UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE EN LABORATOIRE DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOTECHNIQUES DES RÉSIDUS MINIERS UTILISÉS COMME BARRIÈRE DE RECOUVREMENT

MONICA MONZON BOJ
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 MINÉRAL)
SEPTEMBRE 1998

© Monica Monzon Boj, 1998

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

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

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

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

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

0-612-38697-X

Canada

NOTE TO USERS

Page(s) not included in the original manuscript are unavailable from the author or university. The manuscript was microfilmed as received.

iii

This reproduction is the best copy available.

UMI

A mis padres

La escritura llega como el viento,
Està desnuda, es la tinta, es lo escrito,
y pasa como nada pasa en la vida, nada,
excepto eso, la vida ❀ Marguerite Duras

À mes parents

L'écrit ça arrive comme le vent,
c'est nu, c'est de l'encre, c'est l'écrit,
et ça passe comme rien d'autre ne passe dans la vie,
rien de plus, sauf elle, la vie ❀ Marguerite Duras

REMERCIEMENTS

En premier lieu, j'aimerais exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de recherche, Monsieur Michel Aubertin, pour avoir bien voulu me guider durant les différents étapes de ce projet. Je vous suis aussi très reconnaissante pour votre attitude toujours aimable, stimulante et positive et pour toutes les nouvelles connaissances acquises.

Je remercie également le Ministère des Ressources Naturelles (MRNQ), le CANMET et les compagnies Itec Minerais Lac Inc., pour le support financier fourni dans le cadre du programme NEDEM/MEND.

Mes remerciements vont aussi aux techniciens Antonio Gatien et Etienne Bélanger pour leur assistance précieuse, leur patience et leur disponibilité au laboratoire.

Je tiens aussi à remercier Bruno Bussière, Michel Julien et Richard Simon pour leur collaboration appréciable quand le besoin se faisait sentir, ainsi que Madeleine Guillemette, Emmanuelle Marchand pour bien avoir voulu corriger mon texte.

Mes remerciements vont également à mon futur mari Olivier Schoefs pour son soutien, sa patience et sa présence qui m'ont permis de bien finir cette étape de ma vie. Je ne voudrais surtout pas oublier de remercier mes amis pour leur amitié constante et pour les bons moments que nous passons ensembles (merci Lucette, Guy, Richard, Martin, Martin, Alkiviathes, Geneviève, Anne-Marie, Nico et tous ceux que ponctuellement j'oublie).

Finalement, une grande et sincère gratitude à ma mère et à mes frères, Adelchi et Norman, pour leur soutien moral, leur tolérance et leur amour.

RÉSUMÉ

Il existe relativement peu de méthodes pour contrôler la production de drainage minier acide (DMA) engendré par les rejets sulfureux entreposés en surface. La méthode retenue dans le présent travail consiste à étudier une technique où les matériaux réactifs sont couverts d'une barrière permettant de réduire le flux d'oxygène et le passage de l'eau. L'objectif du projet consiste à caractériser les propriétés hydrogéologiques des matériaux meubles utilisés pour la conception de cellules expérimentales utilisant des barrières de recouvrement. Ces barrières comprennent les matériaux suivants : résidu Sigma fin, résidu Sigma grossier, résidu Sigma amendé à la bentonite, un till et un Sable. Dans un premier temps, une campagne d'essais de base, dont des analyses granulométriques, des limites de consistance, des essais de compactage et un essai de consolidation, a été réalisée. Dans un deuxième temps, une évaluation du comportement hydrique des matériaux a été effectuée. Les mesures de conductivité hydraulique, les courbes de rétention d'eau et le potentiel de diffusion de l'oxygène ont servi pour cette partie de l'étude. En plus, des essais avec cycles de gel et dégel ont été réalisés afin d'évaluer le comportement des matériaux pour des conditions simulant le climat du Québec. Les résultats de ces essais nous ont permis d'étudier aussi divers modèles contitutifs, tels que le modèle de Kozeny-Carman modifié par Chapuis et Montour (1992), et un nouveau modèle appelé Kozeny-Carman Pavchich modifié (KCPM) (Aubertin et al., 1996). Pour la rétention capillaire, le modèle de van Genuchten (1980) et Fredlund et Xing (1994) ont servi à décrire les caractéristiques de rétention d'eau des matériaux, et le modèle de Kovács Modifié (Aubertin et al., 1998) a été utilisé comme modèle de prédiction. De plus, à l'aide des modèles de Mualem (1976) et Fredlund et al. (1994) on a pu estimer la conductivité hydraulique non saturée. Finalement, des essais dans des colonnes ont été réalisés pour comparer le comportement de différents systèmes de recouvrement.

Les principaux résultats obtenus lors des essais de base sont conformes aux attentes et se comparent bien aux résultats tirés de la littérature sur des matériaux similaires. Les caractéristiques hydrogéotechniques évaluées en laboratoire montrent aussi une assez bonne concordance avec les modèles utilisés. Les simulations numériques ont permis de bien évaluer le comportement hydrique du système de recouvrement. Il a en autre été constaté que la configuration du système, composé d'une couche de matériau fin entre deux couches d'un matériau plus grossier (sable) a permis d'assurer le maintien d'un haut degré de saturation dans la couche centrale et ainsi réduire le flux diffusif d'oxygène. Les résultats obtenus ont montré que l'effet de barrière capillaire est bien présent dans les couvertures. Cette étude a permis de montrer que les matériaux choisis possèdent de bonnes caractéristiques hydrogéologiques pour être utilisés lors de constructions de recouvrements multicouches. Les configurations des systèmes proposés sont également compatibles avec les objectifs visés.

ABSTRACT

Few methods exist to control the production of acid mining drainage generated by surface storage of sulfurous mine wastes. This project investigates a technology where the reactive materials are covered with a barrier, allowing a reduction of the oxygen flux and the water transfer. The objective of the project is to characterize the hydrogeological properties of the materials used for the designed construction in situ of experimental cells with covering barriers. These barriers include the following materials: fine Sigma tailings, coarser Sigma tailing, tailings with bentonite, a till and a sand. First, a basic test campaign was conducted, including granulometric analysis, consistency limits, compaction tests and consolidation tests. Secondly, the hydrogeological behavior of the material was assessed. Hydraulic conductivity measurements, water retention curves and oxygen diffusion potential were used for this section of the study. Furthermore, permeability tests with freezing and thawing cycles were performed to assess the material behavior for conditions corresponding to Quebec climate. The various test results allowed a study of a few constitutive models as well, like the Kozeny-Carman model modified by Chapuis and Montour (1992) and a new model called Kozeny-Carman Pavchich modified (Aubertin et al., 1996). As for the water retention curves, the van Genuchten (1980) model and the Fredlund and Xing (1994) model were used to describe the material water retention characteristics, and the Kovacs modified model (Aubertin et al., 1998) was used as a prediction model. Also, using the model of Mualem (1976) and of Fredlund et al (1994), we were able to estimate the unsaturated hydraulic conductivity. Finally, column tests were done to compare the behavior of different covering systems.

The main results from the basic tests are in agreement with expectations and can be compared to litterature results obtained with similar materials. The hydrogeotechnic characteristics evaluated in the laboratory show a satisfactory agreement with the models used as well. The numerical simulations allowed the correct evaluation of the hydrogeological behavior of the covering system. The systems configurated with a fine

grained material layer in between two layers of a coarser material insured a high degree of saturation within the central layer and thus reduced the oxygen diffusion flux. The results showed that the capillary barrier effect is present in the covering systems. This study has shown that the chosen materials exhibit good hydrogeological characteristics for multilayer covering set-ups. The configurations of the proposed systems are also compatible with the targeted objectives.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE ..... **IV**

REMERCIEMENTS ..... **V**

RÉSUMÉ ..... **VII**

ABSTRACT ..... **VIIII**

TABLE DES MATIÈRES ..... **X**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XIIIII**

LISTE DES FIGURES ..... **XV**

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS ..... **XVIII**

CHAPITRE 1. INTRODUCTION **1**

1.1 GÉNÉRALITÉS 1

1.2 LE DRAINAGE ACIDE 2

1.3 RÉACTIONS DU DMA 3

1.4 CONTRÔLE DU DMA À L'AIDE DE BARRIÈRES DE RECOUVREMENT 5

1.5 OBJECTIFS DU PROJET 6

CHAPITRE 2. BARRIÈRES DE RECOUVREMENT **8**

2.1 GÉNÉRALITÉS 8

2.2 COMPOSANTES DES BARRIÈRES MULTICOUCHES 9

2.3 EFFETS DE BARRIÈRE CAPILLAIRE 11

2.4 PERFORMANCE DES COUVERTURES 13

2.4.1 Simulations numériques 14

2.4.2 Modèles physiques 15

CHAPITRE 3. REVUE SUR LES PROPRIÉTÉS DES RÉSIDUS MINIERS 21

3.1 GÉNÉRALITÉS 21

3.2 RAPPEL SUR LES PROPRIÉTÉS 21

3.2.1 Propriétés de base 22

3.2.2 Propriétés hydriques 25

3.2.3 Diffusion de l'oxygène 27

3.3 MODÈLES DE PRÉDICTION 28

3.3.1 Évaluation de la conductivité hydraulique 29

3.3.2 Évaluation des courbes de rétention d'eau 31

3.3.3 Modèles de prédiction de la conductivité hydraulique non saturée 35

3.3.4 Évaluation du coefficient de diffusion 38

3.3.5 Simulations avec SEEP/W 40

CHAPITRE 4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL 53

4.1 GÉNÉRALITÉS 53

4.2 MATÉRIAUX ÉTUDIÉS 53

4.3 PROGRAMME D'ESSAIS 54

4.3.1 Analyses granulométriques 55

4.3.2 Poids spécifique des grains 56

4.3.3 Essais de compactage 56

4.3.4 Limites de consistance 56

4.3.5 Essais de consolidation 58

4.3.6 Essais de perméabilité 59

4.3.7 Essais de perméabilité avec cycles de gel-dégel 62

4.3.8 Essais de rétention d'eau 63

4.3.9 Diffusion d'oxygène 64

4.4 MODÈLES PHYSIQUES 66

4.4.1 Montage des colonnes 66

CHAPITRE 5. PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS 83

5.1 GÉNÉRALITÉS 83

5.2 ESSAIS DE BASE 83

5.2.1 Analyses minéralogiques 83

5.2.1 Densité des grains solides 84

5.2.2 Analyses granulométriques 84

5.2.3 Limites de consistance 85

5.2.4 Essais de compactage 86

5.2.5 Essais de consolidation 87

5.3 CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE 88

5.4 ESSAIS DE PERMÉABILITÉ AVEC GEL-DÉGEL 91

5.5 COURBES DE RÉTENTION D'EAU 92

5.6 COURBES DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE NON SATURÉE 97

5.7 COEFFICIENT DE DIFFUSION D'OXYGÈNE 98

5.8 ESSAIS EN COLONNES 99

CHAPITRE 6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 133

RÉFÉRENCES 136

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 Résultats des analyses minéralogiques 41
Tableau 3-2 Valeurs de la densité relative des grains solides Dr. 41
Tableau 3-3 Limites de consistance pour des rejets miniers 42
Tableau 3-4 Caractéristiques de compactage de rejets de concentrateur 42
Tableau 3-5 Caractéristiques de consolidation pour les rejets de concentrateur 43
Tableau 3-6 Conductivité hydraulique pour des rejets de concentrateur 44
Tableau 3-7 Coefficients de diffusion effectifs expérimentaux 44
Tableau 4-1 Caractéristiques de la colonne 1 71
Tableau 4-2 Caractéristiques de la colonne 2 72
Tableau 4-3 Caractéristiques de la colonne 3 73
Tableau 4-4 Caractéristiques de la colonne 4 74
Tableau 4-5 Caractéristiques de la colonne 5 75
Tableau 4-6 Caractéristiques de la colonne 6 et 7 76
Tableau 4-7 Caractéristiques de la colonne 8 77
Tableau 4-8 Caractéristiques de la colonne 9 78
Tableau 5-1 Résultats des analyses minéralogiques 102
Tableau 5-2 Résultats de densités relatives pour les échantillons étudiés 102
Tableau 5-3 Principaux résultats des analyses granulométriques 103
Tableau 5-4 Résultats des analyses de limites de consistance 103
Tableau 5-5 Résultats des essais de compactage 104
Tableau 5-6 Résultats des essais de consolidation 104
Tableau 5-7 Résultats des essai de perméabilité 105
Tableau 5-8 Résultats des essai de perméabilité avec des cycles gel-dégel 105
Tableau 5-9 Résultats de l'analyse des données expérimentales des essai de retention capillaire avec le logiciel RETC 106

Tableau 5-10 Résultats de l'analyse des données expérimentales des essai de rétention capillaire avec la méthode de Fredlund et de Kovacs modifié 107
Tableau 5-11 Résultats de l'analyse du coefficient de diffusion effectif 108

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 Les principales composantes d'un système de recouvrement 17
Figure 2-2 Courbes de rétention d'eau schématisées pour un sable et un silt 18
Figure 2-3 Courbes de conductivité hydraulique non saturée schématisées pour un sable et un silt. 18
Figure 2-4 Résultat de simulations avec SEEP/W 19
Figure 2-5 Représentation schématique des diverses étapes pour l'évaluation d'un recouvrement. 19
Figure 2-6 Les principales composantes d'un système de recouvrement 20
Figure 3-1 Fuseaux typiques de granulométrie de rejets de concentrateur 46
Figure 3-2 Courbes granulométriques des matériaux étudiés au Laboratoire de Génie Mineral à l'École Polytechnique de Montréal 47
Figure 3-3 Courbes de rétention d'eau de divers résidus minier 47
Figure 3-4 Courbes de rétention d'eau de deux sites. 48
Figure 3-5 Profils des coefficients de diffusion expérimentaux comparés aux profils des coefficients de diffusion empiriques de Collin et Rasmuson (1990) 49
Figure 3-6 Conductivité hydraulique des résidus miniers ; valeurs expérimentales comparées au modèle KCPM (Aubertin et al., 1996). 49
Figure 3-7 Courbes typiques de rétention d'eau pour des résidus minier à partir du modèle de van Genuchten (1980). 50
Figure 3-8 Courbes typiques de rétention d'eau pour des résidus minier à partir du modèle de Fredlund (1994) 50
Figure 3-9 Courbes typiques de rétention d'eau pour des résidus minier à partir du modèle de Kovács (1994). 51
Figure 3-10 Courbes typiques de la conductivité hydraulique non-saturé pour des résidus minier à partir du modèle de Fredlund (1994). 52

Figure 3-11 Courbes typiques de rétention d'eau pour des résidus minier à partir du modèle de Mualem (1976). 52
Figure 4-1 Schéma de la cellule pressurisée de type «Tempe Cell» 79
Figure 4-2 Montage expérimentale utilisé pour la mesure du coefficient de diffusion 80
Figure 4-3 a) Première section de chaque colonne, b) montage utilisés pour empecher le lessivage des particules fines. 81
Figure 4-4 Colonnes expérimentales. 81
Figure 4-5 Colonnes expérimentales des matériaux «lâches» 82
Figure 5-1 Courbes granulométriques des matériaux étudiés 109
Figure 5-2 Courbes de compactage des matériaux étudiés 109
Figure 5-3 Courbes de consolidation du résidu Sigma fin 110
Figure 5-4 Courbe de consolidation du résidu Sigma grossier 110
Figure 5-5 Courbe de consolidation du résidu Sigma amendé 111
Figure 5-6 Courbes de consolidation du Till 111
Figure 5-7 Valeurs de conductivité hydraulique pour le résidu Sigma fin 112
Figure 5-8 Valeurs de conductivité hydraulique pour les résidus Sigma grossier 112
Figure 5-9 Valeurs de conductivité hydraulique pour les résidus Sigma amendé 113
Figure 5-10 Valeurs de conductivité hydraulique pour le Till 113
Figure 5-11 Valeurs de conductivité hydraulique pour les résidus Manitou 114
Figure 5-12 Valeurs de conductivité hydraulique pour le Sable 114
Figure 5-13 Effets des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique 115
Figure 5-14 Effets des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique 115
Figure 5-15 Effets des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique 116
Figure 5-16 Effets des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique 116
Figure 5-17 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma fin 117
Figure 5-18 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma grossier 119
Figure 5-19 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma amendé 121
Figure 5-20 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon de Till 123

Figure 5-21 Comparaison des résultats des essais de rétention d'eau d'une durée de 24 heures avec ceux de 48 heures 125
Figure 5-22 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturé avec le logiciel RETC 126
Figure 5-23 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturé avec la méthode de Fredlund 126
Figure 5-24 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturé avec le logiciel RETC 127
Figure 5-25 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturé avec la méthode de Fredlund 127
Figure 5-26 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturé avec le logiciel RETC 128
Figure 5-27 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturé avec la méthode de Fredlund 128
Figure 5-28 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturé avec le logiciel RETC 129
Figure 5-29 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturé avec la méthode de Fredlund 129
Figure 5-30 Comparaison des résultats de l'analyse du coefficient de diffusion effective expérimentale et de la valeur théorique de Collin (1987) 130
Figure 5-31 Système de recouvrement avec 40 cm de Sigma grossier comme couche capillaire 131
Figure 5-32 Profils de teneur en eau et de saturation calculés pour le drainage de la colonne 1 132

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

a	Surface de la burette d'injection d'eau (L^3)
a_1, a_2	Coefficients du modèle de Kovacs (1981)
a_f	Valeur approximative de ψ_a du modèle de Fredlund et Xing (1994)
A	Surface de la burette d'injection d'eau (L^3)
AEV	Pression d'entrée d'air ("*Air Entry Value*") (aussi ψ_a) [$ML^{-1}T^{-2}$]
b_k	Paramètre du modèle Kovacs modifié
C	Coefficient de forme et de tortuosité des canaux formés par les pores
$C(\psi)$	Fonction de correction du modèle de Fredlund et Xing (1994)
C_o	Concentration de l'oxygène (ML^{-3})
C_U	Coefficient d'uniformité = D_{60}/D_{10}
c	Coefficient de forme
$D(\theta)$	Diffusivité défini par $k(\theta)\ d\psi/d\theta$
D_{10}	Diamètre des grains pour avoir 10 % de la masse avec un plus petit diamètre [L]
D_{60}	Diamètre des grains pour avoir 60 % de la masse avec un plus petit diamètre [L]
D_a	Coefficient de diffusion effectif de l'oxygène dans l'air intersticielle (L^2T^{-1})
D_a^o	Coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'air (L^2T^{-1})
D_h	Taille effective des grains [L]
D_r	Densité relative des grains solides
D_w	Coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau libre (L^2T^{-1})
D_w^o	Coefficient de diffusion effectif de l'oxygène dans l'eau intersticielle (L^2T^{-1})

e	Indice des vides
F	Flux d'oxygène ($ML^{-2}L^{-1}$)
g	Accélération gravitationnelle [LT^{-2}]
h	Charge hydraulique (ψ + élévation) [L]
h_{co}	Montée capillaire moyenne [L]
h_1	Charge au début de l'essai (L)
h_2	Charge au temps t (L)
h_{co}	Montée capillaire moyenne (L)
Δh	Différence de charge hydraulique, $\Delta h = h_1 - h_2$ (L)
I_p	Indice de plasticité
$k(\theta)$	Conductivité hydraulique calculée pour une certaine teneur en eau volumique [LT^{-1}]
$k_{\psi r}$ ou k_r	Conductivité hydraulique à la succion résiduelle [LT^{-1}]
k, k_i	Conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité (i = x, y ou z) [LT^{-1}]
k_{rel}	Conductivité hydraulique relative [LT^{-1}]
k_{sat}	Conductivité hydraulique à saturation [LT^{-1}]
k_{sc}	Conductivité hydraulique saturée calculée (modèle Childs et Collis-George, 1950) [LT^{-1}]
L	Longueur [L]
m_f	Paramètre de lissage de courbe du modèle de Fredlund et Xing (1994) relié à la teneur en eau résiduelle et la fonction de correction $c(\psi)$
m_K, a_k	Coefficients ouverts du modèle Kovacs modifié
m_v,	Constantes d'ajustement du modèle de van Genuchten (1980)
n	Porosité
n_f	Paramètre de lissage du modèle de Fredlund et Xing (1994) qui contrôle la pente au point d'inflexion de la courbe caractéristique de succion

n_v	Constantes d'ajustement du modèle de van Genuchten (1980)
P	Taux de précipitation à la surface $[LT^{-1}]$
Q	Débit d'eau sortant au bas du perméamètre $[LT^{-1}]$
S	Surface spécifique des grains en (L^2M^{-1})
S_a	Saturation due aux forces d'adhésion
S_c	Saturation due aux forces capillaires
S_e	Degré de saturation effectif
S_r	Degré de saturation
S_s	Coefficient élastique de stockage $[L^{-1}]$
T	Température en degré Kelvin
T_s	Tension de surface de l'eau $[MT^{-2}]$
t	Durée de l'essai (T)
u_a	Pression de l'air dans les pores $[ML^{-1}T^{-2}]$
u_w	Pression de l'eau interstitielle $[ML^{-1}T^{-2}]$
w_L	Limite de liquidité
w_{opt}	Teneur en eau à l'optimum Proctor
w_p	Limite de plasticité
y	Variable d'intégration représentant le logarithme de la succion
z	Profondeur (L)
α	Constante du modèle de van Genuchten (1980) qui représente l'inverse de ψ_a
α_k	Coefficient de forme du modèle de Kovacs (1981)
β_1, β_2	Exposants du modèle de Kovacs (1981)
γ_w	Poids volumique de l'eau $[ML^{-2}T^{-2}]$
γ_d	Poids volumique sec $[ML^{-2}T^{-2}]$
γ_s	Poids volumique du sol $[ML^{-2}T^{-2}]$
μ_w	Viscosité absolue de l'eau $[MT^{-1}L^{-1}]$
θ	Teneur en eau volumique $[L^3L^{-3}]$

θ_e	Teneur en eau réduite [L^3L^{-3}]
θ_r	Teneur en eau volumique résiduelle [L^3L^{-3}]
θ_s	Teneur en eau volumique à saturation [L^3L^{-3}]
ρ_w	Masse volumique de l'eau [ML^{-3}]
$\rho_{d\ opt}$	Masse volumique sèche à l'optimum Proctor [ML^{-3}]
σ	Contrainte totale [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ	Pression négative ou succion [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_{90}	Pression exercée pour une saturation de 90 % [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_a	Pression d'entrée d'air ("*Air Entry Value*") [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_x	Succion au point x d'une courbe caractéristique de succion schématisée [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_j :	Succion correspondant au point milieu de l'intervalle j_{CC} (modèle Childs et Collis-George, 1950) [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_r	Pression (ou succion) résiduelle [$ML^{-1}T^{-2}$]

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

1.1 Généralités

Le contexte géologique québécois est très favorable à l'activité minière. Le Bouclier canadien, composé de roches ignées et métamorphiques, renferme des gîtes polymétalliques et aurifères (dans les provinces Supérieur et Churchill), d'importants dépôts ferrifères (provinces Churchill et Grenville), ainsi que quelques sites de magnétite titanifère et de pierres de taille telles le granite et l'anorthosite (province de Grenville). Pour leur part, les Basses-Terres du Saint-Laurent, qui sont principalement formées de grès quartzifères et de calcaire, constituent une importante source de pierre de taille, de granulats, de pierre de ciment et de chaux. Enfin, la chaîne des Appalaches, constituée de roches sédimentaires, volcaniques et métamorphiques, enferme des gîtes d'amiante, des dépôts polymétalliques et des gisements de cuivre porphyrique.

L'apport de l'industrie minière à l'ensemble de l'économie du Québec est très important. En 1996, la valeur des expéditions minérales du Québec a atteint 3 312 M$ selon les données préliminaires et l'investissement total de l'industrie minérale est estimé à 1 065 M$ (Anon., 1997).

Les opérations minières ont toutefois provoqué, au fil des ans, des effets négatifs importants sur l'environnement de certaines régions du Québec, où l'activité minière peut constituer la principale source de pollution. Ces effets se font sentir au niveau de la contamination de l'air (poussières, SO_2, etc.) , du sol (décapage, matériaux contaminés, etc.) et de l'eau de surface ou souterraine (réactifs chimiques, métaux lourds, etc.).

Selon un inventaire récent du Ministère de ressources naturelles du Québec (MRNQ), 30% de la superficie des 336 aires d'entreposage de rejets miniers est constituée de résidus potentiellement générateurs d'eaux acides, principalement sous forme de rejets des usines de concentration du minerai. Ce type de résidus couvre 45% de la superficie totale des aires présentes en Abitibi; ceci représente près de 3275 hectares, soit plus de 85% du total des sites acides répertoriés au Québec (Marcotte, 1996). Conséquence malheureuse de nombreuses années de pratiques inadéquates, on peut identifier dans le nord-ouest du Québec plusieurs lacs et rivières qui ont été affectés, de façon peut-être irrémédiable (Fortin, 1982), suite à leur contamination par diverses substances polluantes (solides en suspension, effluents acides, métaux lourds, etc.).

1.2 Le drainage acide

Le drainage rocheux acide (DRA) peut provenir de sources naturelles aussi bien que d'endroits où les roches sulfureuses ont été exposées en raison de travaux de génie civil, d'activités minières ou autres (SRK, 1991).

Les rejets résultant d'une exploitation minière comprennent notamment le mort-terrain produit par le décapage et l'excavation de la surface, les stériles issus des opérations minières et les rejets de concentrateur. Ces derniers sont généralement entreposés à l'air libre, dans des parcs à résidus miniers où il y a, dans certains cas, formation de lixiviats acides dans la zone vadose. Au Québec, on compte 103 sites d'accumulation de résidus miniers encore utilisés, dont le quart seraient potentiellement générateurs de drainage minier acide (DMA).

Le DMA peut se manifester partout où la roche (ou les résidus) qui contient des minéraux sulfurés, tels les sulfures de fer comme la pyrite (FeS_2) et la pyrrhotite ($Fe_{1-x}S$), est en contact avec l'air et l'eau. La qualité et le taux de génération de DMA dépendent

des réactions chimiques et biologiques à l'origine de la production d'acide. La principale menace du DMA est qu'il favorise la libération de métaux lourds toxiques qui passent en solution avec la baisse du pH.

La formation d'eaux acides se manifeste d'abord par une baisse du pH et une génération de sulfates. Lorsque le milieu commence à s'acidifier (pH < 4.5), le soufre des minéraux passe à un degré supérieur d'oxydation et, en présence de fer aqueux instable, provoque la précipitation du fer ferrique avec formation d'hydroxydes. Lorsque le pH descend en deçà de 3.5 environ, le fer ferrique demeure en solution et peut oxyder les sulfures de fer directement. L'acidification de l'eau a en autre pour effet de faire passer en solution des fortes concentrations de métaux (e.g. Ritcey, 1989)

Les principaux facteurs qui influencent le taux de production d'acide sont (SRK, 1991) :
le pH;
la température;
la quantité d'oxygène dans la phase gazeuse (si la saturation est incomplète);
la concentration d'oxygène en phase aqueuse;
le degré de saturation en eau;
l'activité chimique de Fe^{3+};
la surface du sulfure de métal exposé;
la granulométrie;
l'écoulement de l'eau.

1.3 Réactions du DMA

On peut illustrer les réactions de la production d'acide en examinant l'oxydation de la pyrite consideré comme le composé sulfureux le plus répandu (Kleinmann et al., 1981) :

La première réaction est l'oxydation lente de la pyrite, dans une solution presque neutre, en présence d'oxygène :

$$FeS_2 + \frac{7}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+ \qquad (1.1)$$

Le milieu devient alors de plus en plus acide. On assiste aussi à la transformation de fer ferreux en fer ferrique :

$$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + \frac{1}{2}H_2O \qquad (1.2)$$

L'équation 1.3 entraîne ensuite la précipitation du fer ferrique sous forme d'hydroxyde. Des ions H^+ sont ainsi produits et acidifient encore plus le milieu.

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_{3(S)} + 3H^+ \qquad (1.3)$$

L'équation 1.4 se produit lorsque le pH baisse sous une valeur approximative de 3,5; le fer ferrique reste en solution et oxyde directement le minéral sulfureux entraînant un phénomène cyclique et rapide qui implique les réactions (1.2) et (1.4). Elles produisent de grandes quantités d'acide.

$$FeS_{2(s)} + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ \qquad (1.4)$$

Certaines bactéries, telles le *thiobacillus ferrooxydans*, peuvent faciliter la production de DMA en accélérant la cinétique de certaines des réactions précitées (notamment la réaction (1.2)). Ce phénomène est surtout important lorsque le milieu est déjà acide, soit avec un pH autour de 3 à 4.

Comme on le voit avec les équations, la production de DMA requiert la présence de sulfure de fer, d'eau et d'oxygène. C'est en contrant l'interaction entre ces éléments que l'on peut réussir à limiter la production d'acide.

1.4 Contrôle du DMA à l'aide de barrières de recouvrement

Parmi les solutions de contrôle du DMA disponibles, l'installation de barrières de recouvrement semble une des plus pratiques. De telles barrières permettent de restreindre le passage de l'eau et/ou de l'oxygène dans les résidus réactifs et limiter les autres problèmes qui en découlent (Aubertin et al. 1993, 1995).

Divers matériaux peuvent servir à la conception de telles couvertures, selon leur disponibilité dans les environs et les conditions du site. En raison de leur disponibilité et surtout de leur durabilité éprouvées, les barrières de recouvrement constituées de matériaux géologiques semblent les mieux en mesure de résister aux épreuves du temps.

Les barrières de recouvrement peuvent être simples (monocouches) ou complexes (multicouches). Toutefois, on reconnaît usuellement qu'une barrière simple, formée d'une seule couche de sol fin, n'a qu'une efficacité restreinte compte tenu de la difficulté d'assurer son intégrité à long terme en dépit des attaques biologiques (pénétration des racines, creusement de terriers) et des effets climatiques (mouvements de la nappe phréatique et de la frange capillaire, cycles de mouillage-séchage dans la zone vadose, cycles de gel-dégel, etc.). Il est maintenant communément admis qu'il s'avère plus efficace et plus rentable d'utiliser un système de recouvrement complexe (e.g. McMullen et al., 1997). Dans ce cas, chaque couche de la barrière multicouche a une fonction spécifique afin d'en assurer la stabilité et la protection contre l'eau et l'oxygène à long terme et de favoriser le retour du site à un état naturel (SRK, 1991).

La configuration typique préconisée pour les barrières de recouvrement sur les rejets de concentrateur devrait typiquement comprend habituellement une couche de surface servant à la croissance de plantes et à la rétention de l'humidité, une couche de protection contre l'érosion profonde et contre les intrusions biologiques, une couche drainante, une couche de matériau fin peu perméable qui servira à limiter l'infiltration de l'eau et à empêcher le passage de l'oxygène et une couche de support non capillaire (Aubertin et Chapuis, 1991; Aubertin et al., 1995). L'épaisseur de chacune des couches du système dépend alors de la nature et des propriétés hydriques des matériaux.

1.5 Objectifs du projet

L'objectif du projet est d'évaluer, dans des conditions de laboratoire, les propriétés des divers matériaux meubles utilisés pour construire des cellules expérimentales in situ dans lesquelles des recouvrements multicouches ont été installés.

L'idée principale à la base de ce projet est que les résidus miniers non générateurs de DMA sont des matériaux fins ayant une conductivité hydraulique relativement faible et montrant des caractéristiques de succion permettant de créer un effet de barrière capillaire dans un système de recouvrement multicouche. Dans cette étude, des rejets de concentrateur (ou résidus miniers) sont principalement utilisés comme couche de faible perméabilité et de forte rétention capillaire.

Ce projet vise plus spécifiquement à caractériser les propriétés hydrogéologiques des matériaux meubles utilisés pour la conception des cellules expérimentales comprenant des barrières de recouvrement. Pour connaître les caractéristiques des matériaux utilisés, une campagne d'essais de base dont des analyses granulométriques, des limites de consistance, des essais de compactage et consolidation, ont été effectués. Une évaluation

de la conductivité hydraulique en fonction de l'indice des vides, la mesure des courbes de rétention d'eau et une détermination des coefficients de diffusion de l'oxygène ont aussi été effectués. Finalement, des modèles physiques pour étudier le comportement hydrique des systèmes de recouvrement ont été montés.

Le présent mémoire se divise en six chapitres. Suite à l'introduction, le chapitre 2 trace un portrait global des principes sous-jacents à la conception des systèmes de recouvrement avec effets de barrière capillaire. On y présente en détail la structure des systèmes de recouvrement, la fonction de chacune des couches, les divers matériaux employés et certains aspects connexes.

Le chapitre 3 débute par un bref rappel sur les propriétés hydrogéotechniques des résidus miniers et autres matériaux meubles analogues qui pourraient être employés comme couche à forte rétention capillaire dans des barrières de recouvrement. Ensuite, une description succincte des modèles utilisés lors de cet étude est présentée.

Le chapitre 4 porte sur la procédure expérimentale utilisée pour les divers essais, tels que les analyses granulométriques, les limites de consistance, les essais de compactage, les essais de consolidation, les essais de perméabilité, les essais de rétention capillaire, les essais de diffusion d'oxygène et le montage des colonnes.

Le chapitre 5 présente les résultats obtenus suite au programme expérimental ainsi qu'une analyse de ces résultats. Finalement, les conclusions et les recommandations suivent.

CHAPITRE 2 - BARRIÈRES DE RECOUVREMENT

2.1 Généralités

Les barrières de recouvrement mises en place lors de la fermeture de sites d'entreposage de rejets peuvent servir à diverses fonctions. Elles constituent une composante importante dans le processus de contrôle du mouvement des fluides (liquides et gaz) cherchant à entrer ou à sortir du site d'entreposage, là où se trouvent les contaminants potentiels. En ce sens, trois principaux objectifs sont à respecter lors de la conception de telles couvertures : 1- empêcher le contact entre les rejets (matériaux contaminés et/ou potentiellement toxiques) et la surface environnante, 2- réduire l'infiltration de l'eau vers les résidus, et 3- contrôler la migration des gaz hors du site (comme le méthane dans les décharges de déchets domestiques) ou vers l'intérieur du site (tel l'oxygène dans les résidus miniers producteurs d'eaux acides). Ces recouvrements peuvent aussi remplir d'autres fonctions, comme minimiser l'érosion par l'eau et le vent, assurer l'esthétique du site et faciliter le contrôle de l'utilisation future du terrain (Aubertin et Chapuis, 1991).

Pour contrôler la production de DMA, les barrières utilisées peuvent être composées d'un couvert aqueux (ex. : déposition en fond de lac ou inondation du parc à résidus), de matériaux synthétiques, ou de matériaux géologiques. L'utilisation de matériaux géologiques apparaît actuellement comme l'alternative la plus répandue, tant pour des raisons environnementales et sociales que pour des raisons techniques et économiques.

Tel que mentionné précédemment, les barrières de recouvrement construites à partir de matériaux d'origine géologique peuvent être simples (monocouches) ou complexes (multicouches), selon les objectifs visés. La construction de barrières simples à partir d'une couche de sol imperméable (argile, silt ou till) peut s'avérer moins onéreuse que

des barrières complexes. Cependant les barrières monocouches sont souvent d'une efficacité limitée en raison de la difficulté de maintenir le matériau à un haut degré de saturation et d'assurer son intégrité malgré la pénétration des racines et les sévices climatiques (gel-dégel, mouillage-séchage, etc.). Une couche d'une épaisseur minimale de 2 m de sol fin, recouverte d'une couche de protection contre l'érosion (végétation, lit de pierres), parait alors nécessaire afin d'obtenir un rendement acceptable, sans pour autant en assurer le succès à long terme (Aubertin et Chapuis, 1991). Il est usuellement plus efficace et plus rentable d'utiliser un système multicouche qui assurera l'intégrité du système à long terme.

2.2 Composantes des barrières multicouches

Les barrières de recouvrement multicouches typiques incluent jusqu'à cinq couches distinctes (Figure 2.1), lesquelles ont une ou des fonctions spécifiques. Une brève description des cinq couches constituant les barrières de recouvrement complexes est présentée dans ce qui suit (Aubertin et Chapuis, 1991; Aubertin et al., 1995) ; du haut vers le bas, on retrouve :

Une couche superficielle (A)

La protection contre l'érosion peut être assurée par la végétation. Cette couche servirait à la croissance des plantes et à la rétention de l'eau; l'épaisseur de cette couche varie avec le type de végétation.

Une couche de protection (B)

Cette couche, constituée d'un matériau grossier d'une épaisseur variant de 30 à 60 cm, protège contre les intrusions biologiques et fournit une deuxième ligne de protection

contre l'érosion. On devrait utiliser ici un gravier bien étalé (GW) comprenant des cailloux. Si nécessaire, une couche filtrante devrait être placée entre ces deux premières couches de la barrière sèche.

Une couche drainante (C)

Cette couche, de 15 à 30 cm d'épaisseur, est formée d'un sable ayant une perméabilité supérieure, de 3 à 4 ordres de grandeur, à celle de la couche de matériau fin sous-jacente. Elle sert de barrière non capillaire qui réduit les pertes d'humidité dans la couche capillaire. Cette couche drainante sert aussi à contrôler l'eau qui s'infiltre par la surface, et à l'évacuer latéralement le long des surfaces inclinées. Les deux couches précédentes (B et C) peuvent être combinées en une seule lorsque les caractéristiques des matériaux disponibles sont adéquates.

Une couche à rétention capillaire peu perméable (D)

Cette couche, qui constitue en fait la véritable barrière hydrogéologique dans le système de recouvrement, a pour principale fonction de minimiser les infiltrations d'eau et le passage de l'oxygène. Elle favorise le drainage de l'eau dans la couche C et aussi l'accumulation de l'eau dans les couches A et B, ce qui peut être bénéfique pour la végétation et l'évapotranspiration. Le système devrait donc retenir l'eau dans les couches A et B, l'enlever par évapotranspiration et/ou l'évacuer latéralement. Grâce aux effets capillaires, l'eau interstitielle contenue dans la couche à texture fine va être maintenue en place par une pression négative et ainsi retenue si les couches supérieures et sous-jacente sont constituées de matériaux à granulométrie plus grossière. En maintenant saturée cette couche peu perméable, on empêche de ce fait l'oxygène de s'infiltrer dans les couches inférieures, ainsi que la fissuration due au dessèchement.

Le type de matériau meuble qui semble le mieux approprié pour construire une zone de rétention capillaire est un matériau silteux de faible plasticité.

Une couche non capillaire (E)

Dans la plupart des barrières de recouvrement, il est nécessaire d'installer une couche de support. Cette couche sert aussi de barrière contre la remontée d'eau contaminée des résidus vers la couche de matériau fin et elle contribue également à maintenir la couche de matériau fin dans un état saturé créant ainsi un effet de bris capillaire. Comme sa perméabilité est considérablement réduite lorsqu'elle atteint son niveau de teneur en eau résiduelle. Cette couche contribue à réduire l'infiltration.

2.3 Effets de barrière capillaire

Dans des conditions saturées, la pression interstitielle est positive et la valeur de la conductivité hydraulique peut être considérée comme une constante pour un matériau donné. Dans un matériau non saturé, l'eau est maintenue dans les pores par des forces capillaires causées par la tension de surface qui se crée à l'interface eau-air. La pression interstitielle évolue alors en fonction du degré de saturation S_r, ou de la teneur en eau volumique θ ($\theta = n\ S_r$, où n est la porosité). Comme la tension capillaire varie avec le rayon de courbure du ménisque à l'interface eau-air, les petits pores, qui induisent une courbure plus marquée, créent une tension capillaire plus forte. De ce fait, on observe que la relation θ et la succion ψ dépend de la tailles de pores ; celle-ci dépend donc du type de sol (voir fig. 2.2). Les matériaux fins ayant des pores plus petits, on y retrouve souvent des forces capillaires plus grandes et plus d'eau peut donc y être retenue (θ plus élevée).

La relation ψ–θ d'un matériau meuble, souvent appelée courbe de rétention d'eau ou courbe caractéristique de succion, peut être utilisée pour estimer les conditions d'écoulement non saturées (e.g. Brooks et Corey, 1964 ; Mualem, 1986). Cette relation s'apparente à la courbe de remontée capillaire de l'eau dans un sol homogène au-dessus de la nappe phréatique, dans la zone vadose (Freeze et Cherry, 1979 ; Kovács 1981). Divers modèles mathématiques permettent de décrire (e.g. van Genuchten et al., 1991 ; Fredlund et al., 1994), ou même de prédire ces courbes à partir de propriétés de base du matériau (e.g. Kovács, 1981 ; Aubertin et al., 1995). Dans ces modèles, certaines valeurs particulières de la courbe ψ–θ (figure 2.2) sont souvent utilisées, notamment ψ_a (ou AEV pour «*Air Entry Value*») qui représente la pression d'eau nécessaire pour vaincre la tension capillaire exercée dans les pores les plus gros et provoquer le début de la désaturation, ψ_r qui est la pression associée à la teneur en eau résiduelle, et θ_r, la valeur de la teneur en eau volumique résiduelle, quelques fois appelée teneur d'adhésion. La valeur de la succion ψ peut être présentée en unités de pression (kPa, psi), en hauteur d'eau (m, cm), ou en unités logarithmiques pF (98,1 kPa ≡ 14,23 psi ≡ 1000 cm ≡ 3 pF ; Smith, 1990).

