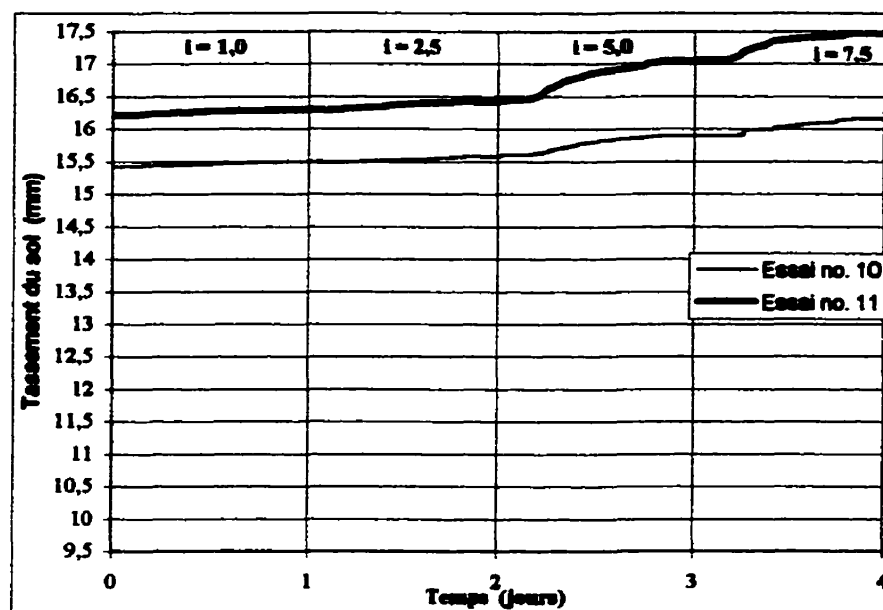


Figure C.20 Tassement du sol F en fonction du temps pour les systèmes BF60-F (essai 10) et BSF8-F (essai 11)

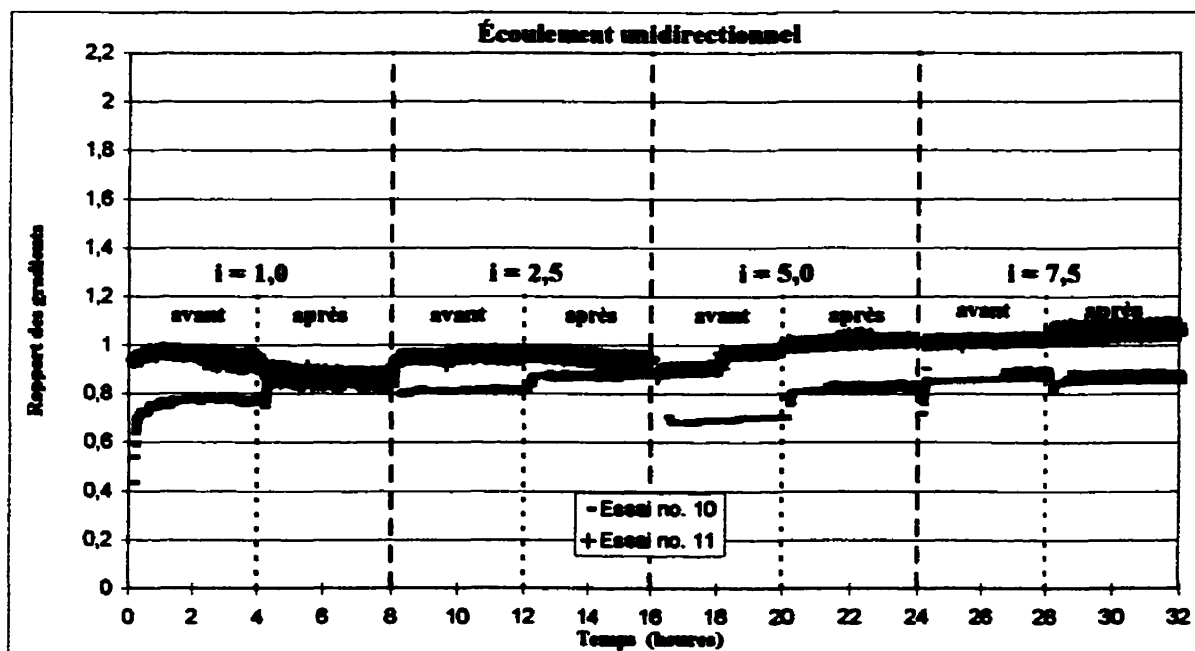
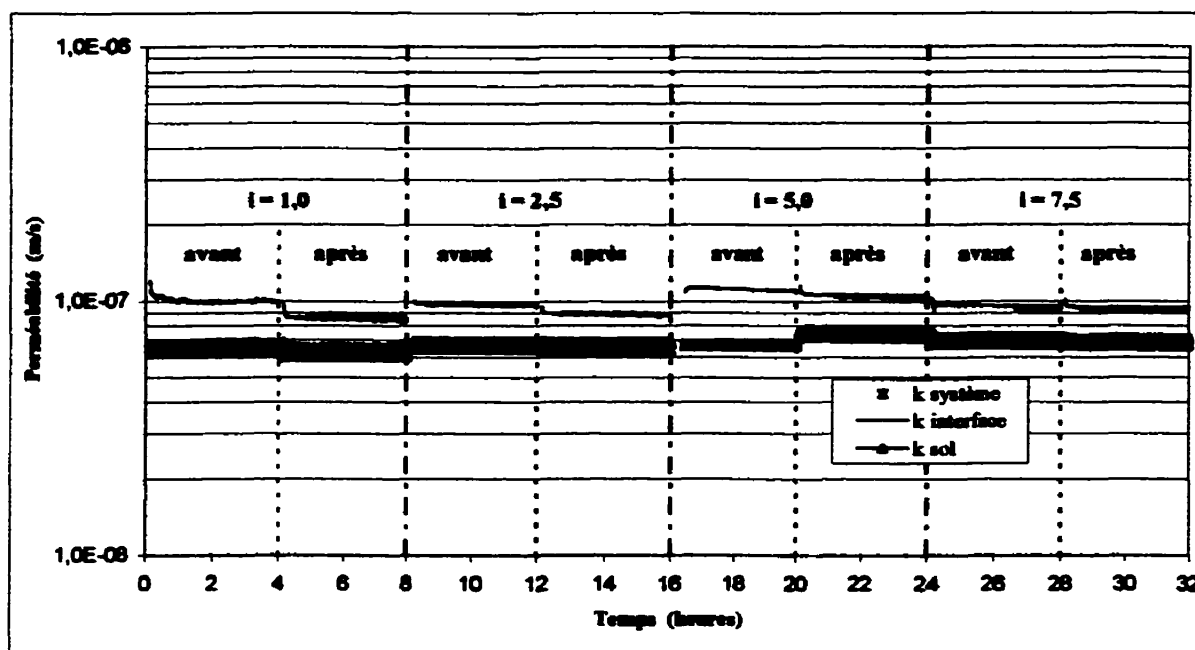
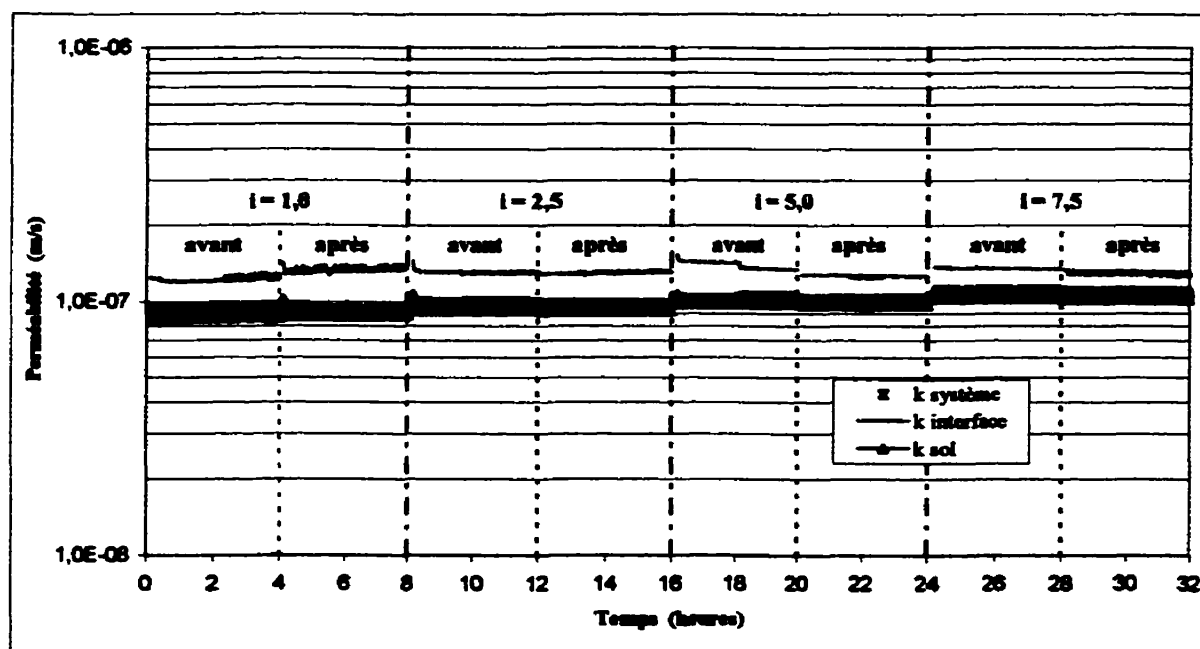


Figure C.21 Évolution du rapport des gradients pour les systèmes BF60-F (essai 10) et BSF8-F (essai 11)



a) Système BF60-F (essai no. 10)



b) Système BSF8-F (essai no. 11)

Figure C.22 Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes BF60-F et BSF8-F

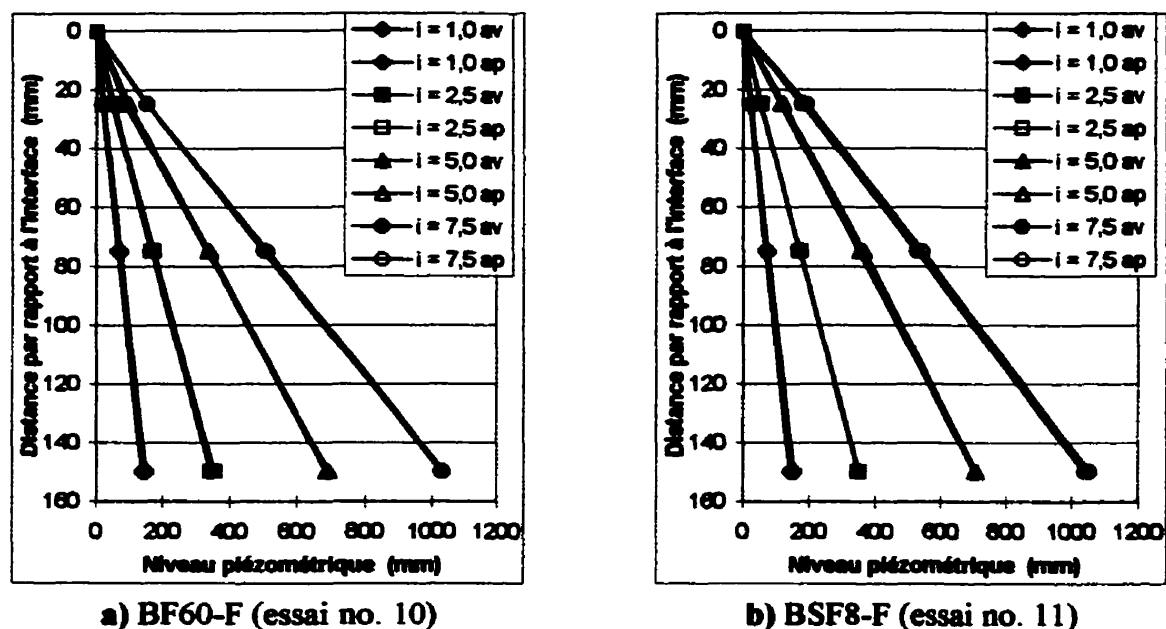


Figure C.23 Distribution des pressions dans le sol F pour les essais no. 10 et 11

C.3.2 Géotextile BSF8

Le comportement en filtration du sol F a également été étudié en contact avec le géotextile BSF8 sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa (essai no. 11). Le tableau 4.4 met en évidence le fait que le sol F est retenu par le géotextile BSF8 qui laisse passer une quantité acceptable de particules, soit une masse totale de sol passant les géotextiles égale à 875 g/m². Le tassement initial de 16,21 mm constitue près de 93% du tassement total de 17,48 mm. De plus, c'est l'alternance de gradients hydrauliques élevés, soit i égal à 5,0 et 7,5, qui occasionne le plus grand remaniement de la structure du sol et/ou un lessivage de particules comme l'illustre la courbe du tassement du sol F en fonction du temps présentée à la figure C.20.

Tout comme pour les essais précédents (8 à 10), le géotextile BSF8 n'est pas colmaté à sa surface par les particules du sol F. La figure C.22 b suggère plutôt la présence d'une

zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol. La perméabilité du système est constante entre de 8×10^{-8} et 1×10^{-7} m/s. Tout comme le système BF60-F, le système BSF8-F est légèrement moins perméable que le sol F sous une contrainte de confinement de 200 kPa. De plus, le rapport des gradients est relativement constant pour tous les gradients imposés au système et sa valeur oscille autour de l'unité (figure C.21). Le GR_{ASTM} est inférieur à un au cours des écoulements unidirectionnels précédents l'alternance d'un gradient égal à 5 tandis qu'il est supérieur à l'unité par la suite.

La distribution des pressions dans le sol F en contact avec le géotextile BSF8 est linéaire dans tout l'échantillon (figure C.23 b). Il y a peu de différence entre la distribution de la perte de charge dans l'échantillon avant et après l'application de gradients alternés. Finalement, nous pouvons considérer qu'un lessivage de quelques particules suivi de l'établissement d'une structure avec pontage dans le sol caractérise le système BSF8-F sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa.

C.3.3 Géotextile NTT

Le géotextile NTT a été utilisé en contact avec le sol F sous deux contraintes de confinement initiales différentes, soit 42 et 200 kPa. L'essai no. 20 reproduit les mêmes conditions de confinement que l'essai no. 5 (système NTT-B) afin d'évaluer l'influence de la forme des particules du sol. Sous une contrainte initiale de 42 et 200 kPa, le tableau 4.4 montre que les masses totales de sol passant sont de respectivement 222 g/m^2 et de 207 g/m^2 . La figure C.24 présente le tassement subit par le sol F au cours de ces essais. Pour l'essai no. 19, le tassement initial représente près de 97% du tassement total. Le système NTT-F subit un plus grand remaniement de la structure du sol F au cours de l'essai no. 20 puisqu'il est soumis à un confinement moins important. Le tassement initial constitue alors 78% du tassement final.

Les perméabilités locales, présentées aux figures C.25 a et b, montrent que le système NTT-F est légèrement plus perméable que le sol F au cours des essais no. 19 et 20. La perméabilité du système est constante autour de 6×10^{-8} m/s et la zone adjacente au géotextile est plus perméable que le sol. Cette zone plus perméable à l'interface est également mise en évidence à la figure C.26 par les valeurs du rapport des gradients oscillant autour d'une valeur de 0,75 (essai no. 19) et de 0,65 (essai no. 20).

La distribution des pressions dans le sol F en contact avec le géotextile NTT est sensiblement linéaire dans tout l'échantillon (figures C.27 a et b). Nous pouvons cependant observer que la perte de charge est un peu moins importante à l'interface, ce qui suppose la formation d'une zone plus perméable à cet endroit. Finalement, la masse acceptable de sol passant les géotextiles suggère que le géotextile NTT initie une structure avec pontage dans le sol F sous une contrainte de confinement initiale de 42 et de 200 kPa.

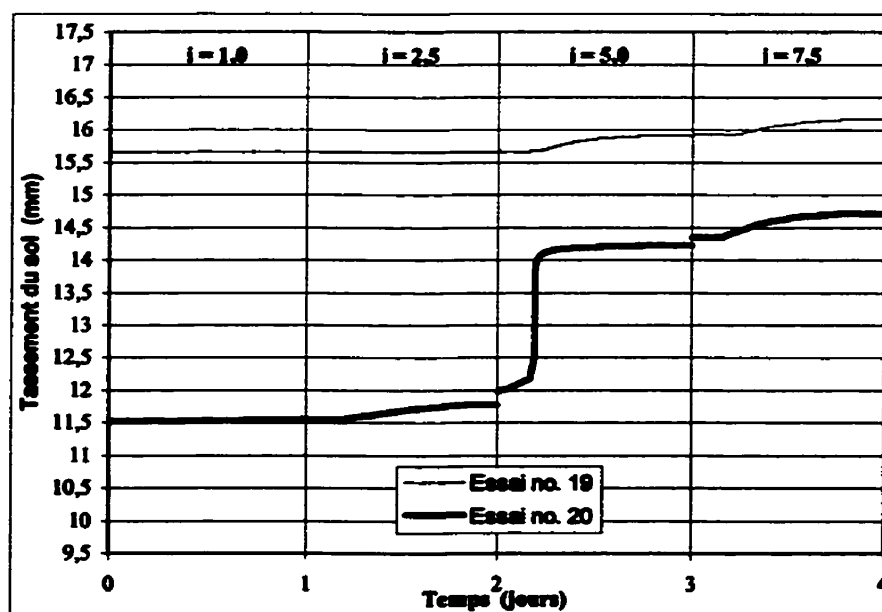
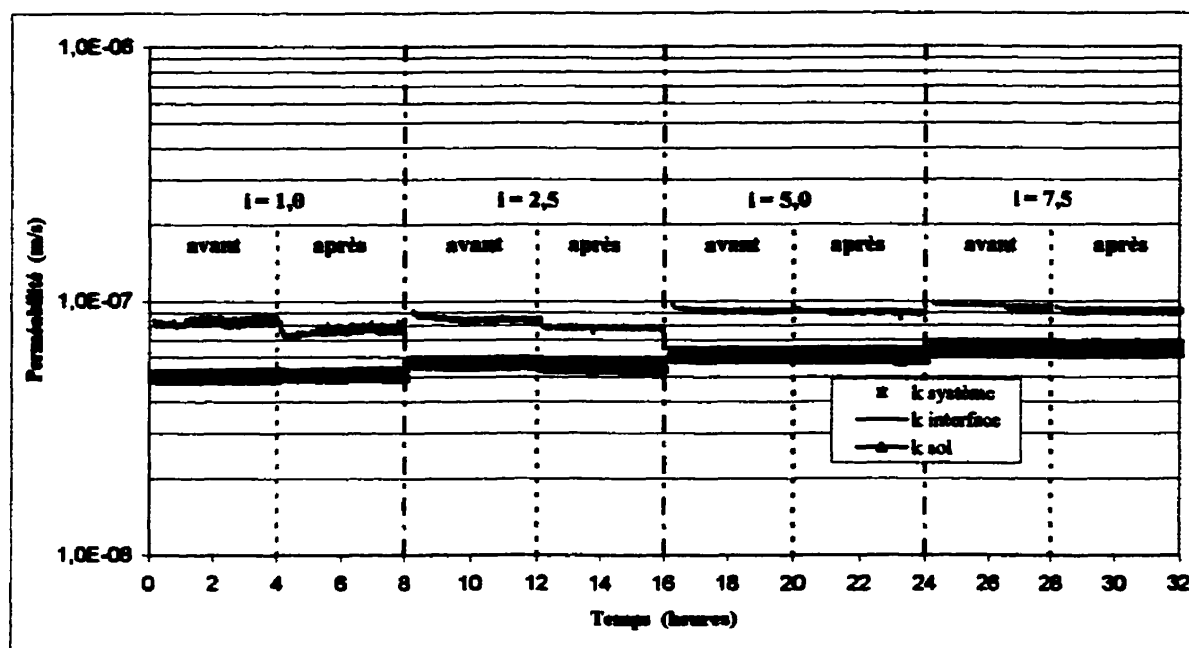
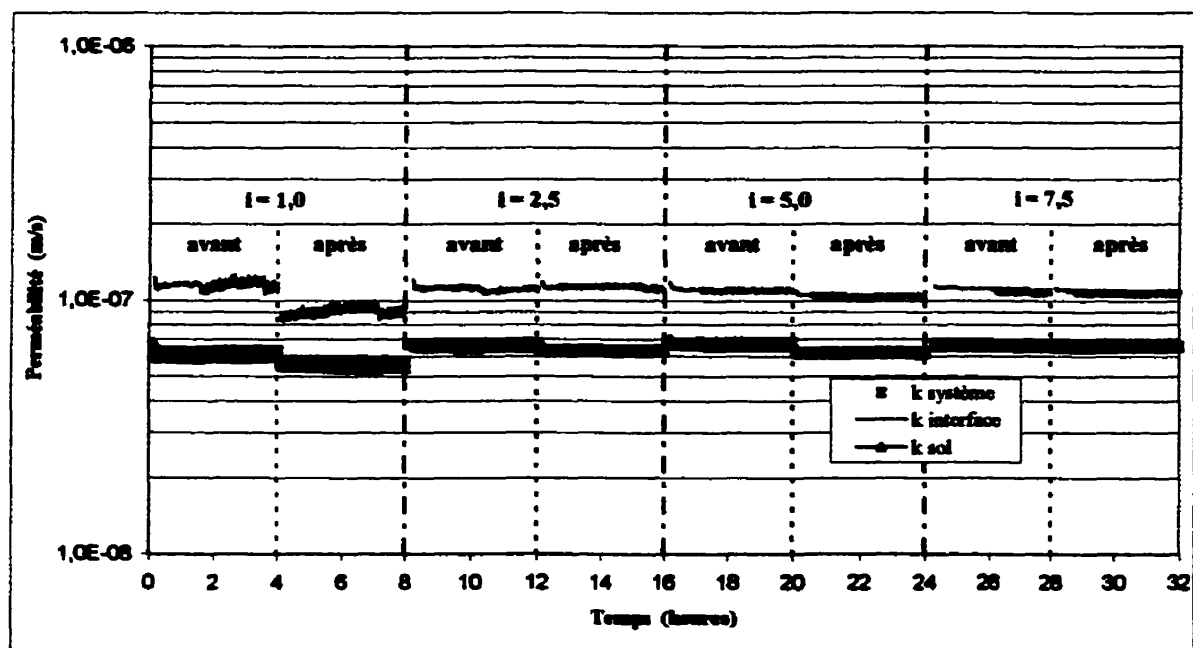


Figure C.24 Tassement du sol F en fonction du temps pour le système NTT-F (essais 19 et 20)



a) Système NTT-F (essai no. 19)



b) Système NTT-F (essai no. 20)