Lorsque $|\psi| \geq |\psi_a|$, on a $\theta < n$ (ie $S_r < 100\%$) ; cela entraîne que $k_u \leq k_s$ (où k_s est la valeur de la conductivité hydraulique à l'état saturé ; k_u est utilisé pour le non saturé). C'est-à-dire, au moment où θ devient plus petit que n, une partie du volume initialement disponible pour l'eau, est occupée par l'air, ce qui a pour conséquence de diminuer l'espace disponible pour l'écoulement de l'eau et ainsi de diminuer la conductivité hydraulique. Lorsqu'on utilise la loi de Darcy pour les écoulements non saturés, la valeur de k doit donc être exprimée en fonction de ψ (ou de θ). Deux exemples d'une telle relation entre k et ψ sont montrés schématiquement à la figure 2.3 (inspirée de Freeze et Cherry, 1979) pour un silt et un sable.

Il y a une certaine similitude entre la forme de la relation ψ–θ et celle de la relation ψ-k, tel qu'on peut le voir aux figures 2.2 et 2.3. Sur la figure 2.3, on peut constater que la valeur de k diminue progressivement à mesure que la pression d'eau baisse (succion plus marquée) ou que la teneur en eau volumique est réduite. Lorsqu'on compare des matériaux de granulométrie différente (un silt et un sable par exemple), on constate que le sol fin est moins perméable que le sol grossier à l'état saturé. Toutefois, l'inverse peut devenir vrai pour certaines conditions de succion : le sable se drainant plus aisément, la chute de la valeur de k_u est plus marquée avec un sable qu'avec le silt. Ceci implique que sous certaines conditions, c'est le matériau le plus grossier qui peut s'avérer le moins perméable. Ce phénomène contribue à l'effet de barrière capillaire dans un système bicouche en réduisant l'écoulement de l'eau d'un matériau fin placé sur un matériau grossier. Ceci favorise la rétention d'eau dans la couche supérieure d'un tel système.

Grâce à cet effet de barrière capillaire, l'infiltration de l'eau à partir de la surface dans le système de recouvrement multicouche incliné (voir figure 2.1) produira un écoulement latéral dans la couche C (supposée saturée) et aussi dans la couche D si celle-ci se maintient en condition non saturée, car $(k_u)_E < (k_u)_D$ (la couche E étant supposée non saturée, avec un S_r faible) (Aubertin et al., 1995).

2.4 Performance des couvertures

Une fois connues les caractéristiques hydriques (k-θ–ψ) des matériaux, la performance des couvertures multicouches pour prévenir l'acidification s'évalue en fonction de la stabilité géochimique du milieu. En ce sens, on peut obtenir des renseignements sur l'efficacité des couvertures en utilisant les résultats des simulations numériques et les résultats des essais sur des modèles physiques.

2.4.1 Simulations numériques

Il existe sur le marché plusieurs logiciels qui servent à modéliser le comportement hydrique des matériaux meubles. On retrouve dans la littérature plusieurs travaux qui ont fait appel à certains de ces logiciels afin de mieux connaître le comportement des couvertures comme barrières de recouvrement. Un des premiers exemples de résultats de modélisation a été présenté par SRK (1987). Il s'agit de la modélisation de réduction de production d'acide qui a été calculée à l'aide du modèle PERAR pour certains types de couvertures simples. Il existe d'autres modèles tels : HELP (Hydrological Evaluation of Landfill Performance) qui peut estimer les paramètres hydrogéologiques et le bilan hydrique d'une large variété de barrières de recouvrement (Wright et al. 1987), TRUST qui a été utilisé pour l'évaluation de l'efficacité des couvertures complexes (Collin, 1987 ; Collin et Rasmuson, 1990), et SEEP/W (GEOSLOPE 1994) qui a servi à modéliser l'écoulement vertical non saturé dans des systèmes bicouches et tricouches (Aachib, 1997 ; Bussière et al. 1995; Crespo, 1994; Yanful et Aubé, 1993) et plus récemment l'écoulement de l'eau dans une barrière de recouvrement multicouche inclinée (Bouchentouf, 1996 ; Aubertin et al., 1997) Les figures 2.4 et 2.5 montrent des exemples de résultats de simulations avec SEEP/W pour de tels systèmes. En général, les résultats des modélisations récentes sont conformes aux observations réalisées en laboratoire et sur le terrain et confirment le potentiel des systèmes de recouvrement multicouches en ce qui concerne l'infiltration et la rétention d'eau. Pour ce qui est de la migration d'oxygène, le flux à travers la barrière peut être estimé à partir de modèles analytiques ou numériques (Aachib et al., 1993 ; Aubertin et al., 1995). Certains résultats plus spécifiques seront montrés ultérieurement dans le mémoire.

2.4.2 Modèles physiques

Les simulations avec modèles mathématiques sont utiles pour étudier de façon paramétrique et pour comparer les divers types de couvertures envisagées. Toutefois, on ne peut déterminer l'efficacité réelle des couvertures qu'en étudiant le comportement de celles actuellement existantes sur le terrain. Malheureusement, les résultats disponibles ne sont pas nombreux. Jusqu'à récemment, il n'y avait que peu de couvertures de sol effectivement en usage. Une de ceux-ci est le site «Rum Jungle», en Australie. Les mesures prises avant et après sa réhabilitation, sur les amas ou à proximité, révèlent que la couverture a fait diminuer l'infiltration dans une certaine mesure. Cependant, l'importance de cette réduction reste incertaine (SRK, 1991).

Les résultats obtenus sur les parcelles expérimentales du site Waite-Amulet semblent aussi montrer les avantages techniques des barrières de recouvrement multicouches (St-Arnaud et al., 1996).

D'autres travaux plus récents sur le sujet permettent de mieux comprendre le comportement de telles couvertures; mentionnons les résultats des caractéristiques de rétention de couvertures multicouches ainsi que les effets de barrière capillaire étudiés à l'aide de modèles physiques en laboratoire (Aubertin et al., 1995 ; St-Arnaud et al., 1996; Aachib, 1997), les résultats de parcelles expérimentales in situ (Aubertin et al., 1997), ainsi que le résultats obtenus sur un site à grande échelle (Ricard et al., 1997).

La conception d'un recouvrement multicouche implique, comme l'indique la procédure schématisée présentée à la figure 2.4, la cueillette de données climatiques, l'évaluation des propriétés des matériaux utilisés et l'établissement d'une géométrie de départ. Les propriétés importantes pour cette analyse incluent les relations $\psi - \theta$, K_u - ψ et D_e - S_r qui seront présentées dans les chapitres à venir. Il faut aussi évaluer d'autres propriétés

importantes des matériaux telles leur composition minéralogique, la courbe de consolidation et la résistance mécanique. L'évaluation de conditions hydriques, le flux diffusif de l'oxygène à travers la barrière et les réactions chimiques dans les rejets se font à l'aide de modèles de calcul numérique. Les modèles numériques sont calibrés à partir des propriétés de chacun des matériaux employés et validés à partir d'essais sur modèles physiques instrumentés en laboratoire ou in situ (Aubertin et al 1995, 1996). Une fois validés ces modèles numériques peuvent être utilisés pour tenter de prédire le comportement à grande échelle et à long terme d'un recouvrement réel.

Ce mémoire présente une synthèse de la composante laboratoire d'une étude sur la performance de couvertures multicouches décrite au chapitre précédent. Parallèlement, la composante terrain comprend une étude des comportements de couvertures à partir de parcelles expérimentales in situ (Aubertin et al., 1997). Le travail de laboratoire est nécessaire pour caractériser les matériaux et pour valider les modèles de calcul.

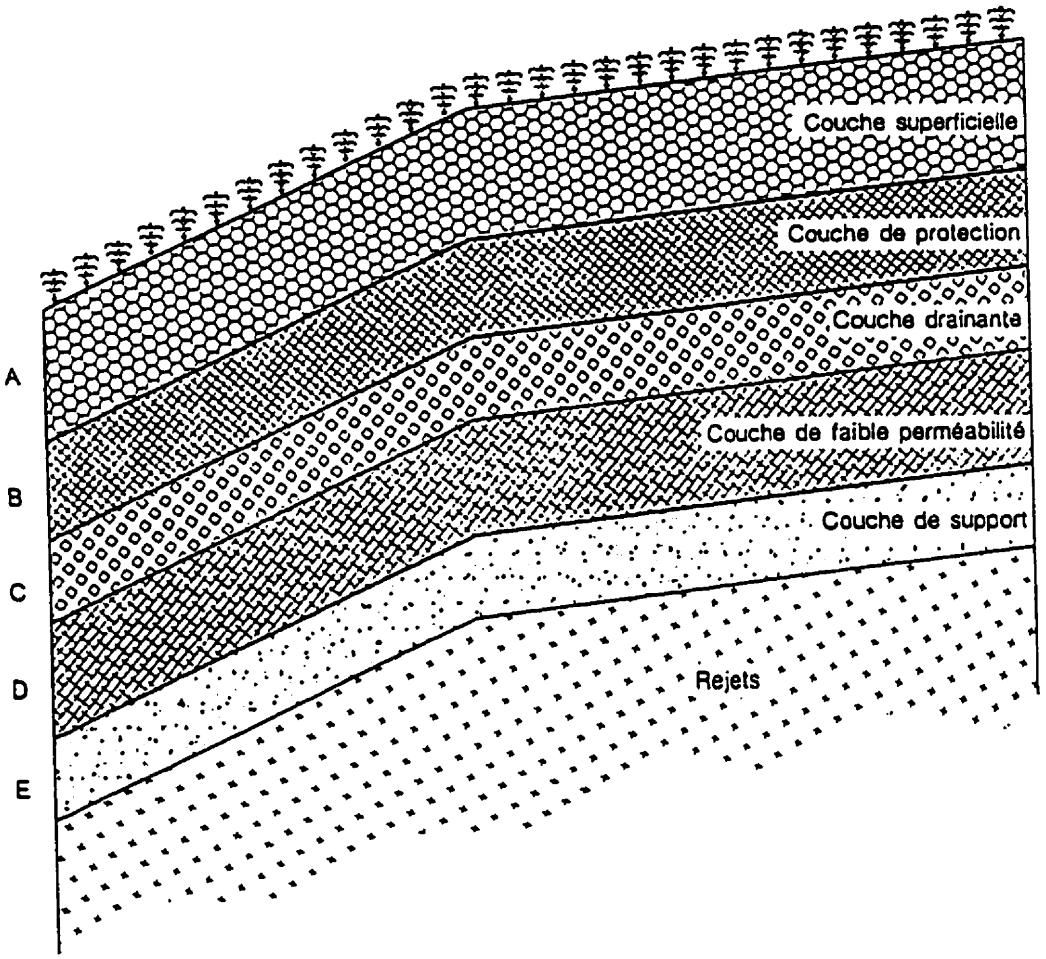


Figure 2-1 Les principales composantes d'un système de recouvrement (Aubertin et al., 1995)

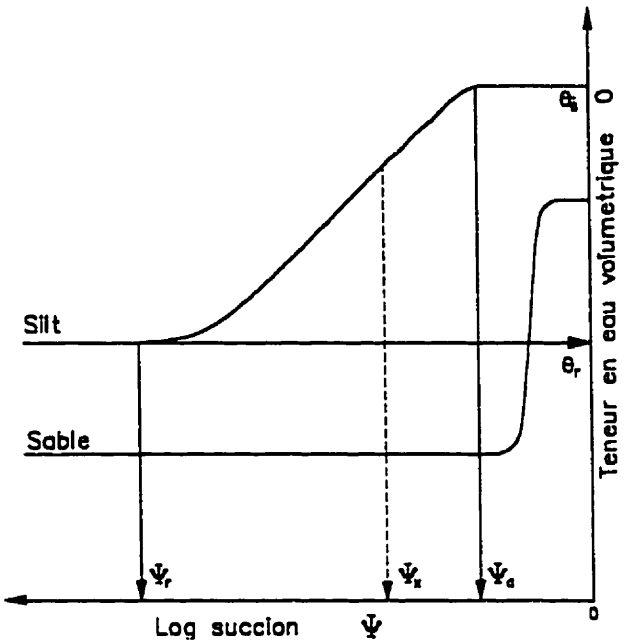


Figure 2-2 Courbes de rétention d'eau schématisées pour un sable et un silt

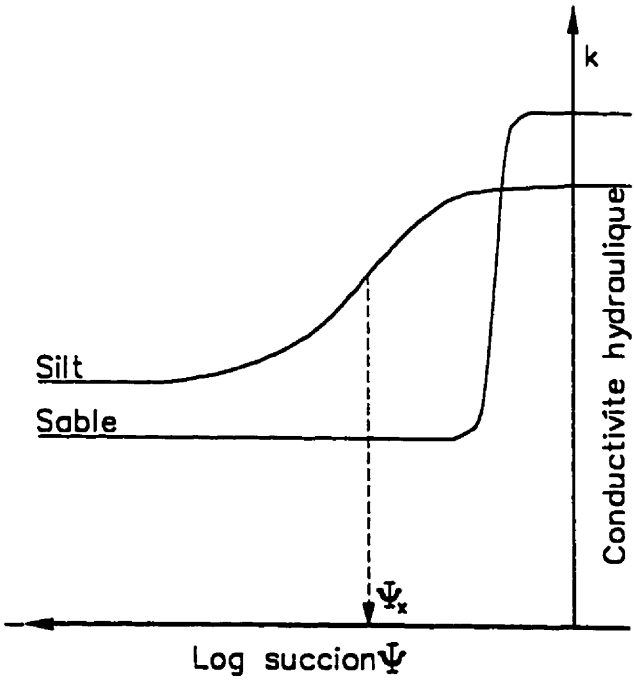


Figure 2-3 Courbes de conductivité hydraulique non saturée schématisées pour un sable et un silt.

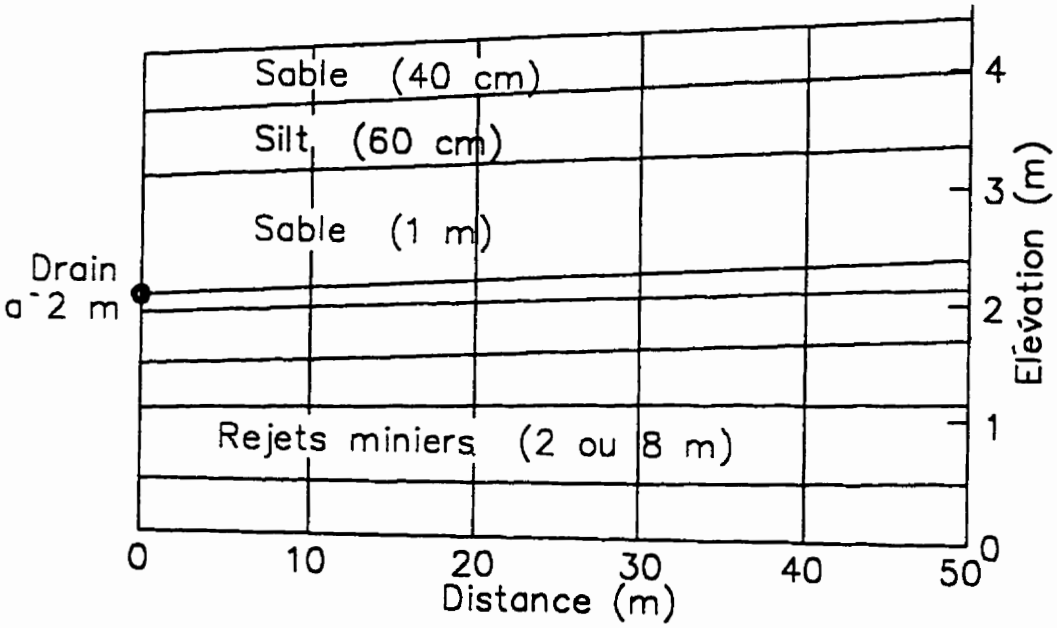


Figure 2-4 Système multicouche modélisé avec le logiciel SEEP/W (Aubertin et al., 1997)

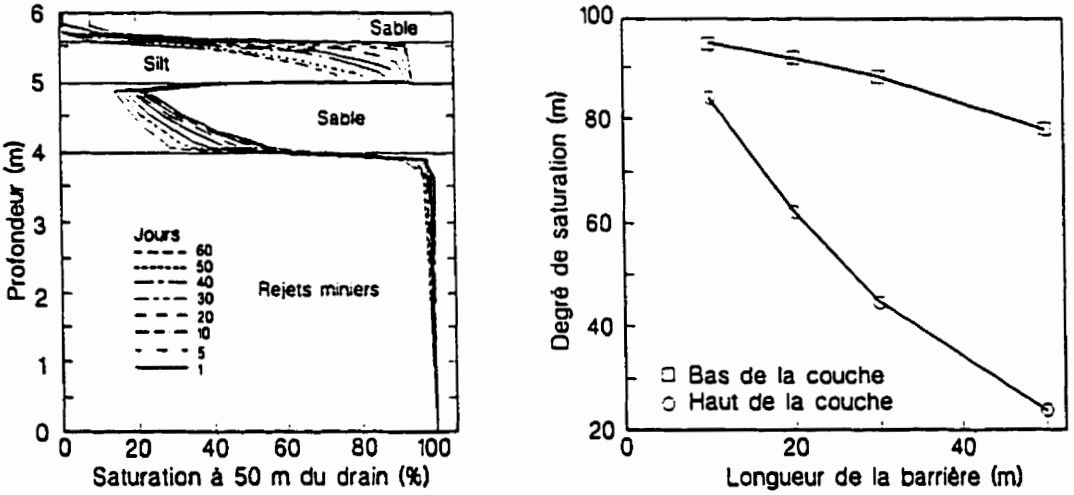


Figure 2-5 Résultat de simulations avec SEEP/W (Aubertin et al., 1997)

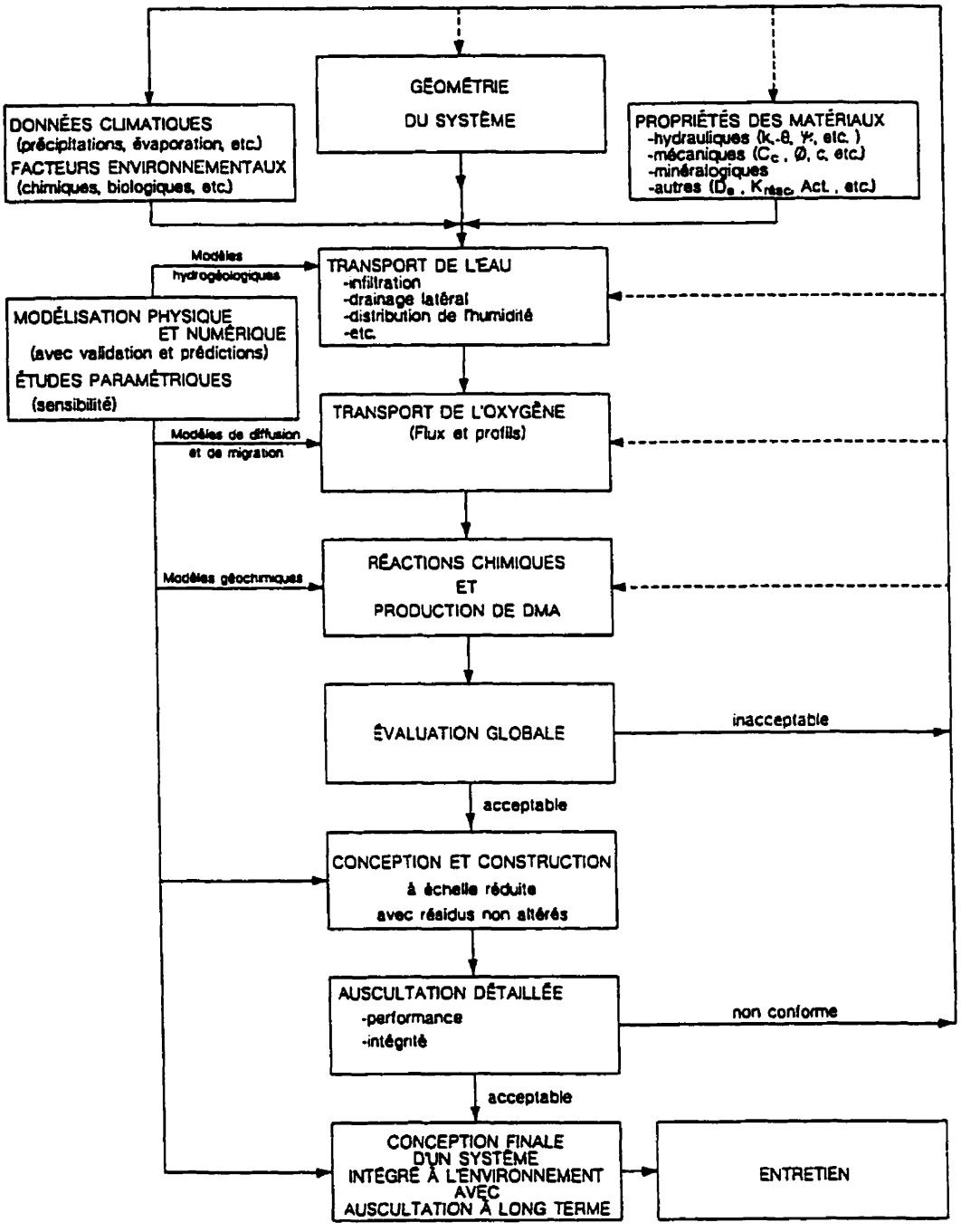


Figure 2-6 Représentation schématique des diverses étapes pour l'évaluation d'un recouvrement (Aubertin et al., 1996).

CHAPITRE 3 - REVUE SUR LES PROPRIÉTÉS DES RÉSIDUS MINIERS

3.1 Généralités

Une des solutions envisagées pour limiter la production du DMA est de recouvrir les rejets réactifs par une barrière constituée de matériaux meubles afin d'empêcher le passage de l'eau et de l'oxygène. Traditionnellement, ces barrières de recouvrement sont constituées de matériaux naturels. Toutefois, ces matériaux ne sont pas toujours disponibles. Il est donc avantageux de remplacer les sols utilisés pour certaines couches par des résidus miniers qui ne sont pas générateurs de DMA. En particulier, les caractéristiques granulométriques des rejets de concentrateur de mines en roche dure font en sorte que ceux-ci pourraient être employés pour constituer la couche peu perméable et à forte rétention capillaire dans un système de recouvrement multicouche (Aubertin et al., 1993).

Dans ce chapitre, on présente d'abord un rappel des différentes propriétés physiques des résidus miniers, suivi d'une brève description des modèles utilisés pour la compréhension du comportement des matériaux dans des CEBC.

3.2 Rappel sur les propriétés

Le programme MEND/NEDEM a attribué un support financier au laboratoire d'environnement minier afin d'étudier l'efficacité de recouvrements multicouches construits à partir de rejets miniers non sulfureux en guise d'alternative au matériaux meubles d'origine naturelle. La phase I de cette étude a permis d'étudier les propriétés

hydrogéotechniques de divers résidus (Aachib et al., 1993; Bussière, 1993; Ricard, 1994; Tremblay, 1995; Aubertin et al., 1995; Kissiova, 1996, Aachib, 1997).

Le diagramme général schématisé de la procédure envisagée pour cette étude est présenté à la figure 2.4. Le protocole expérimental suivi a travers cet étude de laboratoire s'inspire de celui proposé par Collin et Rasmuson (1990). Il implique l'évaluation des caractéristiques suivantes : i) propriétés de base des matériaux (granulométrie, caractéristiques de compactage et de tassement), ii) propriétés hydriques des matériaux (conductivité hydraulique, courbes de rétention d'eau, coefficient de perméabilité non saturée), iii) coefficient de diffusion effectif de l'oxygène en fonction du degré de saturation, iv) comportement hydrique de systèmes multicouches et v) évaluation de l'efficacité des couvertures placées sur des résidus miniers réactifs. Le travail réalisé lors de la phase I a démontré qu'il était possible de concevoir un système de recouvrement multicouche avec effets de barrière capillaire, à partir de rejets de concentrateur non-générateur de DMA (Aubertin et al. 1995). Un rappel des principaux résultats est présenté dans ce qui suit.

3.2.1 Propriétés de base

Au début de cette investigation, des échantillons de résidus miniers ont été prélevés sur une trentaine de sites au Québec (Aubertin et Bussière, 1991). À la suite des analyses préliminaires effectuées (minéralogie, densité du solide, limites de consistance, sédimentométrie), une douzaine de matériaux ont été initialement retenus (Aubertin et al., 1992). Parmi ceux-ci, les rejets de trois sites ont été utilisés (Aubertin et al., 1995) soient: Bevcon, Sénator et Sigma, tous situés en Abitibi. Pour les essais de laboratoire, les matériaux du site Sénator ont été séparés en deux (selon leur origine sur le site), un premier appelé grossier et l'autre appelé fin. Ces rejets n'étaient pas générateurs de DMA, ne contenant pas d'éléments sulfureux. À ces trois matériaux s'est ajouté le matériau

provenant du site Norebec-Manitou, qui contient un assez faible pourcentage d'éléments réactifs (environ 3 % de pyrite). De plus, un cinquième matériau, provenant de Solbec-Cupra, s'est aussi ajouté. Ce dernier matériau, fortement générateur de DMA, sert de matériau de référence pour les essais en colonnes sur les recouvrements (Aubertin et al. 1995; Aachib, 1997). Les résultats des analyses minéralogiques obtenues par diffraction aux rayons X sont présentés au tableau 3.1. Les résidus non réactifs sont composés principalement de quartz, plagioclase, dolomite, chlorite, calcite, mica et tourmaline pour sigma. On peut constater que les matériaux Manitou-Barvue et Solbec-Cubra sont les seuls à contenir un certain pourcentage de sulfure de fer.

La granulométrie des rejets de concentrateur dépend principalement de la finesse de broyage. De plus, en raison du mode de déposition, les parcs à rejets de concentrateur montrent une granulométrie très hétérogène. Pour un même parc à résidus, la granulométrie dépendra donc du point d'échantillonnage. Cette hétérogénéité provient de la mise en place des rejets dans le parc: par déversement latéral en un ou plusieurs points, par déversement en un point à l'intérieur du parc ou par déversement à l'aide d'un cyclone.

La granulométrie n'est pas uniforme en raison de la ségrégation des particules (Vick, 1983; L'Écuyer et al., 1992), les particules grossières se déposant près du point de déversement formant ce que l'on appelle des plages et les particules fines se déposant vers le centre du parc. En général, pour les rejets retrouvés au Québec, le pourcentage passant au tamis #200 (< 80 μm) varie entre 50 et 85 %, et le pourcentage plus petit que 2μm se situe entre 0 et 10 % (Aubertin et Bussière, 1991). On peut voir aux figures 3.1 des fuseaux typiques représentant la granulométrie des rejets (e.g. Vick, 1983; Klohn, 1986) et à la figure 3.2 les courbes granulométriques des matériaux utilisés lors de plusieurs travaux réalisés à l'École Polytechnique au cours des dernières années (voir aussi : Bussière, 1993; Ricard, 1994; Tremblay; 1995, Kissiova, 1996).

La composition minéralogique de la roche mère contrôle la valeur de la densité des grains solides (D_r). Le tableau 3.2 présente un résumé des valeurs de D_r pour différents matériaux de diverses provenances. Normalement, on s'entend pour dire que le D_r varie de 2.4 à 4 pour les mines du Québec, avec une moyenne autour de 2.8 (Aubertin et Bussière, 1991).

Les limites de consistance des rejets de concentrateur varient selon leur granulométrie et leur minéralogie. Le tableau 3.3 présente des valeurs types de limite de liquidité w_L et de limite de plasticité w_p pour des rejets de concentrateur de différentes régions. D'après ce tableau, on remarque que pour la plupart des résidus provenant des mines en roches dures, la limite de plasticité w_p se situe entre 0 et 17 % et que la limite de liquidité w_L se situe sous 40 %.

Des essais de compactage ont aussi été réalisés sur des rejets de concentrateur par divers auteurs. Le tableau 3.4 résume les valeurs obtenues de la littérature en termes de teneur en eau optimale (w_{opt}) et de densité sèche maximale (γ_d). Les valeurs typiques de γ_d sont généralement entre 15 kN/m^3 - 21 kN/m^3 correspondant à une teneur en eau optimale de 10% - 20%. Le comportement des rejets de concentrateur, en terme de compactage, s'apparente à celui de certains sols silteux (Bussière 1993).

Des paramètres typiques issus d'essais de consolidation pour des rejets de concentrateur remaniés et homogénéisés sont présentés au tableau 3.5. Les caractéristiques habituellement considérées sont l'indice de compression C_c, l'indice de recompression C_{cr} et le coefficient de consolidation C_v. On peut dire qu'en règle générale, le C_c varie de 0.06 à 0.5 pour les rejets fins F (si plus que 70 % du matériau passe au tamis #200), de 0.08 à 0.3 pour les rejets moyennement fins MF-G (si 30 à 70 % passe au tamis #200) et de 0.02 à 0.1 pour les résidus grossiers G(si moins de 30 % du matériau passe au tamis

#200). Quant au C_{cr}, il varie généralement de 0.01 à 0.06. Enfin, le C_v varie de 1 x 10^{-3} à 5 x 10^{-2} cm^2/s pour les rejets fins, il est supérieur a 10^{-2} cm^2/s pour les rejets moyennement fins, et il peut aller jusqu'à 10^2 pour les résidus grossiers.

3.2.2 Propriétés hydriques

La conductivité hydraulique d'un matériau meuble dépend de plusieurs paramètres dont les plus importants sont la granulométrie, l'indice des vides ainsi que la minéralogie.
Le tableau 3.6 présente les valeurs de conductivité hydraulique k selon divers indices des vides, ainsi que la classification des matériaux selon USCS (Casagrande, 1948). On retrouve aussi l'appareil utilisé pour mesurer la conductivité hydraulique. En général, on remarque que les rejets fins F ont une conductivité hydraulique qui se situe entre 10^{-4} à 10^{-6} cm/s. Ceux qui sont classés moyennement fins MF-G ont une conductivité hydraulique comprise entre 10^{-3} à 10^{-7} cm/s, tandis que les rejets grossier G ont une conductivité hydraulique comprise normalement entre 10^{-2} à 10^{-4} cm/s (Bussière, 1993).

Comme on l'a vu, les effets capillaires jouent un rôle capital dans le système multicouche. Ce phénomène se produit à l'interface entre deux matériaux présentant des textures différentes (Rasmuson et Eriksson, 1987). Les propriétés hydrauliques contrôlant l'effet de barrière capillaire résident dans les relation succion-teneur en eau, $\psi(\theta)$, et conductivité hydraulique-teneur en eau, $k(\theta)$, dans deux matériaux. Sur les courbes de rétention d'eau, les deux matériaux demeurent saturés jusqu'à une pression ψ_a, en progressant dans le sens négatif des pressions (à partir de la surface de la nappe) ; ψ_a est appelée «valeur d'entrée d'air» (ou AEV). L'AEV est donc la valeur de la succion à laquelle l'air commence à entrer dans les pores les plus larges du matériau.

Les barrières de recouvrement sont construites par-dessus les résidus réactifs dont la surface est au-dessus du niveau de la nappe phréatique. Pour que le système joue pleinement son rôle, la couche construite à partir des matériaux fins doit toujours être proche de la saturation, sans qu'il y ait une alimentation d'eau régulière. Ceci est possible grâce aux forces capillaires qui se développent entre les grains solides et l'eau dans les pores (voir chapitre 2). Les principes du fonctionnement de barrières avec effets capillaires ont été décrites par Nicholson et al (1989, 1991) et Aubertin et al. (1995).

Les caractéristiques de rétention d'eau d'un milieu poreux peuvent être établies en laboratoire à l'aide de la relation entre la succion (ψ) et la teneur en eau volumique (θ). La relation θ-ψ est pratiquement identique à la relation entre la teneur en eau et l'élévation dans la zone vadose d'un matériau homogène (Freeze and Cherry, 1979; SRK, 1991).

Malheureusement, les publications qui donnent les courbes caractéristiques de succion sur les rejets miniers sont encore peu nombreuses. La figure 3.3 nous présente quelques-uns de ces résultats. Les courbes caractéristiques de ces résidus sont très différentes les unes des autres.

Certains des principaux résultats de rétention capillaire obtenus lors des travaux réalisés dans le cadre de la phase I sont illustrés à la figure 3.4. On peut voir les courbes caractéristiques de succion obtenues par des essais de laboratoire et aussi les courbes obtenues à l'aide du modèle de Van Genuchten (1980) (Ricard, 1994; Aubertin et al., 1995; Kissiova, 1996); ce modèle sera présenté plus loin.

3.2.3 Diffusion de l'oxygène

La diffusion est la tendance qu'a une substance à se distribuer uniformément à travers le volume qui lui est disponible. C'est le mouvement constant à travers l'espace des molécules de gaz qui les fait circuler complètement à travers le volume disponible. La diffusion a lieu en réponse à un gradient de concentration. Le mouvement moléculaire (ou ionique) se fait des régions à plus forte concentration vers les régions à plus faible concentration.

Le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau D_w (2.5×10^{-9} m^2/s à 25°C) est d'environ 10^4 fois plus faible que dans l'air (D_a). De plus, la concentration d'oxygène dans l'air est environ 30 fois supérieure à celle dans l'eau. Par conséquent, en l'absence d'un transport convectif, le flux d'oxygène à travers l'eau interstitielle est suffisamment faible pour ne pas être considéré comme une source importante relativement à la génération d'acide.

Plusieurs techniques expérimentales ont été utilisées pour déterminer en laboratoire le coefficient de diffusion des gaz dans des matériaux poreux partiellement saturés. Les expériences de laboratoire consistent en général à mesurer le profil de la concentration en fonction du temps ou de la profondeur, et à le comparer à des profils prédits selon certaines propriétés du matériau telles que le degré de saturation et la porosité (Tremblay, 1995).

La diffusion dans un matériau sec est environ 1000 à 10 000 fois plus élevée que celle dans un matériau saturé. La diffusivité est donc fortement influencée par la teneur en eau d'un milieu poreux partiellement saturé (Tremblay, 1995). En condition sèche et sans gradient de pression, la diffusion de l'oxygène se fait uniquement dans l'espace des pores remplis d'air. Lorsque la teneur en eau augmente, la section transversale disponible pour

la diffusion et le volume de la phase gazeuse diminuent (Currie, 1961), et une partie de la diffusion peut alors se faire via la phase liquide (Collin et Rasmuson, 1990).

Le tableau 3.7 et la figure 3.5 présentent les valeurs de coefficients de diffusion expérimentaux effectifs (D_e) des différents résidus miniers. Les porosités et degrés de saturation relatifs à chaque essai figurent aussi dans le tableau. Sur la figure, il est important d'observer la valeur théorique de D_e qui devient pratiquement égale au coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau lorsque le degré de saturation est d'environ 90 % (Aachib et al., 1993 ; Aubertin et al., 1995).

3.3 Modèles de prédiction

Il est utile, avant de débuter un campagne d'essais ou un projet de construction, d'avoir un estimé de la valeur des propriétés qui seront utilisées pour réaliser les analyses et le design d'un recouvrement.

Certains modèles ont été utilisés ici afin de comparer les résultats des essais expérimentaux. La section qui suit décrit brièvement chacun d'entre eux. On retrouve premièrement des modèles qui prédisent les valeurs de conductivité hydraulique à partir des résultats des analyses granulométriques. Deuxièmement, on retrouve les modèles qu'on a employé pour comparer les courbes de rétention d'eau. Ces modèles peuvent se diviser en deux, les premiers qui sont des modèles d'ajustement des courbes et le deuxième qui est un modèle de prédiction. On montre ensuite les modèles de prédiction de la conductivité hydraulique non saturée de même que le modèle utilisé pour évaluer la diffusion en oxygène. Finalement, le modèle numérique qui a été utilisé pour simuler les conditions de l'écoulement non saturé lors des essais en colonnes est décrit.

3.3.1 Évaluation de la conductivité hydraulique

a) Kozeny-Carman

Les formules de Kozeny-Carman sont souvent utilisées pour calculer la conductivité hydraulique des matériaux étudiés. L'équation de Kozeny-Carman est le résultat de l'équation proposée par Kozeny (1927) et modifiée par Carman (1937,1956). Cette équation semi-empirique relie la conductivité hydraulique aux propriétés des pores. Historiquement, l'équation de Kozeny-Carman a surtout été utilisée pour prédire le coefficient de perméabilité des sables (Taylor, 1948). Cette équation peut s'écrire de la façon suivante (Chapuis et Montour, 1992) :

$$k = C.\frac{g}{\mu\rho}.\frac{e^3}{S^2 D_r^2 (1+e)} \qquad \textbf{(3.1)}$$

où

C : coefficient de forme et de tortuosité des canaux formés par les pores;

e : indice des vides;

D_r : densité des solides;

μ : viscosité de l'eau en ($ML^{-1}T^{-1}$,Pa.s);

ρ : masse volumique de l'eau (M/L^3);

S : surface spécifique des grains en (L^2/M).

En hydrogéologie ainsi qu'en géotechnique, l'utilisation de cette équation devient un peu complexe car il est difficile de déterminer la surface spécifique du sol. L'usage pour la prédiction de la conductivité hydraulique est donc restreint. Pour résoudre ce problème, la méthode proposée par Chapuis et Légaré (1992) a été appliquée, laquelle a permis de

calculer la surface spécifique à partir de la courbe granulométrique d'un sol. La relation empirique qui permet de calculer la surface spécifique est définie comme suit :

$$S=\frac{6}{d\rho_s} \tag{3.2}$$

où

ρ_s : masse volumique des sols (M/L^3) :

d : différence entre deux pourcentages passants cumulés successifs.

b) Kozeny-Carman Pavchich modifié

La conductivité hydraulique a aussi été calculée à l'aide d'une version modifiée de la formule de Kozeny-Carman-Pavchic (KCPM) qui inclue l'effet de tortuosité et une fonction de la distribution granulométrique (Aubertin et al., 1996). La valeur de x est égale à 2.16 et 0.02 a été utilisé pour le coefficient de forme c.

$$k = c\frac{\gamma_w}{\mu} D_{10}^2 C_u^{1/3} \frac{e^{3+x}}{(1+e)} \tag{3.3}$$

où

c : coefficient de forme;

D_{10} : diamètre des grains en mm pour avoir 10 % de la masse avec un plus petit diamètre;

C_u : coefficient d'uniformité;

e : indice des vides.

Cette équation est relativement simple à utiliser et donne des bons résultats pour des résidus miniers (figure 3.6). Toutefois, comme cette dernière est basée sur les mêmes

hypothèses de base que Kozeny-Carman, les mêmes restrictions s'appliquent (voir Aubertin et al 1996, 1997).

3.3.2 Évaluation des courbes de rétention d'eau

A partir d'essais de laboratoire, on est en mesure d'établir la relation θ–ψ. On utilise habituellement des modèles descriptifs qui permettent de décrire la courbe de rétention d'eau sur l'ensemble du domaine expérimental. Les modèles utilisés dans la présente étude sont brièvement décrits ci dessous. Un modèle prédictif a aussi été utilisé. Il s'agit du modèle de Kovács modifié. Ce dernier a été développé afin de prédire la courbe de rétention d'eau à partir des propriétés de base du matériau (e.g. Kovács, 1981; Aubertin et al. 1995).

a) Modèle de van Genuchten

Le code RETC (RETention Curves) provenant de van Genuchten et al., (1991) a été utilisé pour décrire la forme des courbes de rétention d'eau (figure 3.7). Ce logiciel a originalement été conçu afin de modéliser les propriétés hydrauliques de sols non saturés. Il sert à ajuster quelques modèles analytiques à des mesures de la rétention capillaire ou de la conductivité hydraulique. C'est donc un programme qui fournit une description des courbes expérimentales $\theta - \psi$. Ici, le code RETC a été utilisé uniquement pour obtenir les courbes caractéristiques de succion et pour avoir une estimation de la teneur en eau résiduelle.

L'équation du modèle de van Genuchten (1980) peut être écrite de la façon suivante :

$$\theta_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha_v \psi)^{n_v}} \right]^{m_v} \qquad \textbf{(3.4)}$$

où :

ψ : pression de succion (L) ;

α_v : constante qui représente l'inverse de ψ_a (L^{-1});

m_v, n_v : constante d'ajustement du modèle ;

θ_e : teneur en eau effective (ou réduite) (L^3/L^{-3}). Elle est donnée par l'expression suivante (θ_r = teneur en eau résiduelle) :

$$\theta_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \tag{3.5}$$

Des valeurs typiques des paramètres α_v, m_v, n_v pour différents types de sols peuvent être trouvées dans van Genuchten et Nielsen (1985).

b) Modèle de Fredlund et Xing (1994)

Ce modèle est basé sur une vaste étude statistique de la distribution de la taille des pores dans le matériau. Le modèle contient des paramètres de lissage de courbes et nécessite par conséquent une calibration obtenue par un programme de régression non linéaire utilisant la méthode des moindres carrés. L'équation du modèle est la suivante :

$$\theta(\psi, a_f, n_f, m_f) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ ln\left[e + (\psi / a_f)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \tag{3.6}$$

où $C(\psi)$ est une fonction de correction définie par

$$C(\psi) = 1 - \frac{ln\left[1 + (\psi / \psi_r)\right]}{ln\left[1 + (1000000 / \psi_r)\right]} \tag{3.7}$$

où :

e : nombre népérien (2.71828);

ψ_r : pression de succion correspondant à la valeur de teneur en eau résiduelle (L) ;

a_f : valeur approximative de ψ_a (L);

n_f : paramètre de lissage qui contrôle la pente au point d'inflexion de la courbe de rétention capillaire;

m_f : paramètre de lissage de courbe (relié à la teneur en eau résiduelle et à la fonction de correction $C(\psi)$).