Figure C.25 Perméabilités en fonction du temps pour le système NTT-F

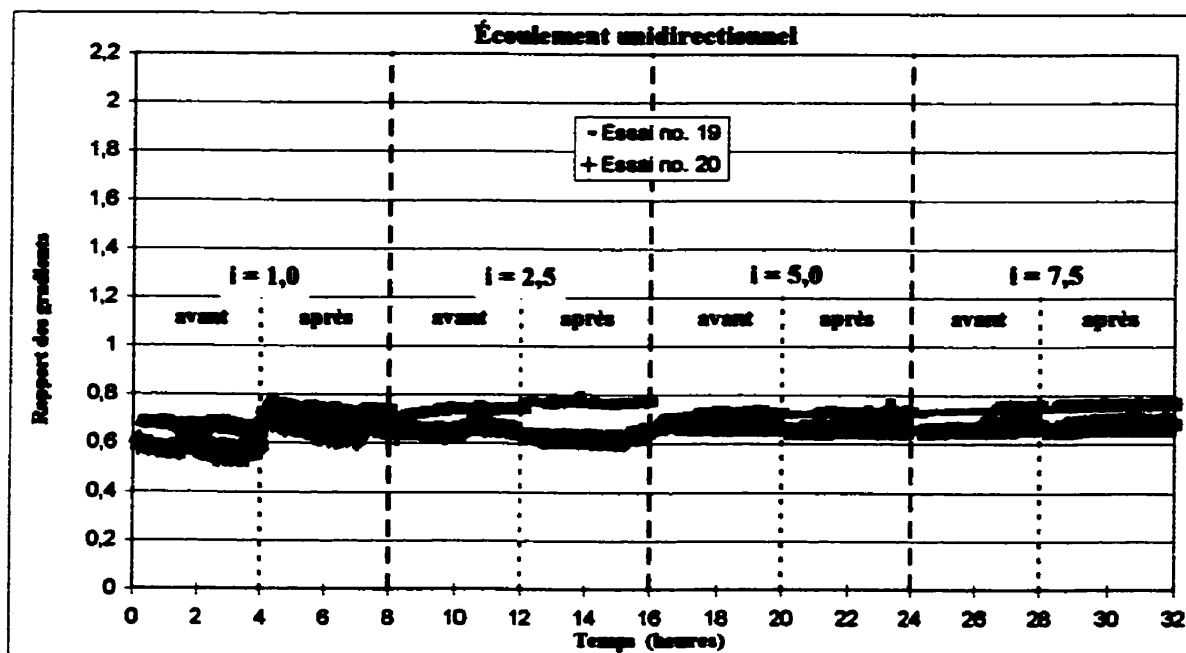
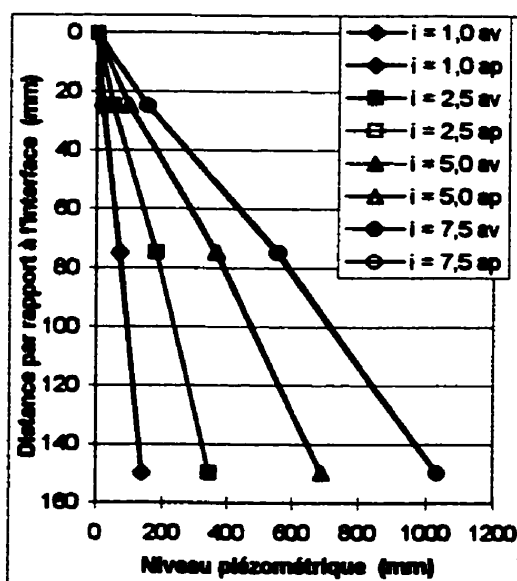
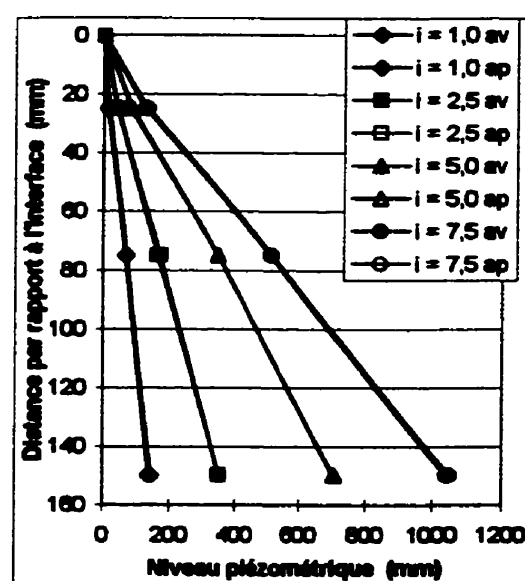


Figure C.26 Évolution du rapport des gradients pour le système NTT-F (essais 19 et 20)



a) NTT-F (essai no. 19)



b) NTT-F (essai no. 20)

Figure C.27 Distribution des pressions dans le sol F pour les essais no. 19 et 20

C.4 Comportement du sol à granulométrie concave vers le haut (sol C)

Le comportement en filtration du sol C a été étudié à l'aide de deux géotextiles possédant une ouverture de filtration similaire mais comportant un nombre de constrictions m différent.

C.4.1 Géotextile BF60

La rétention du sol C par le géotextile BF60 a été étudiée sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa. Le tableau 4.4 indique que le sol C est retenu correctement par le géotextile BF60 dans ces conditions et qu'une quantité acceptable de particules sont lessivées (231 g/m²). Ce tableau montre également que la masse volumique comprimée du sol sec, $\rho_{d\ comp}$, est plus élevée pour ce sol et se situe autour de 1 960 kg/m³. De plus, la contrainte de confinement initiale de 200 kPa n'occasionne qu'un tassement initial de 8,65 mm, ce qui est un peu plus de la moitié du tassement initial que subissent les sols F et I sous cette même contrainte. En plus, le sol C subit très peu de réarrangement de sa structure en cours d'essai (figure C.28). Ces observations sur la masse volumique et le tassement indiquent que le sol C présente probablement une compactibilité plus faible que les autres sols, ce qui est reliée à son contenu plus faible en particules fines (inférieures à 80 μ m).

Les perméabilités locales, présentées à la figure C.29 a, montrent que le système BF60-C possède une perméabilité semblable à celle du sol C jusqu'à l'écoulement unidirectionnel précédent l'alternance d'un gradient égal à 2,5. Par la suite, la perméabilité du système est légèrement supérieure à celle du sol et varie entre 3 et 4 x 10⁻⁷ m/s. La zone adjacente au géotextile est plus perméable que le sol tout au long de l'essai. Cette zone plus perméable à l'interface est également mise en évidence par les valeurs du rapport des gradients oscillant entre 0,7 et 0,8 tout au long de l'essai (figure C.30). De plus, le rapport GR_{ASTM} ne présente pas de saut marqué lors de

l'augmentation du gradient et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient à l'exemption du premier gradient. Dans ce cas, l'alternance d'un gradient hydraulique égal à l'unité provoque une légèrement augmentation du rapport des gradients, qui passe de 0,66 à 0,75.

La distribution des pressions dans le sol C en contact avec le géotextile BF60 est sensiblement linéaire dans tout l'échantillon (figure C.31 a). Nous pouvons cependant observer que la perte de charge est un peu moins importante à l'interface, ce qui suppose la formation d'une zone plus perméable à cet endroit. De plus, il y a peu de différence entre la distribution des pressions dans l'échantillon avant et après l'application de gradients alternés. Finalement, la masse acceptable de sol passant les géotextiles et la constance de la perméabilité du système suggèrent que le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol C sous une contrainte de confinement de 200 kPa.

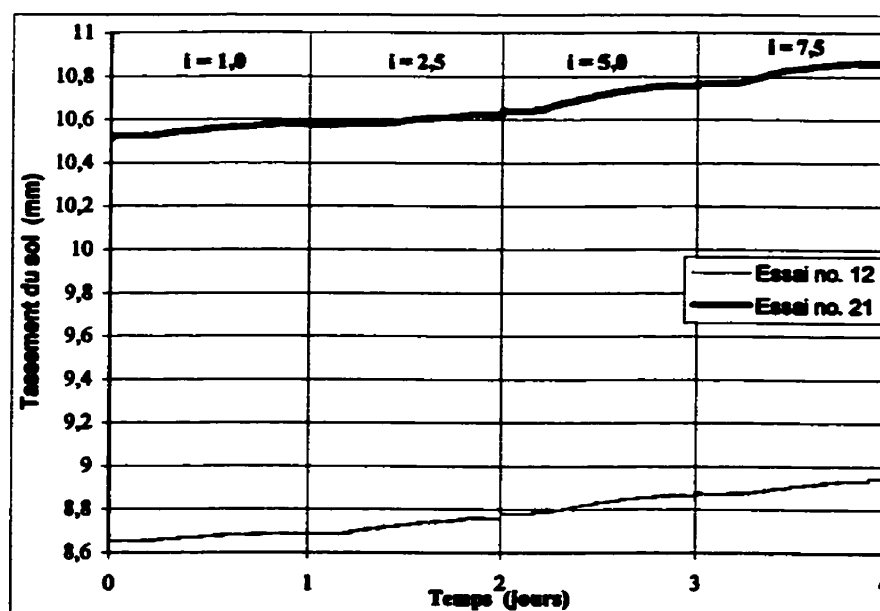
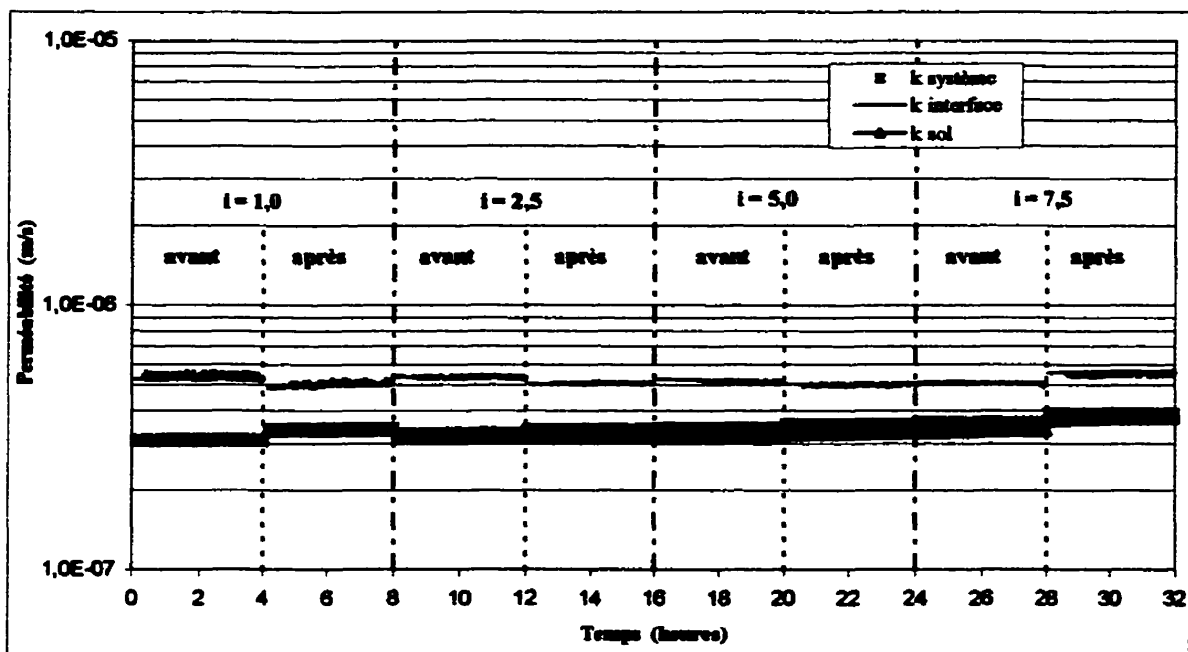
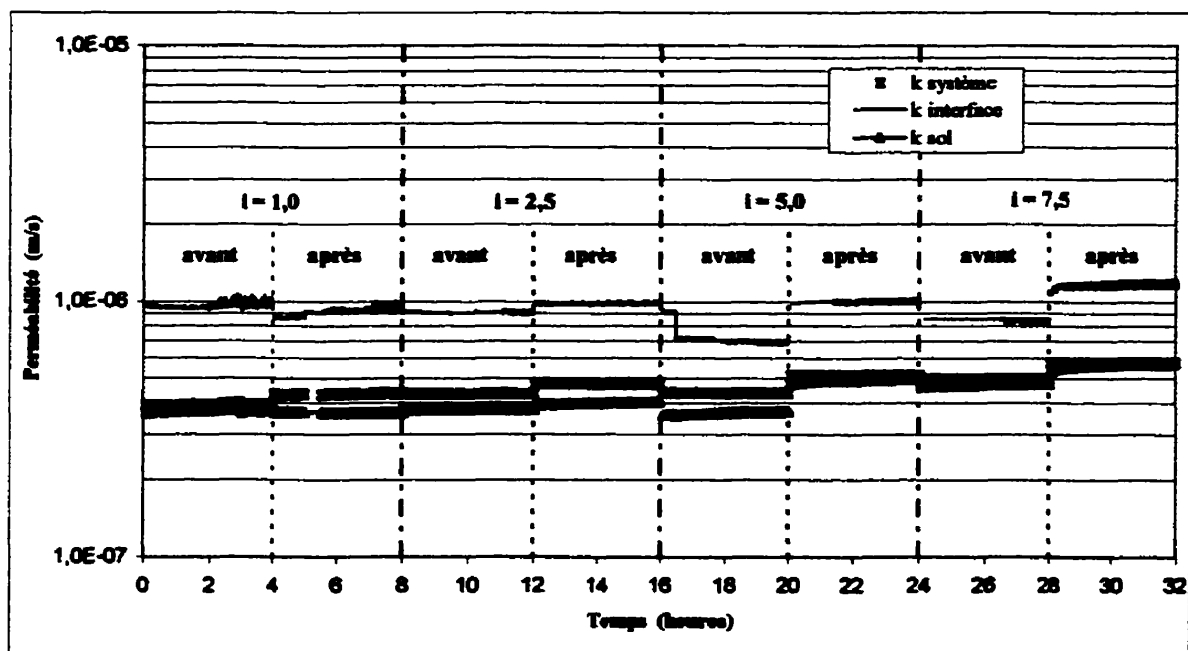