Une représentation graphique typique de l'équation du modèle est présentée à la figure 3.8.

c) Modèle de Kovács modifié

Le modèle de Kovács (1981) est basé sur une approche semi-empirique et il permet d'évaluer la courbe de rétention d'eau ou la courbe de succion d'un sol à partir des propriétés de base telles que la granulométrie et l'indice des vides (figure 3.9). Les équations du modèle de Kovács (1981) peuvent être écrites de la façon suivante :

$$S_r = S_c + S_a (1 - S_c) \tag{3.8}$$

avec

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2 + 1\right] \exp\left[-\left(\frac{h_{co}}{\psi}\right)^2\right] \tag{3.9}$$

$$S_a = a_1 \left(\frac{1-n}{n}\right) \psi^{-\beta_1} \left(\frac{\alpha_k}{D_h}\right)^{\beta_2} \tag{3.10}$$

$$h_{co} = a_2\left(\frac{1-n}{n}\right)\left(\frac{\alpha_k}{D_h}\right) \tag{3.11}$$

où

S_r : degré de saturation moyen dans la zone capillaire;

S_c : degré de saturation dans la zone capillaire;

S_a : degré de saturation dans la zone d'adhésion.

h_{co} : montée capillaire moyenne (L);

n : porosité (L^3/L^{-3});

ψ : pression de succion (en cm d'eau) (L);

α_k : rapport du diamètre effectif des grains et le coefficient de forme.

D_h : taille effective des grains (L);

a_1, a_2 : coefficients (Kovács (1981) a proposé $a_1 = 2.5 \times 10^{-3}$ et $a_2 = 7.5 \times 10^{-2}$);

β_1, β_2 : exposants (Kovács (1981) a proposé $\beta_1 = 1/6$ et $\beta_2 = 2/3$).

Les équations 3.8 à 3.12 de Kovács sont considérées valides pour

$$50 < \frac{\alpha_k}{D_h} < 25x10^3 \tag{3.12}$$

Aubertin et al., (1998) ont proposé une version modifiée de l'équation de Kovács (1981) qui permet d'obtenir une meilleure concordance avec les résultats de laboratoire sur des résidus miniers. L'équation Kovács modifiée est semblable à celle décrite auparavant sauf pour les paramètres S_c et S_a qui se lisent comme suit :

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{\psi_{90}}{\psi}\right)^2 + 1\right]^{m_k} exp\left[-m_k\left(\frac{\psi_{90}}{\psi}\right)^2\right] \tag{3.13}$$

et

$$S_a = C(\psi)\frac{a_k}{e^{1/3}\psi^{1/6}}\psi_{90}^{2/3} \qquad \textbf{(3.14)}$$

où

$C(\psi)$: fonction de correction de Fredlund et Xing (1994) (L^{-1}) ;

m_k, a_k : coefficients ouverts (pour estimer une courbe sans valeurs expérimentales, Aubertin et al. (1998) proposent $a_k = 0.0018$ et $m_k = 4.93$)

e : indice des vides;

ψ_{90} : pression exercée pour une saturation de 90 % qui peut être estimée par l'équation suivante (Aubertin et al., 1998) (L):

$$\psi_{90} = \frac{b_k}{eD_{10}} \qquad \textbf{(3.15)}$$

avec :

b_k : 4.0 mm^2;

D_{10} : diamètre des grains en mm pour avoir 10 % de la masse avec un plus petit diamètre (L).

Le principal avantage de la version modifiée de Kovács est que l'on peut estimer la courbe caractéristique de succion au complet uniquement à partir de certaines propriétés de base des matériaux, soit l'indice des vides et le D_{10}.

3.3.3 Modèles de prédiction de la conductivité hydraulique non saturée

Les modèles utilisés pour prédire les courbes de conductivité hydraulique non saturée de nos matériaux sont : le modèle de Fredlund et al. (1994) et le modèle de Mualem (1976) utilisé

dans le code RETC. Ces modèles utilisent la relation entre la teneur en eau et la succion pour prédire la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau ou la succion.

Modèle de Fredlund

Le modèle de Fredlund et al. (1994) offre l'avantage d'être relativement simple à appliquer. Il n'exige pas non plus la connaissance de la courbe caractéristique du matériau au complet (ni la connaissance de la teneur en eau résiduelle) puisqu'il incorpore la prédiction de celle-ci dans les calculs. La succion correspondant à une teneur en eau de zéro est approximativement la même pour tous les types de sol. Sa valeur de 10^6 kPa a été expérimentalement confirmée. L'intégration dans le modèle de prédiction est donc effectuée de ψ_a jusqu'à 10^6 kPa. Fredlund et al. (1994) ont proposé d'effectuer l'intégration de l'expression de la conductivité hydraulique sur une échelle logarithmique afin de simplifier la procédure du calcul; l'équation s'écrit comme suit :

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{ln(\psi)}^{b} \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{ln(\psi_a)}^{b} \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \qquad \textbf{(3.16)}$$

où

ψ_a : pression à l'entrée de l'air (L);

b : ln (1000000 kPa);

θ' : dérivée de la fonction décrivant la courbe caractéristique de succion du matériau;

y : variable d'intégration représentant le logarithme de la succion.

Une représentation graphique du modèle est présentée à la figure 3.10.

Modèle de Mualem

Mualem (1976), pour sa part, a élaboré un modèle de la matrice des pores similaires à celui de Childs et Collis-George (1950). Le modèle de prédiction proposé par Mualem a été vérifié avec les données expérimentales obtenues pour 50 sols. Ce modèle est de loin le plus utilisé pour prédire la relation ψ-k (e.g. Mishra et Parker, 1990; Akindunni et al., 1991; Wise et al., 1994; Marion et al., 1994; Yeh et al., 1994; Chiu et Shakelford, 1994). Lors des analyses de conductivité hydraulique non-saturée de nos échantillons, ce modèle a été utilisé; l'équation de Mualem (1976) s'écrit comme suit :

$$k(\theta) = S_e^{\eta}\left[\int_0^{\theta}\frac{d\theta}{\psi} \Big/ \int_0^{\theta_s}\frac{d\theta}{\psi}\right]^2 \qquad \textbf{(3.17)}$$

où :

S_e : degré de saturation effectifs ($S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)) \equiv \theta_e$ de van Genuchten ;

η : paramètre qui dépend des propriétés du sol et du fluide.

En substituant l'équation proposée par van Genuchten (1980), soit l'équation 3.4, dans le modèle statistique de Mualem (1976) présenté à l'équation 3.17, on obtient l'équation suivante:

$$k(\theta) = k_{sat}\left\{1 - \left[1 - \theta_e^{1/m_{vm}}\right]^{m_{vm}}\right\}^2 \theta_e^{\eta} \qquad \textbf{(3.18)}$$

où

k_{sat} : conductivité hydraulique saturée (LT^{-1});

θ_e : teneur en eau réduite (L^3/L^{-3});

m_{vm} : paramètre de lissage de courbes.

L'équation du modèle de Mualem (1976) telle que présentée à l'équation 3.18 est utilisée par logiciel RETC (van Genuchten, 1991). Elle est fréquemment utilisée pour décrire la fonction de perméabilité à partir de la courbe de succion (figure 3.11).

3.3.4 Évaluation du coefficient de diffusion

Dans un milieux poreux comme les résidus miniers, le transport d'oxygène se fait principalement par la diffusion qui est engendrée par le déséquilibre des pressions partielles (ou des concentrations). Le mouvement de l'oxygène peut aussi s'exprimer à partir des lois de Fick, qu'on peut écrire comme suit pour un milieu non réactif (Freeze et Cherry 1979; Nicholson et al., 1989; Aubertin et al., 1995):

$$F = -D_e \frac{\delta C}{\delta Z} \qquad \textbf{(3.19)}$$

et

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D_e \frac{\delta^2 C}{\delta Z^2} \qquad \textbf{(3.20)}$$

où:

F : flux d'oxygène ($ML^{-2}T^{-1}$);

D_e : coefficient de diffusion effective (L^2/T);

C_o : concentration de l'oxygène (ML^{-3});

Z : profondeur (L);

$\delta C_o / \delta t$: dérivée de la concentration par rapport au temps.

On peut estimer la valeur du coefficient D_e à partir de la relation de Collin (1987).Cette relation est une modification de celle proposée par Millington et Shearer (1971) et elle permet d'inclure l'effet de la diffusion à travers les pores remplis d'eau (Collin et Rasmuson, 1988). Les deux patrons de diffusion parallèles, à travers l'air et à travers

l'eau, sont définis dans la relation suivante afin d'estimer la diffusivité effective totale et de déterminer la valeur de D_e:

$$\begin{aligned} D_e / D_a^0 &= D_a / D_a^0 + H * D_w^0 / D_a^0 * D_w / D_w^o \\ &= (1 - S_r)^2 * [n(1 - S_r)]^{2xa} + H * (D_w^0 / D_a^0) * S_r^2 * (nS_r)^{2xw} \end{aligned} \qquad \textbf{(3.21)}$$

où H = constante de solubilité d'un gaz dans l'eau (constante de la loi de Henry) : $H = C_w/C_a$, où C_w et C_a sont les concentrations du gaz dans la phase eau et dans la phase air, respectivement (H = 2.95.10^{-2} à 25°C pour l'oxygène) et D_w et D_w^0 sont les coefficients de diffusion effectif de l'oxygène dans l'eau intersticielle et dans l'eau libre.

Le modèle de Millington et Shearer (1971) modifié par Collin (1987) a été utilisé avec succès avec des données tirées de la littérature (Aachib et al., 1993) et il a donné de très bons résultats pour les matériaux silteux comme on pourra le constater au chapitre 5 et dans Aubertin et al. (1995).À partir de ce modèle, on constate que la valeur de D_e devient pratiquement égale à celle de D_w^0 (2,2 x 10^{-9} m^2/s) lorsque le degré de saturation est d'environ 90 % (Aachib et al., 1993; Aubertin et al., 1995).

Pour ce qui est des essais réalisés au cours de ce projet, ils permettent d'estimer la valeur de D_e en ayant recours au logiciel Pollute. Ce logiciel permet la modélisation directe des essais à partir des paramètres physiques expérimentaux en utilisant les lois de Fick (décrites ci-dessus). Le coefficient de diffusion est déterminé en ajustant la solution de l'équation transitoire unidimensionnelle au profil expérimental mesuré de la concentration en fonction du temps. Le coefficient D_p (coefficient de diffusion modélisé) n'inclut pas la porosité disponible pour la diffusion de l'échantillon (la porosité à l'air, n_a, dans ce cas). Ce coefficient D_p, multiplié par la porosité à l'air, n_a, de l'échantillon donne le coefficient de diffusion effectif expérimental D_e (voir Tremblay, 1995 et Aubertin et al., 1995 pour plus de détails).

3.3.5 Simulations avec SEEP/W

Les écoulements non saturés se prêtent mal a des solutions analytiques, de sorte que l'on a fréquemment recours à des modèles numériques. Le logiciel SEEP/W est commercialisé par GEOSLOPE international de Calgary au Canada (Geoslope International, 1994). Il permet la modélisation de l'écoulement de l'eau à travers les matériaux poreux et les massifs rocheux. Ce logiciel a été utilisé en raison de sa disponibilité et des résultats intéressants déjà obtenus dans le passé pour la résolution d'un bon nombre de problèmes en hydrogéologie (e.g. Yanful et al.,1993; Chapuis et al.,1993; Crespo, 1994; Bussière et al., 1995; Bouchentouf, 1996; Chenaf, 1997). Le logiciel tient compte de l'écoulement de l'eau dans la zone non-saturée et il permet d'étudier des cas comprenant plusieurs horizons (différenciés par les courbes de rétention d'eau qui leur sont attribuées).

SEEP/W utilise la méthode des éléments finis dont le principe est de discrétiser le domaine en éléments de taille finie, de formuler l'équation de comportement du matériau dans chaque élément et d'en faire un ensemble global d'équations pouvant être résolues d'une façon simultanée (e.g. Bussière et al. 1997). Ce logiciel calcule la distribution des pressions interstitielles, les charges hydrauliques, les vitesses d'écoulement, les gradients hydrauliques ainsi que les propriétés des matériaux. À partir de ces résultats, il est possible de tracer les profils de teneur en eau ou des pressions développées dans les différents matériaux qui sont présentés dans le chapitre 5. Pour plus de détails sur SEEP/W, on peut consulter GEOSLOPE International (1994), Crespo (1994) et Chenaf (1997).

Tableau 3-1 Résultats des analyses minéralogiques (tiré de Bussière, 1993)

Minéraux	Sigma	Bevcon	Senator (fin)	Senateur (grossier)	Manitou-Barvue	Solbec-Cupra
Calcite (%)	10	8	—	5	—	—
Chlorite (%)	25	5	15	10	14	8
Dolomite (%)	—	15	15	25	—	—
Mica (%)	5	—	10	10	15	—
Plagioclase (%)	30	27	20	20	5	30
Pyrite (%)	—	—	—	—	3	27
Quartz (%)	25	45	40	30	63	35
Tourmaline (%)	5	—	—	—	—	—

Tableau 3-2 Valeurs de la densité relative des grains solides Dr (modifié de Bussière, 1993)

Dr	Type de minerai	Localisation	Référence
2.82 -3.31	Divers	États Unis	Bates et Wayment (1967)
3.01	Fer	Québec	Guerra (1973)
2.88 -3.04	Pb-Zn-Ag	États-Unis	Mabes et al. (1977)
2.74	Or	Japon	Ishihara et al. (1980)
2.72	Cuivre	Chili	Garga et McKay (1984)
2.77 - 2.81	Uranium	Ontario	Matyas et al. (1984)
2.63 - 2.78	Or	Colombie-Britanique	Eivemark et Robinson (1989)
2.84 - 3.98	Cu-Pb-Zn	Québec	L'Ecuyer et al. (1992)
278 - 3.39	Divers	Québec	Bussière 1993
2.81-3.35	Divers	Québec	Bussière 1995

Tableau 3-3 Limites de consistance pour des rejets miniers (modifié de Bussière, 1993)

w_L	w_p	Type de minerai	Localisation	Référence
N.D.	N.P.	Fer	Québec	Guerra (1973)
19-30	N.P-10	Cuivre	Colombie-Britanique	Mittal et Morgenstern (1976)
16-28	N.P.-2	Pb-Zn	États-Unis	Mabec et al. (1984)
25-40	N.P.-10	Uranium	Ontario	Matyas et al (1984)
32-60	18-22	Potasse	Saskatchewan	Pufahl et Johnson (1987)
N.D.-48	N.P.-24	Uranium	États-Unis	Chen et al. (1988)
20-50	N.P.-30	Uranium	États-Unis	Keshian et Rager (1988)
23-45	N.P.-8	Cu-Pb-Zn	Colombie-Britanique	Haile et Kerr (1989)
25	N.P.	Cu-Pb-Zn	Québec	L'Écuyer et al. (1992)
13-25	N.P.-0.25	Divers	Québec	Bussière (1993)
40	17	Divers	Colombie Britanique	Wilson et al. (1997)

Tableau 3-4 Caractéristiques de compactage de rejets de concentrateur (tiré de Bussière, 1993)

$\gamma_{d\ max}$ (kN/m^3)	W_{opt} (%)	Type d'essai	Classification (USCS)	Type de minerai	Référence
18.58	10.4	proctor modifié	SP	Fer (Qué.)	Guerra (1973)
20.86	10.1	proctor modifié	ML	Fer (Qué.)	Guerra (1973)
16.02	16.5	---	CL	Cuivre (EU)	Girucky (1973)
14.6-15.5	—	proctor modifié	SP ET SW	Cuivre (B.C.)	Mittal et Morgensteern (1975)
19.95	10.5	proctor normalisé	GP ET SP	Taconite (EU)	Klohn (1979)
17.28-18.54	12.5-15	proctor modifié	ML ET SM	Cuivre (EU)	Volpe (1979)
15.39-16.02	19-20	proctor modifié	ML	Cuivre (EU)	Volpe (1979)
15.24	21	proctor normalisé	SW	Or (1987)	Kinard et Schweizer (1987)
16.65	18.5	proctor normalisé	CL	Uranium (EU)	Chen et al. (1988)
17.44	14.8	proctor normalisé	ML-SP	Uranium (EU)	Chen et al. (1988)
17.8-20.75	12-15.2	proctor modifié	ML	Divers(Qué.)	Bussière (1993)

Tableau 3-5 Caractéristiques de consolidation pour les rejets de concentrateur (tiré de Bussière, 1993)

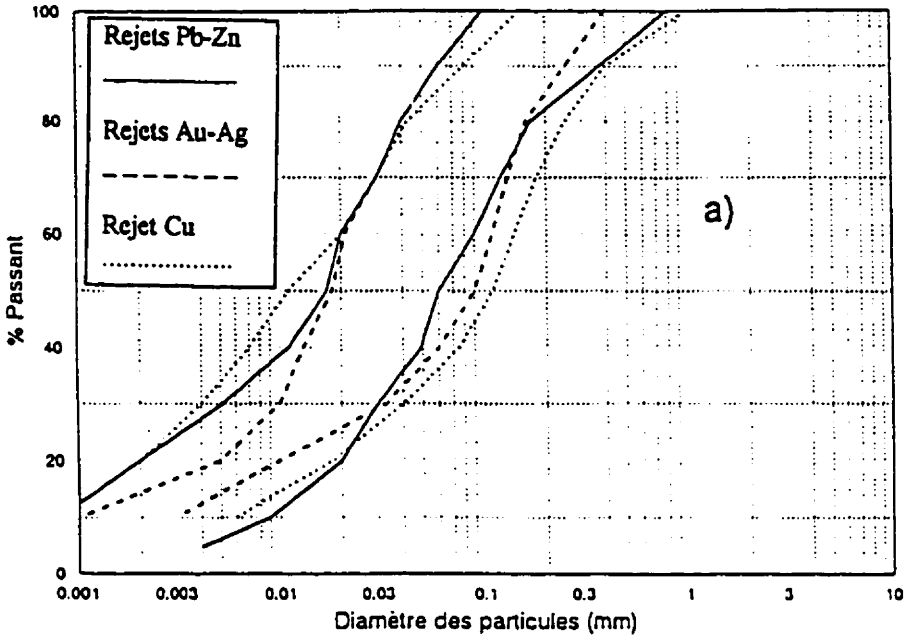
C_c	C_{cr}	C_v	Classification (USCS)	Type de minerai	Références
.75-.12	.01-.02	$2.7x10^{-3}$ - $2.5x10^{-2}$	F (ML)	Fer (Qué.)	Guerra (1973)
.035	---	$2x10^{-3}$	G (SP)	Fer (Qué.)	Guerra (1973)
.06-.13	---	---	G (SP et SW)	Cuivre (C.B.)	Mittal et Morgenstern (1975)
.13-.27	---	$1x10^{-3}$ - $1x10^{-2}$	F et F-G	Cuivre (C.B.)	Mittal et Mortenstern (1976)
.3	.032	---	F (ML)	Pb-Zn (EU)	Mabes et al. (1977)
.06-1.3	---	$1x10^{-2}$	G (SP)	Molybdène (EU)	Nelson et al. (1977)
.01-.4	---	---	F (ML)	Uranium (Ont.)	Matyas et al (1984)
.065-.455	---	$3.1x10-^{3}$ - $1x10^{-2}$	F (CH et CL)	Potasse (Sask.)	Pufahl et Johnson (1987)
.535	.056	$6.2x10^{-3}$	F(ML)	Uranium	Chen et al. (1988)
.12	.011	$1.1x10^{-2}$	F-G (SM)	(EU)	Chen et al (1988)
.13-.87	---	$1.5x10^{-3}$-$5x10^{-2}$	F (CH et CL)	Uranium	Keshian et Rager (1988)
.015-.303	---	$5x10^{-2}$-$2x10^{-1}$	G (SM)	(EU)	«
---	---	$4.4x10^{-3}$-$4.8x10^{-2}$	F (ML-CL)	Cu-Pb-Zn (C.B.)	Haile et Kerr (1989)
.046-.13	.01-.009	$1.04x10^{-2}$-1.22	F(ML)	Divers (Qué)	Bussière 1993

Tableau 3-6 Conductivité hydraulique pour des rejets de concentrateur (modifié de Bussière, 1993)

k (cm/s)	e	Classification (USCS)	Type de minerai	Référence
$1.2x10^{-2}$-$6x10^{-4}$	.8	SW-ML	—	Pettibone et Kealy (1971)
1.3 $x10^{-4}$	.55	ML	Fer (Qué.)	Guerra (1973)
$1x10^{-2}$-$1x10^{-3}$	.65-1.1	SP-SW	Cuivre (C.B.)	Mittal et Morgenstern (1976)
$1x10^{-4}$-$5x10^{-7}$	.6-1.25	ML-SW	Cuivre (C.B.)	Mittal et Morgenstern (1976)
$1x10^{-5}$-$1x10^{-6}$	.45-1.2	ML	Pb-Zn (EU)	Mabes et al. (1977)
$6x10^{-3}$-$2x10^{-4}$	.5-1.1	SP	Molybdène (EU)	Nelson et al. (1977)
$8x10^{-3}$- $2x10^{-6}$	.65-1.26	ML-SM-SP	Cuivre (EU)	Volpe (1979)
$8x10^{-2}$-$4x10^{-9}$	.7-1.7	ML-SP	Uranium (Ont.)	Matyas et al. (1984)
$1.5x10^{-4}$-$3.9x10^{-7}$	.6-1.2	SW-SM	Or	Kinard et Schweizer (1987)
$1.6x10^{-7}$-$2x10^{-8}$	.6	CH-CL	Potasse (Sask.)	Pufahl et Johnson (1987)
$5.6x10^{-4}$-$4.4x10^{-6}$	—	SM	Uranium (EU)	Chen et al. (1988)
$1x10^{-2}$-$1x10^{-4}$	.5-2.3	SP	Uranium (EU)	Keshian et Rager (1988)
$5x10^{-4}$-$2x10^{-6}$	.5-2.3	SM	Uranium (EU)	Keshian et Rager (1988)
$1x10^{-4}$-$1x10^{-7}$	.5-2.3	ML	Uranium (EU)	Keshian et Rager (1988)
$3.5x10^{-5}$-$1x10^{-6}$	—	ML-CL	Cu-Pb-Zn (C.B.)	Haile et Kerr (1989)
$3.1x10^{-6}$-$4.8x10^{-6}$	—	ML	Uranium (Ont.)	Robinsky et al. (1991)
$1x10^{-4}$-$1x10^{-6}$	.5-1.0	ML	Divers (Qué.)	Bussière (1993)
$1.6x10^{-3}$-$3.2x10^{-4}$	.8-1.2	—	Divers (Qué.)	Bussière et al. (1995)
$1x10^{-5}$-$1x10^{-8}$	—	CL	Argent (C.B.)	Wilson et al. (1997)
$1x10^{-6}$-$3x10^{-6}$	.3	—	Or (Australie)	Bews et al. (1997)
$2x10^{-4}$-$5x10^{-6}$	.5-1.0	ML	Divers (Qué.)	Aubertin et al. (1998)

Tableau 3-7 Coefficients de diffusion effectifs expérimentaux (Tiré de Tremblay, 1995)

Échantillon	n	Classification (USCS)	Sr (%)	D_e (m^2/s)
Senator	0.38 - 0.83	ML	0.34 - 94.9	5.9×10^{-5} - 2.54×10^{-9}
Bevcon	0.24 - 0.71	ML	0.55 - 91.25	2.73×10^{-4} - 3.99×10^{-9}
Sigma	0.39 - 0.51	ML	0.97 - 90.76	1.25×10^{-5} - 8.63×10^{-9}



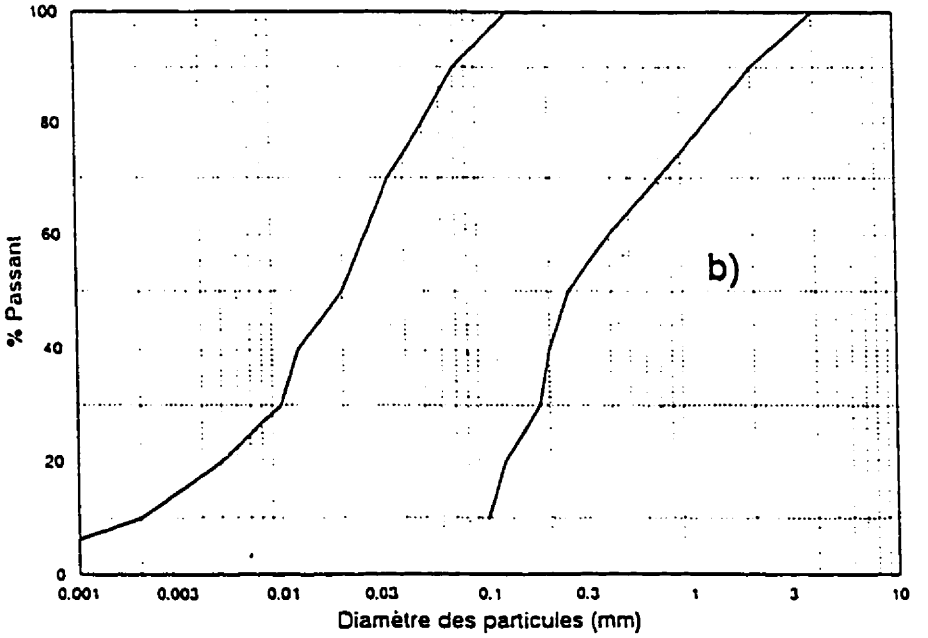


Figure 3-1 Fuseaux typiques de granulométrie de rejets de concentrateur (a-Vick,1983; b-Klohn, 1986).

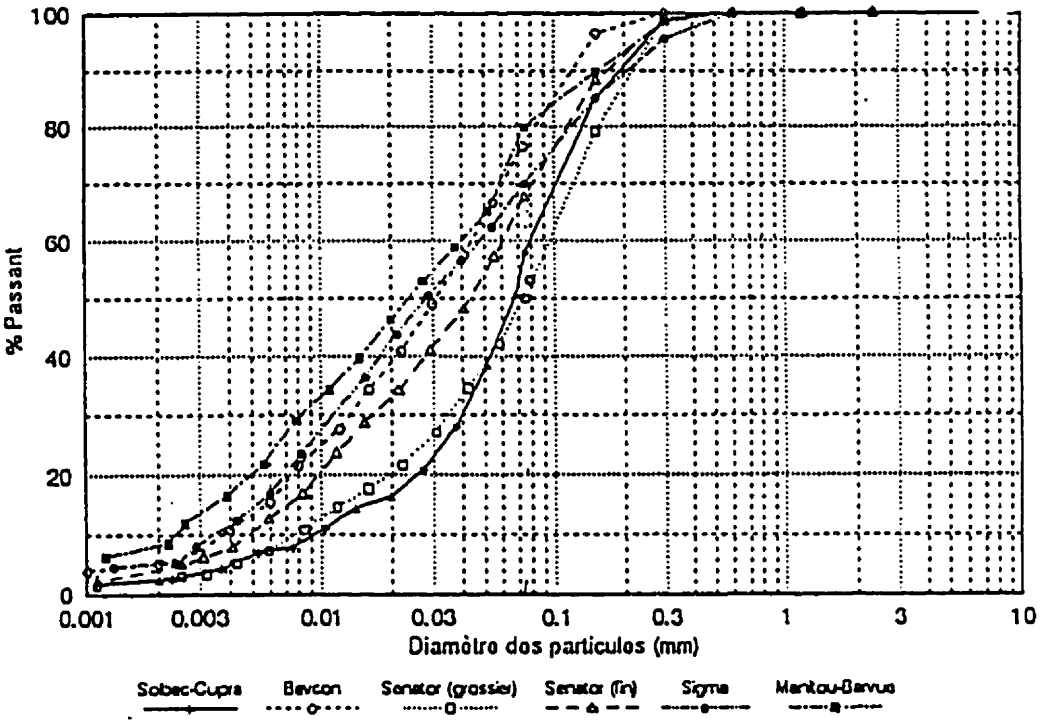


Figure 3-2 Courbes granulométriques des matériaux étudiés au Laboratoire de Génie Minéral à l'École Polytechnique de Montréal (Tiré de Ricard, 1994).

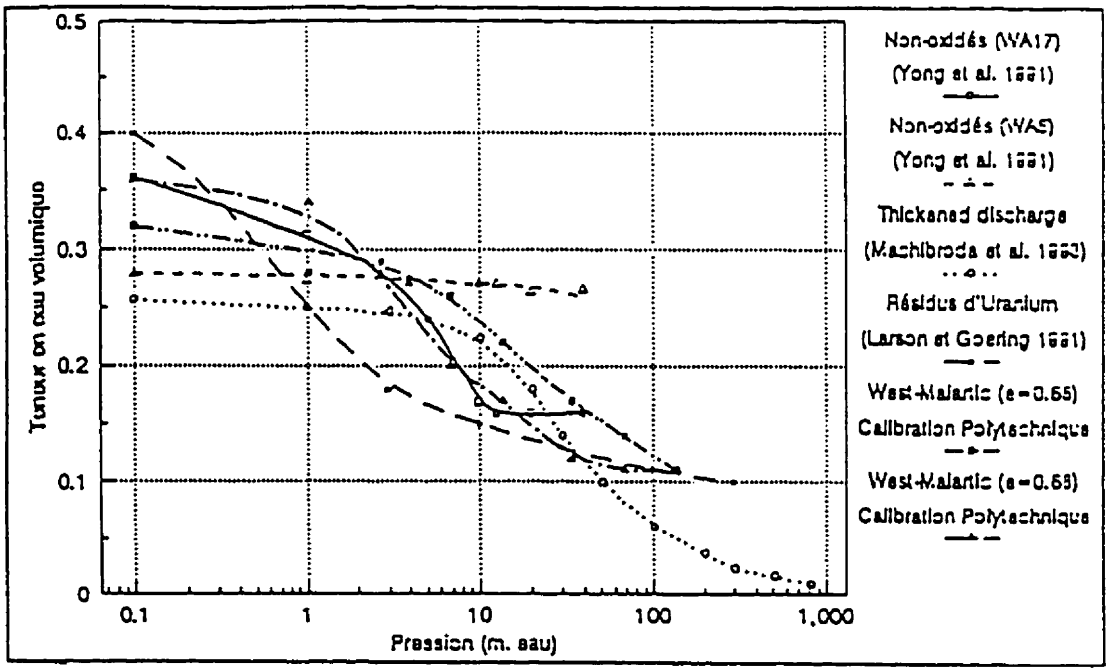
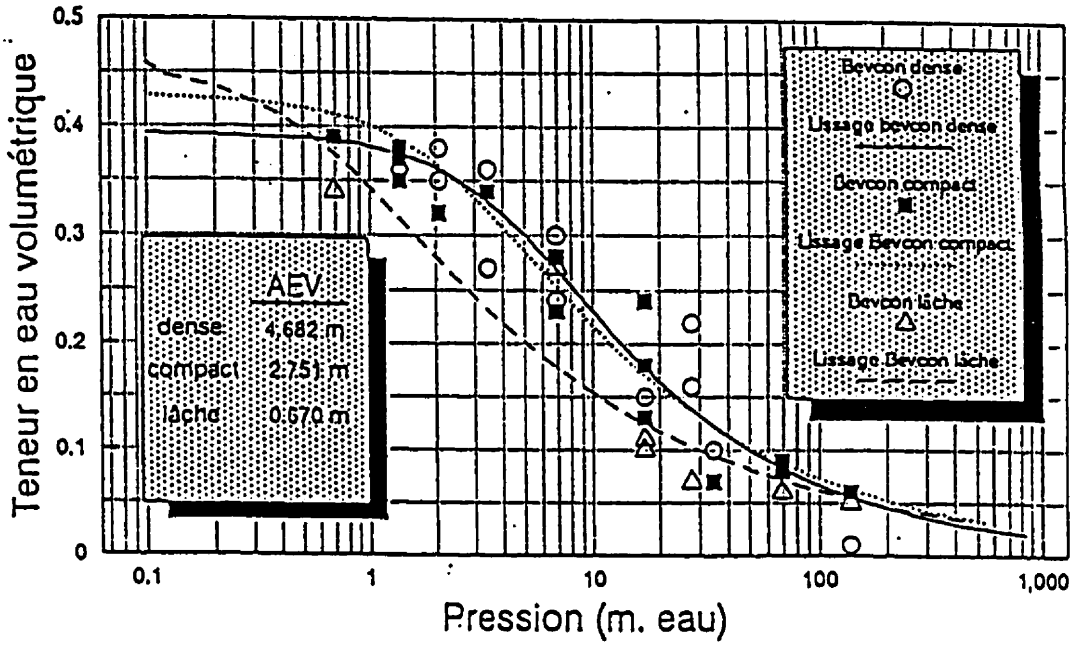


Figure 3-3 Courbes de rétention d'eau de divers résidus miniers (Tiré de Ricard, 1994).



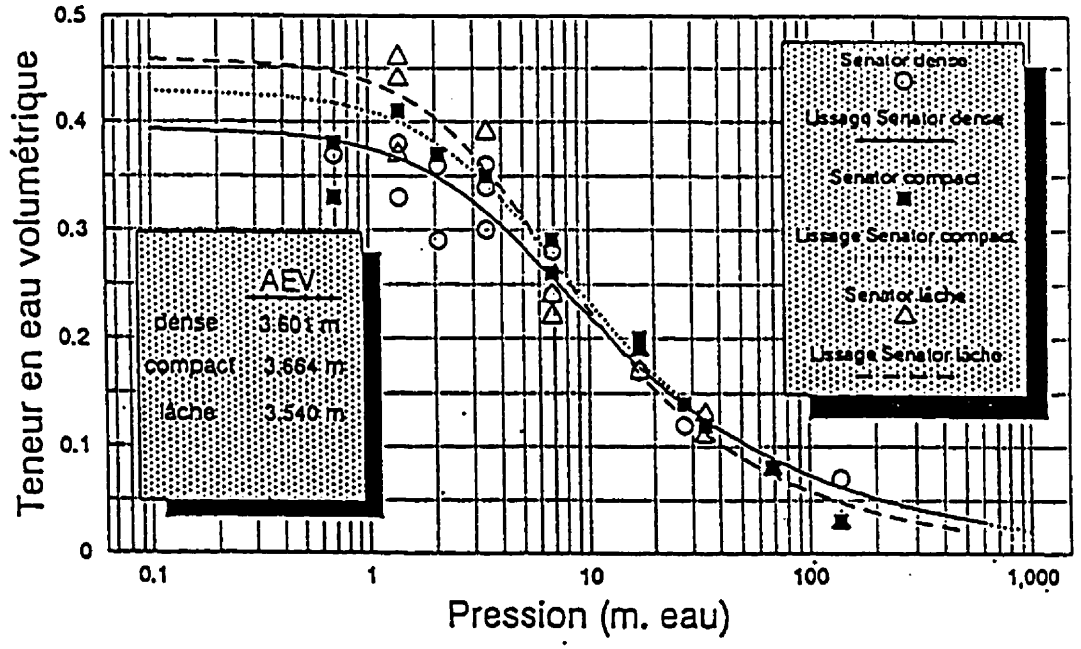


Figure 3.4 Courbes de rétention d'eau de deux sites (Tirées de Aubertin et al., 1995).

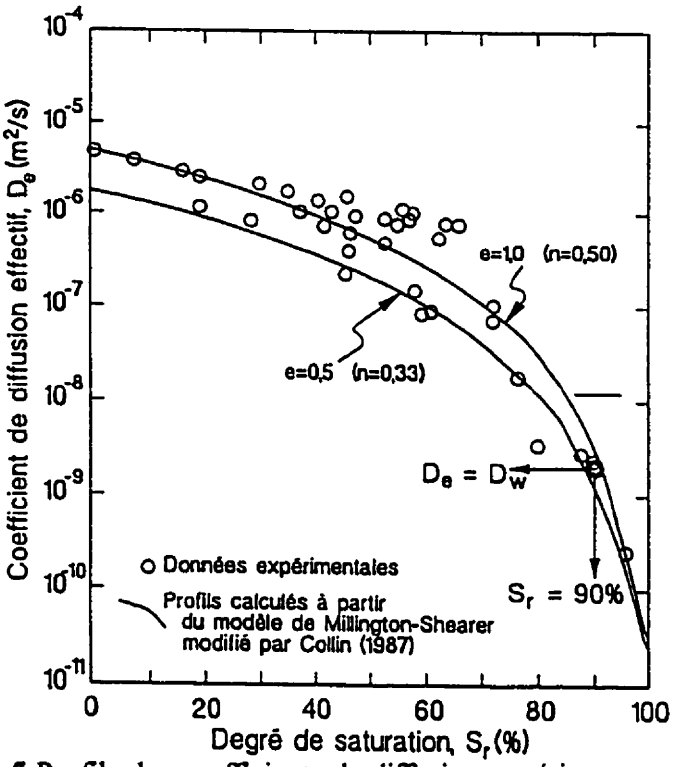


Figure 3-5 Profils des coefficients de diffusion expérimentaux comparés aux profils des coefficients de diffusion empiriques de Collin et Rasmuson (1990) (Aubertin et al., 1995).

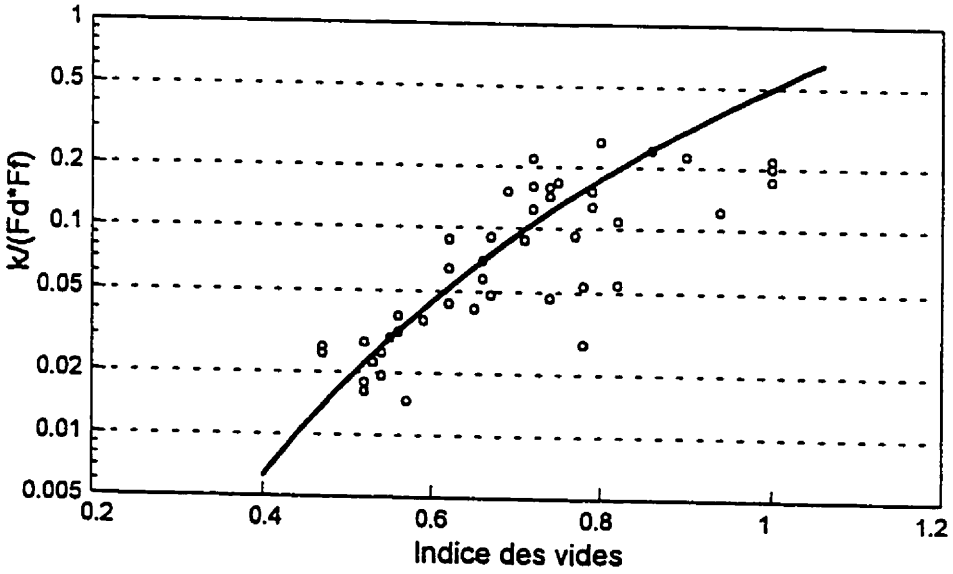


Figure 3-6 Conductivité hydraulique des résidus miniers ; valeurs expérimentales comparées au modèle KCPM (Aubertin et al., 1996) (où $f_d\ f_f = c\gamma_w D_{10} C_u^{1/3}/\mu$)

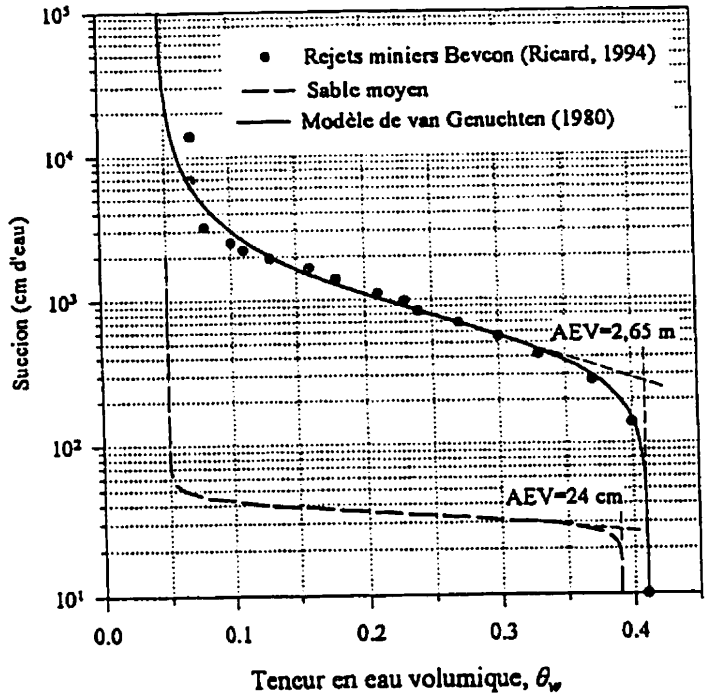


Figure 3-7 Courbes typiques de rétention d'eau pour des résidus minier à partir du modèle de van Genuchten (1980).