Figure C.28 Tassement du sol C en fonction du temps pour les systèmes BF60-C (essai 12) et BSF8-C (essai 21)



a) Système BF60-C (essai no. 12)



b) Système BSF8-C (essai no. 21)

Figure C.29 Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes BF60-C et BSF8-C

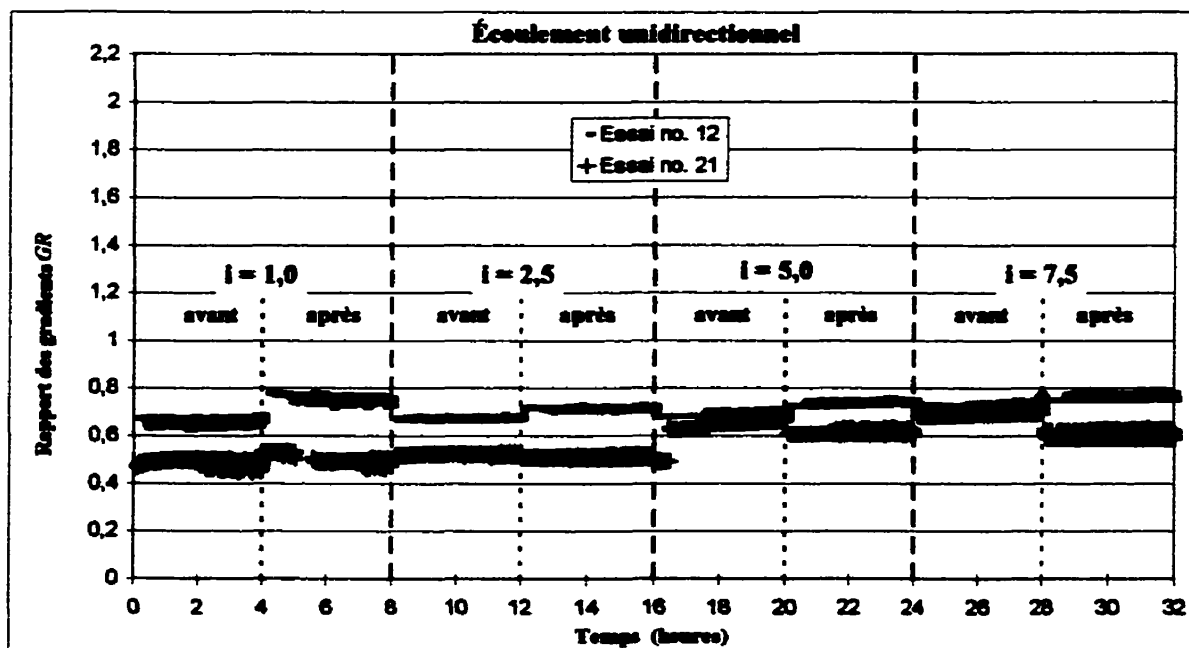


**Figure C.30 Évolution du rapport des gradients pour les systèmes
BF60-C (essai 12) et BSF8-C (essai 21)**

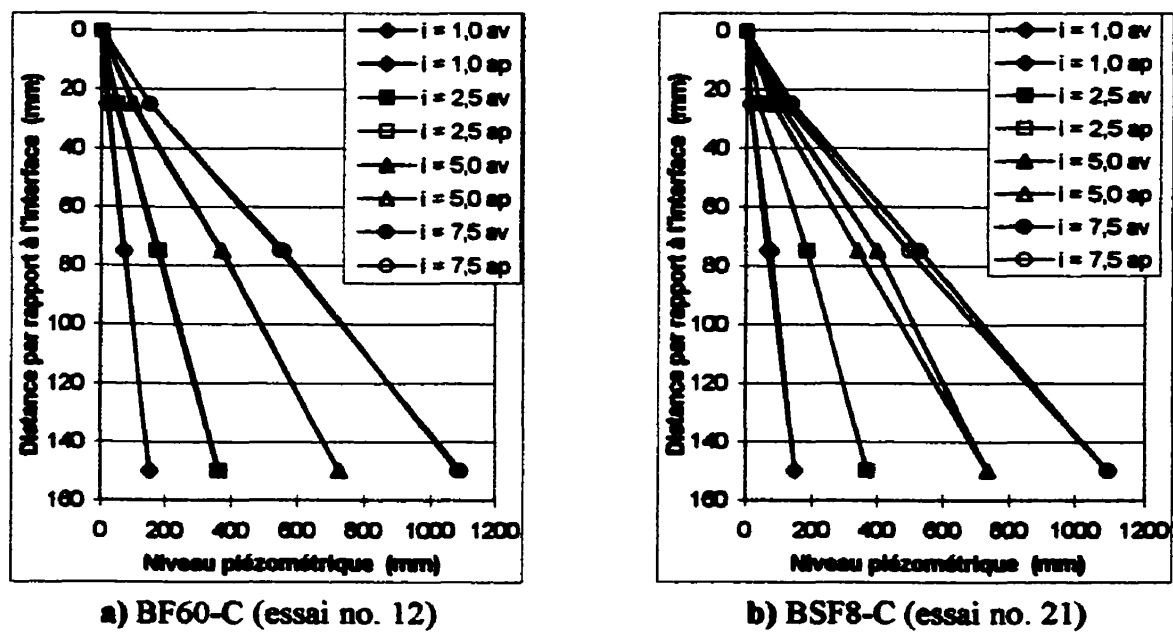


Figure C.31 Distribution des pressions dans le sol C pour les essais no. 12 et 21

C.4.2 Géotextile BSF8

Le comportement en filtration du sol C a finalement été analysé en contact avec le géotextile BSF8 sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa. Sous ces conditions de confinement, le géotextile BSF8 retient correctement le sol C qui subit un lessivage d'une quantité acceptable de particules (274 g/m^2). Tout comme pour l'essai no. 12, le tassement initial du sol C engendré par l'application du confinement est faible par rapport à celui des sols I et F et ce tassement initial constitue près de 97% du tassement total (figure C.28). Les perméabilités locales, présentées à la figure C.29 b, montrent que la perméabilité du système BSF8-C est légèrement supérieure à celle du sol et qu'elle augmente au cours de l'essai entre 4 et $6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. La zone adjacente au géotextile est plus perméable que le sol et cette zone est également mise en évidence par les valeurs du rapport des gradients inférieures à l'unité tout au long de l'essai (figure C.30). De plus, le rapport GR_{ASTM} est constant autour de 0,5 au cours des deux premiers gradients tandis qu'il oscille entre 0,6 et 0,7 au cours des écoulements unidirectionnels à des gradients hydrauliques plus élevés.

La distribution des pressions dans le sol C en contact avec le géotextile BSF8 est sensiblement linéaire dans tout l'échantillon (figure C.31 b). Nous pouvons également observer la formation d'une zone plus perméable à l'interface. Toutefois, il y a un certain écart entre la distribution des pressions dans l'échantillon avant et après l'application de gradients alternés élevés. Pour les deux derniers gradients, l'alternance des gradients entraîne le lessivage d'une plus grande quantité de particules des zones centrale et supérieure du sol. La figure C.30 montre en effet que le GR_{ASTM} est plus faible après l'écoulement alterné comparativement au rapport mesuré avant cet écoulement alterné. Finalement, la masse acceptable de sol passant les géotextiles suggère que le géotextile BSF8 initie une structure avec pontage dans le sol C sous une contrainte de confinement de 200 kPa.

C.5 Comportement du sol instable (sol I)

Le comportement en filtration du sol I a été étudié à l'aide de cinq géotextiles dont l'ouverture de filtration s'échelonne entre 44 et 200 μm .

C.5.1 Géotextile BF60

La rétention du sol I par le géotextile BF60 a été analysée sous deux contraintes de confinement initiales différentes, soit 200 et 100 kPa pour les essais no. 13 et 18 respectivement. Pour les deux conditions de confinement étudiées, les écoulements alterné et unidirectionnel ascendant imposés au système BF60-I ont entraîné un lessivage d'une quantité acceptable de particules. En effet, le tableau 4.4 montre que les masses passantes totales sont de 524 g/m^2 et de 451 g/m^2 sous une contrainte de respectivement 100 et 200 kPa. La figure C.32 présente le tassement subit par le sol I au cours de ces essais. Une fois de plus, les tassements initiaux constituent un pourcentage important des tassements totaux, soit 91% et 96% pour l'essai no. 18 et no. 13 respectivement.

Les particules fines du sol instable ne s'accumulent pas à la surface du géotextile BF60 au cours des essais no. 13 et 18. Les figures C.33 a et b suggèrent plutôt la présence d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol. Le système BF60-I est également plus perméable que le sol instable et sa perméabilité augmente légèrement de 6 à 8 $\times 10^{-8}$ m/s pendant l'essai no. 13 et de 8 $\times 10^{-8}$ à 1,2 $\times 10^{-7}$ m/s pendant l'essai no. 18. De plus, le tableau 4.5 et la figure C.34 montrent que des valeurs du rapport des gradients inférieures à l'unité ont été mesurées tout au long des essais no. 13 et 18. Le rapport GR_{ASTM} ne présente pas de saut marqué lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient à l'exception du premier gradient. Il est également constant au cours d'un même écoulement unidirectionnel d'une durée de

4 heures et il oscille autour d'une valeur de 0,5 (essai no. 13) et de 0,4 (essai no. 18) pour l'ensemble des gradients imposés au système BF60-I.