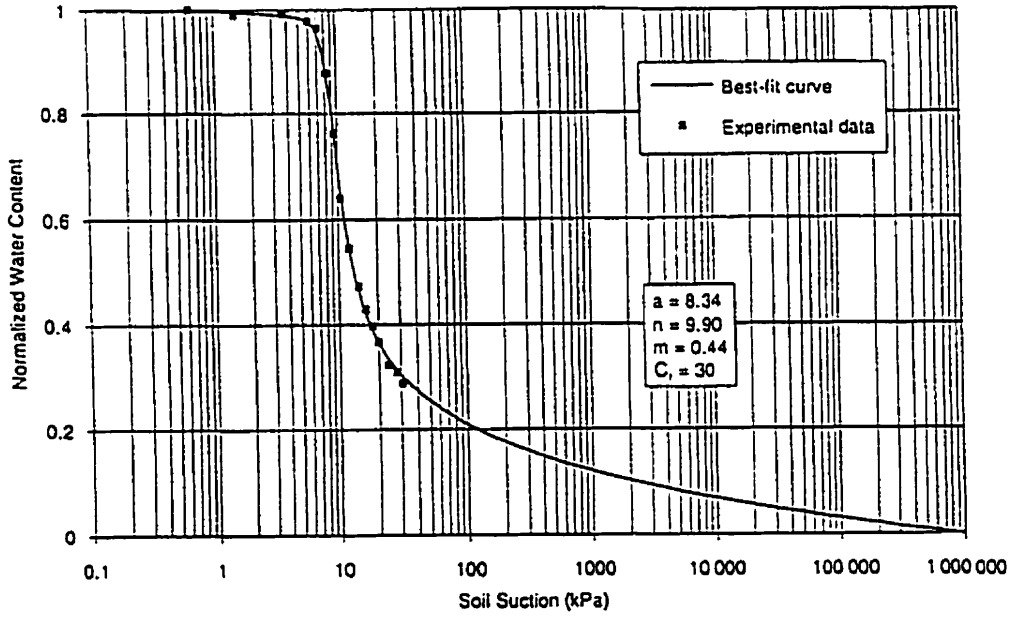
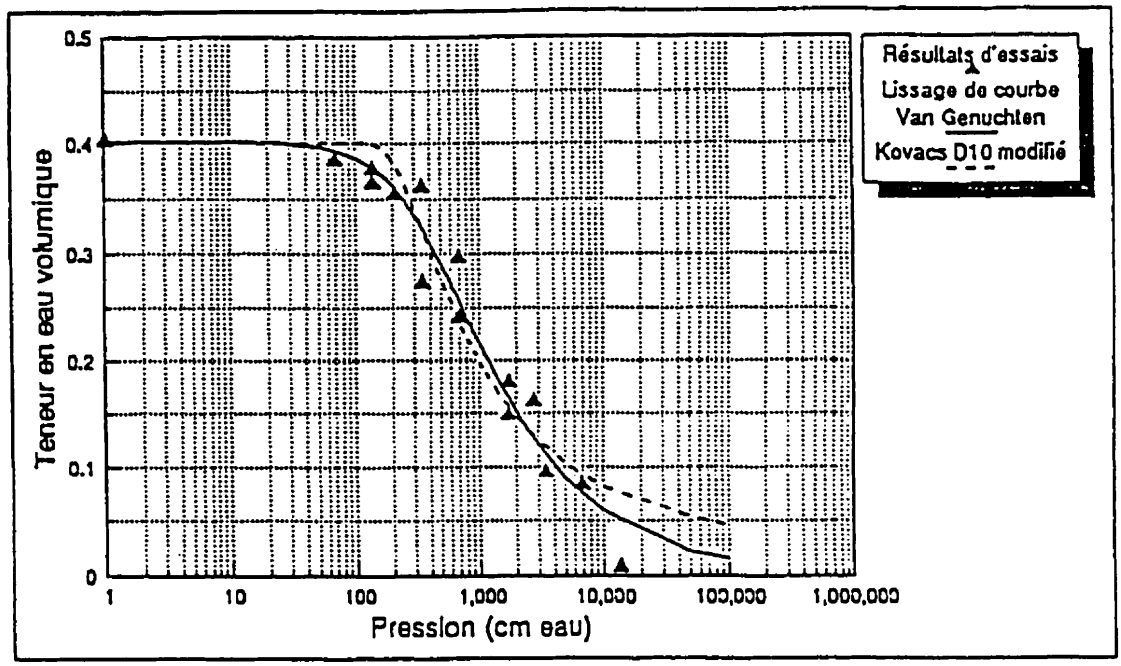


Figure 3-8 Courbes typiques de rétention d'eau pour des résidus minier à partir du modèle de Fredlund (1994).



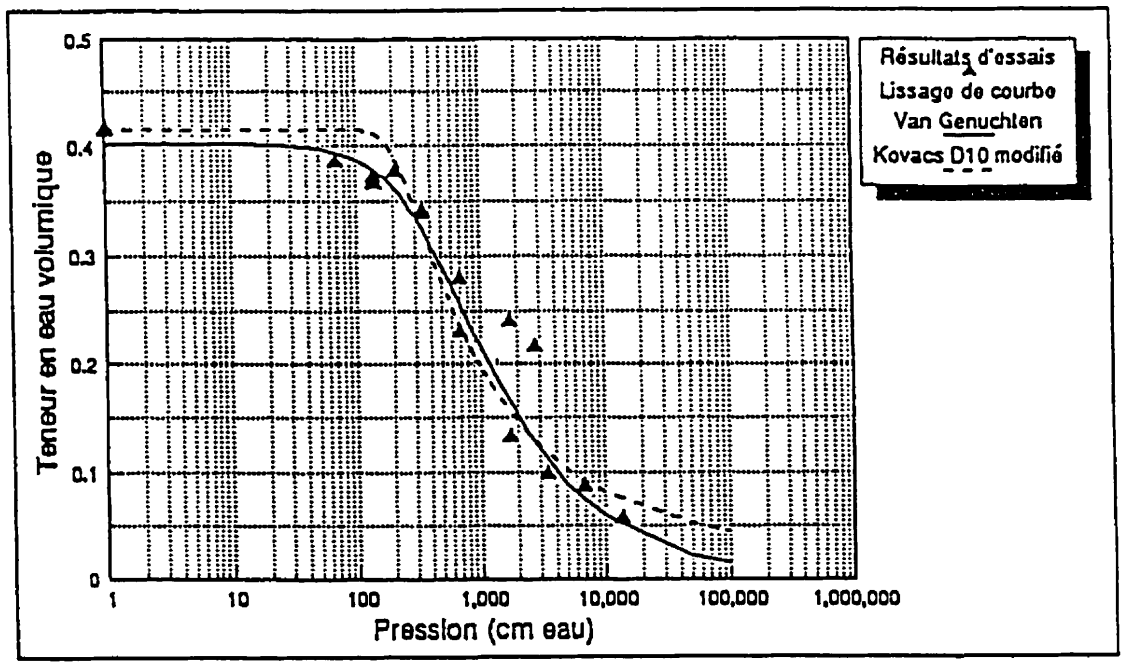


Figure 3-9 Courbes typiques de rétention d'eau pour des résidus miniers à partir du modèle de Kovács (1994) (Tiré de Ricard, 1994).

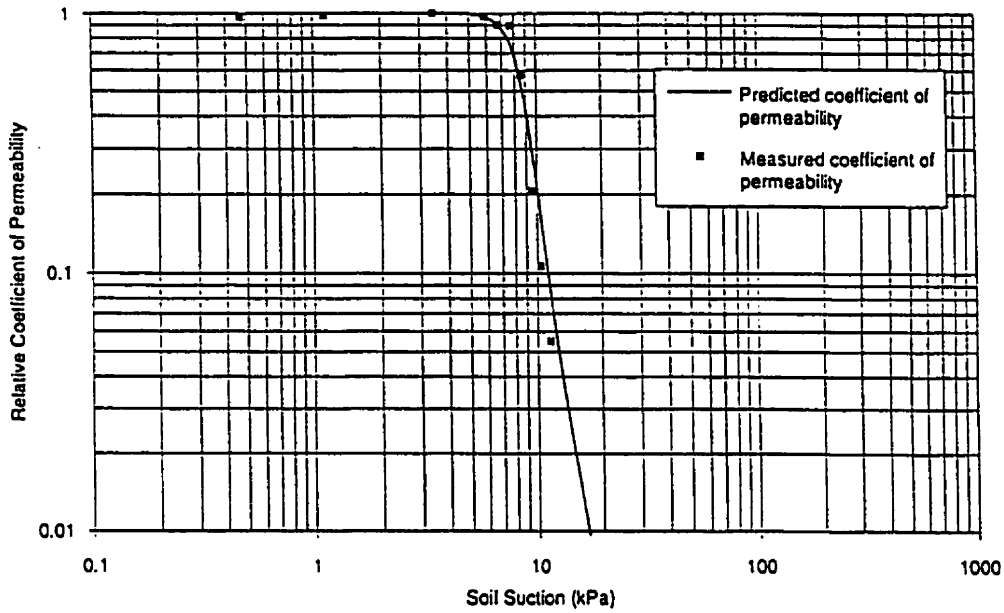


Figure 3-10 Courbes typiques de la conductivité hydraulique non-saturée pour des résidus miniers à partir du modèle de Fredlund et al., (1994).

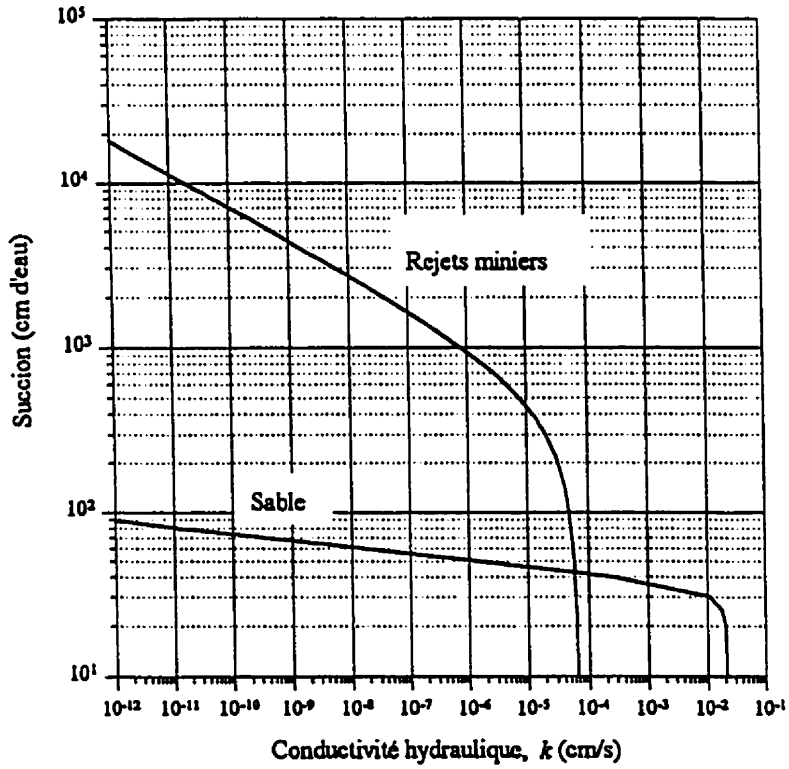


Figure 3-11 Courbes typiques de la conductivité hydraulique non-saturée pour des résidus miniers à partir du modèle de Mualem (1976) (tiré de van Genuchten, 1980)

CHAPITRE 4 - PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

4.1 Généralités

Dans le but d'évaluer le potentiel des rejets de concentrateur non réactifs pour construire des barrières de recouvrement visant à empêcher la production de DMA, des travaux expérimentaux ont été réalisés dans le cadre de ce projet.

Ce chapitre décrit les étapes suivis afin de caractériser les six matériaux considérés comme composantes des couches de barrières de recouvrement. Comme pour les autres travaux effectués précédemment au laboratoire d'Hydrogéologie et Environnement minier de l'École Polytechnique, une étude des propriétés pertinentes à la conception des barrières de recouvrement a été effectuée. Ce travail a été réalisé en suivant le protocole déjà brièvement décrit au chapitre deux..

4.2 Matériaux étudiés

Au total, six matériaux ont été étudiés afin de connaître leurs caractéristiques. Quatre d'entre eux ont été évalués à titre de couche à rétention capillaire peu perméable. De ces quatre matériaux, trois proviennent du même site; il s'agit des résidus de concentrateur de la mine Sigma, toujours active, qui est située à Val D'Or. L'autre matériau est un till naturel extrait d'un site situé près de Val D'Or. Les autres deux matériaux sont : un sable utilisé comme couche drainante et couche non capillaire, et un résidu minier réactif provenant du site Norebec-Manitou qui présente une teneur approximative de 2 à 5 % en

éléments sulfureux et qui est générateur de DMA. Ce dernier est utilisé comme résidu réactif dans les essais de colonne avec système de recouvrement.

Les échantillons ont été prélevés à la pelle, et placés dans des contenants en plastique hermétique (chaudières). Tous les échantillons ont été préparés à l'air libre de façon à les homogénéiser et à les sécher jusqu'à une teneur en eau résiduelle d'environ 10 %. La caractérisation des matériaux a ensuite été réalisée.

Les échantillons de résidus miniers prélevés sur le site de la mine Sigma ont été classés en trois catégories : Sigma fin, Sigma grossier et Sigma amendé (à la bentonite). Sigma fin et Sigma grossier se différencient principalement par l'emplacement de l'échantillonnage et Sigma amendé est le mélange de Sigma grossier avec environ 8 % (en poids) de bentonite. La teneur en bentonite retenue a été choisie en considérant que 6 % serait la valeur qui minimiserait les possibilités de lessivage et qui permettrait d'obtenir des valeurs de conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-6} cm/s, et qu'une teneur de 10 % était la limite supérieure imposée par les facteurs économiques (Ricard, 1994).

Le mélange résidus non réactifs et bentonite s'est effectué à l'usine de béton de Fournier et Fils à Val d'Or. Les matériaux testés en laboratoire sont les mêmes que ceux utilisés pour construire les barrières de recouvrement dans les cellules expérimentales in situ (Aubertin et al., 1997).

4.3 Programme d'essais

La caractérisation des matériaux a habituellement été réalisée en suivant les procédures d'essais standard ASTM. La méthodologie utilisée lors de la réalisation des différents essais de laboratoire est présentée brièvement ci-dessous. Les essais sont décrits dans l'ordre suivant: les essais de base (les essais granulométriques, les essais de poids spécifique des grains, les

essais de compactage, les limites de consistance), les essais de consolidation, les essais de perméabilité, les essais de rétention d'eau, les essais de diffusion d'oxygène et finalement, les essais de perméabilité avec cycles de gel-dégel.

En plus, des essais en colonnes ont aussi été réalisés afin d'évaluer la performance et l'efficacité des systèmes de recouvrement (voir section 4.4).

4.3.1 Analyses granulométriques

Les courbes granulométriques sont obtenues à l'aide d'une sédimentométrie et/ou d'un tamisage, selon le matériau.

La méthodologie de la sédimentométrie a consisté à prélever un échantillon sec de 50 grammes. On ajoute ensuite 125 ml d'une solution de Na-métaphosphate de 4 % plus une quantité d'eau distillée suffisante pour remplir à moitié un gobelet d'agitateur. On disperse ensuite la solution à l'agitateur pendant une minute. On place alors la solution dans une colonne de sédimentation de 1000 ml. On remplit la colonne avec de l'eau déminéralisée. Un hydromètre 152H a servi pour lire les valeurs de la densité de la solution, ce qui permet d'estimer la quantité de matière en suspension. L'interprétation est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse de déposition d'une particule sphérique dans un fluide visqueux en fonction du diamètre de la particule et de sa densité. On prépare parallèlement à notre échantillon, une solution témoin. Cette solution nous permet de soustraire la composante de la densité due à la solution de Na-métaphosphate.

Une mesure de température est prise à toutes les fois que l'on prend une mesure de densité. Ces mesures se font pour des périodes de temps déterminées, soit : 1, 2, 5, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 1440 minutes. Pour avoir une description plus détaillée de l'essai, on peut consulter la norme ASTM D422 qui a été suivie au cours de ces essais.

4.3.2 Poids spécifique des grains

La valeur de D_r est obtenue par un essai au pycnomètre suivant la norme ASTM D854-91. On utilise le principe d'Archimède pour déterminer le rapport entre les poids volumiques de l'eau et des grains de sol à une température donnée. Trois essais de détermination de D_r ont été effectués; l'écart maximal permis est ici de 0.013.

4.3.3 Essais de compactage

L'essai utilisé dans cette étude est le Proctor modifié. Cet essai consiste à placer dans un cylindre de métal une certaine quantité de matériau meuble qui, une fois compacté, occupera environ 20 % du volume du moule. On compacte le matériau à l'aide du marteau Proctor (25 coups). On répète sur cinq couches de matériau à compacter. Une fois ces cinq couches compactées, on enlève l'échantillon du moule et on le fait sécher au four. On recommence ensuite avec un échantillon ayant une teneur en eau légèrement supérieure. Un minimum de 4 teneurs en eau est nécessaire. On peut donc, après cet essai, connaître la variation du poids unitaire sec γ_d en fonction de la teneur en eau. La norme suivie est celle de l'ASTM D1557-78 méthode A (masse de 4.536 kg, chute de 45.72 cm, diamètre du moule de 10.16 cm).

4.3.4 Limites de consistance

Afin d'évaluer la limite de liquidité w_l des matériaux fins, on a utilisé deux méthodes la première est celle mise au point par Casagrande et la deuxième a été effectuée à l'aide du pénétromètre à cône suédois. On peut trouver toutes les caractéristiques de l'appareil de Casagrande ainsi que les détails de la manipulation dans la norme ASTM D4318-84. Quant

au pénétromètre à cône suédois, cet essai a été normalisé par le bureau de normalisation du Québec et la description de l'essai se trouve dans la norme BNQ 2501-092/1981-10-28.

Pour chaque méthode, on a utilisé la technique à point unique et la technique à plusieurs points. La technique à point unique, pour l'essai à l'aide du cône suédois, consiste à laisser pénétrer d'une profondeur comprise entre 8 mm et 12 mm un cône ayant une masse de 60g et 60 degrés d'angle à la pointe (au lieu de 7 mm et 15 mm pour la méthode à plusieurs points), et de déterminer la teneur en eau correspondante. La valeur de la limite de liquidité (w_L) est ensuite définie à partir de l'équation suivante et arrondie au nombre entier :

$$w_L = \frac{20(w-15)}{P_{60}+10} + 15 \qquad (4.1)$$

où :

P_{60} : pénétration, en millimètres, du cône de 60g -60° comprise entre 8mm et 12mm (L);

w : teneur en eau, en pourcentage, correspondant à la pénétration P_{60}.

Pour ce qui est de la technique à plusieurs points, il faut présenter sur un graphique à échelle arithmétique la teneur en eau du sol en ordonnée et la pénétration correspondante en abscisse. On trace ensuite une droite approchant le plus possible les points expérimentaux. La limite de liquidité est définie par la valeur de la teneur en eau sur cette droite correspondant à une pénétration de 10 mm.

Pour la méthode de Casagrande, la procédure à point unique est semblable à celle utilisée à l'aide du cône suédois. Pour cette méthode, il faut que les nombre de coups nécessaires à fermer la fente se trouve entre 20 et 30. La formule à utiliser pour le calcul de la limite de liquidité est :

$$w_L = w\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \tag{4.2}$$

où :

N : nombre de coups nécessaires pour la fermeture de la fente ;

w : teneur en eau correspondant à N.

Pour ce qui est de la technique à plusieurs points, on présente sur un graphique à échelle semi-logarithmique la teneur en eau du sol en ordonnée et le nombre de chocs correspondant en abscisse. On trace ensuite une droite approchant le plus possible les points expérimentaux. La limite de liquidité est définie par la valeur de la teneur en eau sur cette droite correspondant à 25 coups.

Parallèlement à l'essai de la limite liquide, on a procédé à l'essai pour déterminer la limite plastique w_p. En ce qui concerne cet essai, nous n'avons besoin, comme appareillage, que d'une plaque de verre. La norme pour la détermination de la limite plastique est identique a celle de la limite liquide (ASTM D4318-84). Comme certains matériaux utilisés sont très peu plastiques, les résultats obtenus ici doivent être interprétés prudemment.

4.3.5 Essais de consolidation

L'appareil oedométrique utilisé pour déterminer les caractéristiques de consolidation et de compressibilité des sols est de type Bishop, muni d'un anneau fixe. Cet essai permet d'estimer le tassement dans le temps. Les résultats de cet essai représentent l'évolution de l'indices des vides (e) en fonction de la charge appliquée (P).

L'essai oedométrique conventionnel a été conçu pour des échantillons de sols non remaniés. Comme les résidus miniers ne peuvent que difficilement être échantillonnés en

préservant leur structure intacte (L'Écuyer et al. 1992), les échantillons prélevés pour ce projet ont été complètement remaniés; cela est conforme aux besoins spécifiques de cette recherche. Une méthode de la mise en place de l'échantillon dans l'anneau a été conçue (Bussière, 1993 ; Aubertin et al., 1995). L'échantillon a été placé dans un perméamètre à parois rigide, où trois couches de même épaisseur ont été compactées, le perméamètre a été mis sous vide pendant 15 minutes pour ensuite laisser l'échantillon se saturer lentement. Après saturation, l'échantillon a été mis dans l'anneau métallique et placé dans l'appareil oedométrique. À partir de cette étape, la norme ASTM D-2435-80 a servi de guide.

4.3.6 Essais de perméabilité

Le coefficient de perméabilité k (aussi appelé conductivité hydraulique) d'un sol dépend de plusieurs facteurs, tels que la granulométrie, la forme des grains, la composition minéralogique, la structure du sol, l'indice des vides, le degré de saturation, la température, la nature du fluide et le type d'écoulement qui sont liés au fluide. La perméabilité d'un sol est la mesure de sa capacité à laisser passer l'eau à travers lui. La vitesse de circulation de l'eau dans un sol peut varier de quelques centimètres par heure (sable) à quelques centimètres par an (argile).

Dans cette section, on trouve une description des méthodes utilisées pour l'évaluation de la conductivité hydraulique (k). Cette dernière a été mesurée à l'aide d'essais au perméamètre à charges constante ou variable ainsi qu'en cellule triaxiale.

- Essais à charge constante :

La norme utilisée pour l'essai est celle de l'ASTM D-2434. L'essai a pour objet de déterminer la conductivité hydraulique saturée d'un sol pour un écoulement laminaire de

l'eau à travers un matériau poreux. La valeur retenue de conductivité hydraulique est déterminée en appliquant une différence de charge hydraulique constante à travers un échantillon de matériau saturé et en mesurant le débit d'eau qui sort du perméamètre :

$$k = \frac{QL}{A\Delta h} \tag{4.3}$$

où

Q : débit d'eau sortant au bas du perméamètre (LT^{-1});

L : longueur de l'échantillon dans le perméamètre (L);

A : surface de la section de l'échantillon (L^3);

Δh : différence de charge hydraulique, $\Delta h = h_1 - h_2$ (L).

Pour le perméamètre à paroi rigide, l'échantillon est amené à saturation sous vide avec de l'eau désaérée circulant du bas vers le haut. Par contre, l'écoulement dans le perméamètre se fait du haut vers le bas durant l'essai. Avant l'essai, on pèse le perméamètre vide et l'échantillon. Lorsque l'essai est terminé on fait sécher l'échantillon et on le pèse afin de déterminer le degré de saturation initial et l'indice des vides du matériau.

- Essais à charge variable :

Le montage de cet essai est semblable de celui à charge constante. Le principe de cet essai consiste à laisser passer l'eau provenant d'une burette à travers l'échantillon et de mesurer la variation du niveau d'eau dans une autre burette pendant un temps déterminé. Le spécimen est d'abord amené à saturation pour enlever toute bulle d'air; l'eau utilisée pour la saturation est distillée et désaérée.

Pendant l'essai, le déplacement de l'eau se fait du bas vers le haut. La conductivité hydraulique à la température de l'essai a été déterminée à partir de la relation suivante (Freeze and Cherry, 1979) :

$$k = \frac{aL}{2At}\left(ln\frac{h_1}{h_2}\right) \qquad (4.4)$$

où

a : surface de la burette d'injection d'eau (L^3);

L : hauteur du spécimen (L);

A : surface de la section du spécimen (L^3);

t : durée de l'essai (T).

h_1 : charge au début de l'essai (L);

h_2 : charge au temps t (L).

- Essais à l'aide de la cellule triaxiale :

La méthode utilisée pour faire ces essais de laboratoire est celle à charge variable de type triaxial selon la norme ASTM D5084-90, utilisant un perméamètre à paroi flexible.

Les perméamètres utilisés acceptent les échantillons de 7.25 cm de diamètre et jusqu'à 15 cm de hauteur. Pour la mise en place de l'échantillon, on prépare 1 kg de matériau à une teneur en eau d'environ 10 % (soit proche de la teneur en eau optimale, telle qu'obtenue lors des essais Proctor). On place ensuite le matériau dans un moule fendu et ce, en plusieurs couches (environ 5 à 10). Chaque couche est compactée à l'aide d'une masse de 850 grammes lorsque l'on vise des indices des vides élevés (e = 0.65 à 1.1) ou encore à l'aide de la masse Proctor de 4.5 kilogrammes pour les indices des vides plus faibles (0.5 à 0.65). Cela nous a donc permis de couvrir une plage d'indice des vides allant de 0.5 à 1.1 environ. Une fois la mise en place

terminée, on procède à la saturation de l'échantillon. La saturation se fait par contre pression (environ -75kPa) avec de l'eau désaéré.

Une fois l'échantillon saturé, l'essai commence et, lorsque les débits d'eau à l'entrée et à la sortie sont stables (régime permanent), le calcul de la conductivité hydraulique est alors effectué à l'aide de la formule 4.4. À noter que pour tous les essais, la conductivité hydraulique est corrigée selon la température du fluide.

4.3.7 Essais de perméabilité avec cycles de gel-dégel

Le système de recouvrement doit jouer son rôle pour une période prolongée. Le climat au Québec étant très difficile pour les matériaux meubles (cycles gel-dégel, mouillage-séchage), il s'avère nécessaire de connaître certains aspects de leur comportement face aux cycles gel-dégel.

Des essais de perméabilité avec cycles de gel et dégel ont donc été réalisés. Au total, quinze cycles de gel-dégel ont été effectués entre lesquels quatre essais de perméabilité ont été faits : le premier avant de commencer les cycles de gel-dégel, le deuxième après le cinquième cycle, le troisième au dixième cycle et un dernier, après le quinzième cycle.

Entre chaque essai de perméabilité réalisé à charge constante dans un perméamètre à paroi rigide, on a soumis le matériau à des cycles de gel-dégel en plaçant le perméamètre spécialement conçu à cet effet au congélateur pendant 24 heures et en le sortant 24 heures. La variation de la perméabilité à la suite des cycles gel-dégel constitue alors une indication des effets structuraux du gel sur le matériau (Day, 1996).

4.3.8 Essais de rétention d'eau

Comme il a été dit au chapitre précédent, les caractéristiques de succion des matériaux est d'une importance primordiale puisque la teneur en eau du matériau dans la barrière, qui dépend des forces capillaires de succion qui s'y développent, affecte grandement sa capacité à limiter le passage de l'oxygène.

Le programme de cette partie du projet comporte trois étapes. La première consiste dans la détermination de la courbe de rétention d'eau des matériaux. La seconde est l'analyse des courbes avec des modèles mathématiques descriptifs et la dernière est la prédiction des courbes à partir des caractéristiques de base des matériaux (voir section 3.3.2).

La procédure d'essai au laboratoire pour l'obtention des courbes de rétention d'eau (ou courbes caractéristiques de succion) est la norme ASTM D3152-72. L'échantillon de sol est placé sur une plaque poreuse dans une cellule pressurisée (de type Tempe). La figure 4.1 présente l'appareil. L'échantillon de matériau meuble est placé sur la plaque céramique dans l'anneau métallique. La pression d'air est appliquée à travers la valve supérieure de l'appareil.

Au montage, la plaque de céramique et l'échantillon sont saturés. L'essai est monté de façon à éliminer tout excès d'eau sur la surface de la cellule. La pression d'air appliquée à l'échantillon est généralement réglée selon la succion désirée. L'échantillon est alors soumis à une pression d'air positive tandis que l'eau de sortie subit une pression atmosphérique (pression de référence). L'air est donc comprimé dans la cellule et à l'équilibre, la quantité d'eau évacuée de l'échantillon correspond à sa capacité de rétention en fonction de la pression appliquée, la succion est donnée par la différence entre la pression d'eau (u_w) et la pression d'air (u_a) (Fredlund et Rahardjo, 1993). Avec plusieurs niveaux de pression, la relation succion-humidité peut être établie. À la fin de l'essai, quand la succion la plus élevée désirée a été établie,

l'appareil est démonté et une mesure de la teneur en eau finale de l'échantillon est réalisée. On peut ainsi calculer l'indice des vides et le degré de saturation final.

Le potentiel de succion a aussi été étudié à l'aide de plusieurs modèles mathématiques (voir section 3.3.2), soit ceux de van Genuchten et de Fredlund qui sont considérés comme des méthodes descriptives (e.g. van Genuchten et al., 1991; Fredlund et al., 1994), et le modèle de Kovács modifié qui est une méthode dite de prédiction (voir chap. 3). Cette dernière prédit la courbe à partir des propriétés de base du matériau (e.g. Kovács, 1981; Aubertin et al. 1995, 1997).

4.3.9 Diffusion d'oxygène

Parmi les diverses méthodes de mesure de la diffusion gazeuse dans un matériau poreux décrites par Tremblay (1995), celle utilisée par Yanful (1993) a été choisie. Cependant, quelques modifications lui ont été apportées. Il s'agit d'une méthode transitoire en colonne dont la concentration à la source décroît avec le temps jusqu'à atteindre une valeur stationnaire (Tremblay, 1995).

La mesure de D_e est faite pour diverses valeurs du degré de saturations S_r. La procédure utilisée implique une condition où la concentration d'oxygène à la source décroît progressivement, alors que celle du récepteur augmente proportionnellement. Cet essai est fait à l'aide d'une colonne constituée d'un cylindre PVC transparent de 10 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur, auquel sont fixés les raccords et conduites ainsi que le senseur d'oxygène qui mesure la concentration dans la cellule (figure 4.2).

Pour cet essai les matériaux étudiés sont humidifiés et ils sont placés entre deux couches de sable préalablement séché au four. La mis en place et la densification sont fait directement dans le cylindre. Pour minimiser les fuites d'oxygène, les parois du cylindre sont enduites de

graisse à vide avant la mise en place du matériau meuble. Des joints toriques enduits de graisse à vide assurent l'étanchéité des extrémités du montage qui est ensuite vissé.

Avant de débuter l'essai, on purge l'appareil à l'azote; la durée de la purge augmente avec le degré de saturation de l'échantillon. Ainsi, les échantillons ayant une saturation inférieure à environ 70 % prendront approximativement trois heures de purge tandis que ceux avec une plus grande saturation nécessiteront 12 heures de purge. Ensuite, le réservoir supérieur (la source) est ouvert et se remplit d'air (à environ 21 % d'oxygène). Le système fermé permet la diffusion de l'oxygène à travers l'échantillon sous l'effet du gradient de concentration. À l'équilibre, correspondant à l'état stationnaire, la concentration est partout la même dans la cellule. La concentration en oxygène dans le réservoir source est donnée par un analyseur d'oxygène (Modèle Teledyne).

A la fin de chaque essai, le sol est pesé et la teneur en eau finale est mesurée afin de vérifier une possible variation entre le début et la fin de l'essai. La masse, le volume et la teneur en eau des échantillons au début de l'essai servent à calculer les porosités à l'air et à l'eau utilisées lors de la détermination du coefficient de diffusion avec une solution numérique des lois de Fick (voir chapitre 3). La courbe de concentration en fonction du temps dans le haut du cylindre permet de déduire la valeur de D_p (coefficient de diffusion modélisé), par comparaison avec les résultats de modélisation découlant du logiciel POLLUTEv6 (Rowe et al., 1994). Ce logiciel permet la modélisation des essais à partir des paramètres physiques expérimentaux. Le logiciel est décrit de façon assez détaillé dans le mémoire de maîtrise de Tremblay (1995). Le coefficient de diffusion est déterminé en ajustant la solution de l'équation transitoire unidimensionnelle au profil expérimental mesuré de la concentration en fonction du temps. Le coefficient D_p n'inclut pas la porosité disponible pour la diffusion de l'échantillon (la porosité à l'air, n_a, dans ce cas). Ce coefficient de diffusion modélisé, D_p, multiplié par la porosité à l'air, n_a, de l'échantillon donne le coefficient de diffusion effectif expérimental D_e. D'autres détails sont aussi donnés au chapitre 5.

4.4 Modèles physiques

L'utilisation de couvertures "*sèches*" pour le contrôle de la production de DMA repose sur la capacité que possède ce genre de couverture à agir comme barrière capillaire et ainsi limiter le passage de l'eau et la diffusion de l'oxygène. Afin d'évaluer la performance et l'efficacité de barrières multicouches visant à limiter le DMA, des essais de laboratoire sont réalisés à l'intérieur de colonnes dans lesquelles on inclut les matériaux étudiés. Il s'agit alors de construire des systèmes multicouches placés sur des rejets réactifs.

L'une des préoccupations, lors de ces essais en laboratoire, est de vérifier le comportement hydrique et physico-chimique des constituants pour les conditions prédéterminées.

Comme il ne semble pas exister, à l'heure actuelle, de protocole expérimental bien établi (ou normalisé) pour réaliser des essais en colonne, les essais effectués dans le cadre de ce projet sont conçus de façon à reproduire le plus fidèlement possible certaines des conditions que l'on retrouve sur le terrain.

4.4.1 Montage des colonnes

Le concept de la colonne de contrôle a été développé pour aider à quantifier l'ampleur de la réduction de la production de DMA (Aachib et al., 1993; Aubertin et al., 1995; Aachib 1997). Pour ce projet, sept colonnes ont d'abord été montées selon la géométrie des cellules construites sur le terrain. Parmi les sept colonnes, cinq possèdent une barrière de recouvrement multicouche alors que les deux dernières, sans barrière, servent de colonnes témoin. Ces dernières permettent de mettre en évidence l'effet d'un recouvrement sur la production d'acide due à l'oxydation des minéraux sulfurés.

Les cinq colonnes possédant un système de recouvrement sont instrumentées avec des électrodes RDT (réflectométrie dans le domaine du temps) afin de pouvoir suivre l'évolution du profil hydrique dans les couches de ce système pendant toute la durée de l'expérience. L'unité RDT utilisée est un modèle Tectronix 1502B.

Pour pouvoir établir une corrélation entre les expériences de laboratoire et celles in situ, les colonnes ont été construites avec les mêmes matériaux et la même stratigraphie que les cellules de terrain (Aubertin et al., 1997).

Les colonnes expérimentales de laboratoire sont en Plexiglas. Elles varient de 150 cm à 200 cm de hauteur à l'exception des deux dernières (sans couverture) qui ont été construites à l'aide d'une seule section et qui contiennent 30 cm de résidus réactifs (fig.4.3a). Les colonnes sont formées de sections de 50 cm chacune et leur diamètre intérieur est de 15.24 cm.

Toutes les colonnes possèdent une couche de résidus réactifs, provenant du site Norebec-Manitou, d'une épaisseur de 30 cm et placée au bas des colonnes. Cette couche repose sur un géotextile, qui lui-même repose sur un disque en céramique poreuse «Soil moisture 604d03-B.5M2» de 0.5 bar, pour permettre le drainage de l'eau tout en empêchant le passage de l'air. Pour faciliter le drainage, un disque perforé en plastique de 75 mm a été placé sous la pierre poreuse (fig. 4.3b). Un tube en plastique relie la base de la colonne à un flacon qui est utilisé pour collecter l'eau drainée de la colonne.

Les matériaux ont été mis en place uniformément et densifiés directement à l'intérieur de la colonne avec une énergie constante à l'aide d'une masse de 4.5 kg. On a essayé de respecter le niveau de compactage (densité) des matériaux aux cellules expérimentales in situ (tableaux 4.1-4.8). Avant de placer les matériaux, l'intérieur de la colonne a été

enduit avec de la graisse à vide pour prévenir l'infiltration de l'oxygène à travers la paroi. La configuration de la colonne de contrôle 1 (figure 4.4) est la suivante : une couche drainante d'environ 30 cm de sable en surface, qui a été compactée à une densité sèche approximative de 92 % de l'optimum de l'essai proctor modifié avec une teneur en eau moyenne de 3.2 %. Cette couche repose sur 60 cm de résidus non réactifs (sigma grossier) qui représente la couche à forte rétention capillaire; cette dernière a été compactée à 86 % de l'optimum proctor avec une teneur en eau moyenne de 10.2 %. En dessous de cette couche, on trouve 40 cm de sable, qui sert de couche non capillaire, compacté à 93 % de l'optimum proctor avec la même teneur en eau que la couche de sable de surface. Finalement, on trouve une épaisseur de 30 cm de résidus miniers sulfureux non oxydés compactés à 80% de l'optimum proctor avec une teneur en eau de 4.5 %.

Toutes les colonnes possédant des barrières à recouvrement ont été construites de façon semblable (figure 4.5). Toutefois, la couche à forte rétention capillaire change d'une cellule à l'autre; celle de la colonne 2, d'une épaisseur de 60 cm, est construite avec un matériel silteux d'origine naturelle (till), celle de la colonne 3, d'une épaisseur de 30 cm, avec des résidus miniers plus fins (sigma fin), celle de la colonne 4, d'une épaisseur de 30 cm, avec 15 cm de résidus miniers non sulfureux (sigma grossier) amendés à la bentonite et 15 cm de résidus miniers non sulfureux non amendés, et la colonne 5, d'une épaisseur de 90 cm, avec des résidus miniers, non sulfureux, (sigma fin).

Chaque colonne avec un système de recouvrement est instrumentée avec deux sondes RDT; une dans la partie supérieure de la couche de sable du bas et la seconde dans la partie supérieure de la couche à forte rétention capillaire. Cependant, la colonne 4 qui possède deux couches distinctes à forte rétention capillaire possède une sonde RDT dans chacune de celles-ci.

Après montage, les colonnes ont été saturées lentement à partir de la valve du bas, avec de l'eau désaérée, jusqu'au mouillage complet des résidus réactifs. À partir de cette hauteur, la saturation s'est fait à partir de la valve située au-dessus de l'interface des résidus réactifs et du sable pour éviter toute contamination provenant des résidus réactifs. Les colonnes sont considérées saturées lorsque le niveau d'eau dépasse d'un centimètre la surface de la dernière couche de sable. Une fois les colonnes saturées, la valve de drainage a été ouverte jusqu'à l'équilibre de désaturation.

Ultérieurement, deux autres colonnes avec des recouvrements se sont rajoutées (Fig. 4.5). Ces dernières ont été montées pour représenter le cas de couvertures construites avec des moyens hydrauliques, en utilisant une porosité plus élevée. La colonne #8 a été construite avec les résidus sigma grossier et la colonne #9 avec les résidus miniers Sigma fin. De bas en haut, pour chaque colonne on retrouve une couche de 30 cm composée de résidus miniers réactifs (Manitou), 40 cm de sable, 60 cm de résidus minier sigma fin ou sigma grossier et 30 cm de sable. Contrairement aux autres colonnes, les matériaux dans les colonnes #8 et #9 n'ont été densifiées que très légèrement. On a installé de petites plaques de tassement : deux plaques ont été mises en place par colonne soit une à l'interface résidus miniers réactifs et sable et une sur les résidus fins non réactifs juste sous la couche de sable. La saturation des deux colonnes s'est faite de façon différente, en appliquant une pression négative (pratiquement sous vide) pendant 2 jours avant de saturer le système (sous vide) avec de l'eau désaérée. Ces colonnes sont aussi instrumentées avec trois sondes TDR ; une dans la partie supérieure de la première couche de sable, la deuxième dans la partie inférieure de la couche à forte rétention capillaire et la dernière, dans la partie supérieure de la dernière. Ces colonnes permettront d'estimer l'efficacité d'un recouvrement construit par des moyens hydrauliques plutôt que mécaniques. On pourra en outre suivre les tassements des différents matériaux dans le temps en fonction des conditions hydrogéologiques et géochimiques induites par les cycles de mouillage et séchage.

Périodiquement, environ 10 cm d'eau sont ajoutés dans toutes les colonnes. L'eau de percolation est recueillie à la base de chaque colonne pour être analysée. Les mesures porteront sur le pH, le Eh, la conductivité électrique, les teneurs en sulfates et en métaux dissous. La procédure suivie est la même que pour la phase I du projet (Aubertin et al., 1995; Aachib, 1997). Comme ces essais se poursuivront pendant encore plusieurs mois, seuls les résultats obtenus jusqu'à la fin de juin 1997 seront rapportés dans ce mémoire. Les caractéristiques des colonnes sont présentées aux tableaux 4.1à 4.8.

Tableau 4-1 Caractéristiques de la colonne 1

COUCHE	(Dr)	Diamètre (col. cm)	Longueur (cm) prévue	Longueur (cm) obtenue	Volume (col. cm^3)
sable	2.780	15.24	30.00	30.00	5472.44
sigma grossier	2.798	15.24	60.00	60.40	11017.85
sable	2.780	15.24	40.00	39.85	7269.23
manitou	2.849	15.24	30.00	29.75	5426.84

COUCHE	Masse hum M (g)	Excédent (p/r au poids estimé)	Déficit (p/r au poids estimé)	Compactage (approx.)	Compactage (réel)
sable	11144.00		356.90	90.00	91.84
sigma grossier	18570.40	671.70	255.00	86.70	80.81
sable	14896.30		43.10	90.50	92.42
manitou	9226.80		0.80	80.00	79.37

COUCHE	W (%) (moyen)	e	Masse sèche M_d (g)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)	Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)
sable	3.00	0.41	10809.68	1.98	2.04
sigma grossier	11.20	0.87	16490.52	1.50	1.69
sable	3.00	0.40	14449.41	1.99	2.05
manitou	4.40	0.75	8820.82	1.63	1.70

COUCHE	γ opt (100%) (kg/m^3)	γ (kg/m^3)	n (%)	Sr
sable	2110.00	1937.76	28.95	20.47
sigma grossier	1817.00	1468.27	46.51	36.04
sable	2110.00	1949.98	28.50	20.93
manitou	2009.00	1594.52	42.95	16.65

Tableau 4-2 Caractéristiques de la colonne 2

COUCHE	(Dr)	Diamètre (col. cm)	Longueur (cm) prévue	Longueur (cm) obtenue	Volume (col. cm^3)
sable	2.780	15.24	30.00	31.40	5727.82
till	2.743	15.24	60.00	60.50	11036.09
sable	2.780	15.24	40.00	40.00	7296.59
manitou	2.849	15.24	30.00	30.00	5472.44

COUCHE	Masse hum M (g)	Excédent (p/r au poids estimé)	Déficit (p/r au poids estimé)	Compactage (approx.)	Compactage (réel)
sable	11984.70		790.20	93.40	90.96
till	20794.70		1389.70	90.40	78.37
sable	15487.10		1120.10	89.90	90.59
manitou	10965.60		1739.60	80.00	79.94

COUCHE	W (%) (moyen)	e	Masse sèche M_d (g)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)	Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)
sable	6.50	0.42	11205.69	1.96	2.09
till	25.85	0.96	15419.27	1.40	1.88
sable	8.20	0.43	14217.16	1.95	2.12
manitou	18.30	0.74	8958.90	1.64	2.00

COUCHE	γ opt (100%) (kg/m^3)	γ (kg/m^3)	n (%)	Sr
sable	2110.00	1919.19	29.63	42.92
till	1749.00	1370.62	49.06	73.61
sable	2110.00	1911.45	29.91	53.42
manitou	2009.00	1605.99	42.54	70.43

Tableau 4-3 Caractéristiques de la colonne 3

COUCHE	(Dr)	Diamètre (col. cm)	Longueur (cm) prévue	Longueur (cm) obtenue	Volume (col. cm^3)
sable	2.780	15.24	25.00	24.88	4538.48
sigma fin	2.809	15.24	30.00	30.32	5530.81
sable	2.780	15.24	45.00	45.25	8254.26
manitou	2.849	15.24	30.00	30.35	5536.29

COUCHE	Masse hum M (g)	Excédent (p/r au poids estimé)	Déficit (p/r au poids estimé)	Compactage (approx.)	Compactage (réel)
sable	9288.90		259.70	90.40	87.07
sigma fin	9511.70	419.30		83.60	83.71
sable	16892.50		711.60	90.00	90.77
manitou	9226.00			80.00	77.25

COUCHE	W (%) (moyen)	e	Masse sèche M_d (g)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)	Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)
sable	8.50	0.48	8499.34	1.87	2.05
sigma fin	9.30	0.80	8627.11	1.56	1.72
sable	4.60	0.42	16115.45	1.95	2.05
manitou	5.07	0.80	8758.24	1.58	1.67

COUCHE	γ opt (100%) (kg/m^3)	γ (kg/m^3)	n	Sr
sable	2110.00	1837.15	0.33	48.78
sigma fin	1828.00	1530.19	0.44	32.62
sable	2110.00	1915.28	0.30	30.17
manitou	2009.00	1551.91	0.44	18.03

Tableau 4-4 Caractéristiques de la colonne 4

COUCHE	(Dr)	Diamètre (col. cm)	Longueur (cm) prévue	Longueur (cm) obtenue	Volume (col. cm^3)
sable	2.780	15.24	30.00	30.00	5472.44
sig gro-amen	2.822	15.24	15.00	14.90	2717.98
sig gro-no-ame	2.798	15.24	15.00	15.10	2754.46
sable	2.780	15.24	40.00	39.40	7187.14
manitou	2.849	15.24	30.00	29.90	5454.20

COUCHE	Masse hum M (g)	Excédent (p/r au poids estimé)	Déficit (p/r au poids estimé)	Compactage (approx.)	Compactage (réel)
sable	11655.80		236.20	93.00	94.47
sig gro-amen	4252.50	142.50		74.00	64.48
sig gro-no-ame	4291.80	236.20		81.60	74.83
sable	15114.00		731.00	90.00	93.66
manitou	9660.40		434.40	80.00	82.34

COUCHE	W (%) (moyen)	e	Masse sèche M_d (g)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)	Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)
sable	4.60	0.37	11119.63	2.03	2.13
sig gro-amen	16.90	1.17	3533.83	1.30	1.56
sig gro-no-ame	11.00	1.02	3819.70	1.39	1.56
sable	4.20	0.38	14479.21	2.01	2.10
manitou	4.80	0.69	9196.70	1.69	1.77

COUCHE	γ opt (100%) (kg/m^3)	γ (kg/m^3)	n	Sr
sable	2110.00	1993.33	0.27	34.74
sig gro-amen	1978.00	1275.46	0.54	40.75
sig gro-no-ame	1818.00	1360.38	0.50	30.24
sable	2110.00	1976.32	0.28	30.73
manitou	2009.00	1654.13	0.41	19.83

Tableau 4-5 Caractéristiques de la colonne 5

COUCHE	(Dr)	Diamètre (col. cm)	Longueur (cm) prévue	Longueur (cm) obtenue	Volume (col. cm^3)
sable	2.780	15.24	30.00	30.00	5472.44
sigma fin	2.809	15.24	90.00	91.80	16745.67
sable	2.780	15.24	40.00	40.60	7406.04
manitou	2.849	15.24	30.00	30.20	5508.92

COUCHE	Masse hum M (g)	Excédent (p/r au poids estimé)	Déficit (p/r au poids estimé)	Compactage (approx.)	Compactage (réel)
sable	11473.00		446.00	92.00	93.67
sigma fin	27830.40	1207.60		86.70	80.35
sable	14740.60		277.60	90.50	88.93
manitou	9507.00		281.00	80.00	80.14

COUCHE	W (%) (moyen)	e	Masse sèche M_d (g)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)	Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)
sable	3.90	0.38	11025.55	2.01	2.10
sigma fin	10.40	0.89	24936.04	1.49	1.66
sable	3.90	0.45	14165.72	1.91	1.99
manitou	4.90	0.74	9041.16	1.64	1.73

COUCHE	γ opt (100%) (kg/m^3)	γ (kg/m^3)	n	Sr
sable	2110.00	1976.46	0.28	28.54
sigma fin	1818.00	1460.81	0.47	32.96
sable	2110.00	1876.38	0.31	23.91
manitou	2009.00	1610.00	0.42	18.97

Tableau 4-6 Caractéristiques des colonnes 6 et 7

COUCHE	(Dr)	Diamètre (col. cm)	Longueur (cm) prévue	Longueur (cm) obtenue	Volume (col. cm^3)
manitou 6	2.849	15.24	30.00	29.90	5454.20
manitou 7	2.849	15.24	30.00	29.90	5454.20

COUCHE	Masse hum M (g)	Excédent (p/r au poids estimé)	Déficit (p/r au poids estimé)	Compactage (approx.)	Compactage (réel)
manitou 6	9226.00			80.00	78.63
manitou 7	9226.00			80.00	78.63

COUCHE	W (%) (moyen)	e	Masse sèche M_d (g)	Masse volumique sec ρ_d (g/cm^3)	Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)
manitou 6	4.80	0.77	8783.15	1.61	1.69
manitou 7	4.80	0.77	8783.15	1.61	1.69

COUCHE	ġ opt (100%) (kg/m^3)	ġ (kg/m^3)	n	Sr
manitou 6	2009.00	1579.75	0.43	17.78
manitou 7	2009.00	1579.75	0.43	17.78

Tableau 4-7 Caractéristiques de la colonne 8

COUCHE	(Dr)	Diamètre (col. cm)	Longueur (cm) prévue	Longueur (cm) obtenue	Volume (col. cm^3)
sable	2.780	15.24	30.00	30.00	5472.44
sigma fin	2.809	15.24	80.00	79.95	14584.05
sable	2.780	15.24	60.00	59.90	10926.64
manitou	2.849	15.24	30.00	30.20	5508.92

COUCHE	Masse hum M (g)	W (%) (moyen)	e	Compactage (terrain)	Compactage (réel)
sable	10238.10	7.00	0.60	92.00	80.89
sigma fin	20381.80	9.30	1.22	86.70	68.40
sable	19581.20	3.00	0.60	90.50	80.82
manitou	7645.30	4.40	1.15	80.00	64.79

COUCHE	Masse sèche M_d (g)	n	Sr	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)	Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)
sable	9521.43	0.37	32.55	1.74	1.87
sigma fin	18486.29	0.55	21.48	1.27	1.40
sable	18993.76	0.37	13.92	1.74	1.79
manitou	7308.91	0.53	10.93	1.33	1.39

COUCHE	γ opt (100%) (kg/m^3)	γ (kg/m^3)
sable	2110.00	1706.83
sigma fin	1818.00	1243.48
sable	2110.00	1705.27
manitou	2009.00	1301.53

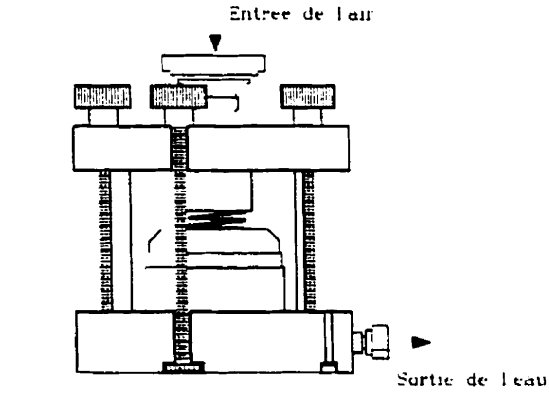
Tableau 4-8 Caractéristiques de la colonne 9

COUCHE	(Dr)	Diamètre (col. cm)	Longueur (cm) prévue	Longueur (cm) obtenue	Volume (col. cm^3)
sable	2.780	15.24	30.00	31.60	5764.30
sigma gros	2.798	15.24	80.00	83.80	15286.35
sable	2.780	15.24	60.00	60.40	11017.85
manitou	2.849	15.24	30.00	29.40	5362.99

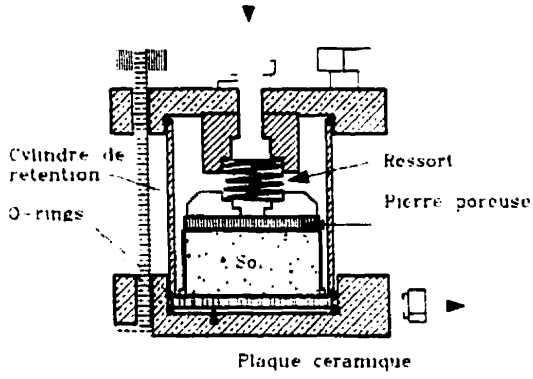
COUCHE	Masse hum M (g)	W (%) (moyen)	e	Compactage (approx.)	Compactage (réel)
sable	9687.30	3.23	0.71	92.00	75.61
sigma gros	21100.40	10.17	1.26	86.70	66.91
sable	20887.00	3.23	0.52	90.50	85.29
manitou	6885.00	4.47	1.32	80.00	59.89

COUCHE	Masse sèche M_d (g)	n	Sr	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)	Masse volumique humide ρ_h (g/cm^3)
sable	9374.40	0.42	12.66	1.63	1.68
sigma gros	18954.49	0.56	22.65	1.24	1.38
sable	20212.35	0.34	17.42	1.83	1.90
manitou	6577.24	0.57	9.63	1.23	1.28

COUCHE	γ opt (100%) (kg/m^3)	γ (kg/m^3)
sable	2110.00	1595.39
sigma gros	1818.00	1216.40
sable	2110.00	1799.65
manitou	2009.00	1203.11



'Tempe Pressure Cell' - vue generale



'Tempe Presure Cell' - vue en coupe

Figure 4-1 Schéma de la cellule pressurisée de type «Tempe Cell» (Tiré de Kissiova, 1996).

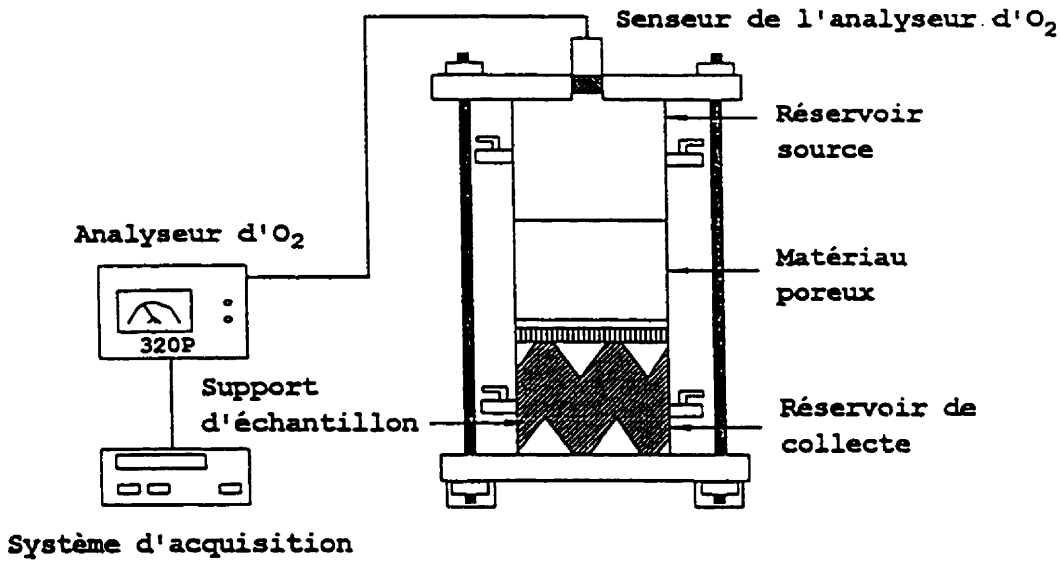


Figure 4-2 Montage expérimentale utilisé pour la mesure du coefficient de diffusion (Tiré de Tremblay, 1995).

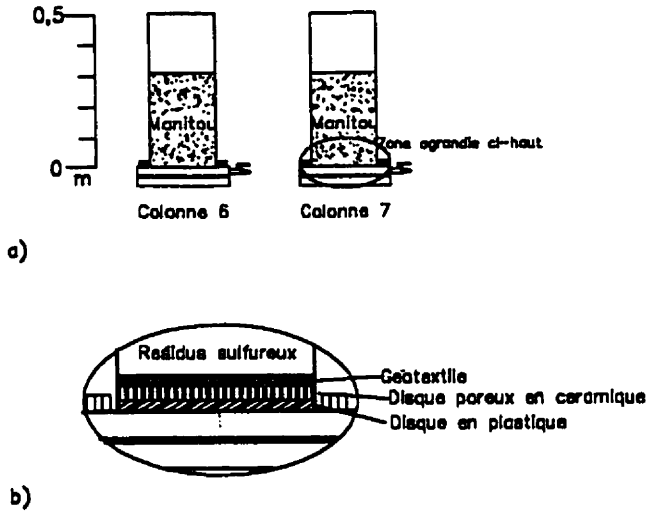


Figure 4.3 a) Première section de chaque colonne, b) montage utilisés pour empecher le lessivage des particules fines.

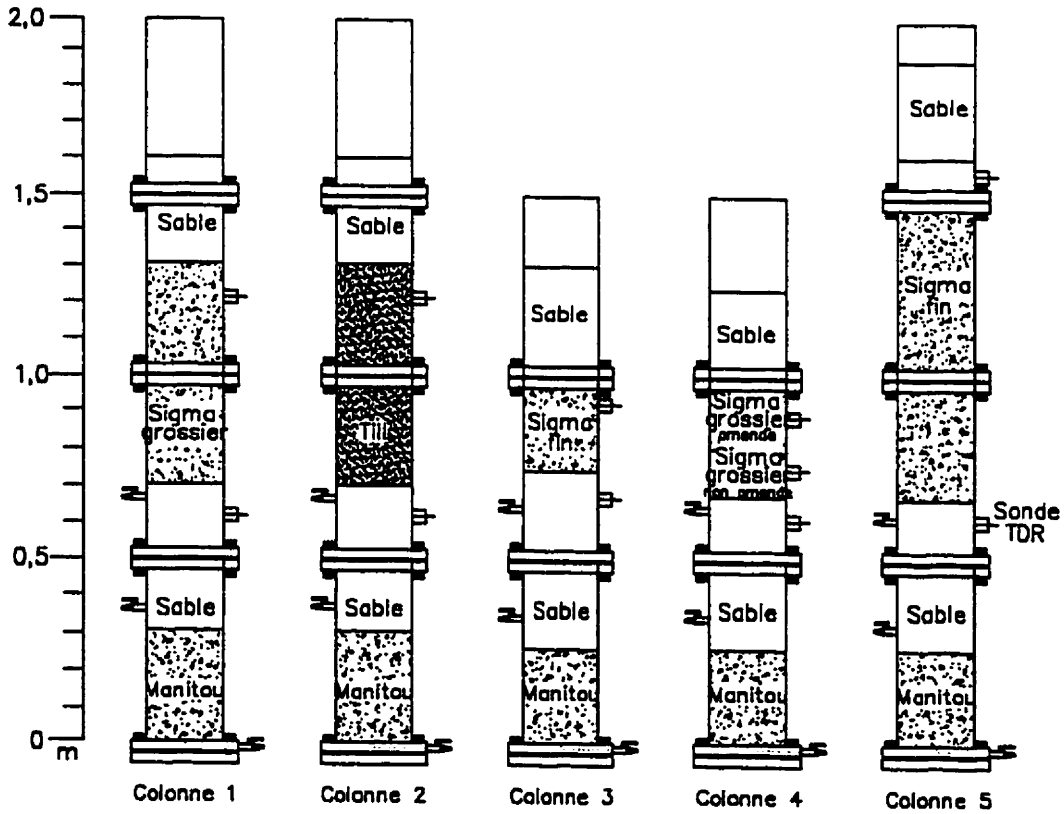


Figure 4.4 Colonnes expérimentales.

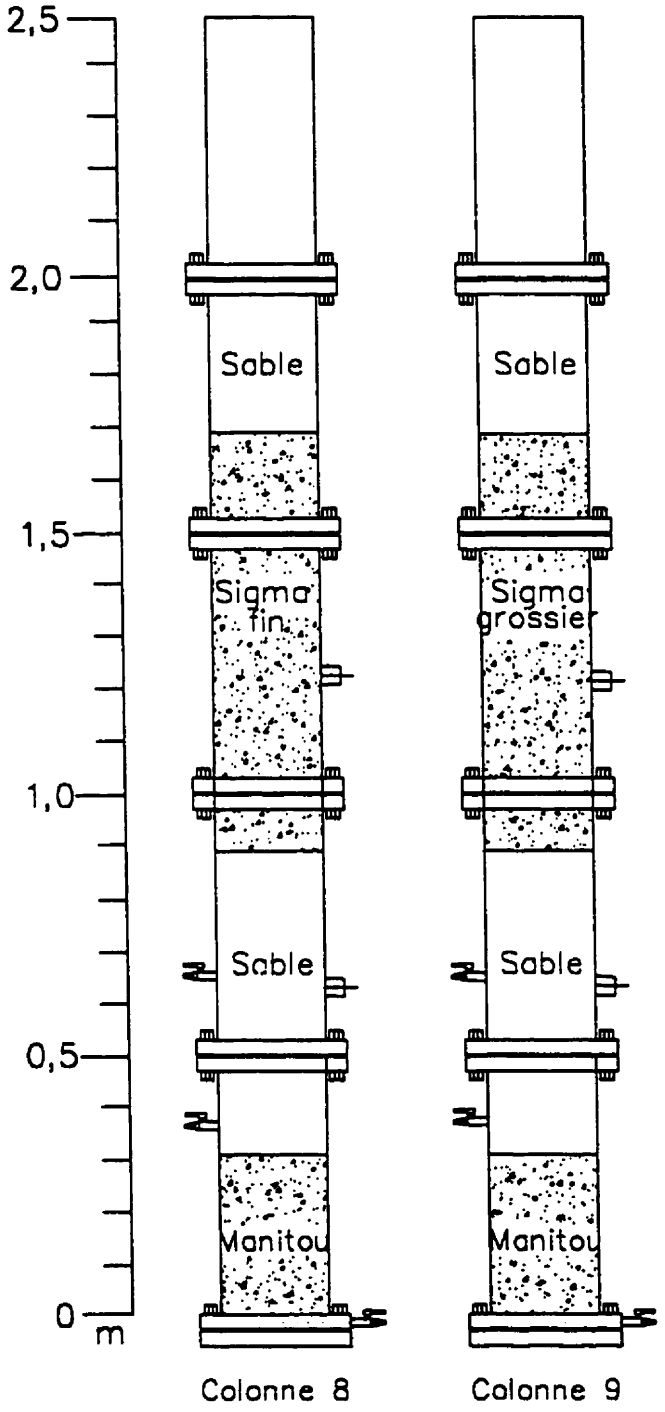


Figure 4.5 Colonnes expérimentales des matériaux «lâches»

CHAPITRE 5 - PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 Généralités

Le programme expérimental décrit dans le chapitre 4 a été appliqué avec les matériaux choisis. L'ensemble des essais a été réalisé au laboratoire d'Hydrogéologie et Environnement minier de l'École Polytechnique de Montréal. Les résultats des différents essais sont présentés sous forme de tableaux et de figures dans les pages qui suivent.

Les résultats obtenus dans les différents essais sont aussi analysés et discutés, tout comme les problèmes rencontrés lors des essais. En règle général, les résultats concordent bien avec ceux anticipés et ceux trouvés dans la littérature.

5.2 Essais de base

5.2.1 Analyses minéralogiques

Les principaux minéraux identifiés dans les échantillons étudiés (sigma grossier, sigma fin et sigma amendé) sont listés au tableau 5.1.

Il est intéressant de constater que les échantillons analysés ont un faible potentiel de génération d'acide (% sulfures bas) et un très bon potentiel de neutralisation de par son abondance en chlorite, albite et carbonates qui excède de beaucoup la quantité de sulfures présents.

5.2.2 Densité des grains solides

Pendant le présent projet, au moins trois essais de densité relative ont été effectués pour chaque échantillon. Les résultats de ces essais sont présentés au tableau 5.2.

Les valeurs de densité des solides des résidus miniers (entre 2.743 et 8.49) correspondent bien aux valeurs trouvées dans la littérature (Matyas et al., 1984 ; Eivemark et Robinson, 1989 ; L'Ecuyer et al., 1992 ; Bussière, 1993) et aux valeurs des résidus miniers du même secteur. Les rejets de concentrateur de la région ont une densité relative moyenne de 2.8 (Aubertin et al., 1991; Bussière, 1993. La valeur de la densité relative pour le till (2.743) est légèrement plus faible et celle du sable est de 2.780 (typique des sols, e.g. Bowles, 1984).

5.2.3 Analyses granulométriques

Au moins cinq analyses granulométriques ont été effectuées pour chaque matériau étudié. Les courbes moyennes sont présentées à la figure 5.1 et sont résumées au tableau 5.3.

On remarque qu'il y a concordance entre les courbes granulométriques des matériaux fins non-réactifs. La granulométrie du sable est la plus grossière et celle des résidus sulfureux se situe entre celle du sable et celle des matériaux fins. On note également que les courbes des résidus Sigma fin, Sigma grossier et till ont un coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$) comparable; on peut les qualifier de matériaux plutôt uniformes, tout comme le sable qui a un coefficient d'uniformité de 3.92. Cependant, les résidus de Sigma amendé ont un coefficient d'uniformité assez différent des autres : 48.28. Ceci est dû à l'ajout d'environ 8% de bentonite, qui a pour effet de diminuer le diamètre des grains correspondant à 10 % de passant en poids (D_{10}).

5.2.4 Limites de consistance

Les résultats des limites de consistance sont présentés au tableau 5.4. Les essais ont été évalués à partir de deux méthodes : la méthode de Casagrande (décrite dans la norme ASTM-4318-84) et la méthode du pénétromètre à cône suédois (décrite dans la norme BNQ 2501-092).

La norme ASTM D4318-84 n'a pas pu être respectée tout au long des essais de la limite de liquidité avec la méthode en plusieurs points, le nombre de chocs maximal requis étant difficilement atteignable avec les résidus miniers. Toutefois, les valeurs obtenues avec cette méthode sont très semblables à celles calculées à partir des essais en un seul point (voir chap. 4) et elles correspondent bien à celles évaluées pour d'autres rejets de concentrateurs. Le w_l a donc été calculé à partir des essais en un seul point et, ensuite, avec la méthode en plusieurs points lorsque cela était possible. La valeur moyenne a été évaluée et les résultats sont présentés au tableau 5.3. On note que le w_L des résidus Sigma fin, Sigma grossier et le till sont semblables; 18.5 pour le premier, 18 pour le deuxième et 20.5 pour le dernier. Cependant, le résidu Sigma amendé possède un w_L beaucoup plus élevé soit d'environ 33.

Les résultats obtenus à l'aide du cône suédois sont un peu différents de ceux trouvés par la méthode de Casagrande, pour les matériaux non-amendés le w_L est de 26 et pour le matériau amendé, il est de 34. Pour ce qui est de la limite de plasticité, elle est de 13.1 pour le Till et d'environ 25.0 pour le matériau amendé. Le w_p des résidus miniers varie entre 14.0 et 16.2.

Finalement, l'indice de plasticité ($I_p=w_L-w_p$) varie selon la méthode utilisée, ce qui est normal puisque les valeurs trouvées pour l'indice de liquidité sont différentes avec chaque

méthode. Pour Sigma fin, le I_p calculé avec le w_l selon la méthode Atterberg est de 2.3, tandis que celui trouvé à l'aide du cône suédois est de 9.8. Pour Sigma grossier on obtient 3.2 avec Atterberg et 13.6 avec le cône suédois. On voit la même différence pour le Till, 7.4 avec Atterberg et 12.9 avec le cône. En ce qui concerne le matériau amendé, les deux méthodes sont équivalentes : on retrouve 8.4 pour Atterberg et 7.9 pour le cône.

D'après le système unifié (USCS) pour les essais effectués avec la méthode de Casagrande, on a trouvé que les matériaux étudiés sont des silts inorganiques ou poussières de roche peu plastiques (ML). Le till est classifié comme une argile inorganique de plasticité faible à moyenne (CL).

Pour ce qui est des résultats avec le cône suédois, on a observé une différence significative dans les résultats obtenus pour les résidus miniers. D'après le USCS, nos matériaux seraient des argiles inorganiques de plasticité faible à moyenne (CL). Rappelons toutefois que ces méthodes ont été conçue pour calculer les indices de plasticité des argiles et non des silts inorganiques. Notons qu'on obtient pour le till et les résidus amendés à la bentonite des résultats très semblables avec les deux méthodes.

5.2.4 Essais de compactage

Les différentes courbes de compactage et les résultats principaux sont présentés à la figure 5.2 et au tableau 5.4 respectivement. Les résultats indiquent que la teneur en eau optimale (w_{opt}) varie de 10 à 17 % environ pour l'ensemble des matériaux. Le poids volumique sec (γ_d) varie alors de 17.8 à 21.1 kN/m^3, ce qui correspond à un indice de vides (e) variant entre 0.32 à 0.57.

Les résultats des essais de compactage des matériaux étudiés se comparent bien aux valeurs trouvées pour des matériaux analogues de la même région (Bussière, 1993 ; Ricard

1994). Les courbes des matériaux non amendés nous indiquent que ces résidus ont un comportement semblable au compactage et que l'ajout de la bentonite tend à diminuer la teneur en eau à γ_d optimum. Les résultats obtenus par Ricard (1994) pour des résidus amendés à la bentonite montrent le même effet.

5.2.6 Essais de consolidation

Les résultats de ces essais sont résumés au tableau 5.6. Les figures 5.3 à 5.6 présentent les courbes de consolidation (e vs log P) pour les matériaux de la couche à faible perméabilité et à forte rétention capillaire. On peut, à partir des ces courbes, déterminer l'indice de compression (C_c) et l'indice de recompression (C_r). Ces indices ont été déterminés en se basant sur la méthode proposée par Bowles (1984). Toutefois, la détermination du coefficient de consolidation (C_v) ne peut se faire graphiquement, à cause de la rapidité de consolidation primaire qu'ont les sols silteux (Head, 1986). Ce dernier a donc été calculé à partir de l'équation de consolidation unidimensionnelle (Bowles, 1984).

$$C_v = \frac{k}{(m\gamma_w)} \qquad (5.1)$$

où

k : conductivité hydraulique (L/T);

m : coefficient de changement de volume ;

γ_w : poids volumique de l'eau (M/L^2T^2).

La conductivité hydraulique (k) est connue à partir des courbes de conductivité hydraulique en fonction de l'indice de vides. Le coefficient de changement de volume (m) est obtenu à l'aide des données obtenues à chaque palier de l'essai oedométrique.

Cette équation serait valide si les hypothèses suivantes sont vérifiées (Holtz et Kovács, 1981).

Le matériau est homogène et saturé à 100 %;
L'échantillon est drainé à ses deux extrémités;
La loi de Darcy s'applique;
L'eau et les grains solides sont incompressibles;
La compression et l'écoulement sont unidimensionnels;
Une légère augmentation de la contrainte ne modifie à peu près pas l'épaisseur (si ce n'est de légères déformations), et k et le coefficient de compressibilité m_v demeurent constants;
Il existe une relation linéaire unique entre la variation de volume et la contrainte effective.

Considérant dans notre cas que ces hypothèses sont suffisamment respectées pour l'application de la théorie de Terzaghi, les valeurs calculées de C_v ont été calculées avec l'équation 5.1 et ces valeurs se trouvent dans le tableau 5.5.

Les résultats obtenus sont conformes à ceux trouvés dans la littérature pour les rejets de concentrateur remaniés et homogénéisés (voir tableau 3.5). Les valeurs de Cc des essais de la présente étude varient entre 0.034 et 0.070. Celles de Cr varie entre 0.002 et 0.006. Quant au Cv, les valeurs se situent entre 3.9×10^{-4} et 3.6×10^{-1} cm^2/s la valeur la plus faible étant celle des résidus amendés.

5.3 Conductivité hydraulique

Les essais de perméabilité sur les matériaux étudiés ont été effectués à l'aide du perméamètre à paroi rigide et du perméamètre à paroi flexible.

L'étude de la conductivité hydraulique à l'aide du perméamètre à paroi rigide s'effectue suivant deux méthodes : celle où la charge est constante, et celle où la charge varie avec le temps. Les résultats sont résumés au tableau 5.7 et les figures 5.7 à 5.11 illustrent ces résultats ainsi que ceux obtenus par des essais triaxiaux. De plus, à des fins de comparaison, on a calculé la valeur de la conductivité hydraulique avec la relation de Kozeny-Carman modifiée par Chapuis et Montour (1992), et avec celle modifiée par Aubertin et al., (1996) (KCPM). Les résultats apparaissent aussi aux figures 5.7 à 5.12.

Étant donné qu'il est difficile de reproduire au laboratoire les conditions naturelles du terrain, il se peut que la représentativité de l'échantillon de même que l'anisotropie et l'hétérogénéité soient modifiées. En effet, le remaniement de l'échantillon, en particulier lors du compactage, provoque un changement de l'indice des vides et des caractéristiques internes du matériau. De plus, le degré de saturation de 100% est difficile à obtenir en laboratoire à cause de la présence de bulles d'air qui altèrent la perméabilité. Toutefois, lors des essais, le degré de saturation des échantillons a toujours été plus grand que 90%.

On a réalisé les essais avec un indice des vides variant de 0.50 à 1.05. De cette façon, on obtient la relation: conductivité hydraulique vs indices des vides. Deux granulométries sont effectuées après chaque essai triaxial pour vérifier s'il n'y a pas eu de migration de particules et s'il y a eu des changements granulométriques dus au compactage. Les résultats des granulométries effectuées montrent qu'il n'y a pas eu de migration des particules et que le compactage n'a pas altéré les échantillons. Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues lors des essais sont ensuite calculées pour la température du laboratoire et converties à la température de 20°C.

On voit dans les figures représentant les résultats que malgré les nombreuses sources d'erreurs, les valeurs de la conductivité hydraulique des différents essais de laboratoire

sont généralement concordantes, sauf en ce qui concerne les résidus miniers réactifs du site Norebec-Manitou. On peut noter que les valeurs de la conductivité hydraulique pour ces résidus sont très différentes les unes des autres. Rappelons toutefois qu'il s'agit d'un matériau dont les lixiviats ont présenté des traces évidentes de contamination et de précipités qui peuvent être la source d'une modification de la géométrie des pores du matériau d'un échantillon à l'autre et aussi ils peuvent modifier les propriétés de la plaque poreuse.

Tout comme pour les résultats obtenus par Bussière (1993) et Ricard (1994), la relation Kozeny-Carman modifiée par Chapuis et Montour (1992) s'avère en général satisfaisante pour représenter la conductivité hydraulique des résidus fins non-amendés, et ces valeurs se situent dans la plage des résultats observés dans la littérature (Matyas et al., 1984 ; Keshian et Rager, 1988 ; Haile et Kerr, 1989 ; Robinsky et al., 1991). De même pour la relation Kozeny-Carman modifiée par Aubertin et al. (1996) , celle-ci a permis d'estimer de façon satisfaisante la conductivité hydraulique des matériaux non-réactifs étudiés. Toutefois la relation modifiée par Aubertin et Bussière (1996) s'avère plus simple d'utilisation ; elle nécessite uniquement les valeurs du D_{10} et du D_{60} de la courbe granulométrique et la valeur de l'indice des vides.

Les résultats de perméabilité pour les résidus amendés à la bentonite concordent bien avec ceux trouvés dans les études de Ricard (1994). Les relations modifiées du modèle de Kozeny-Carman ne fournissent pas une très bonne approximation de la conductivité hydraulique pour ce matériau. En ce qui concerne le sable, il y a presque un ordre de grandeur entre les résultats de laboratoire et les résultats obtenus avec les relations modifiées de Kozeny-Carman; cette même observation a été effectuée par Acevedo (1996) lors de ses analyses pour des sables. On peut donc dire que la formule de Kozeny-Carman ne s'appliquerait pas très bien pour les sables avec les paramètres utilisés pour les résidus miniers. Tout comme le sable, les résultats obtenus pour les résidus réactifs ne

concordent pas avec les courbes obtenues à partir des relations modifiés de Kozeny-Carman. Il faut noter que pour ce matériau, les résultats des essais de conductivité hydraulique faits au laboratoire sont très différents les uns des autres.

En plus des sources d'erreurs possibles dues à la nature géochimique des matériaux et des erreurs possibles lors des montages au laboratoire, d'autres sources d'erreurs sont possibles telles: la circulation préférentielle de l'eau entre l'échantillon et les parois du moule; la formation d'écoulement préférentiel à l'intérieur de l'échantillon; la migration des particules fines et le colmatage de secteurs de l'échantillon; la formation d'une pellicule d'éléments fins près des faces de contacts entre l'échantillon et la pierre poreuse. Ceci expliquerait les quelques différences entre les résultats de conductivité hydraulique des différents échantillons.

Malgré ces différences, on peut considérer satisfaisants les résultats de conductivité hydraulique.

5.4 Essais de perméabilité avec gel-dégel

Les résultats des mesures de la conductivité hydraulique après avoir soumis les matériaux fin à des cycles de gel-dégel sont présentés aux figures 5.13 à 5.15 et au tableau 5.7.

On peut voir à partir des graphiques que l'effet de gel-dégel sur les matériaux est plus significatif dans les échantillons des résidus Sigma amendé ; cela qui est normal car les argiles sont plus sensibles, par leur structure, aux phénomènes de gel-dégel. En général, la variation de la conductivité hydraulique observée ne dépasse pas un ordre de grandeur.

Notons ici qu'il est difficile avec cet essai de calculer le degré de saturation dans l'échantillon entre chaque essai de perméabilité. La saturation étant directement liée aux

changement de l'indice de vides et compte tenu sa fluctuation entre les essais de perméabilité, celle-ci varie. Les variations d'indice des vides représentent donc une incertitude, puisque ces derniers se modifient avec l'expansion de l'eau lors du cycle de gel et qu'il y a un réarrangement de particules qui se fait après chaque cycle de dégel .

Les essais de perméabilité ont été faits à l'aide du perméamètre à parois rigide. Lors des essais, il a été installé un ressort qui exerce une pression sur l'échantillon qui tend à le compacter. Ceci doit être fait pour éviter la boulance lors de l'essai. Toutefois, il faut rappeler que le nombre d'essais est limité, et que ces observations mériteraient d'être confirmées sur une base expérimentale plus étendue.

5.5 Courbes de rétention d'eau

La caractérisation du potentiel de rétention capillaire des matériaux a été obtenue par des essais de rétention d'eau à l'aide de l'appareil Tempe Cell dont le fonctionnement a été décrit au chapitre 4. Les résultats des courbes de succion expérimentales sont présentés au tableau 5.9 et aux figures 5.16 à 5.19. Les courbes de rétention d'eau lissées, à l'aide du code RETC de Van Genuchten et al. (1991) et à l'aide du modèle de Fredlund et Xing (1994), sont présentées au tableau 5.8 et aux figures 5.20 à 5.24. On peut voir aussi dans ces figures et sur le même tableau les résultats obtenus par la méthode de prédiction de Kovács modifiée (Aubertin et al., 1998).

Lorsqu'on observe les résultats expérimentaux, on constate que la saturation initiale de tous les essais est supérieure à 90 % et pour quelques uns celle ci approche 100% ; (Sigma fin (c) avec Sr = 98.5% ; Sigma grossier (a) avec Sr = 98.1% ; Till (a,c,d) avec 97, 99, et 99 %). On remarque aussi que l'AEV des résidus fins non amendés (Sigma fin et Sigma grossier) est assez semblable; ce qui est normal parce qu'ils sont granulométriquement très comparables (fig. 5.1). L'AEV du till est un peu plus élevé que

celui des résidus non amendés et on peut voir dans les courbes granulométriques qu'il est aussi plus fin. La tendance se maintient avec les résidus miniers amendés à la bentonite qui possèdent un AEV plus élevé.

Le logiciel RETC de van Genuchten et al. (1991) a été utilisé pour décrire la forme complète des courbes de succion (voir chapitre 3). À partir des données expérimentales de teneur en eau volumique en fonction de la succion, le logiciel utilise la technique de régression par moindres carrés de façon à obtenir la courbe de rétention d'eau. Tout comme celui de van Genuchten (1980), le modèle de Fredlund et Xing (1994) est descriptif. On peut voir aux figures 5.17 à 5.20 la concordance entre les données expérimentales et les courbes générées à partir de ces modèles.

L'estimation de l'AEV des différentes courbes a été effectuée avec trois approches différentes. La première repose sur le logiciel RETC. À partir de données expérimentales, celui-ci calcule un paramètre α qui est considéré comme l'inverse de ψ_a ($\alpha = \psi_a^{-1}$). La deuxième approche est basée sur la méthode de Fredlund et Xing (1994) ; celle-ci suppose qu'on peut prendre la valeur de la variable «a» comme étant la valeur de ψ_a si la valeur de la variable «m» est petite. Et finalement la troisième approche suppose que le ψ_a correspond à la valeur de la pression à 90% de saturation (ψ_{90}) tel que proposé par Aubertin et al. (1998).