Quant à la distribution des pressions (figure C.35 a et b), elle indique la présence de zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable. Les particules fines du sol I situées dans la zone adjacente au géotextile sont lessivées à travers le filtre tandis que l'écoulement unidirectionnel ascendant favorise la migration des particules fines de la zone inférieure du sol qui s'accumulent dans la zone centrale. Ce type de distribution des pressions n'a pas été observé dans les autres sols. En effet, le sol I est un sol instable selon Kenney et Lau (1985 et 1986). Il est donc incapable de prévenir la migration de ses propres particules fines et ce n'est plus seulement la zone adjacente au géotextile qui est modifiée par l'écoulement. Finalement, la quantité acceptable de particules passant les géotextiles et la perméabilité du système constante au cours des essais suggèrent que le géotextile BF60 initie une structure avec pontage dans le sol I sous une contrainte de confinement initiale de 100 et de 200 kPa.

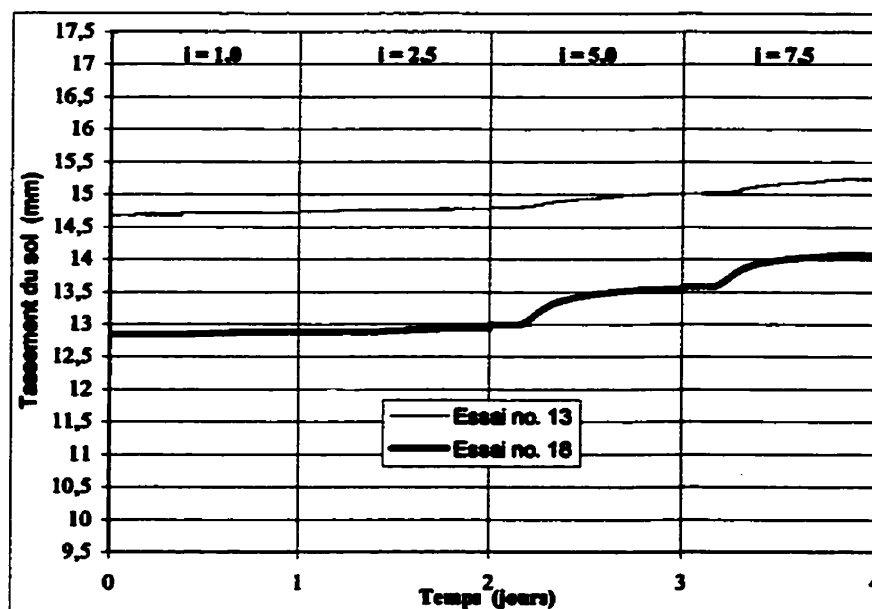
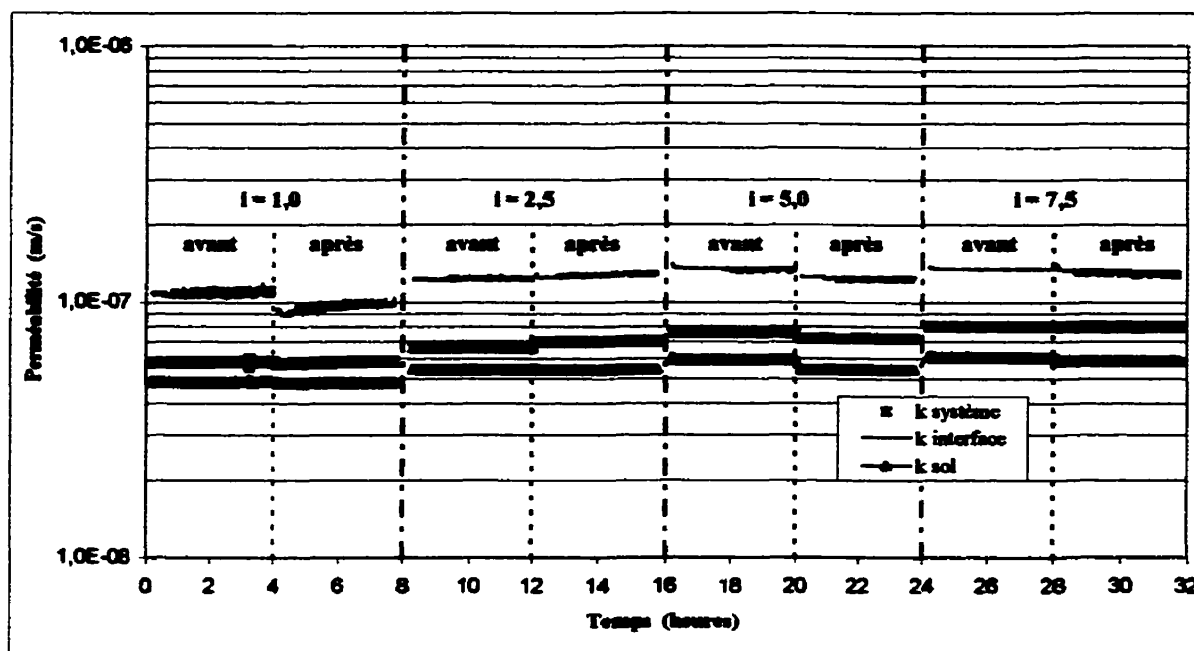
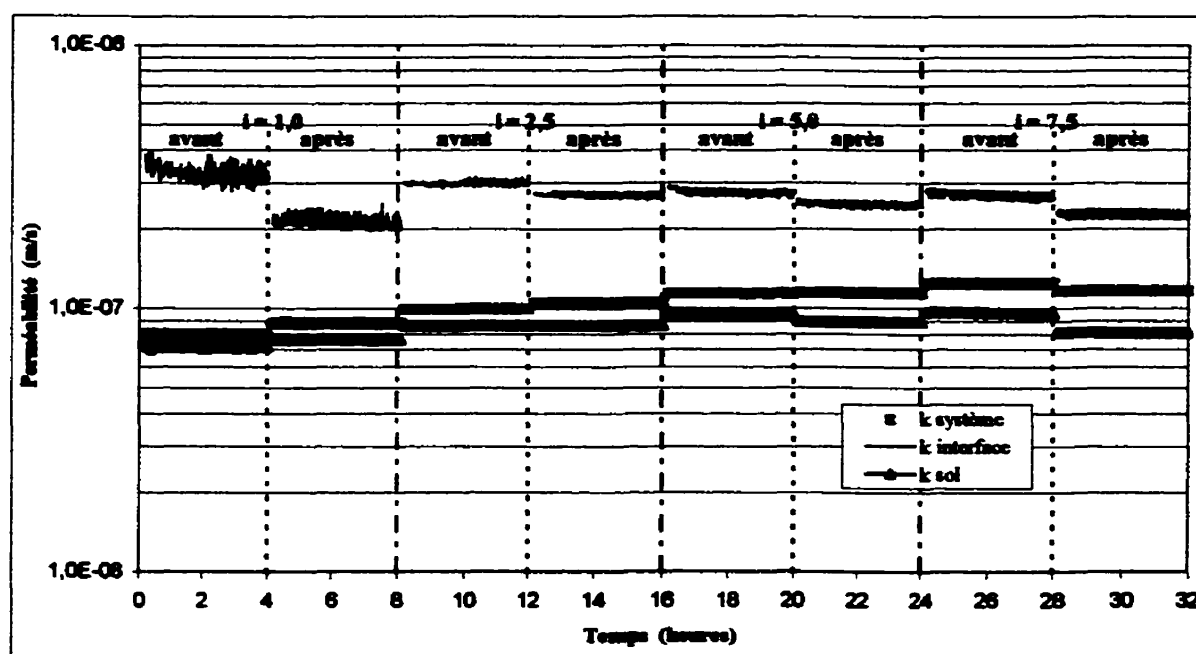


Figure C.32 Tassement du sol I en fonction du temps pour le système BF60-I (essais 13 et 18)



a) Système BF60-I (essai no. 13)



b) Système BF60-I (essai no. 18)

Figure C.33 Perméabilités en fonction du temps pour le système BF60-I

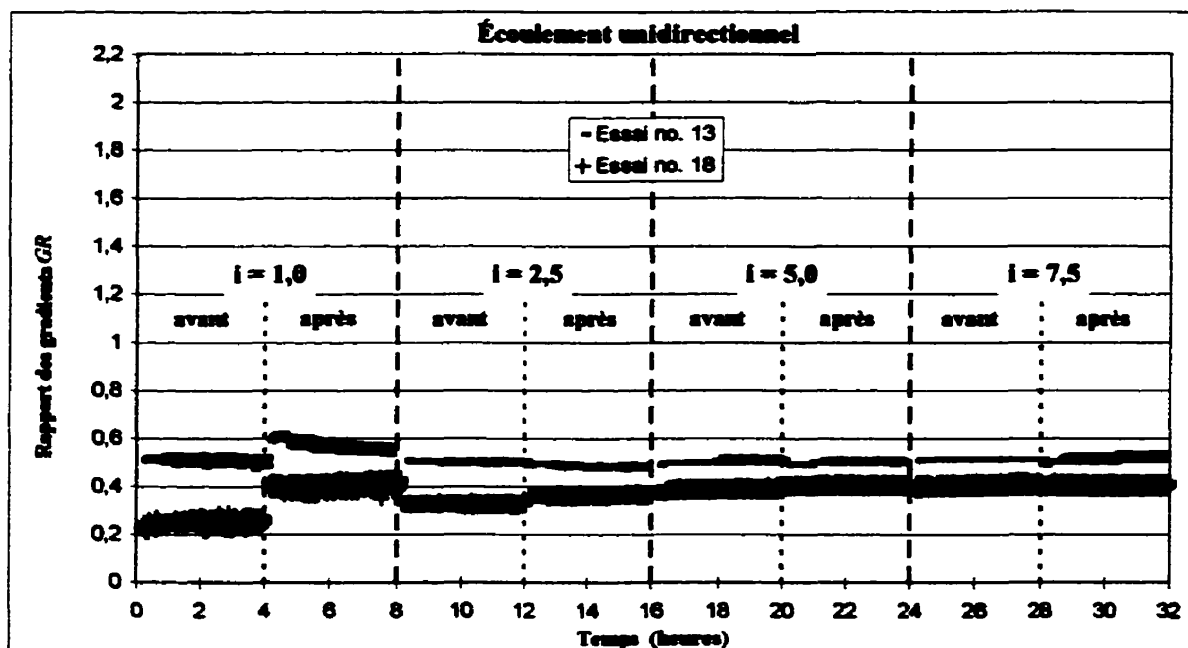


Figure C.34 Évolution du rapport des gradients pour le système BF60-I (essais 13 et 18)

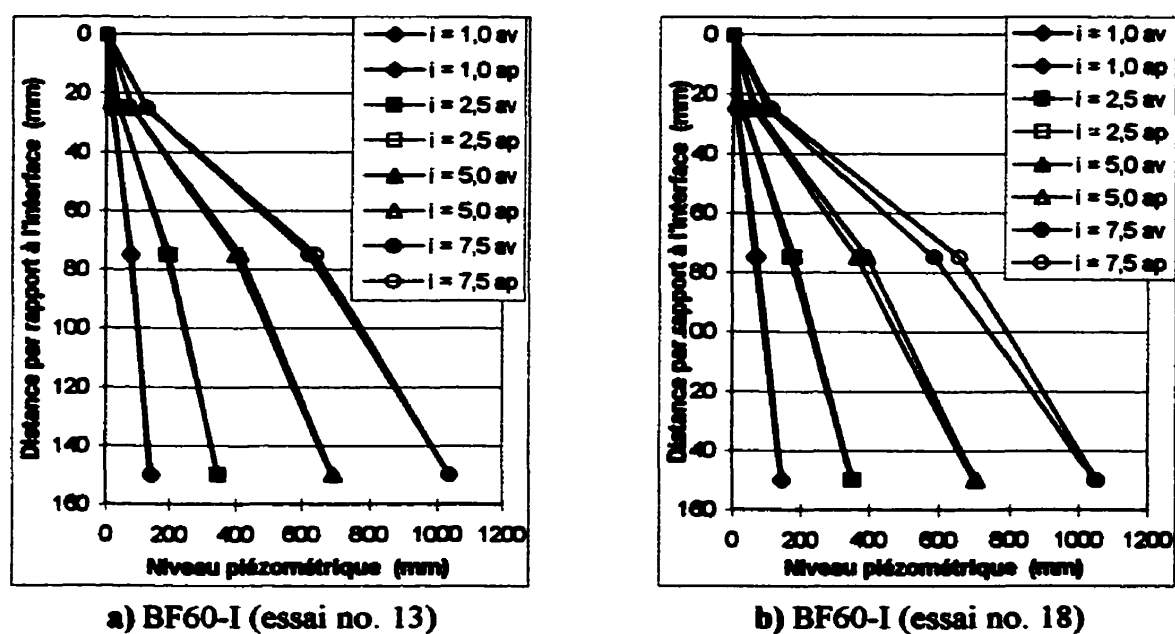


Figure C.35 Distribution des pressions dans le sol I pour les essais no. 13 et 18

C.5.2 Géotextile BSF8

Le tableau 4.4 montre que le sol I est retenu correctement par le géotextile BSF8 sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa. Les écoulements alterné et unidirectionnel ascendant imposés au système BSF8-I ont entraîné un lessivage d'une quantité acceptable de particules, soit 589 g/m². La figure C.36 illustre le tassement subit par le sol I au cours de l'essai no. 14. Tout comme pour les autres essais réalisés avec une contrainte de confinement initiale de 200 kPa, le tassement initial représente un fort pourcentage du tassement final, soit près de 98% pour le système BSF8-I.