À partir des essais effectués, on constate que le profil des courbes caractéristiques de succion varie avec la dimension des grains, la porosité du matériau, ainsi qu'avec sa saturation initiale. De façon générale, on observe que plus un sol est grossier, plus la valeur de l'AEV est faible et plus la perte d'eau au-delà de l'AEV est rapide. De même pour la densité, moins le matériau est dense, plus l'AEV est faible. On remarque aux tableaux 5.8-5.9 que cette tendance n'est pas entièrement respectée dans nos essais expérimentaux; ceci est dû au faible écart de l'indice de vides avec lequel les essais ont été

réalisés. Cette tendance est perçue lorsqu'on fait des essais de l'état lâche à l'état dense du matériau étudié. En ce qui concerne la saturation initiale, lorsque celle-ci est proche de 100%, la courbe de rétention capillaire est complète et on peut trouver la valeur exacte de l'AEV, mais lorsque celle-ci est inférieure à 90% la valeur de l'AEV risque d'être erronée. On observe ce phénomène dans n'importe quelle courbe. Par exemple l'AEV (ψ_{90}) de la courbe 5.17a est de 300 cm et la succion à 80% (ψ_{80}) de saturation est de 390 cm. Ce phénomène est dû au fait que le changement de pente s'effectue à une succion plus élevée, dans ce cas les résultats sont donc surestimés.

On remarque aussi la différence des valeurs d'AEV entre les trois méthodes. Les valeurs du ψ_{90} sont inférieures à celles trouvées à partir de la formule de van Genuchten ($1/\alpha$) et ceci pour toutes les courbes. Toutefois, la façon d'évaluer l'AEV par la formule de van Genuchten est purement mathématique. Le paramètre α^{-1}, dans ce contexte, n'est pas une particularité de la forme des courbes de succion, comme le serait par exemple le point de changement de pente ou encore le point de courbure maximale. Cette façon d'évaluer l'AEV est arbitraire, bien qu'elle soit unique pour une série de données θ vs ψ. Tout comme l'AEV découlant du modèle de van Genuchten, celui découlant du modèle de Fredlund n'est pas représentatif de l'AEV des courbes. Les résultats des études réalisées par Fredlund et Xing (1994) concordent bien avec nos résultats, ils montrent que les valeurs d'AEV sont en général un peu plus élevées que celles obtenues par les courbes expérimentales et ceci seulement pour les courbes possédant un indice «m» petit (voir équation 3.6). Cependant, lorsque l'indice «m» est grand, la valeur de la constante «a» n'est pas du tout réaliste comme AEV. ψ_{90}, la pression de succion nécessaire pour obtenir le degré de saturation de 90 %, a donc été utilisé comme étant approximativement le degré de saturation au point de la courbure maximale sur les courbes θ vs ψ des matériaux silteux (e.g. Gillham et al., 1984; Ricard, 1994).

En ce qui concerne, l'utilisation des paramètres «a» et ($1/\alpha$) comme valeurs d'AEV, notre conclusion concorde avec celle de Leong et Rahardjo (1997). Les valeurs de ces paramètres ne devraient pas être interprétés comme tel.

Il faut se rappeler que les valeurs de l'AEV obtenues dépendent des conditions expérimentales. Toutefois, ces essais ne sont pas idéaux car plusieurs facteurs peuvent influencer les résultats obtenus. La principale difficulté provient de l'intégrité de l'échantillon. Il est difficile d'assurer que l'assèchement de l'échantillon ne cause pas de fissures ou de tassements lors de l'essai. Si tel est le cas, un changement de volume peut entraîner certaines erreurs dans le calcul de la teneur en eau.

Lors des derniers essais de rétention effectués au cours de ce projet, plusieurs modifications au protocole de montage ont été apportées. Lors du calcul des courbes de rétention d'eau, on retrouvait souvent un excédent d'eau et ceci malgré les précautions prises lors du montage de l'échantillon. Un assèchement de la pierre poreuse du haut de l'échantillon a aussi été remarqué (figure 4.1). Afin de vérifier si l'eau excédentaire retrouvée à la fin de l'essai correspondait à l'assèchement de la pierre poreuse, il a été décidé de placer cette dernière sèche. Le résultat de cette hypothèse s'avérant affirmative le montage a continué à se faire avec la pierre poreuse du haut à l'état sec.

Une autre modification a été apportée aux essais. Lors des premiers essais, la durée de ces derniers dépendait du temps de stabilisation du drainage, c'est dire que le changement de palier de pression (ex. de 2 psi à 4 psi) se faisait lorsque la teneur en eau restait constante. Cette procédure avait pour effet d'obtenir des essais d'une très longue durée. Il a donc été décidé d'effectuer les changements de palier de pression après 24 heures. Il a été remarqué que pour les résidus miniers ce changement n'avait aucune influence. Toutefois, pour les sables, il a été noté que 24 heures ne suffisaient pas à la stabilisation de la teneur en eau. À la suite de cette constatation des essais pour le sable ont été

réalisés avec une durée de 48 heures entre chaque palier. La figure 5.21 montre les résultats des essais faits avec différents paliers de temps. Plusieurs essais ont aussi été effectués à l'aide des cellules à haute pression pour mieux voir la progression de la courbe lorsqu'on exerce des hautes pressions (100 - 150 psi) sur les matériaux amendés (voir figure 5.19c).

Le seul modèle prédictif utilisé lors de ce travail est celui de Kovács modifié (voir chap. 3). Ce modèle prédit la courbe de rétention d'eau à partir des caractéristiques physiques du matériau soit: le D_{10} et l'indice des vides. Le modèle utilise aussi trois paramètres qui d'après les travaux réalisés par Aubertin et al. (1998), sont $b = 4.00$; $m_k = 0.05$ et $a_k = 0.006$, subséquemment ils ont été changés par : $b = 4.93$, $m_k = 0.14$ et $a_k = 0.002$ (Aubertin et al., 1998b). On remarque aux figures 5.17 à 5.20 que les courbes des matériaux fins non-amendés ont généralement la même allure. Les courbes construites à partir du modèle de Kovács modifié ont toutes une saturation initiale de 100 % contrairement aux données expérimentales (d'où l'intérêt de ces courbes).

Les différences entre les courbes expérimentales et celles produites à partir du modèle de Kovács modifié pourraient être expliquées par le temps de changement de palier de pression. Ce dernier étant peut-être trop rapide, il ne laisserait pas assez de temps à l'échantillon pour trouver son équilibre. Pour une même pression, la teneur en eau va être plus grande qu'elle serait si on laissait l'équilibre s'établir. On peut voir à la figure 5.18b l'exemple d'un échantillon auquel on a laissé le temps de se stabiliser. On note que la courbe expérimentale a une meilleure concordance même si elle ne possède pas une saturation de 100 %. Le modèle de Kovács modifié génère donc une courbe de rétention d'eau complète, c'est-à-dire à partir de l'état saturé de l'échantillon (Sr = 100), ce qui est très difficile d'obtenir en laboratoire. Le tableau 5.9 montre les valeurs d'AEV calculées à partir du modèle Kovács modifié. On note dans ces résultats le lien entre la densité de l'échantillon et la valeur de l'AEV; cette dernière n'est pas apparente lors des essais

expérimentaux à cause de la proximité des valeurs des indices des vides. On s'aperçoit aussi que les valeurs d'AEV trouvées par le modèle pour les échantillons de Sigma amendé sont élevées par rapport aux essais de laboratoire. Toutefois, on trouve dans d'autres études une bonne corrélation entre l'AEV trouvé par ce modèle et celui trouvé par leurs essais expérimentaux (Ricard, 1994; Aubertin et al., 1998) et ce pour des résidus amendés à la bentonite. Ces différences sont peut-être dues à la durée de l'essai.

5.6 Courbes de conductivité hydraulique non saturée

Comme mentionné au chapitre 3, des modèles numériques ont été utilisés pour l'étude de l'écoulement non saturé. Pour cela, on a eu besoin de la courbe k-ψ. Deux modèles statistiques ont été utilisés pour la prédiction des courbes de conductivité hydraulique non saturée; celui de Mualem (1974) et Fredlund et al. (1994). Les résultats sont présentés aux figures 5.22 à 5.29.

Le modèle de Mualem, utilisé par van Genuchten dans le logiciel RETC, nous donne l'expression de k(ψ). À partir des valeurs de la courbe de rétention capillaire, le logiciel RETC calcule directement les courbes de conductivité non saturée. Les figures 5.22, 5.24, 5.26 et 5.28 présentent les courbes k(ψ) des matériaux étudiés. On note une bonne similitude entre ces courbes pour un même matériau à faible succion. Il faut rappeler que ces courbes étant générées à partir des courbes de succion, il est très important que ces dernières soient établies avec précision. La différence entre les pentes des courbes de conductivité hydraulique non saturée provient des différences déjà observées entre les courbes de rétention capillaire. D'où l'importance de la précision sur les données relatives aux courbes de succion car celle-ci se répercute directement sur la précision des résultats donnant les courbes de conductivité hydraulique non saturée.

La relation mathématique du modèle proposé par Fredlund et al. (1994) a été programmée dans le langage Octave (l'équivalent à Matlab pour le système Unix). Cette relation utilise les paramètres a, m et n pour calculer la courbe $k(\psi)$ (voir tableau 5.9). Ces derniers ont été obtenus lors du lissage de la courbe de rétention capillaire. Les figures 5.23, 5.25, 5.27 et 5.29 présentent les résultats des courbes générées par le modèle de Fredlund et al. (1994). On note une bonne ressemblance entre les courbes pour un même matériau. Les valeurs des conductivités hydrauliques pour des hautes pressions sont plus uniformes que celles générées avec le code RETC.

Les modèles de Mualem (1986) et celui de Fredlund et al. (1994) s'accordent bien. On note que la conductivité hydraulique commence à diminuer approximativement à la même succion pour les deux modèles. Toutefois, avec le modèle de van Genuchten (1980) elle décroît plus rapidement après une pression négative de 500 cm d'eau.

5.7 Coefficient de diffusion d'oxygène

Les coefficients de diffusion effective ont été estimés à l'aide du logiciel POLLUTEv6. La procédure du calcul a été expliquée au chapitre 4. Une comparaison entre la valeur théorique proposée par Collin (1987) et les données expérimentales est présentée à la figure 5.30 et le tableau 5.11 présente les valeurs des coefficients de diffusion modélisée (D_p) et les valeurs du coefficient de diffusion effective.

On s'aperçoit que le coefficient de diffusion efficace diminue avec le degré de saturation de l'échantillon pour des porosités équivalentes, et il devient très faible lorsqu'il est saturé à 100%. On constate aussi la concordance entre les résultats expérimentaux et la courbe théorique de Collin (1987). Toutefois, on note une légère différence avec les données expérimentales à haut degré de saturation. Ceci est probablement dû au fait que la durée

de l'essai est trop courte. Les essais à forte saturation requièrent des durées relativement élevées et il est difficile de savoir quand ils ont atteint l'équilibre.

5.8 Essais en colonnes

Les résultats obtenus dans l'essai de la colonne de contrôle numéro 1 (résidus couverts), et les résultats obtenus à l'aide du logiciel SEEP/W sont comparés et présentés aux figures 5.31 à 5.32. Comme les essais se poursuivent pendant plusieurs mois, seuls les résultats obtenus jusqu'à la fin de juin 1997 sont présentés.

Les figures 4.3 à 4.5 montrent l'allure physique des colonnes expérimentales et les tableaux 4.1 à 4.8 présentent les caractéristiques de mise en place des matériaux dans chaque colonne. Les principaux résultats obtenus dans les essais en colonnes de contrôle (résidus couverts) sont présentés dans les figures 5.30 et 5.32

Les colonnes ont d'abord été simulées en régime permanent afin d'établir des conditions initiales pour l'écoulement en régime transitoire. Les conditions frontières sur les parois des cellules ont été représentées par une limite imperméable (charge hydraulique égale à zéro). Une charge hydraulique initiale correspondant à la hauteur de la nappe phréatique a été imposée au haut de la colonne et dans le bas de la colonne cette charge hydraulique a été imposée légèrement inférieure. En régime transitoire, aucune condition frontière n'a été déterminée pour le dessus de la colonne. Une fonction de variation du niveau de l'eau en fonction du temps a été, par contre, imposée au bas de la colonne. Il est à noter que l'évaporation n'a pas été prise en compte pour ces modèles.

Les figures 5.31 et 5.32 présentent les résultats du premier essai. On remarque que la teneur en eau baisse rapidement dans les couches de sable pendant les premières heures.

Les figures 5.31 et 5.32 présentent les résultats du premier essai. On remarque que la teneur en eau baisse rapidement dans les couches de sable pendant les premières heures. Elle commence à se stabiliser après 1 jour et atteint un équilibre à environ 60 jours. Les couches fines gardent leur teneur en eau initiale tout au long de la simulation.

Les figures 5.31b présentent l'évolution des profils de pression dans le temps. Au départ de la simulation la nappe phréatique se situe au haut de la colonne. On aurait donc une droite de pente négative 1:1 comme profil de pression dont la valeur initiale de pression serait zéro dans l'horizon de la nappe. Afin de ne pas modifier l'échelle en x, la condition initiale n'apparaît pas sur les figures. On note que l'équilibre des pressions est atteint après environ 1 jours de drainage et qu'il est près de l'équilibre hydrostatique (pente négative 1:1). Avant d'atteindre l'équilibre, on remarque à t = 1 jour une cassure dans le profil des pressions de la couche grossière du bas. Cette cassure, représentée par un segment vertical à une succion d'environ -55 cm d'eau, permet d'avoir une succion à peu près constante malgré l'augmentation de l'élévation. Ceci entraîne une succion à l'interface sol grossier- sol fin plus faible et ainsi, des succions plus faibles dans la couche fine. Ce type de profil de pression est typique de ceux observés pour les barrières capillaires (e.g. Aubertin et al., 1995)

La figure 5.32 présente les résultats expérimentaux de la teneur en eau. Les teneurs en eau dans la couche du sable du bas et dans la couche fine ont été prises à l'aide des sondes TDR (voir chapitre 4). On note une grande différence entre le résultat après 1 heure de la modélisation avec SEEP/W et le résultat de laboratoire. Ceci est causé par le fait que, dans la modélisation numérique, on pose la nappe phréatique au haut de la colonne et, dans les essais de laboratoire, la colonne a été drainée avant de rajouter 10 cm^3 d'eau. Par la suite, les résultats montrent une très bonne concordance ; les courbes sont à une teneur en eau d'environ 0.15 après 1 jour de drainage et d'environ 0.10 après 30 jours de drainage.

Ces essais se poursuivront pendant encore plusieurs mois et seront analysés lors des publications à venir. À date les résultats sont conformes à nos attentes.

Tableau 5.1 Résultats des analyses minéralogiques (Bernier,1996)

Sigma	Qz	Ab	Or	Bt	Chl	Mo	Cc	Ank	To	Ilm	Ep	Sul
Grossier	A	M	F	F	M	---	P	F	P	F	F	F
Fin	A	M	F	F	M	---	P	F	P	F	F	F
Amendé	A	M	F	F	M	F	P	F	P	F	F	F
Total	35	15	---	10	22	---	8	tr	5	1	3	1

Légende: Qz = quartz, Ab = albite, Or = orthose, Bt = biotite, Chl = chlorite, Mu = muscovite, Gyp = gypse, Py = pyrite, Cal = calcite, Tlc = talc, Ep = épidote, Mo = montmorillonite, Ank = ankérite, Ilm = ilménite, To = tourmaline, Hn = hornblende, A = abondant (30 - 50 %), M = moyennement abondant (10-30 %), F = faiblement abondant (5-10 %) P = peu abondant (0 - 5 %), tr = trace, --- = absent

Tableau 5.2 Résultats des densités relatives pour les échantillons étudiés

Échantillons	ÉTÉ 95	FEV. 96	FEV. 96	FEV. 96	FEV. 96	FEV. 96	MOYENNE
Sigma fin	2.790	2.810	2.808				**2.809**
Sigma grossier	2.793	2.799	2.793	2.802			**2.798**
Sigma amendé		2.850	2.803	2.822	2.814	2.801	**2.818**
Till	2.743	2.749	2.793	2.740			**2.743**
Manitou		2.850	2.848				**2.849**
Sable		2.781	2.779				**2.780**

Tableau 5-3 Principaux résultats des analyses granulométriques (voir figure 5.2.1)

Nom	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	C_u	Passant tamis #200	< 2μm
Sigma fin	0.0042	0.039	0.013	9.17	78.5%	5.0%
Sigma grossier	0.0040	0.036	0.012	9.00	77.5%	5.0%
Sigma amendé	0.0012	0.028	0.0075	48.28	81.0%	14.5%
Manitou	0.0116	0.31	0.135	26.78	20.5%	5.0%
Till	0.0038	0.017	0.0086	4.47	98.5%	5.5%
Sable	0.37	1.45	0.735	—	33.5%	0

Tableau 5-4 Résultats des analyses de limites de consistance

	Sigma fin		**Sigma grossier**		**Sigma amendé**		**Till**	
	Atterberg	**cône**	**Atterberg**	**cône**	**Atterberg**	**cône**	**Atterberg**	**cône**
w_L	18.5	26	18	26	32.9	34	20.5	26
w_p	16.2	16.2	14.8	12.5	24.5	26.1	13.1	13.1
I_P	2.3	9.8	3.2	13.6	8.4	7.9	7.4	12.9
UCSC	ML	CL	ML	CL	ML	ML	CL	CL

Tableau 5-5 Résultats des essais de compactage (voir figure 5.2)

Nom de l'échantillon	W_{opt} (%) Teneur en eau optimale	γ_d (kN/m^3) Poids volumique sec	e (correspondant) indice des vides
sigma fin	15.5	18.3	0.55
sigma grossier	15.7	18.2	0.55
sigma amendé	13.1	19.8	0.46
manitou	10.5	20.1	0.42
till	16.8	17.5	0.57
sable	10.0	21.1	0.32

Tableau 5-6 Résultats des essais de consolidation (voir figures 5.3 à 5.6)

Échantillon	C_c	C_r	C_v	m_v	e
Sigma fin	0.057	0.003	0.059 à 0.25	2.08×10^{-4} à 3.01×10^{-5}	0.75 à 0.66
Sigma grossier	0.070	0.002	0.12 à 0.36	2.11×10^{-4} à 8.19×10^{-6}	0.88 à 0.77
Sigma amendé	0.063	0.006	3.93×10^{-4} à 3.56×10^{-3}	2.59×10^{-4} à 1.72×10^{-5}	0.59 à 0.49
Till	0.034	0.004	6.42×10^{-2} à 1.34×10^{-2}	1.52×10^{-4} à 6.35×10^{-4}	0.65 à 0.60

Tableau 5.7 Résultats des essais de perméabilité

Échantillon	e	essai à charge variable (cm/s)	essai à charge constante (cm/s)	essai triaxial (cm/s)	Kozeny-Carman (cm/s)
Sigma fin	0.50 à 1.02	$3.73x10^{-4}$ à $3.41x10^{-4}$	$3.46x10^{-4}$ à $2.97x10^{-4}$	$5.76x10^{-5}$ à $1.12x10^{-4}$	$3.10x10^{-6}$ à $1.86x10^{-5}$
Sigma grossier	0.50 à 1.06	$4.58x10^{-4}$ à $1.74x10^{-4}$	$4.39x10^{-4}$ à $2.40x10^{-4}$	$4.74x10^{-5}$ à $1.07x10^{-4}$	$3.13x10^{-6}$ à $1.88x10^{-5}$
Sigma amendé	0.50 à 1.00	---	---	$7.81x10^{-8}$ à $9.84x10^{-6}$	$6.93x10^{-7}$ à $4.16x10^{-6}$
till	0.50 à 1.00	$9.82x10^{-5}$ à $2.80x10^{-5}$	---	$1.23x10^{-5}$ à $7.24x10^{-5}$	$2.20x10^{-6}$ à $1.32x10^{-5}$
manitou	0.50 à 1.00	$6.68x10^{-3}$ à $2.58x10^{-3}$	$8.22x10^{-4}$ à $2.19x10^{-3}$	$2.85x10^{-4}$ à $6.34x10^{-4}$	$2.43x10^{-5}$ à $1.46x10^{-4}$
sable	0.50 à 1.00	$3.05x10^{-2}$ à $2.60x10^{-2}$	$4.43x10^{-2}$ à $4.73x10^{-2}$	---	$3.15x10^{-2}$ à $1.89x10^{-1}$

Tableau 5.8 Résultats des essais de perméabilité avec des cycles gel-dégel

cycle	Sigma fin		Sigma grossier		Sigma amendé		Till	
	e	k(cm/s)	e	k (cm/s)	e	k (cm/s)	e	k (cm/s)
0	0.879	2.38e-4	0.838	1.37e-4	0.793	4.49e-6	0.746	4.14e-5
4	0.705	7.68e-5	-----		-----		-----	
5	-----		0.844	9.17e-5	0.812	2.02e-6	0.806	5.79e-5
9	0.807	6.37e-5	0.852	7.77e-5	0.818	2.83e-6	0.800	4.71e-5
15	0.769	4.89e-5	0.844	4.95e-5	0.837	4.94e-6	0.854	5.34e-5
0	0.727	5.65e-5	-----		-----		-----	
4	0.928	7.42e-5	-----		-----		-----	
9	0.795	6.35e-5	-----		-----		-----	
15	0.816	5.45e-5	-----		-----		-----	

Tableau 5-9 Résultats de l'analyse des données expérimentales des essais de rétention capillaire avec le logiciel RETC

Échantillon	e	θ_s	θ_r	n	α	AEV (VG)	Ψ_{90}
Sigma fin	0.72	0.401	0	2.717	0.0021	473	300
	0.74	0.394	0	2.308	0.0023	443	290
	0.76	0.425	0	3.407	0.0017	582	300
	0.80	0.421	0	2.764	0.0026	389	250
	0.86	0.411	0	1.922	0.0013	743	330
Sigma grossier	0.64	0.364	0	2.984	0.0017	583	320
	0.71	0.409	0	2.016	0.0013	761	400
	0.78	0.412	0	2.362	0.0019	529	250
	0.86	0.443	0	5.368	0.0026	385	260
Sigma amendé	0.56	0.328	0	7.691	0.0012	831	700
	0.57	0.346	0	1.534	0.0028	350	170
	0.65	0.372	0	2.644	0.0016	633	360
	0.67	0.375	0	1.829	0.0016	644	350
Till	0.62	0.376	0	3.776	0.0016	616	310
	0.70	0.411	0	2.423	0.0011	905	410
	0.72	0.381	0	3.985	0.0013	763	500
	0.79	0.440	0	1.9819	0.0013	776	310

Tableau 5.10 Résultats de l'analyse des données expérimentales des essais de rétention capillaire avec la méthode de Fredlund et de Kovacs modifiée

			Fredlund				Kovacs mod.	
Échantillon	**e**	**θ_s**	**Ψ_{90}**	**a (aev)**	**m**	**n**	**D_{10}**	**Ψ_{90} Prédit**
Sigma fin	0.72	0.401	300	357	0.61	3.57	0.0042	370
	0.74	0.394	290	348	0.69	2.61	0.0042	370
	0.76	0.425	300	983	5.09	2.33	0.0042	370
	0.80	0.421	250	296	0.58	4.00	0.0042	320
	0.86	0.411	330	1738	3.30	1.42	0.0042	300
Sigma grossier	0.64	0.364	320	484	0.89	3.19	0.0040	440
	0.71	0.409	400	708	1.12	2.02	0.0040	400
	0.78	0.412	250	955	3.36	1.70	0.0040	340
	0.86	0.443	260	390	2.26	4.95	0.0040	320
Sigma amendé	0.56	0.328	700	726	0.85	1.29	0.0012	1400
	0.57	0.346	170	220	0.12	1.75	0.0012	1500
	0.65	0.372	360	539	0.98	2.72	0.0012	1400
	0.67	0.375	350	535	0.641	1.71	0.0012	1400
Till	0.62	0.376	310	453	0.438	4.35	0.0038	490
	0.70	0.411	410	636	0.544	5.87	0.0038	420
	0.72	0.381	500	578	0.478	4.87	0.0038	400
	0.79	0.440	310	1130	1.619	2.053	0.0038	380

Tableau 5.11 Résultats de l'analyse du coefficient de diffusion effectif

Nom	Sr	n	n_a	D_e
Sigma fin	100.00	0.371	0.000	0.00
Sigma fin	99.00	0.317	0.003	5.03×10^{-10}
Sigma fin	78.10	0.379	0.083	2.63×10^{-8}
Sigma fin	74.00	0.386	0.100	1.11×10^{-7}
Sigma fin	59.69	0.374	0.151	2.39×10^{-7}
Sigma grossier	78.91	0.386	0.081	1.29×10^{-8}
Sigma grossier	67.01	0.407	0.134	4.08×10^{-7}
Sigma grossier	45.92	0.397	0.215	4.08×10^{-7}
Sigma amendé	90.41	0.345	0.033	8.39×10^{-9}
Sigma amendé	26.52	0.393	0.289	6.87×10^{-7}
Sigma amendé	13.22	0.399	0.346	1.10×10^{-6}
till	73.30	0.389	0.104	4.94×10^{-8}
till	69.60	0.328	0.100	2.53×10^{-7}
till	55.70	0.420	0.186	2.95×10^{-7}

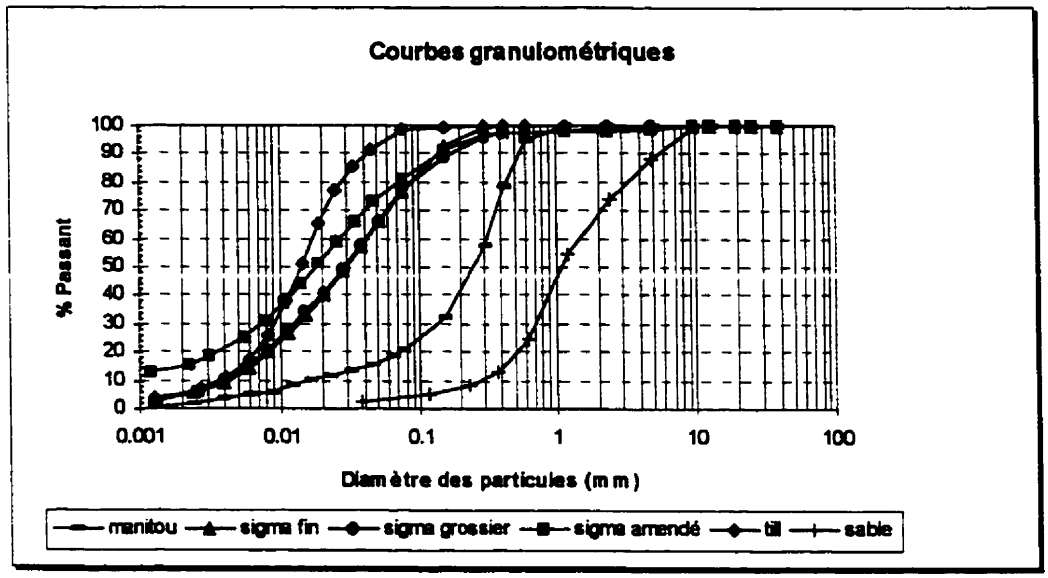


Figure 5-1 Courbes granulométriques des matériaux étudiés

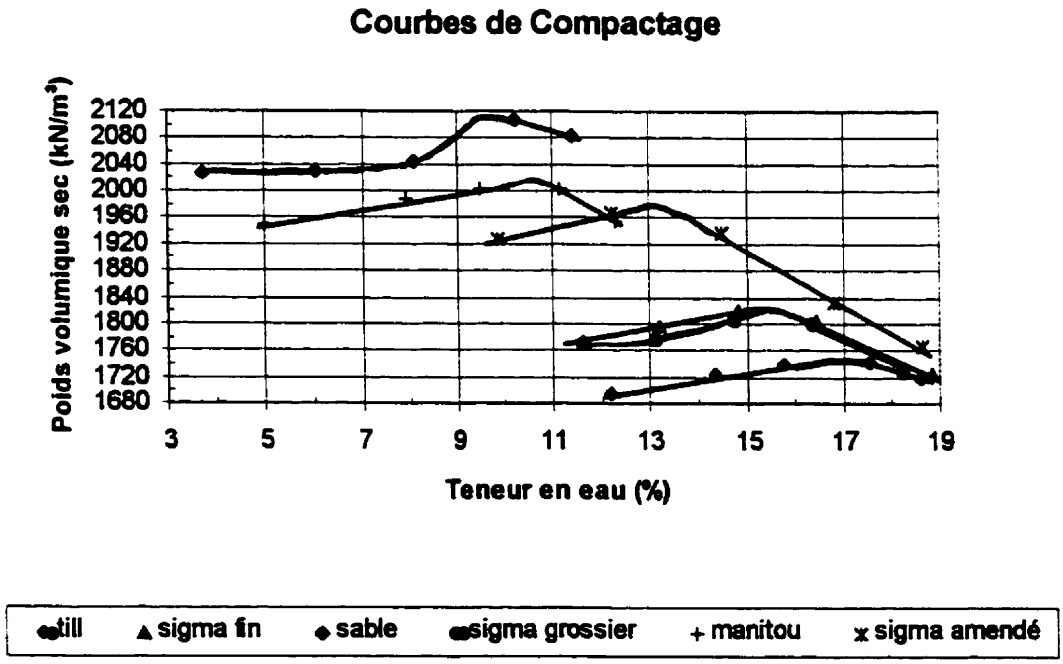


Figure 5-2 Courbes de compactage des matériaux étudiés

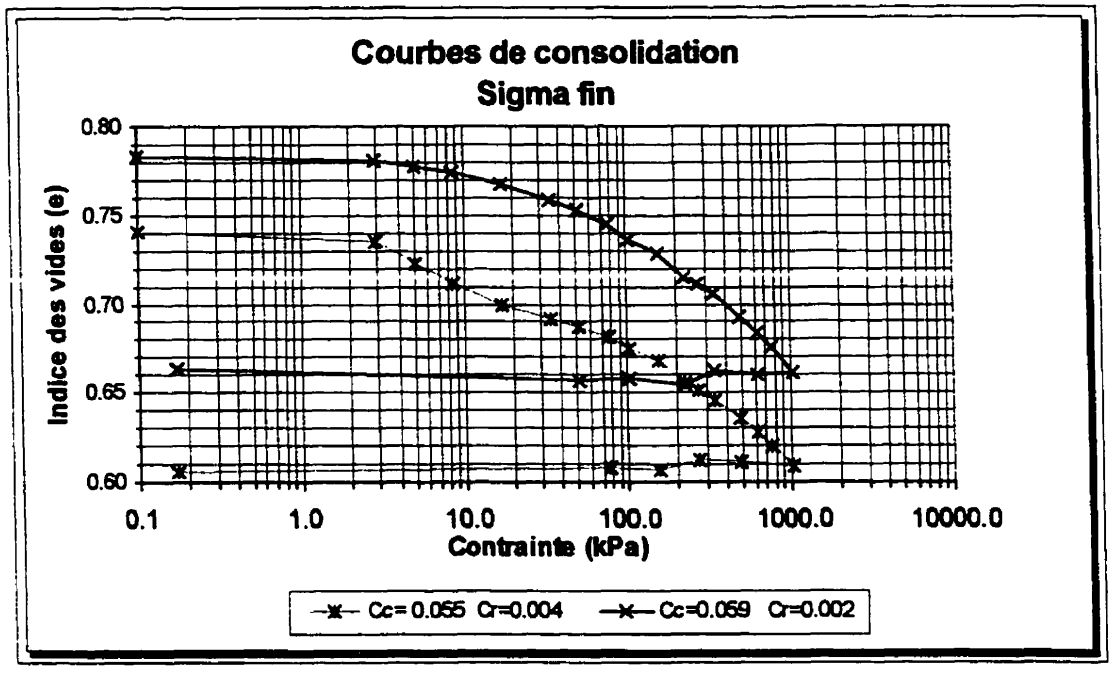


Figure 5-3 Courbes de consolidation du résidu Sigma fin

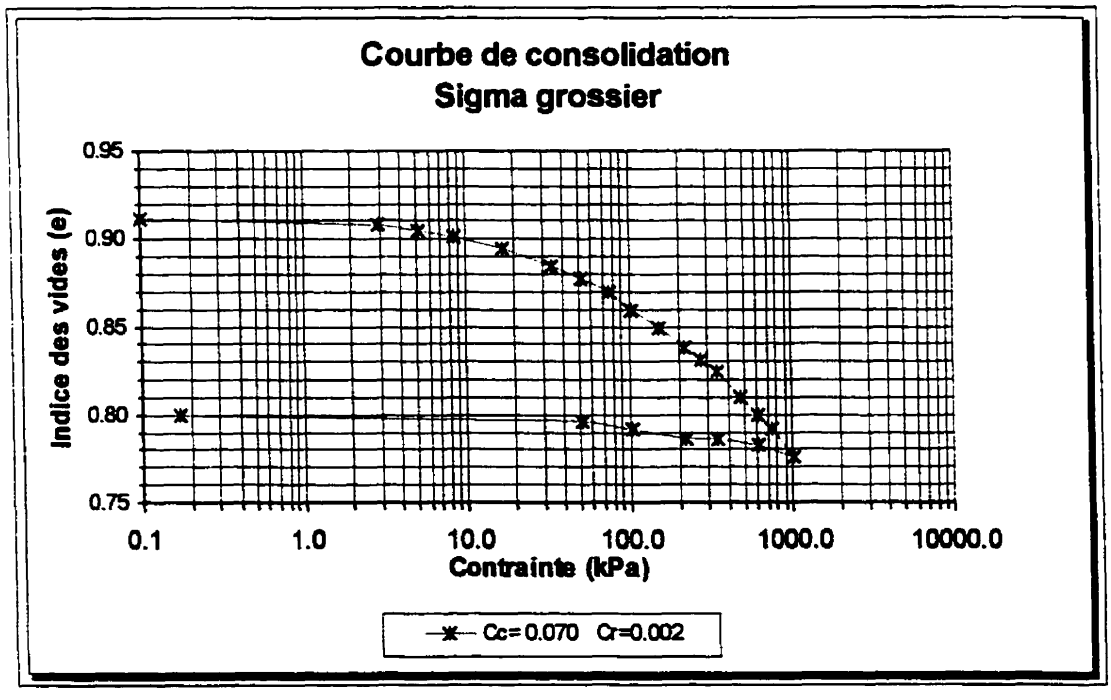


Figure 5-4 Courbe de consolidation du résidu Sigma grossier

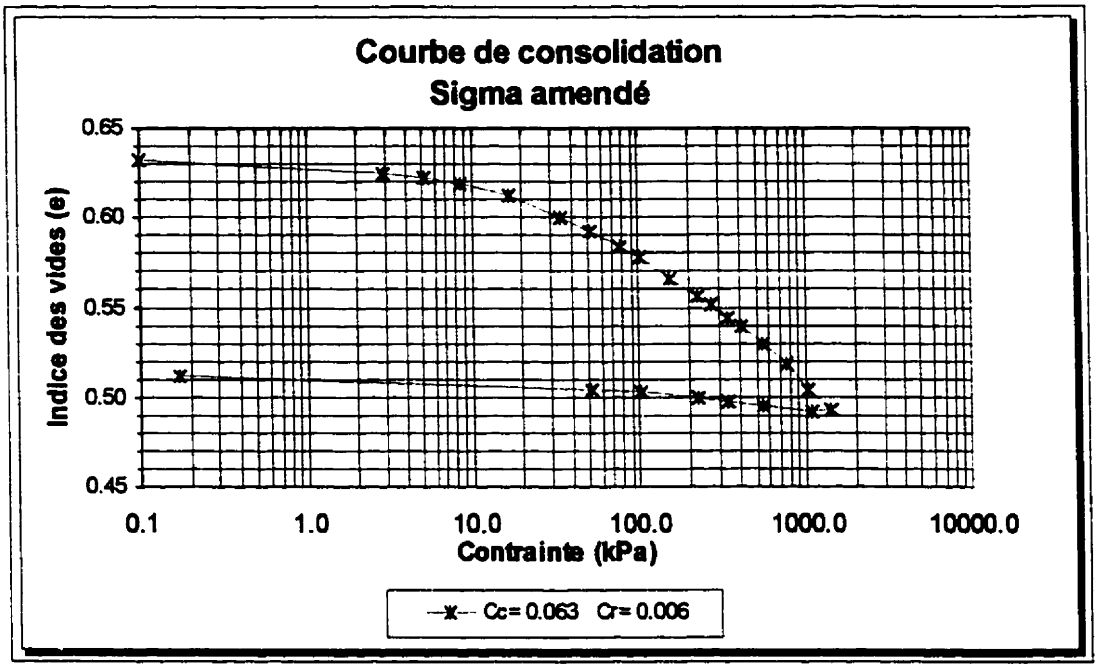


Figure 5-5 Courbe de consolidation du résidu Sigma amendé

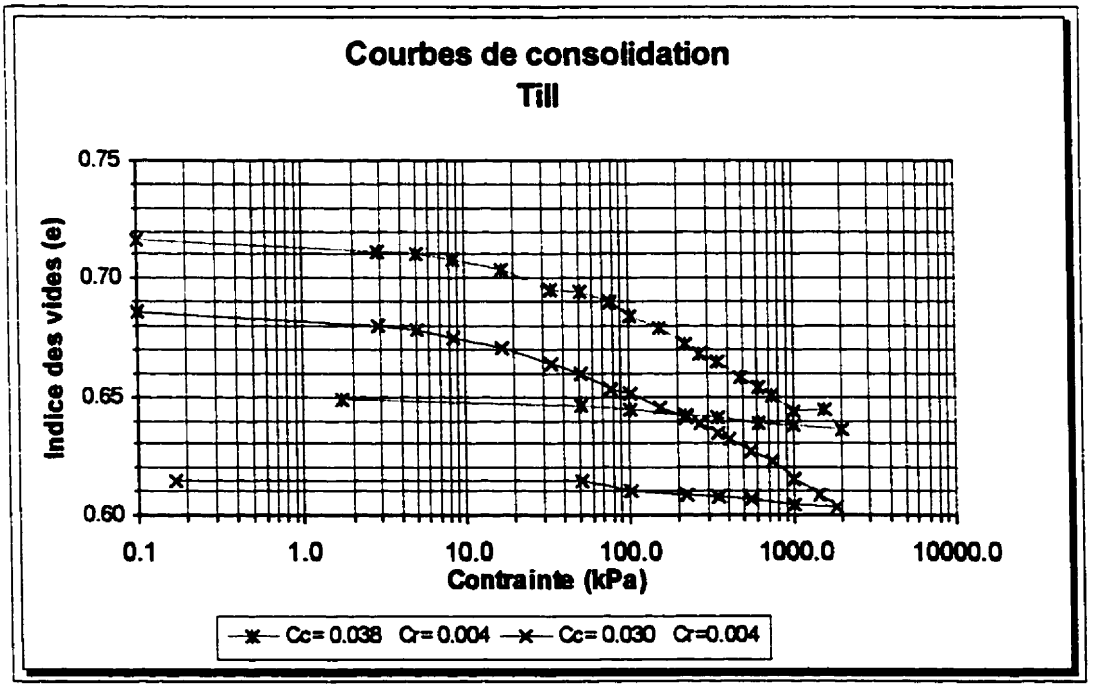


Figure 5-6 Courbes de consolidation du Till

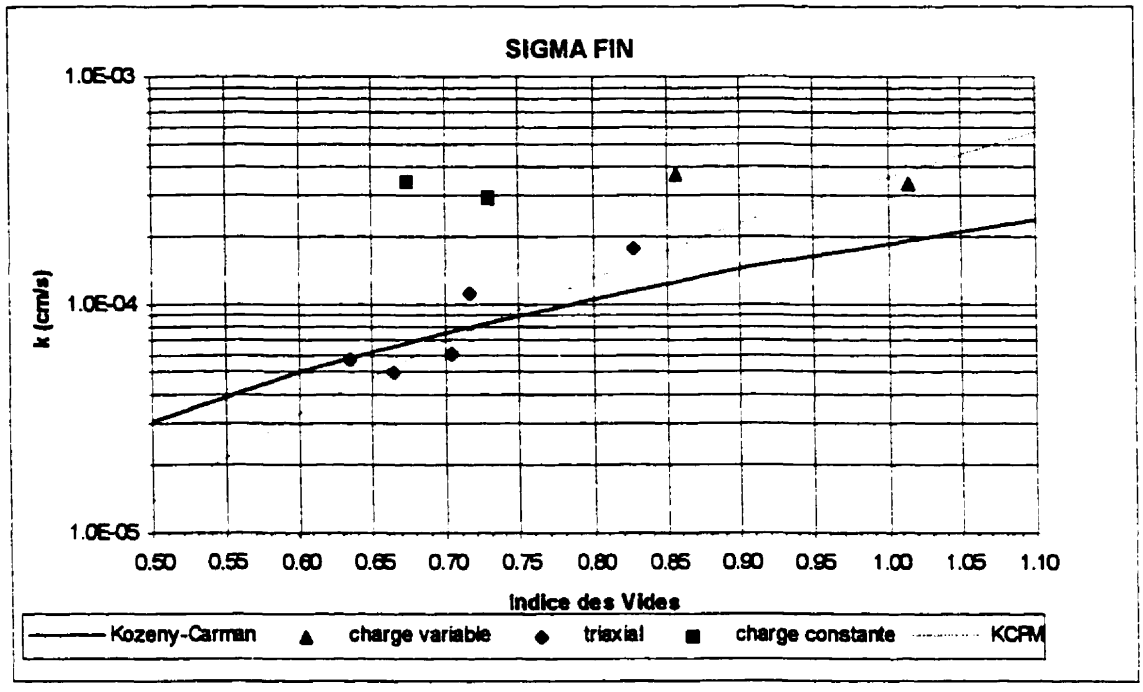


Figure 5-7 Valeurs de conductivité hydraulique pour le résidu Sigma fin

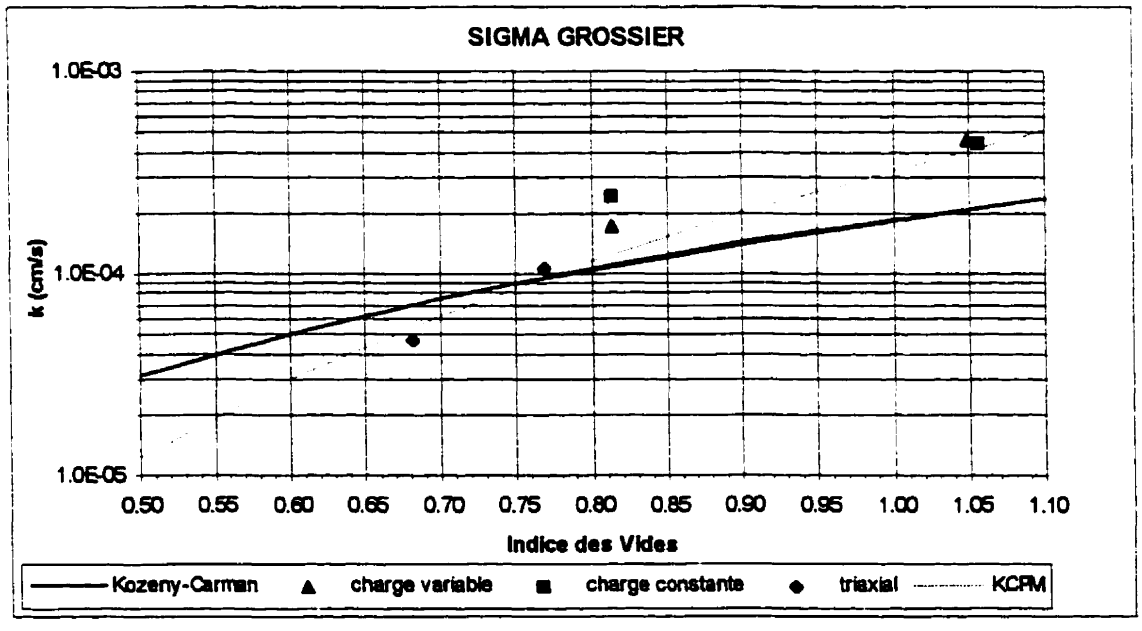


Figure 5-8 Valeurs de conductivité hydraulique pour le résidu Sigma grossier

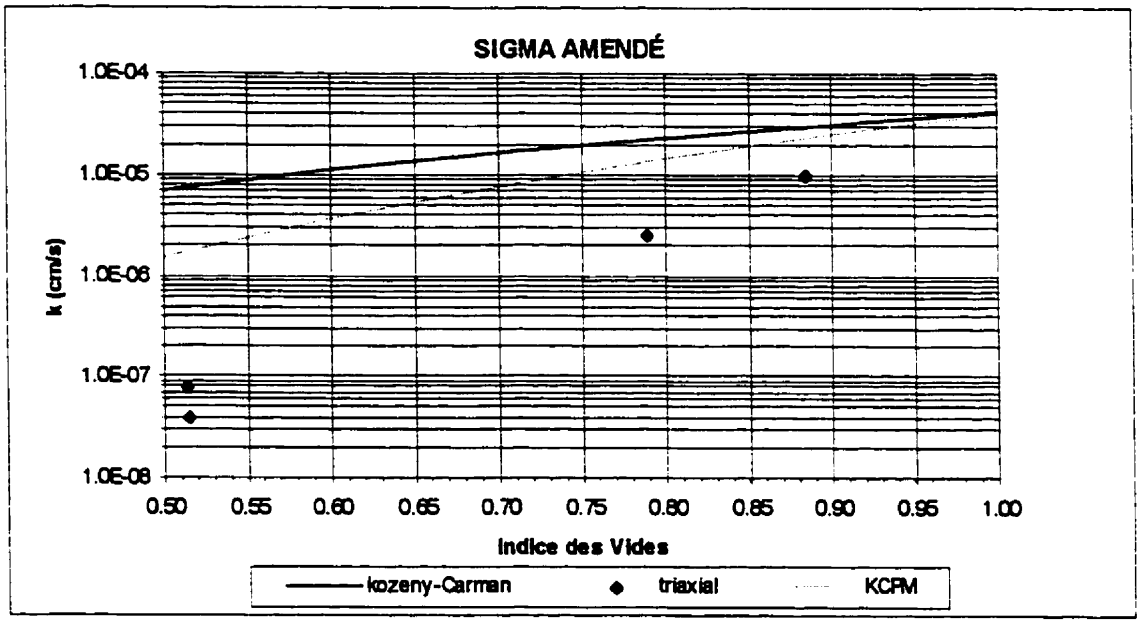


Figure 5-9 Valeurs de conductivité hydraulique pour le résidu Sigma amendé

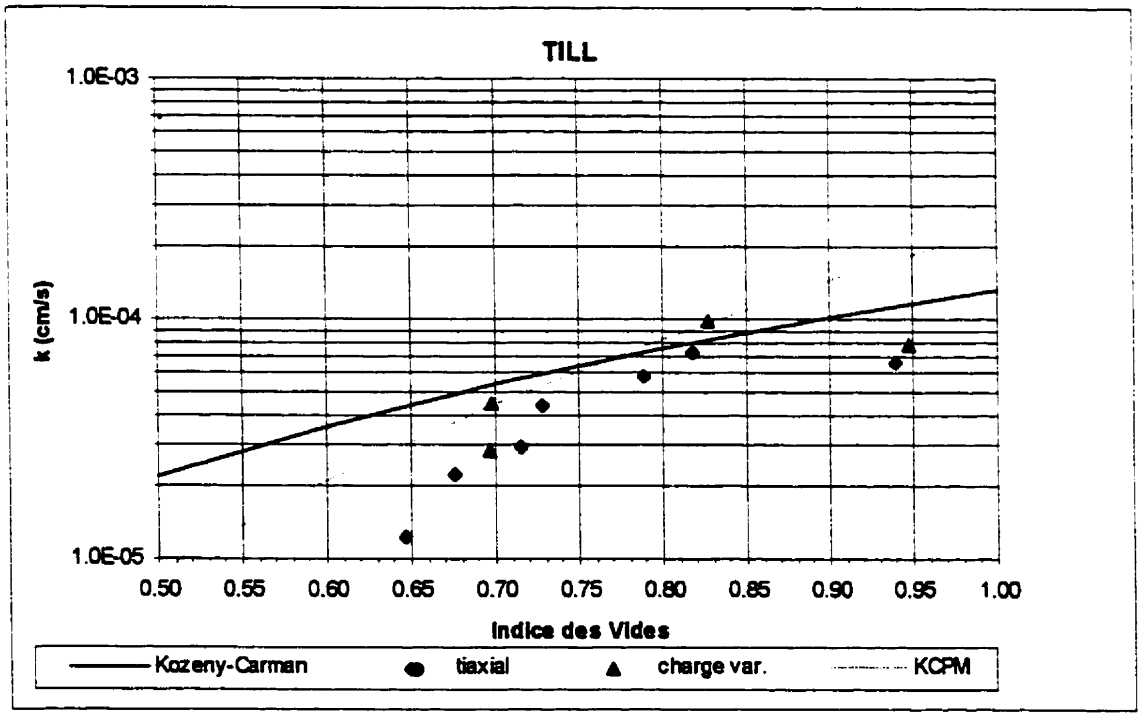


Figure 5-10 Valeurs de conductivité hydraulique pour le Till

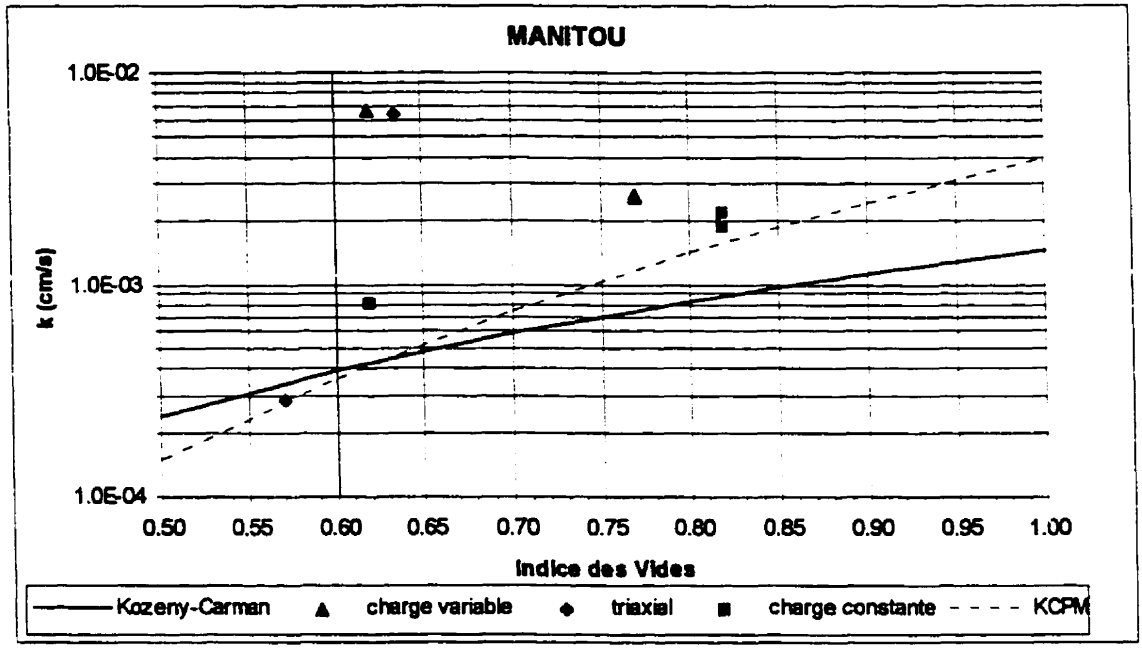


Figure 5-11 Valeurs de conductivité hydraulique pour les résidus Manitou

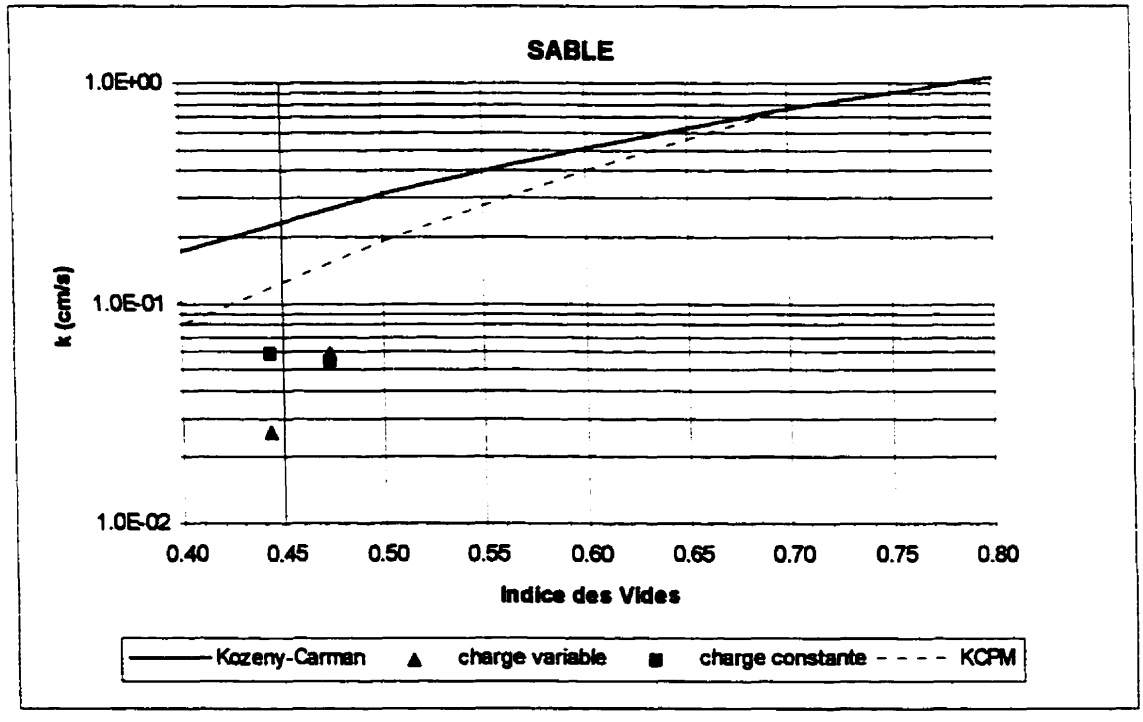


Figure 5-12 Valeurs de conductivité hydraulique pour le Sable

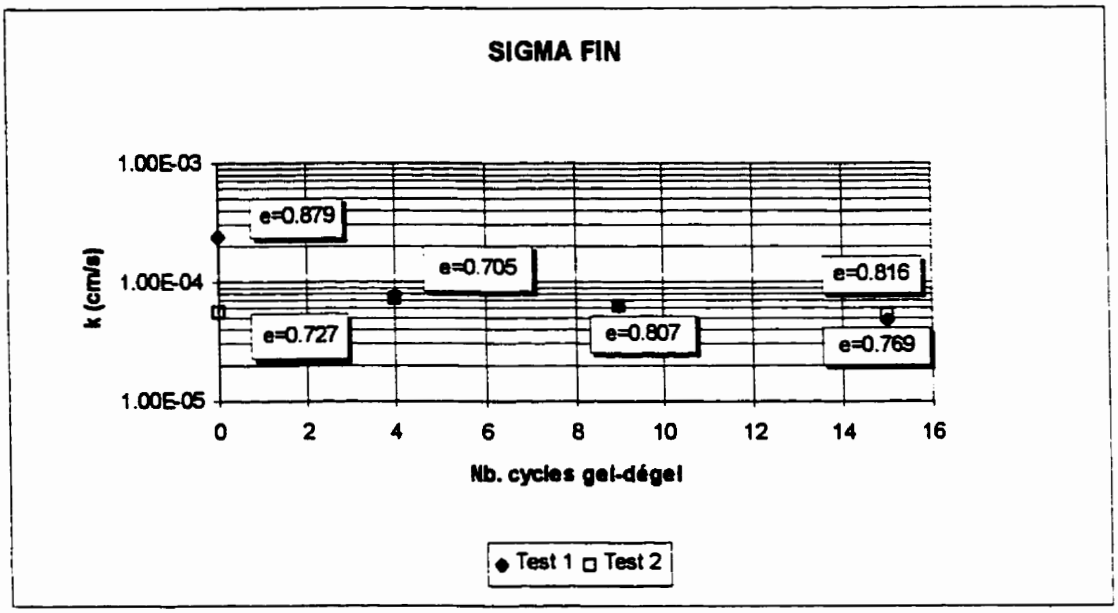


Figure 5-13 Effets des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique

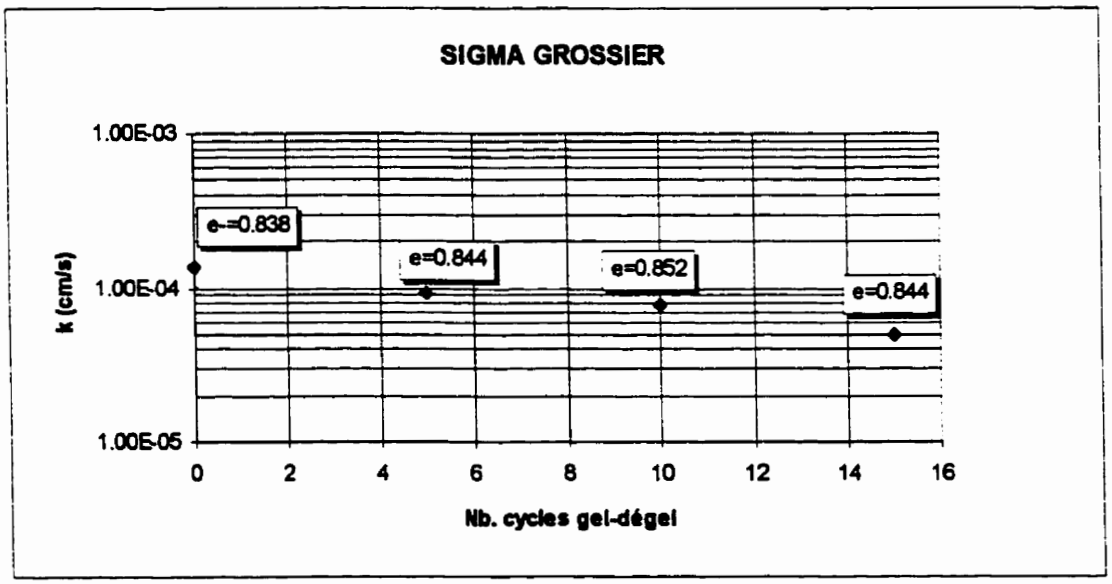


Figure 5-14 Effets des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique

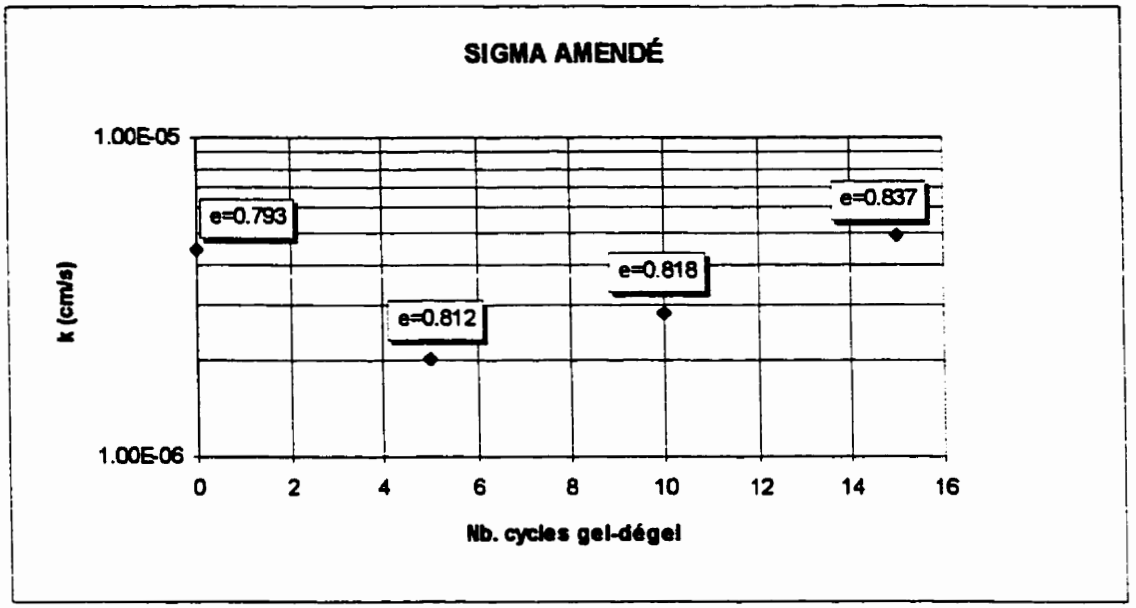


Figure 5-15 Effets des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique

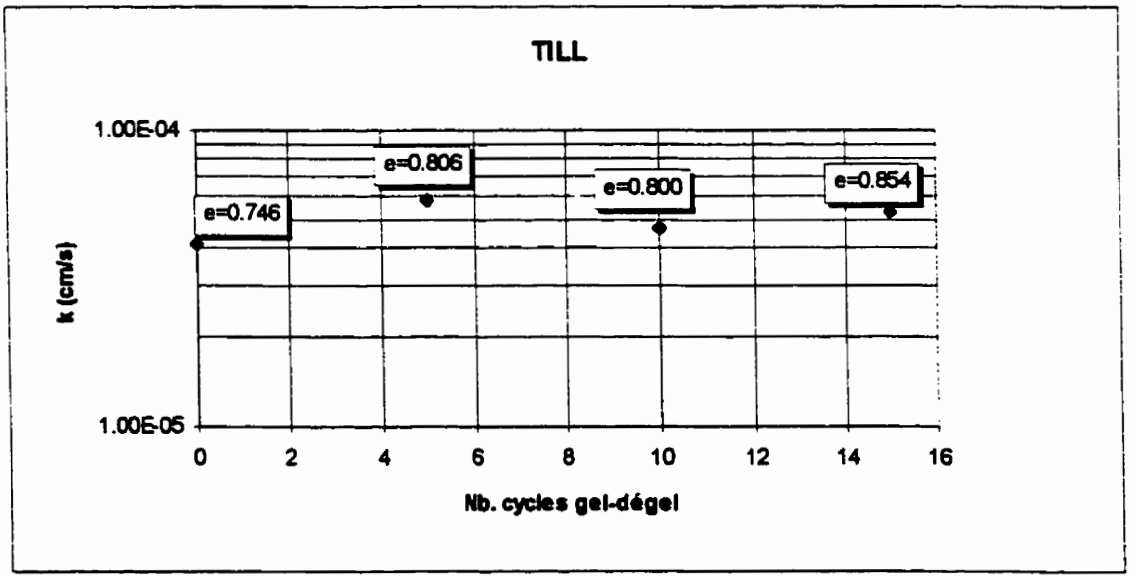


Figure 5-16 Effets des cycles gel-dégel sur la conductivité hydraulique

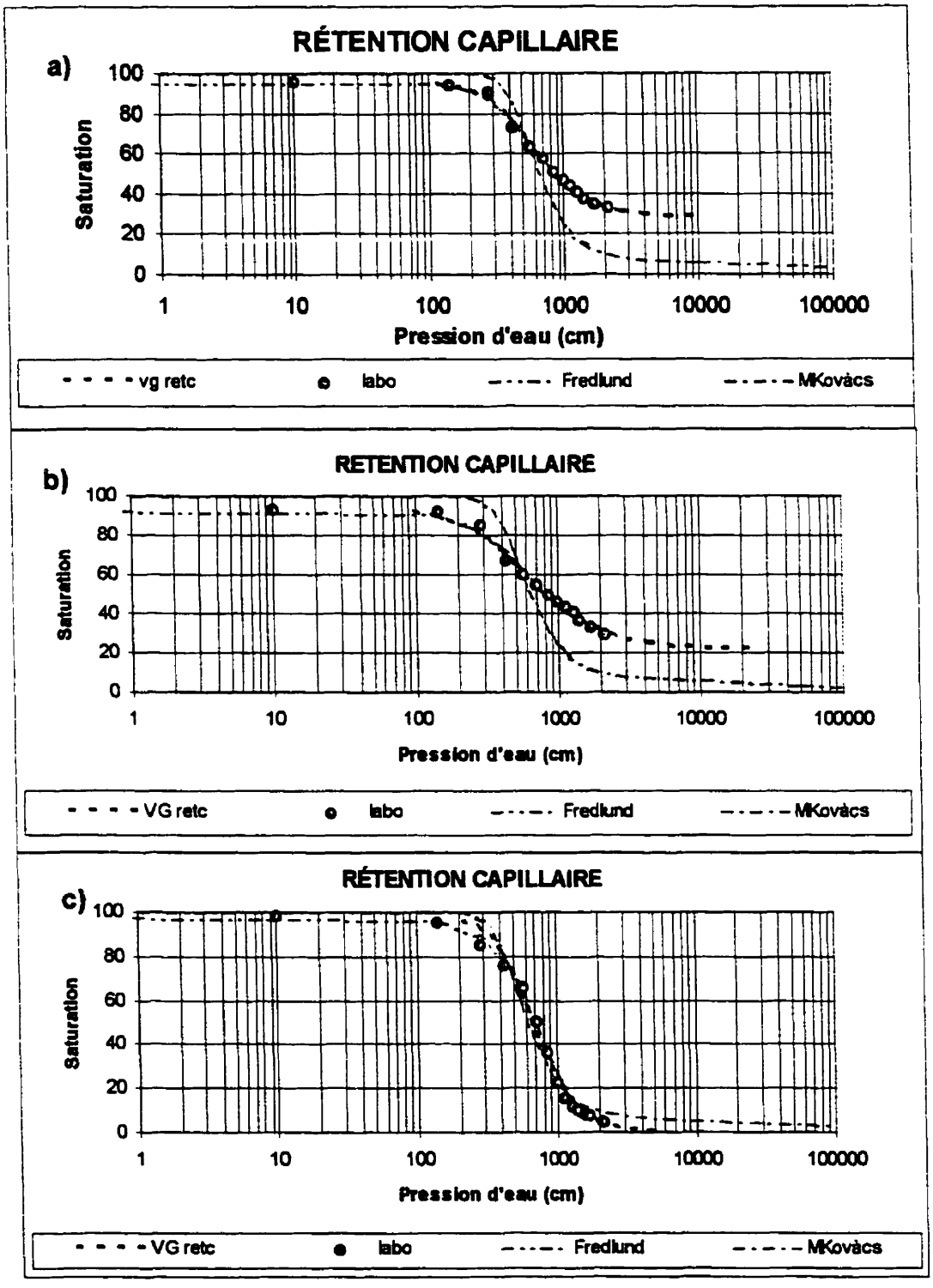


Figure 5-17 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma fin a) e = 0.72; b) e= 0.74; c) e =0.76

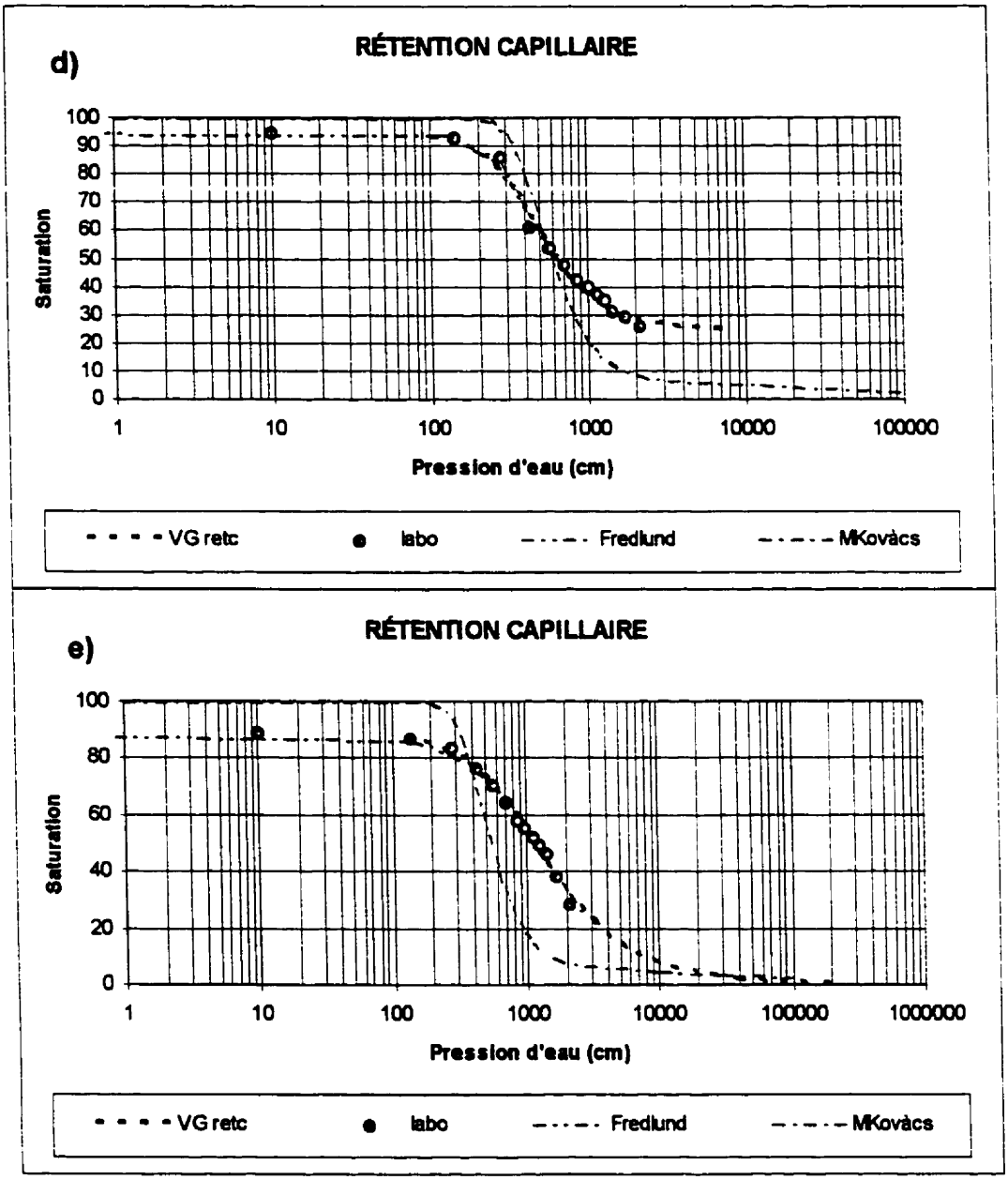


Figure 5.17 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma fin (suite)

d) e= 0.80; e) e= 0.86

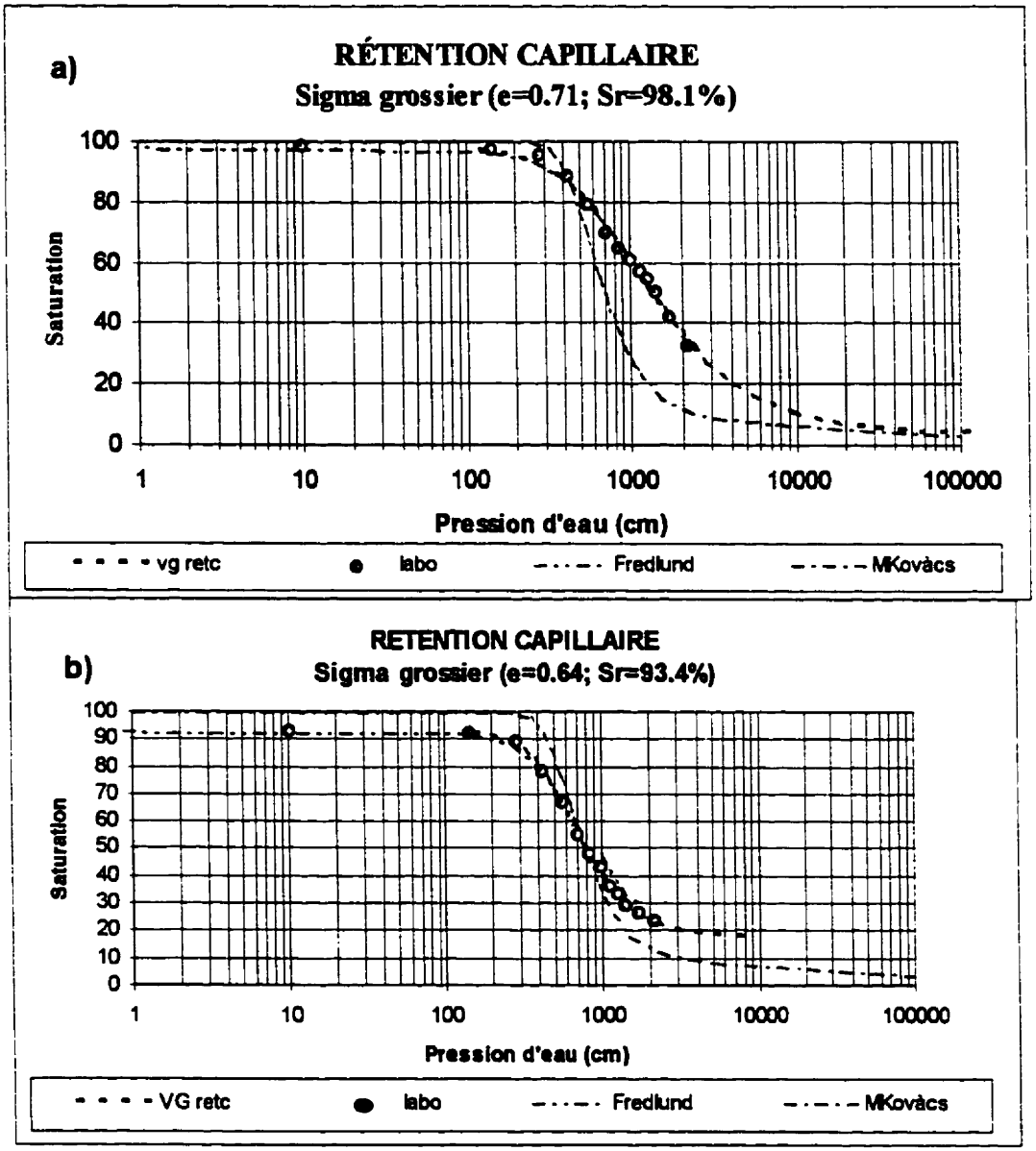
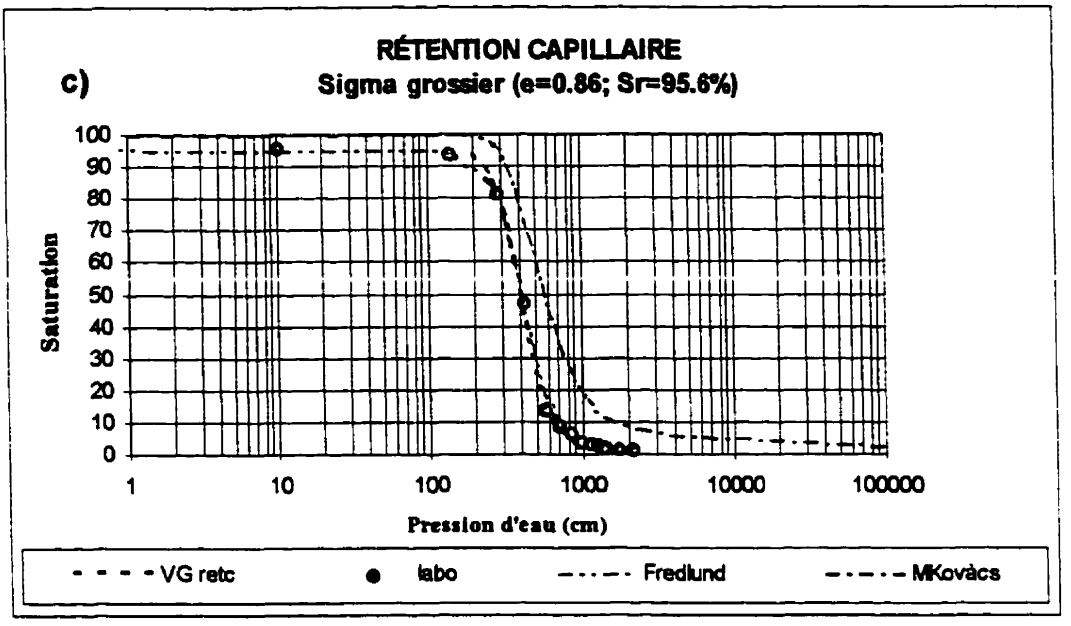


Figure 5-18 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma grossier



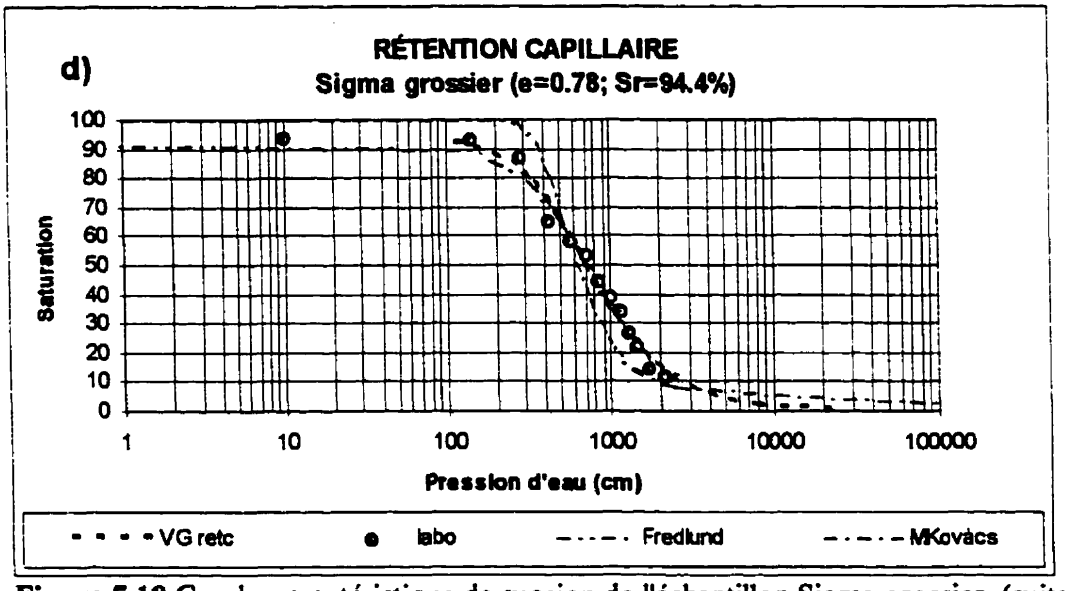


Figure 5.18 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma grossier (suite)

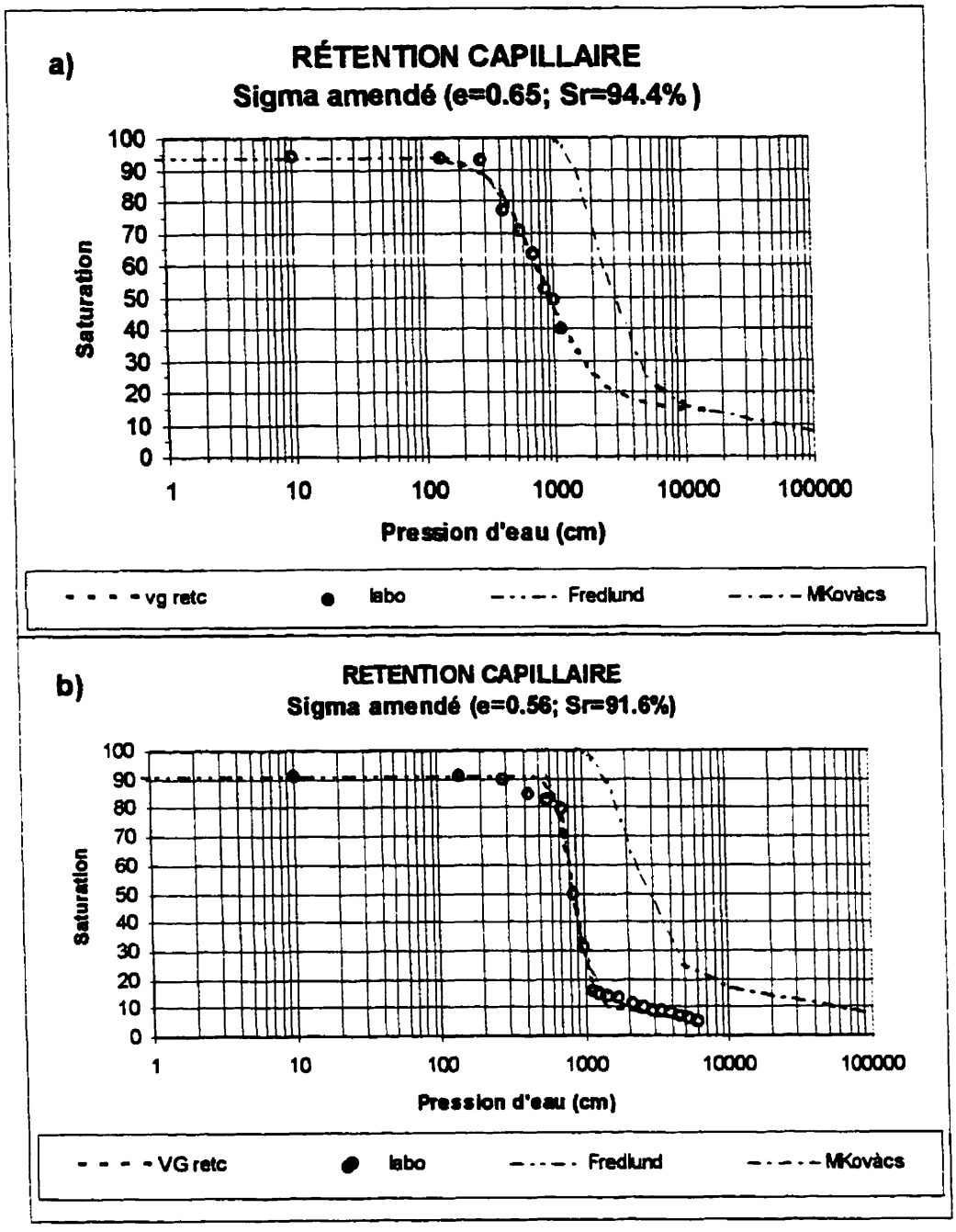


Figure 5-19 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma amendé

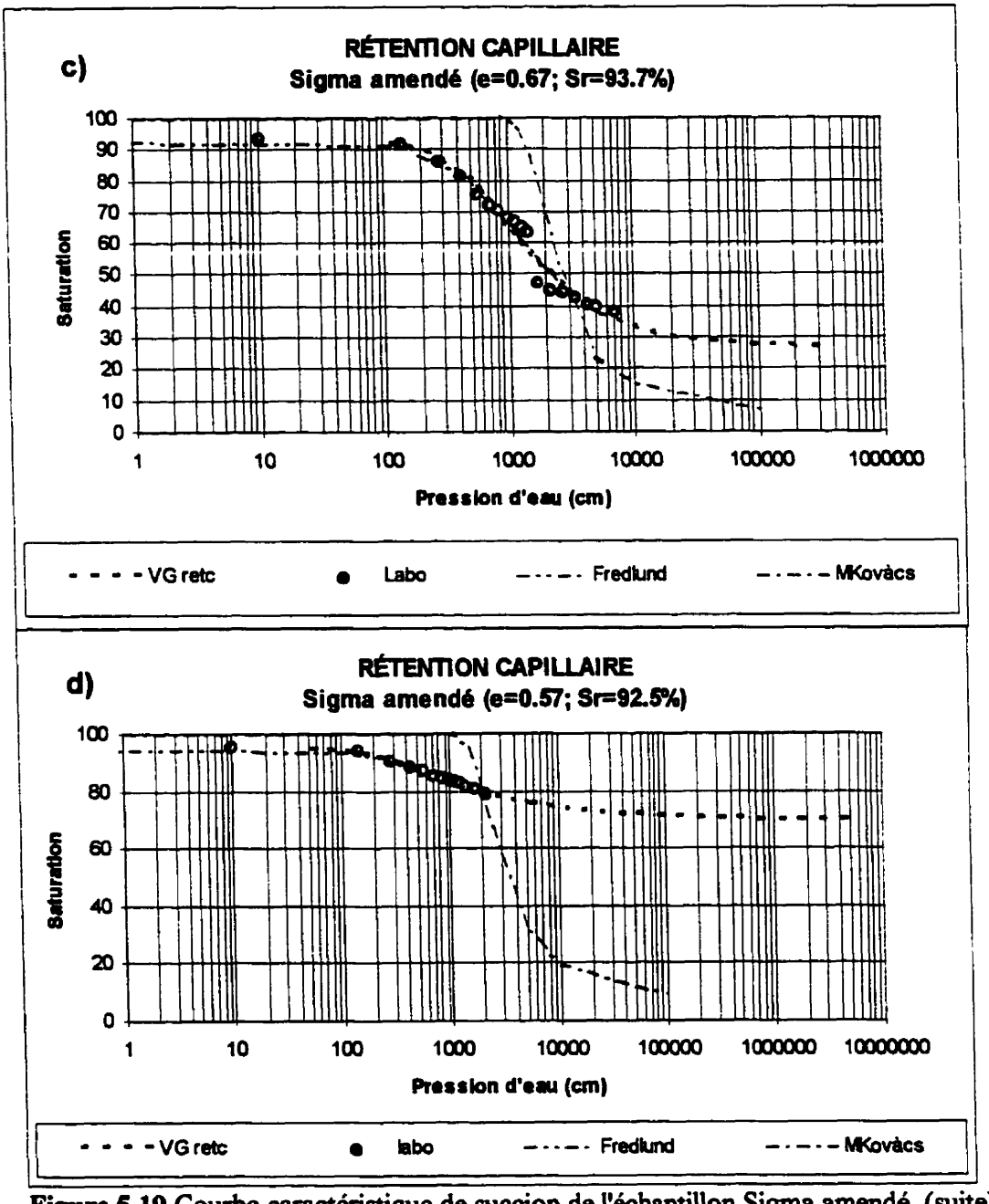


Figure 5.19 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon Sigma amendé (suite)