L'écoulement à travers le système BSF8-I favorise la formation d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface supérieure à celle du sol (figure C.37 a). Celle-ci demeure constante au cours de l'essai à une valeur de 1×10^{-7} m/s. Le système BSF8-I est également plus perméable que le sol I et sa perméabilité augmente progressivement de 1 à $1,5 \times 10^{-7}$ m/s. Cette hausse de k_{sys} est perceptible lors de l'augmentation du gradient hydraulique et entre les écoulements unidirectionnels à un même gradient tandis qu'elle est constante au cours d'un même écoulement unidirectionnel d'une durée de 4 heures. Cette observation peut supposer un lessivage continu des particules du sol I à travers le géotextile BSF8.

Quant à la figure C.38, elle présente l'évolution du rapport des gradients en fonction du temps. À l'exception de l'écoulement unidirectionnel qui suit l'alternance d'un gradient hydraulique égal à 1, le rapport GR_{ASTM} oscille autour d'une valeur de 0,6 pour l'ensemble des gradients imposés au système BSF8-I. La distribution des pressions mesurées pour le système BSF8-I, présentée à la figure C.39 a, est semblable à celle obtenue pour le système BF60-I (figure C.35 a). Elle indique la présence de zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable.

Cependant, il y a un certain écart entre la distribution des pressions dans l'échantillon avant et après l'écoulement alterné. Pour tous les gradients imposés au système, l'application de gradients alternés entraînent le lessivage d'une plus grande quantité de particules de la zone inférieure qui s'accumulent dans les zones centrale et supérieure. La distribution des pressions mesurées après l'écoulement alterné montre donc une plus grande perte de charge dans les zones centrale et supérieure ainsi qu'une plus faible perte de charge dans la zone inférieure comparativement à la distribution mesurée avant cet écoulement alterné. Finalement, nous pouvons considérer qu'un lessivage de particules suivi de l'établissement d'une structure avec pontage dans le sol I caractérise le système BSF8-I sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa. Il faut cependant noter que la croissance de la perméabilité du système tout au long de l'essai peut suggérer une certaine tendance au lessivage comme comportement en filtration du sol I en contact avec le géotextile BSF8.

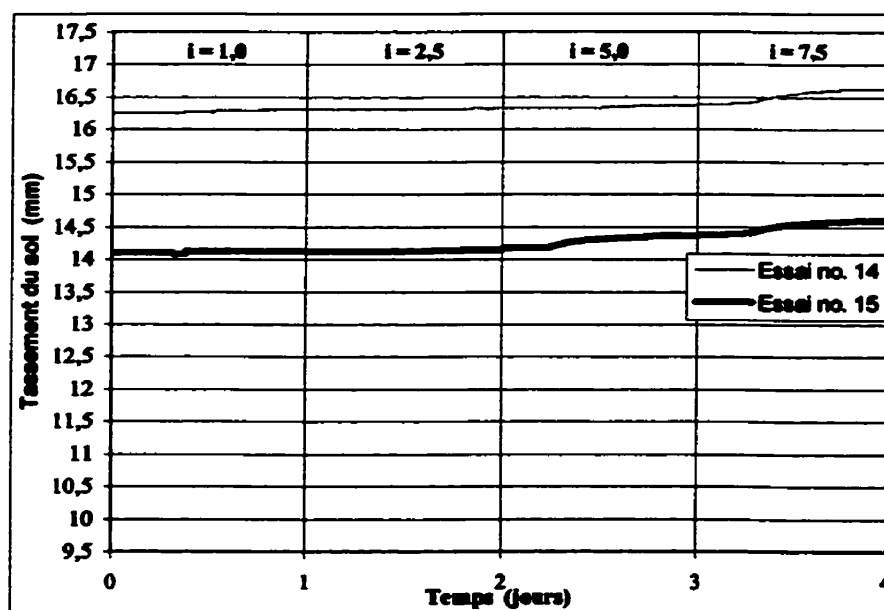
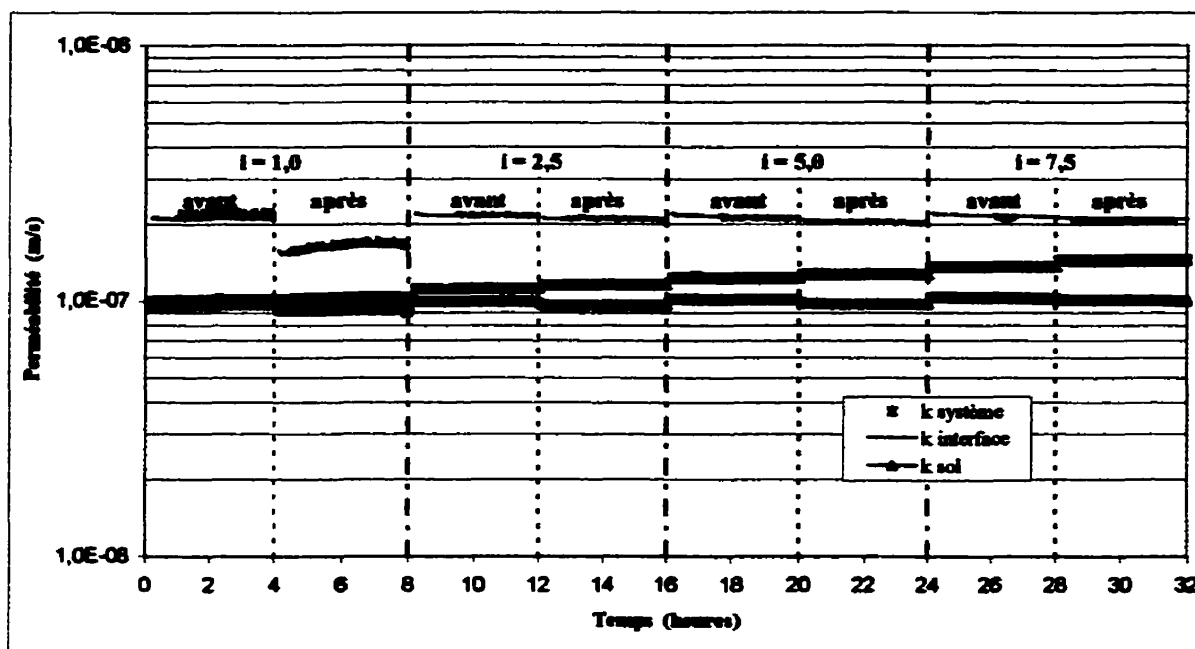
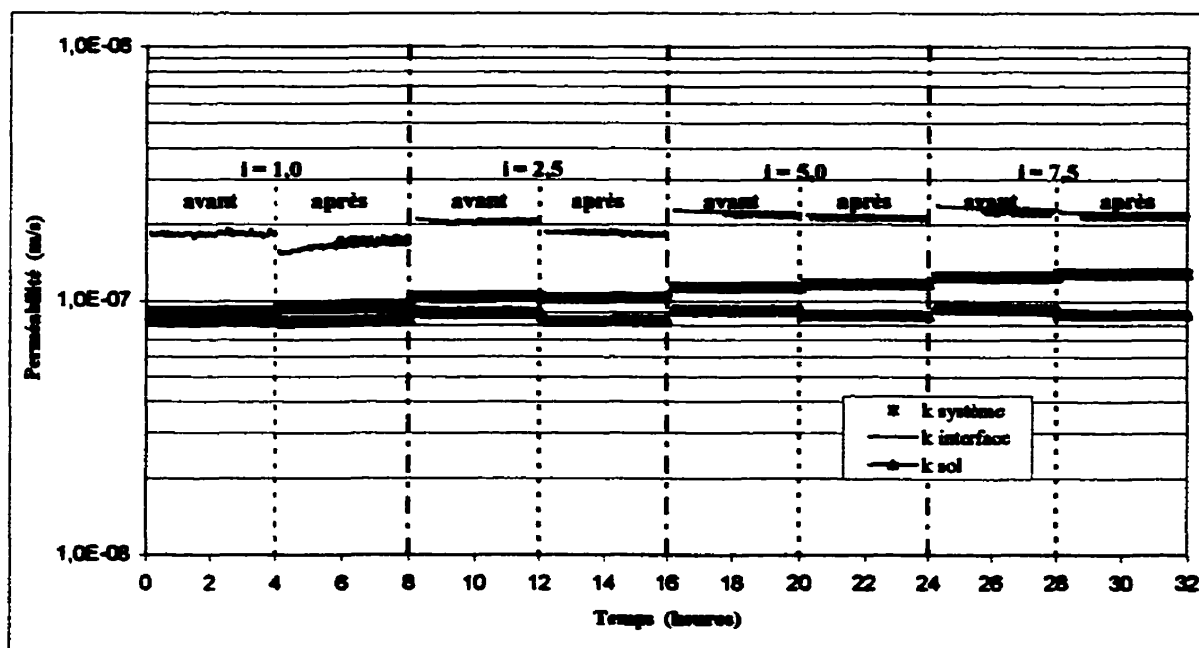


Figure C.36 Tassement du sol I en fonction du temps pour les systèmes BSF8-I (essai 14) et NTT-I (essai 15)



a) Système BSF8-I (essai no. 14)



b) Système NTT-I (essai no. 15)

Figure C.37 Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes BSF8-I et NTT-I

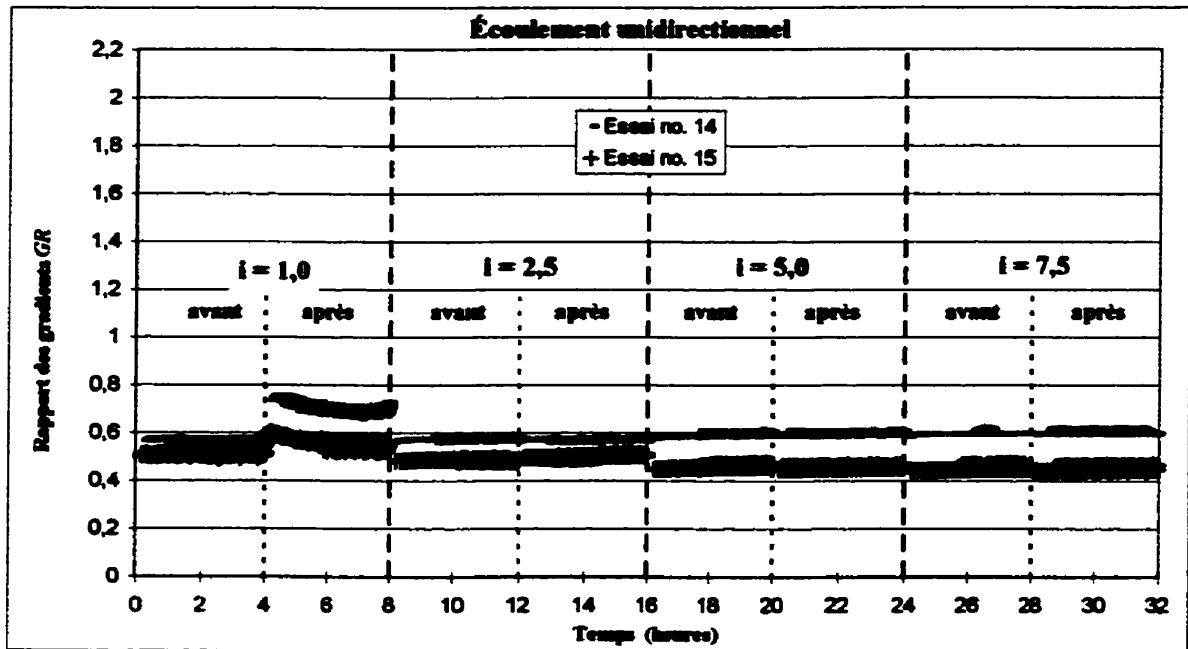


Figure C.38 Évolution du rapport des gradients pour les systèmes BSF8-I (essai 14) et NTT-I (essai 15)

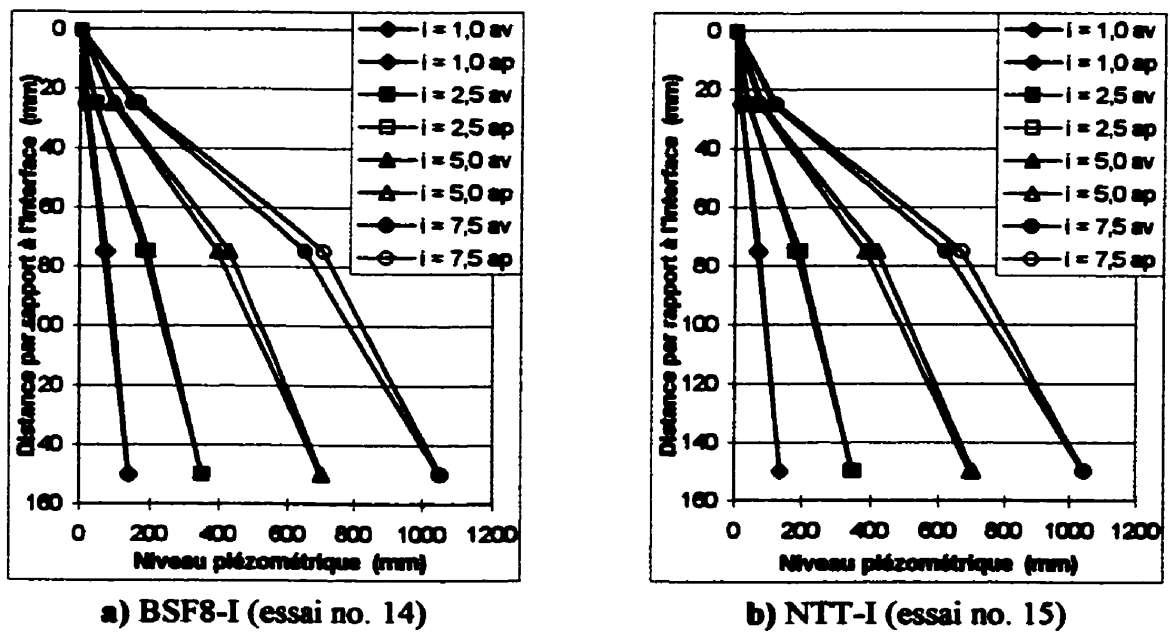


Figure C.39 Distribution des pressions dans le sol I pour les essais no. 14 et 15

C.5.3 Géotextile NTT

Sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa, le sol I est retenu correctement par le géotextile NTT qui laisse passer une quantité acceptable de particules, soit 347 g/m². La figure C.36 indique également que le tassement initial représente un fort pourcentage du tassement final, soit près de 97%. De plus, les commentaires émis au sujet des perméabilités locales mesurées au cours de l'essai no. 14 (figure C.37 a) s'appliquent aussi à celles obtenues pendant l'essai no. 15 (figure C.37 b). Notamment, le géotextile NTT initie une zone plus perméable dans le sol I à l'interface et la perméabilité du sol est constante pour tous les gradients imposés. La perméabilité du système NTT-I est supérieure à celle du sol et elle augmente progressivement de 9×10^{-8} à $1,3 \times 10^{-7}$ m/s. Cette observation peut supposer un lessivage continu des particules du sol I à travers le géotextile NTT.

La figure C.38 montre que le rapport GR_{ASTM} varie surtout entre 0,4 et 0,5 pour l'ensemble des gradients imposés au système NTT-I. La distribution des pressions mesurées pour le système NTT-I est présentée à la figure C.39 b. Elle indique la présence de zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable. Tout comme pour l'essai no. 14, il y a un écart entre les pressions mesurées avant et après l'écoulement alterné. Pour tous les gradients imposés au système, la distribution mesurée après l'écoulement alterné montre une plus grande perte de charge dans les zones centrale et supérieure ainsi qu'une plus faible perte de charge dans la zone inférieure comparativement à la distribution mesurée avant cet écoulement alterné. Finalement, la quantité acceptable de sol passant suggère que le géotextile NTT initie une structure avec pontage dans le sol I sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa. Cependant, l'instabilité interne du sol I et la croissance de la perméabilité du système tout au long de l'essai peut suggérer une certaine tendance au lessivage comme comportement en filtration du sol I en contact avec le géotextile NTT.

C.5.4 Géotextile NTP

Le tableau 4.4 montre que le sol I est retenu correctement par le géotextile NTP sous une contrainte de confinement initiale de 200 kPa. Les écoulements alterné et unidirectionnel ascendant imposés au système NTP-I ont entraîné un lessivage d'une quantité acceptable de particules, soit 735 g/m². Il faut noter que cette masse totale est répartie presque également entre la masse de sol passant le géotextile inférieur (323 g/m²) et le géotextile supérieur (412 g/m²). La quantité de particules ayant traversé le géotextile inférieur est plus importante pour l'essai no. 16 par rapport à celle mesurée pour les essais précédents. En effet, le géotextile NTP est plus ouvert et occasionne ainsi un lessivage d'un plus grand nombre de particules lors de la mise en place de l'échantillon de sol. La figure C.40 illustre le tassement subit par le sol I au cours de l'essai no. 16. Le tassement initial représente près de 97% du tassement total.

L'écoulement à travers le système NTP-I favorise la formation d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface largement supérieure à celle du sol (figure C.41 a). Celle-ci augmente à la suite de l'écoulement alterné à un gradient égal à un puis elle se stabilise à une valeur de 8×10^{-8} m/s. Cette hausse de la perméabilité du sol au cours du premier gradient indique que des particules fines de la zone centrale du sol migrent vers la zone adjacente au géotextile. Le système NTP-I est plus perméable que le sol I et sa perméabilité augmente progressivement de $6,4 \times 10^{-8}$ à $1,2 \times 10^{-7}$ m/s, ce qui suggère un lessivage continu des particules du sol I à travers le géotextile NTP. Quant à la figure C.42, elle présente l'évolution du rapport des gradients en fonction du temps. À l'exception de l'écoulement unidirectionnel qui suit l'alternance d'un gradient hydraulique égal à 1, le rapport GR_{ASTM} oscille autour d'une valeur de 0,25 pour l'ensemble des gradients imposés au système NTP-I.

La distribution des pressions mesurées pour le système NTP-I indique la présence de zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable

(figure C.43 a). Il faut cependant noter que la démarcation entre la pente du niveau piézométrique en fonction de la distance dans la zone centrale et celle dans la zone inférieure est moins marquée que celle observée pour les autres essais réalisés avec le sol instable. Nous pouvons considérer que la figure C.43 a montre une zone lessivée de ses particules fines à l'interface et une distribution des pressions sensiblement linéaire dans le reste de l'échantillon. Finalement, le lessivage d'une certaine quantité de particules suivi de l'établissement d'une structure avec pontage dans le sol I caractérise le système NTP-I sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa. Il faut cependant noter que les très faibles valeurs mesurées du rapport des gradients et la croissance de la perméabilité du système tout au long de l'essai peut suggérer une certaine tendance au lessivage comme comportement en filtration du sol I en contact avec le géotextile NTP.

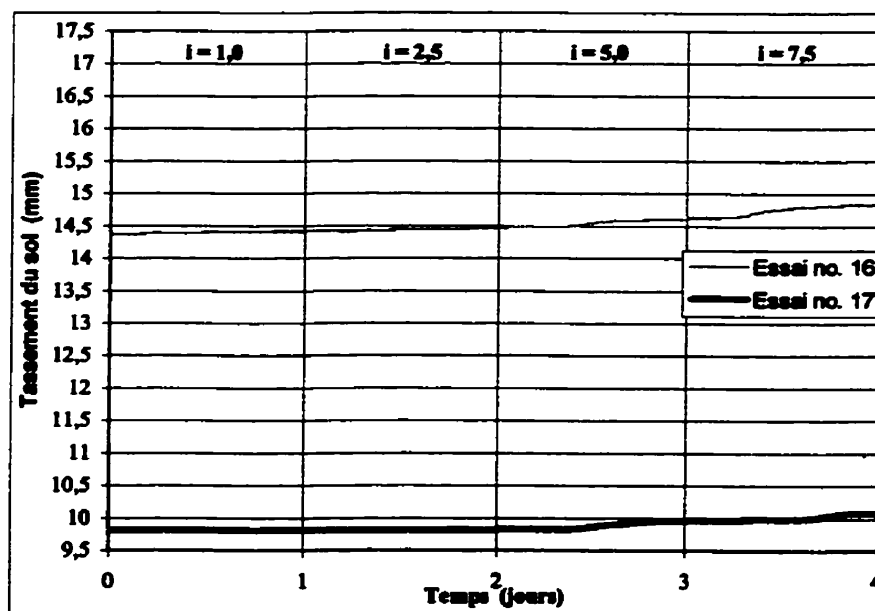
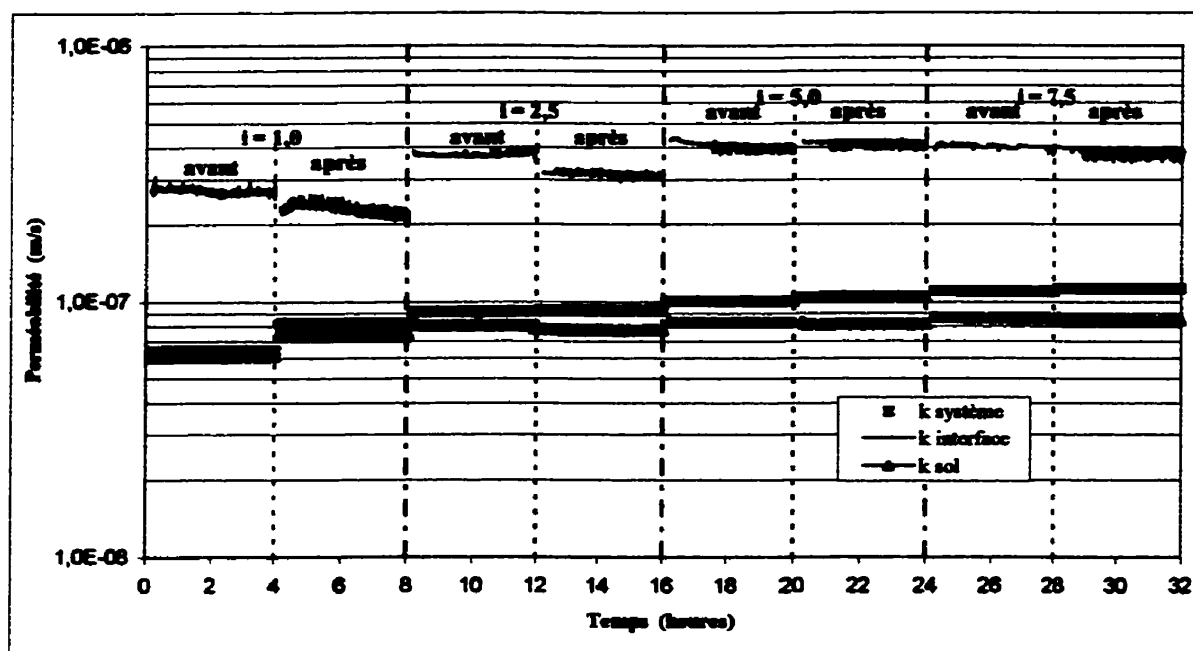
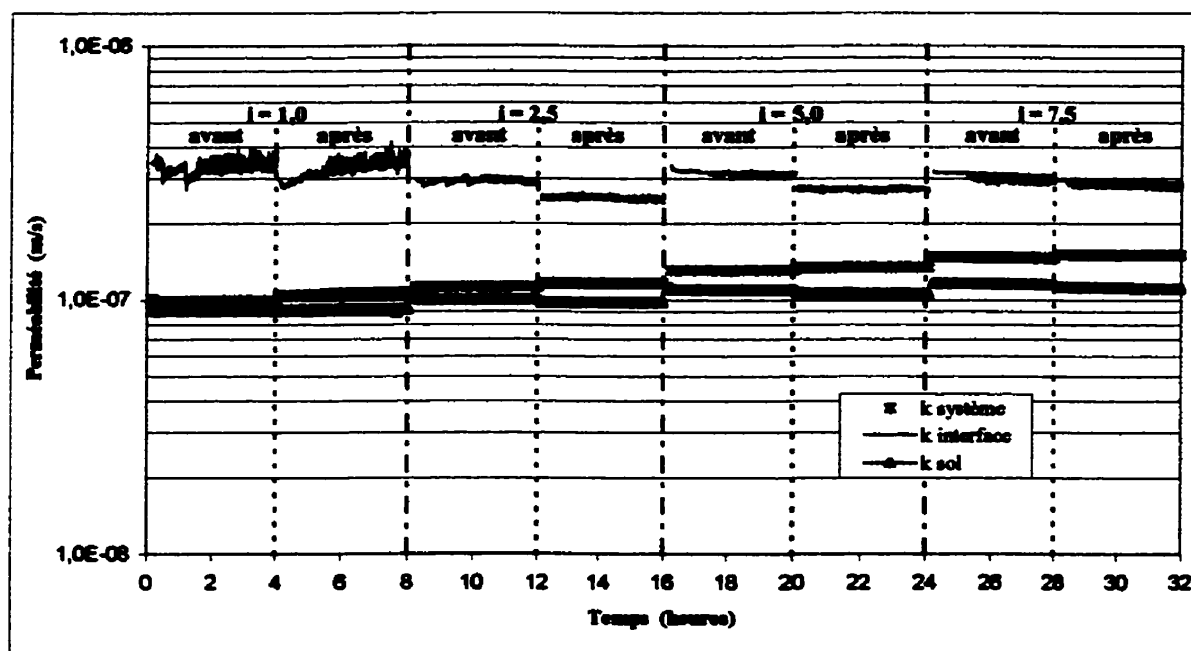


Figure C.40 Tassement du sol I en fonction du temps pour les systèmes NTP-I (essai 16) et T-I (essai 17)



a) Système NTP-I (essai no. 16)



b) Système T-I (essai no. 17)

Figure C.41 Perméabilités en fonction du temps pour les systèmes NTP-I et T-I

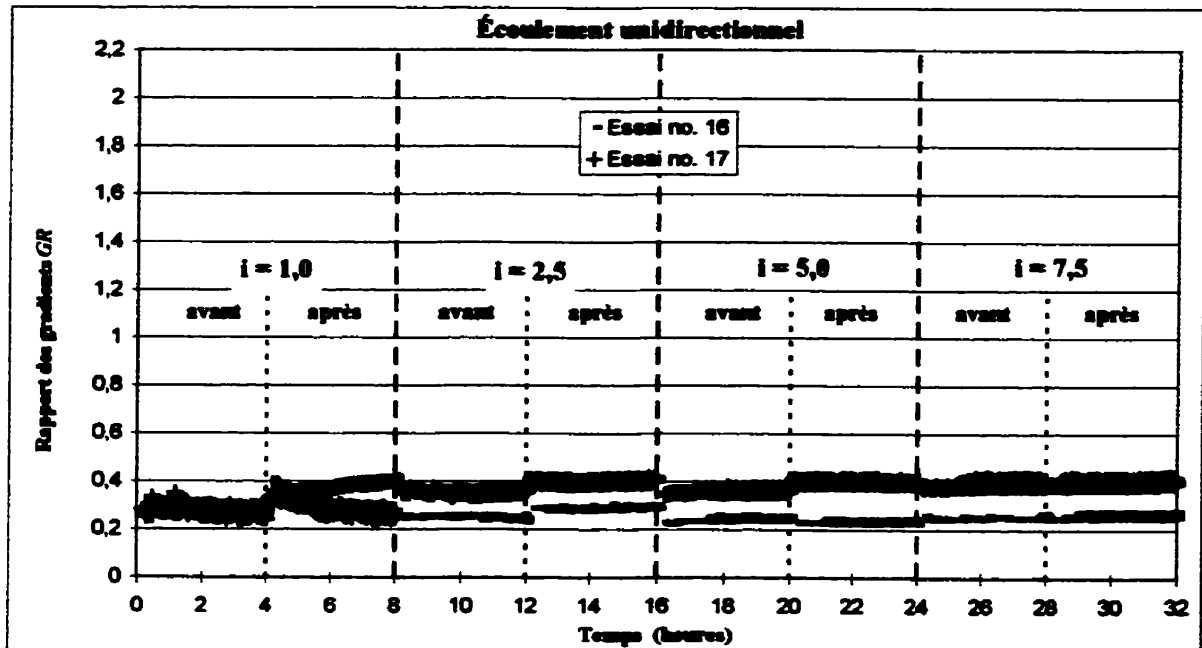


Figure C.42 Évolution du rapport des gradients pour les systèmes NTP-I (essai 16) et T-I (essai 17)

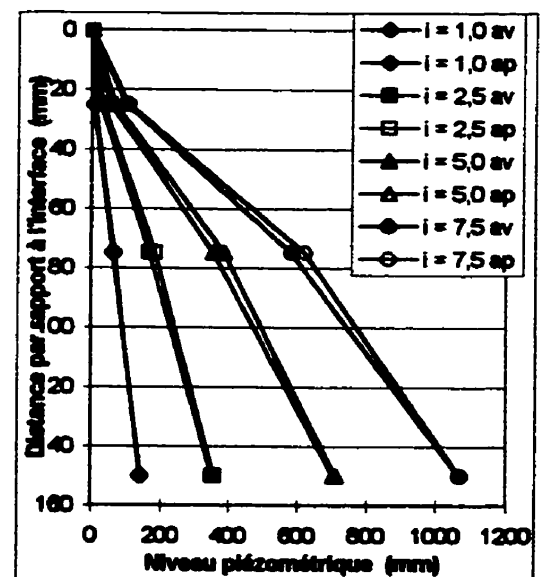
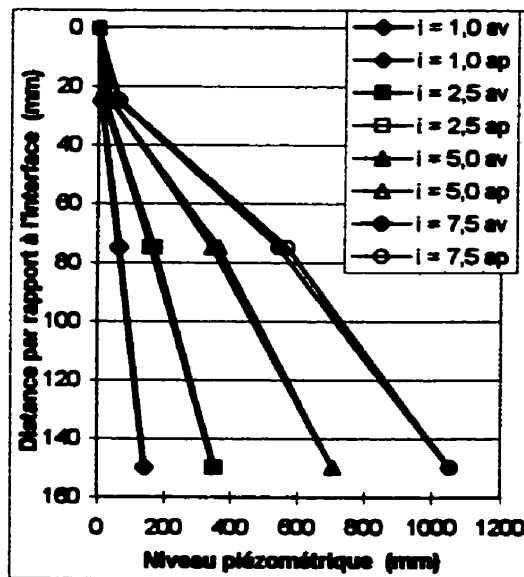


Figure C.43 Distribution des pressions dans le sol I pour les essais no. 16 et 17

C.5.5 Géotextile T

Les écoulements alterné et unidirectionnel ascendant imposés au système T-I ont entraîné le lessivage d'une importante quantité de particules, soit $3\,296\text{ g/m}^2$. Il faut noter que la masse des particules ayant traversé le géotextile inférieur ($2\,144\text{ g/m}^2$) est environ deux fois plus élevée que la masse des particules qui ont migré à travers le géotextile supérieur ($1\,152\text{ g/m}^2$). Le géotextile T comporte une ouverture de filtration qui est de la même dimension que les plus grosses particules du sol instable. Il se produit alors un lessivage d'un grand nombre de particules lors de la mise en place de l'échantillon de sol. La figure C.40 présente le tassement subit par le sol I au cours de l'essai no .17. Le tableau 4.4 montre que la contrainte de confinement initiale de 200 kPa n'occasionne qu'un tassement initial de $9,81\text{ mm}$. La quantité de particules ayant traversé le géotextile inférieur lors de la mise en place du sol aurait dû entraîner un tassement initial plus grand. Le fait que le système a été laissé au repos une fin de semaine avant l'application de la contrainte peut être une explication. Le sol s'est alors un peu compacté sous son propre poids, ce qui a entraîné un tassement moins grand lors de l'application du confinement.

La figure C.41 b indique la formation d'une zone plus perméable à l'interface comme en témoigne la perméabilité de l'interface largement supérieure à celle du sol. Celle-ci augmente au cours de l'essai, passant de $9,9 \times 10^{-8}\text{ m/s}$ à $1,1 \times 10^{-7}\text{ m/s}$. Cette hausse de la perméabilité du sol montre qu'il y a une migration continue des particules fines de la zone centrale vers la zone adjacente au géotextile. La perméabilité du système T-I est supérieure à celle du sol I et elle augmente progressivement de $1,0$ à $1,5 \times 10^{-7}\text{ m/s}$, ce qui suggère un lessivage continu des particules du sol I à travers le géotextile T. Le rapport GR_{ASTM} est relativement constant au cours de l'essai no. 17. Il est généralement égal à $0,4$ à l'exemption du premier gradient où des valeurs de $0,25$ ont été mesurées.

La distribution des pressions mesurées pour le système T-I indique la présence de zones plus perméables aux extrémités et d'une zone centrale moins perméable (figure C.43 b). Tout comme pour l'essai no. 16, la démarcation entre les pentes du niveau piézométrique dans la zone centrale et dans la zone inférieure est moins marquée. De plus, il y a un écart entre les pressions mesurées avant et après l'écoulement alterné. Pour tous les gradients imposés au système, la distribution mesurée après l'écoulement alterné montre une plus grande perte de charge dans la zone centrale ainsi qu'une plus faible perte de charge dans la zone inférieure comparativement à la distribution mesurée avant cet écoulement alterné. Finalement, l'importante quantité de particules ayant migré à travers les géotextiles permet d'attribuer le lessivage comme comportement en filtration du système T-I sous une contrainte de confinement variant entre 200 et 211 kPa.