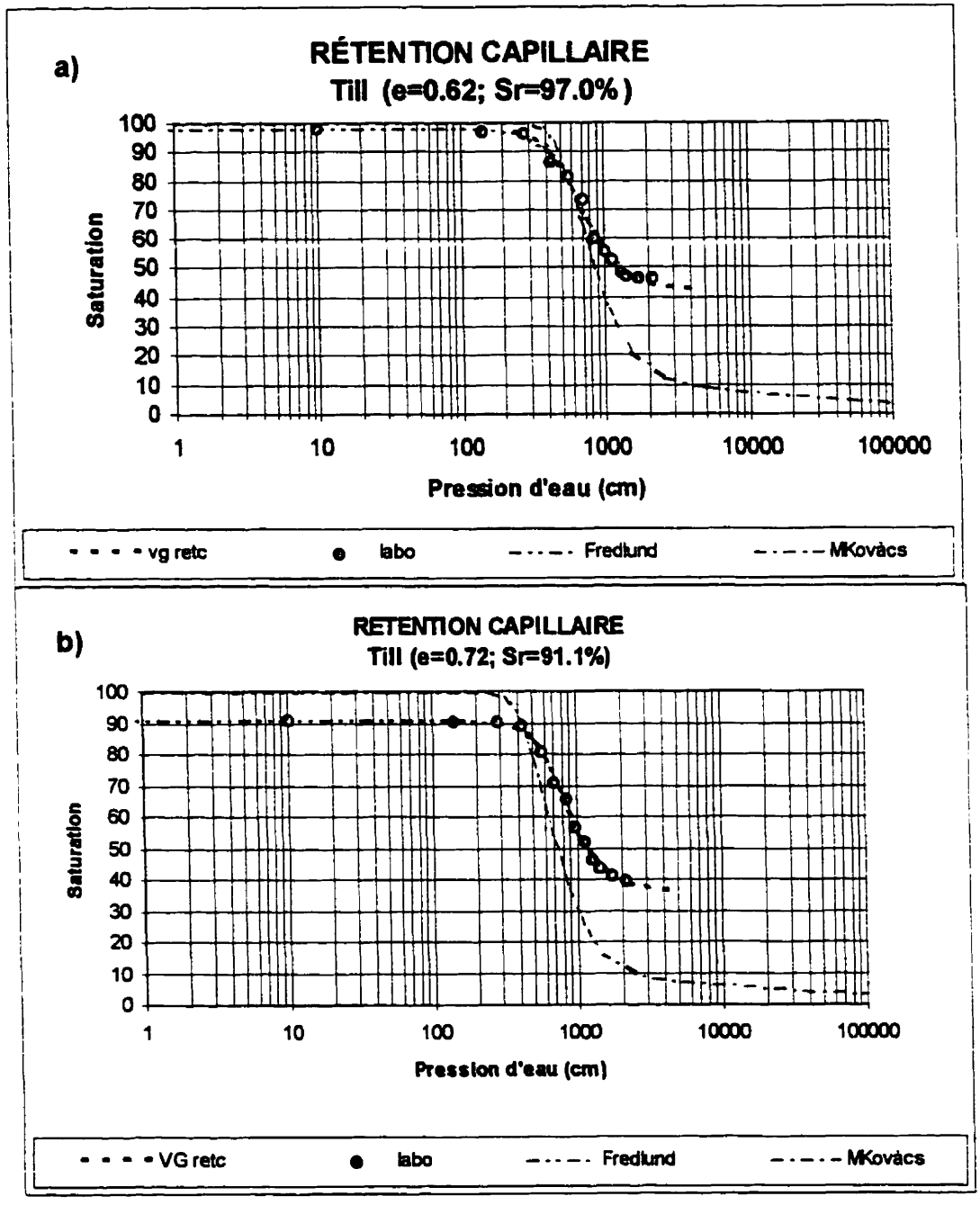


Figure 5-20 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon de Till

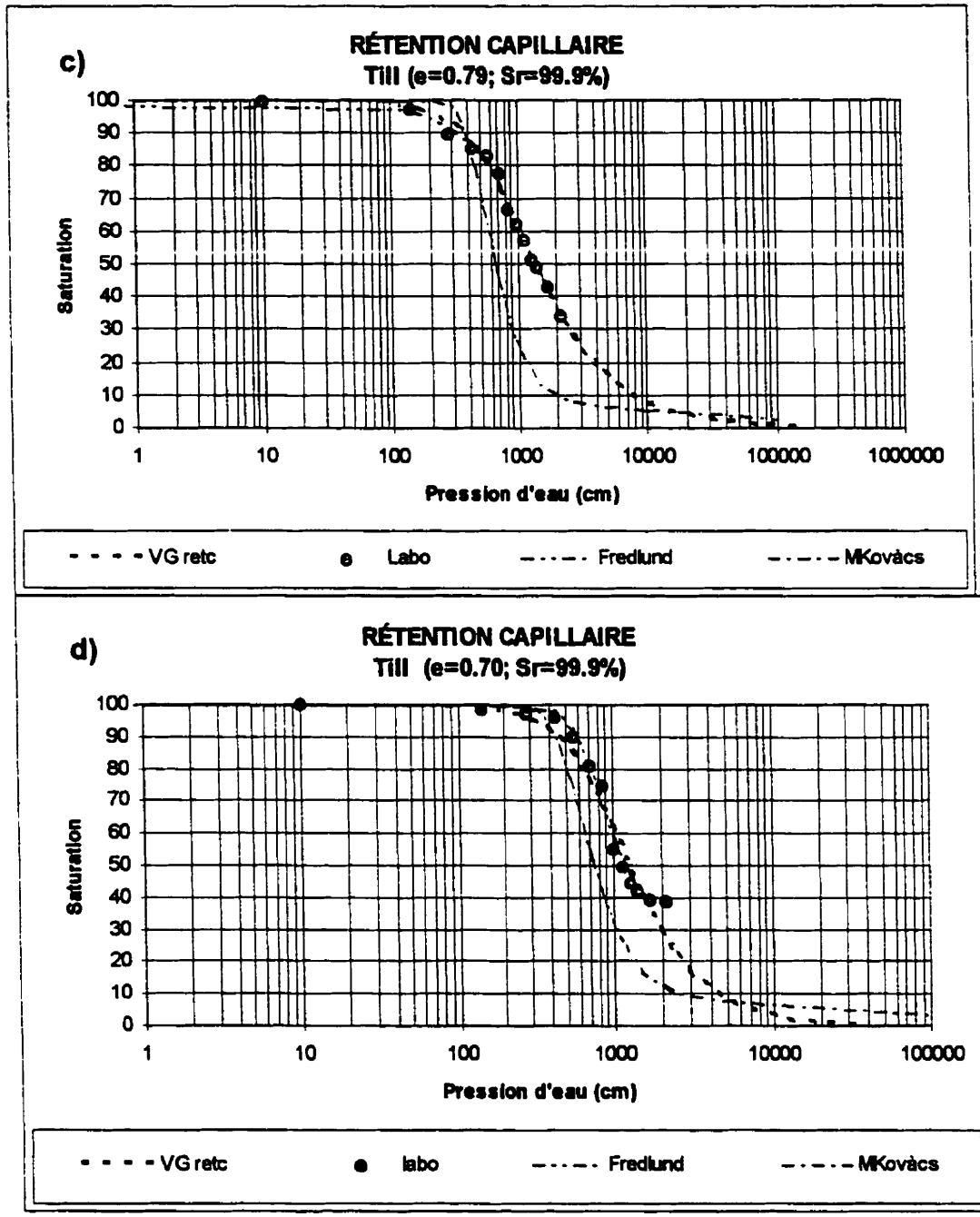
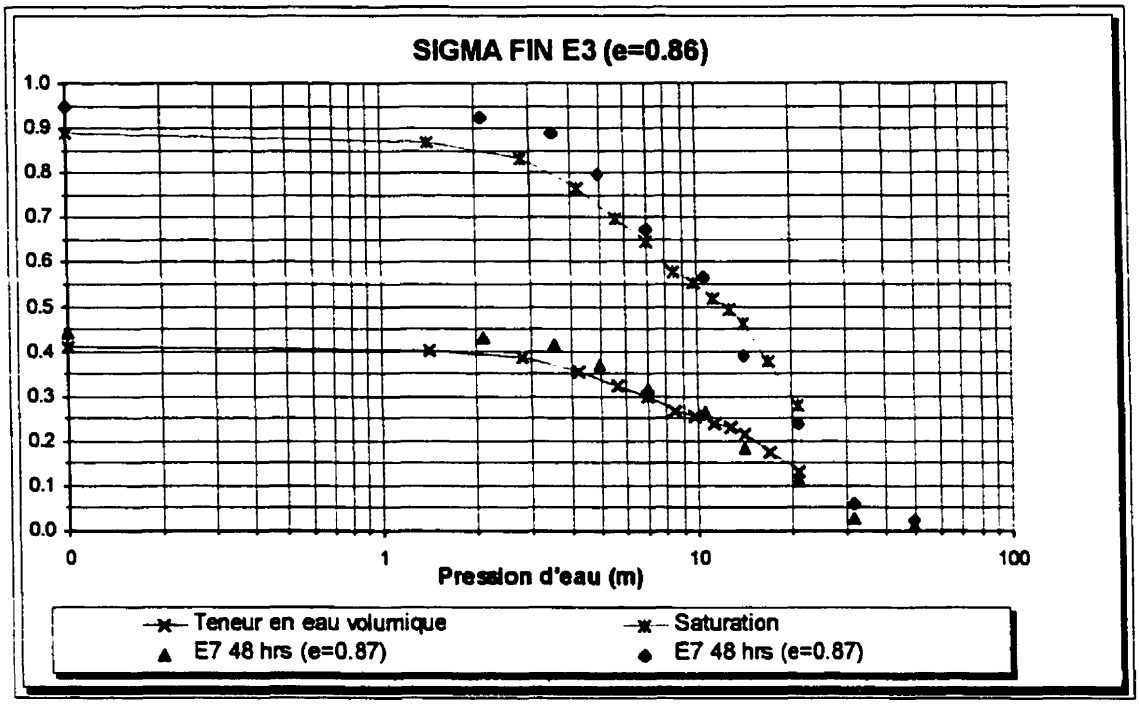


Figure 5.20 Courbe caractéristique de succion de l'échantillon de Till (suite)



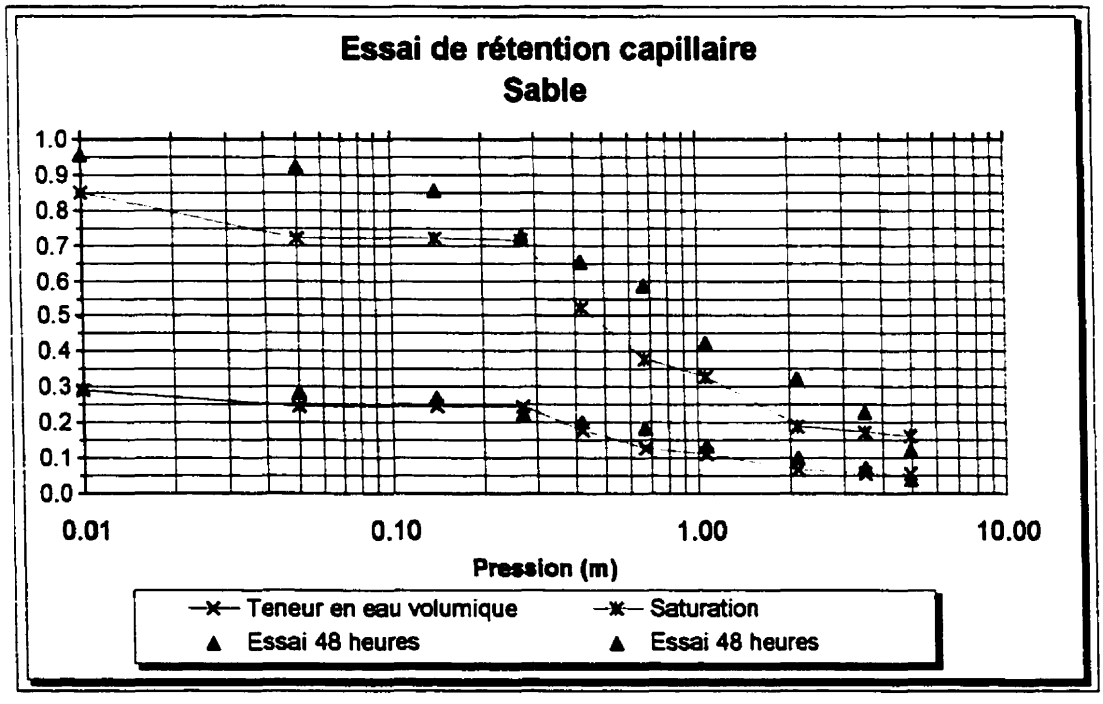


Figure 5-21 Comparaison des résultats des essais de rétention d'eau d'une durée de 24 heures avec ceux de 48 heures

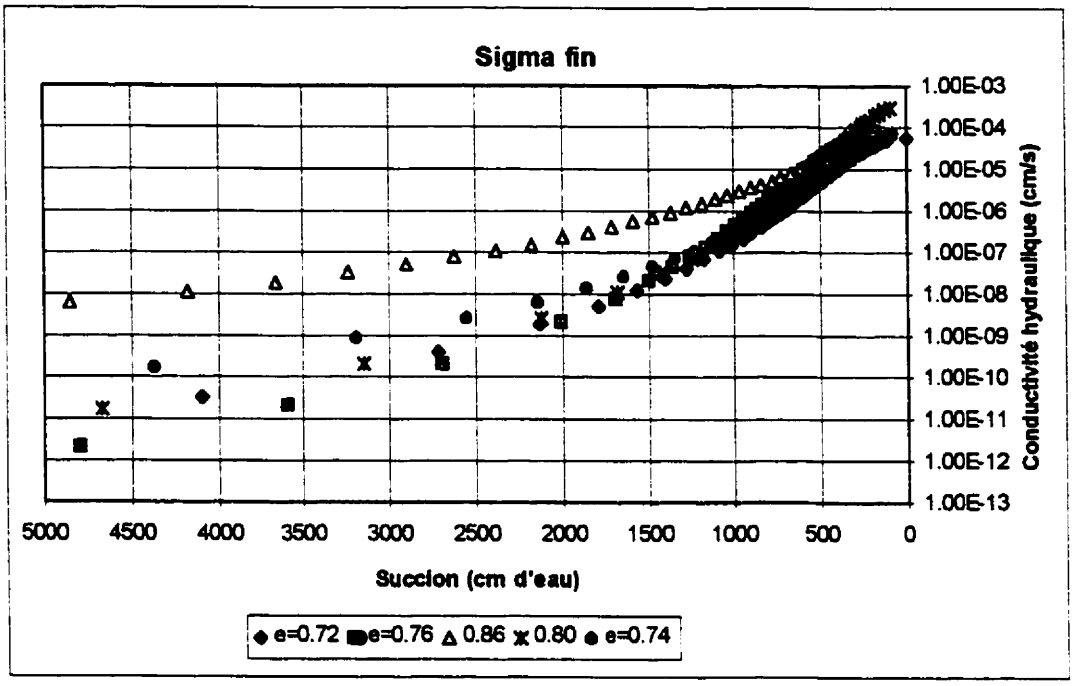


Figure 5-22 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturée avec le logiciel RETC

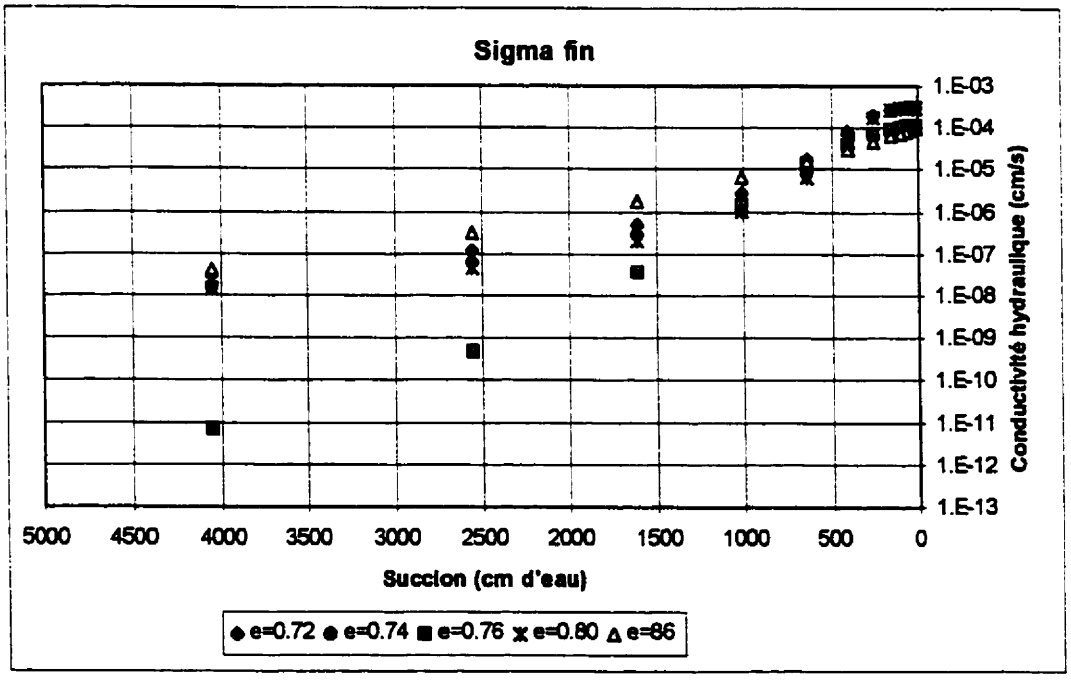


Figure 5-23 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturée avec la méthode de Fredlund

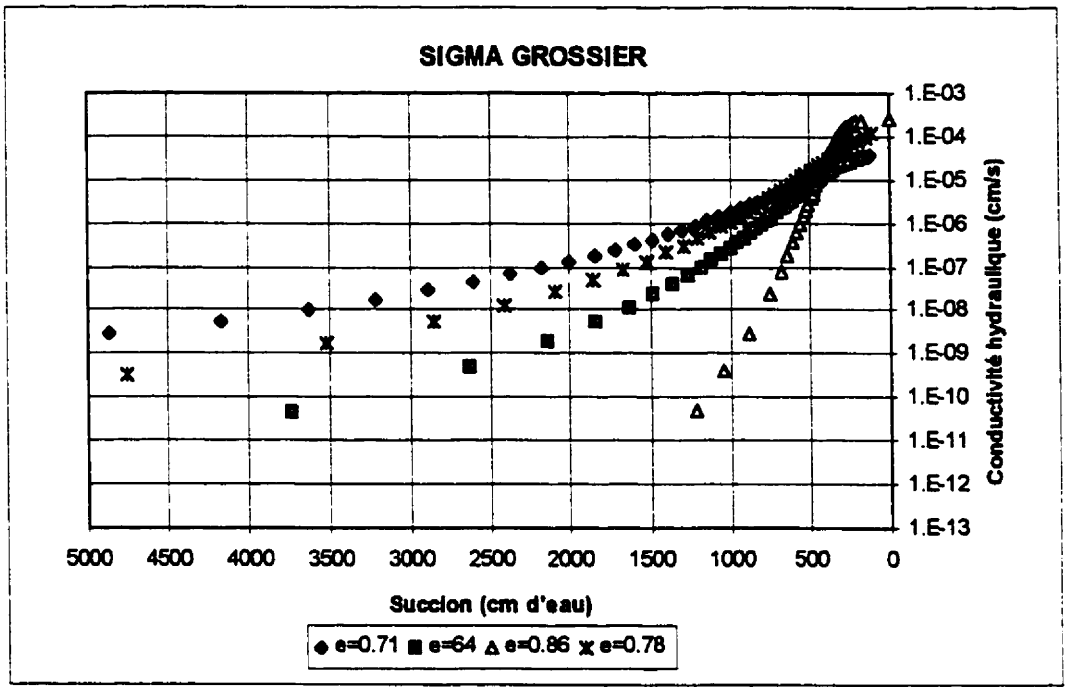


Figure 5-24 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturée avec le logiciel RETC

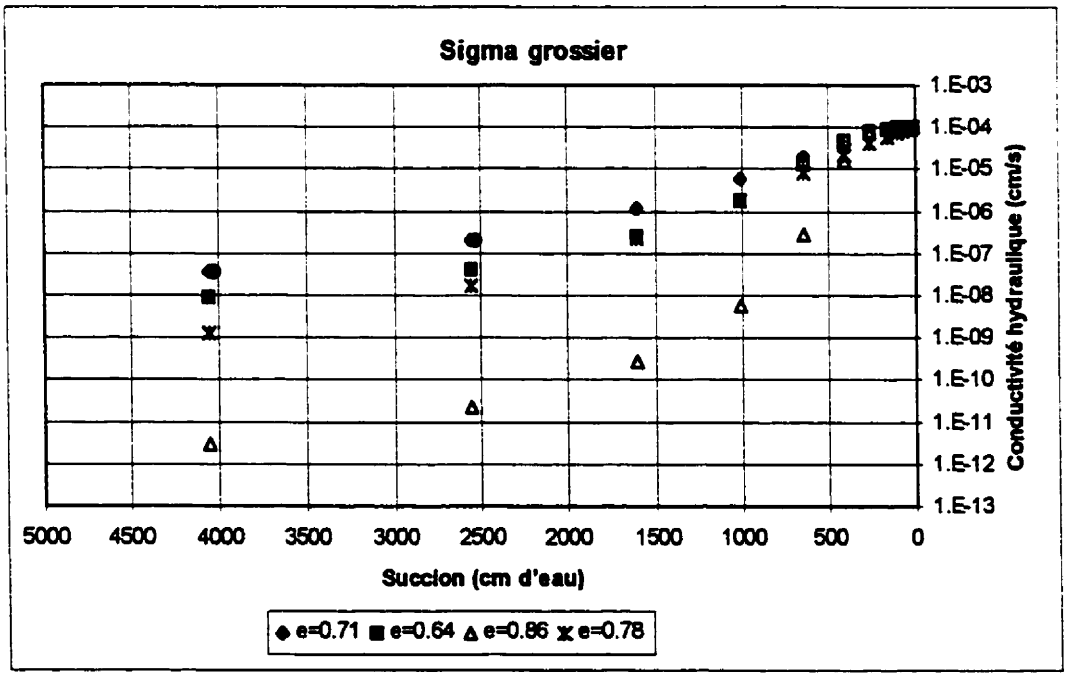


Figure 5-25 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturée avec la méthode de Fredlund

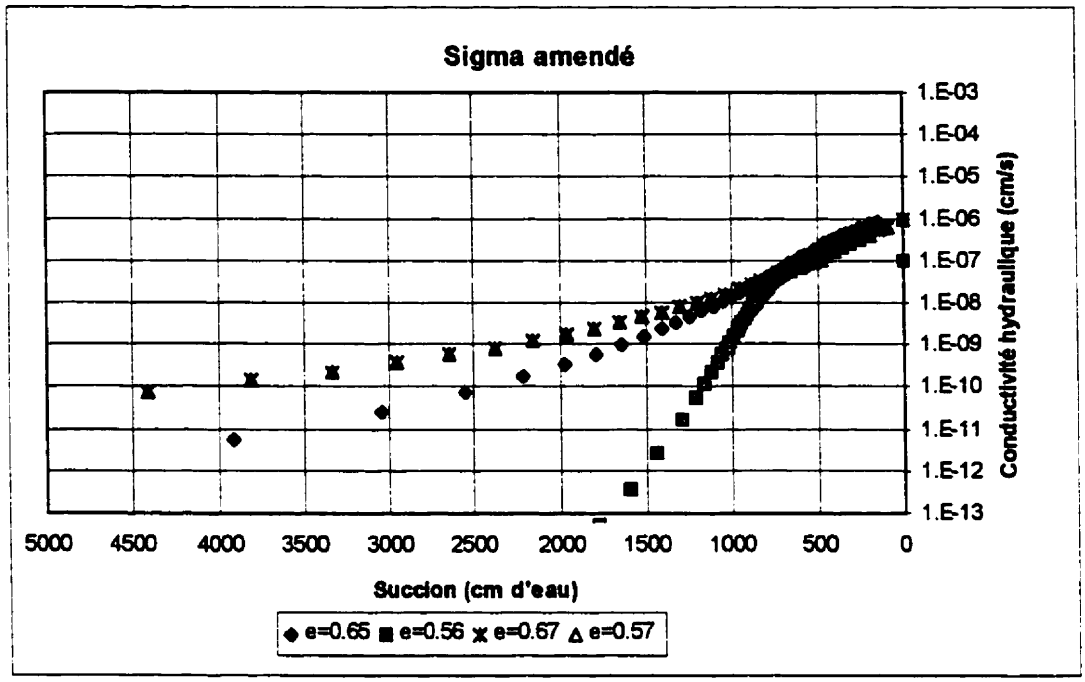


Figure 5-26 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturée avec le logiciel RETC

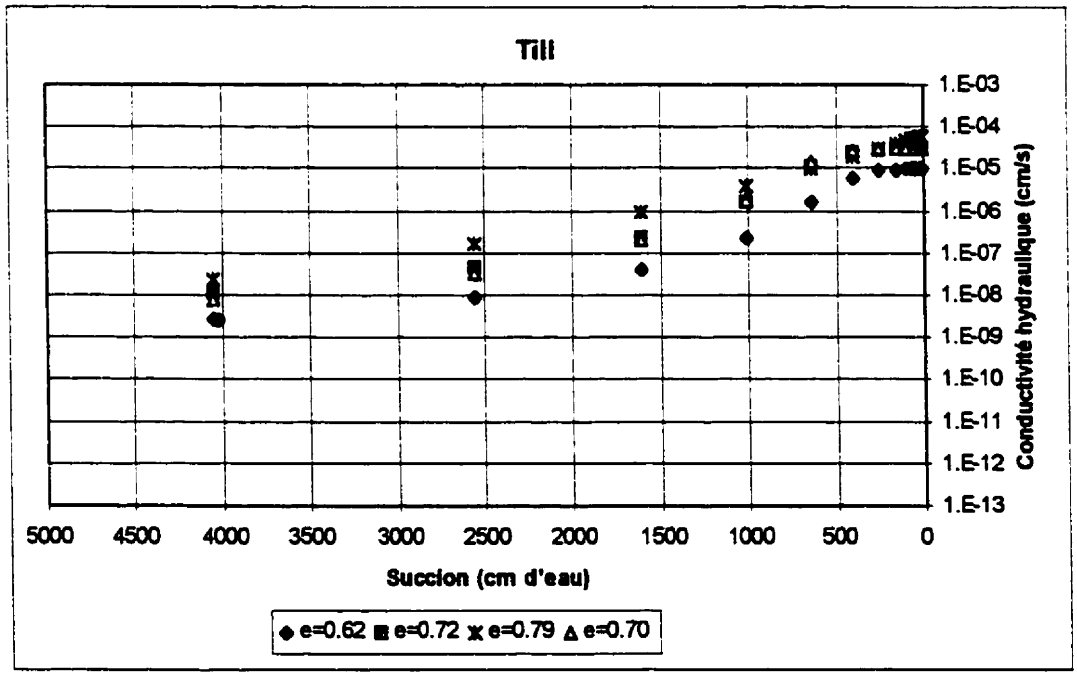


Figure 5-27 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturée avec la méthode de Fredlund

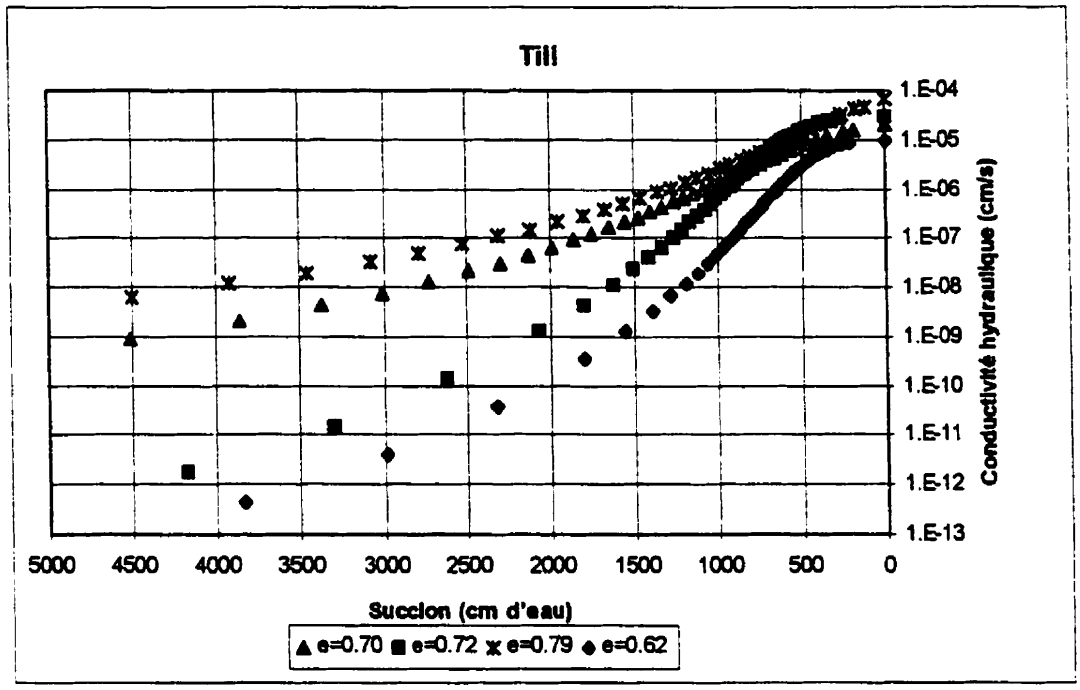


Figure 5-28 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturée avec le logiciel RETC

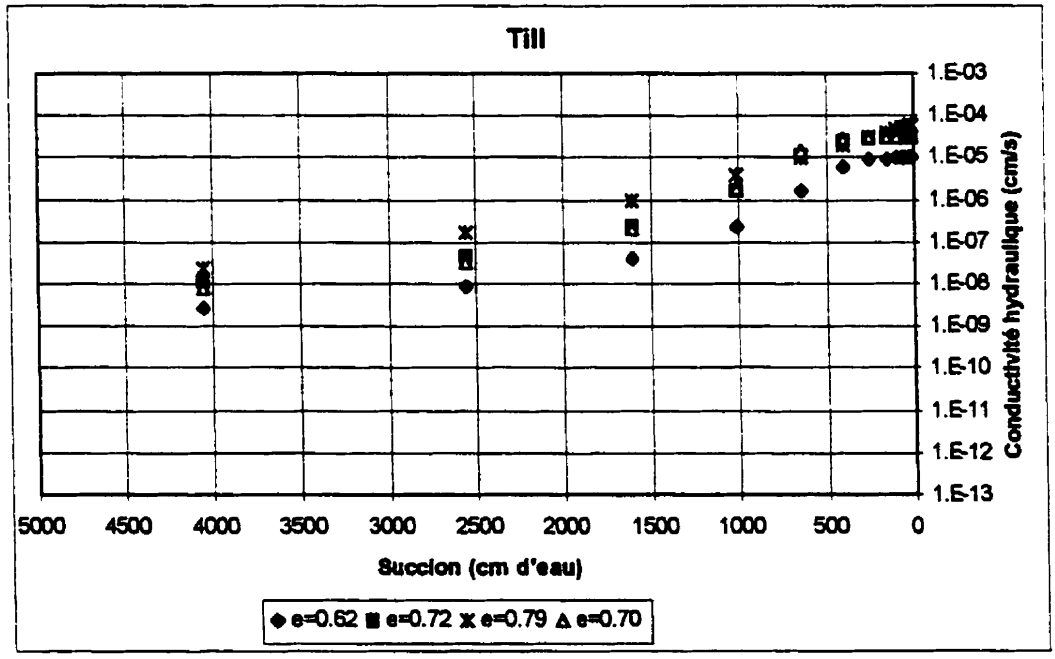


Figure 5-29 Résultats de l'analyse de la conductivité hydraulique non saturée avec la méthode de Fredlund

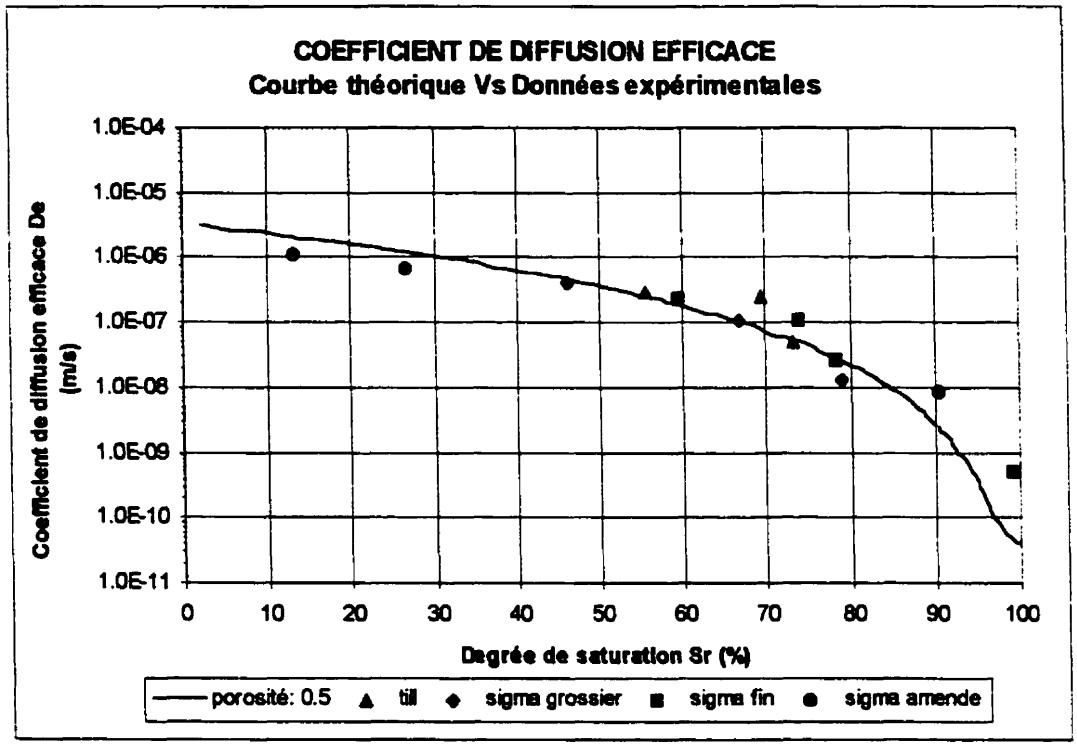


Figure 5-30 Comparaison des résultats de l'analyse du coefficient de diffusion effective expérimentale et de la valeur théorique de Collin (1987)

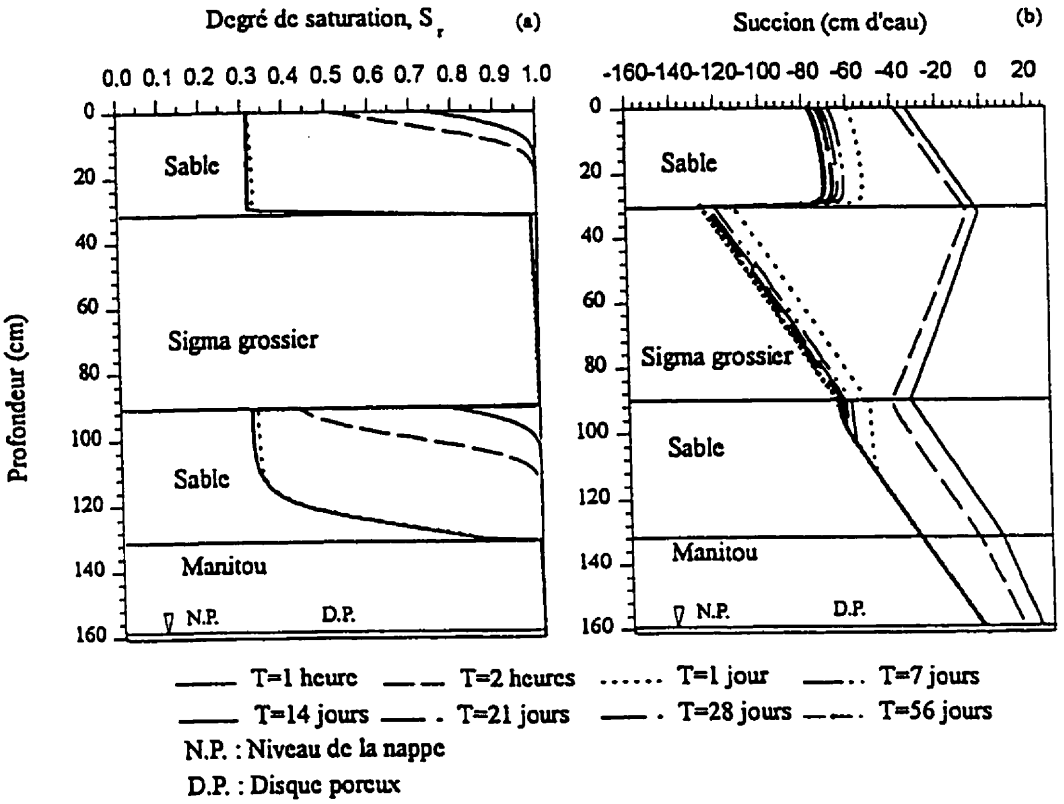
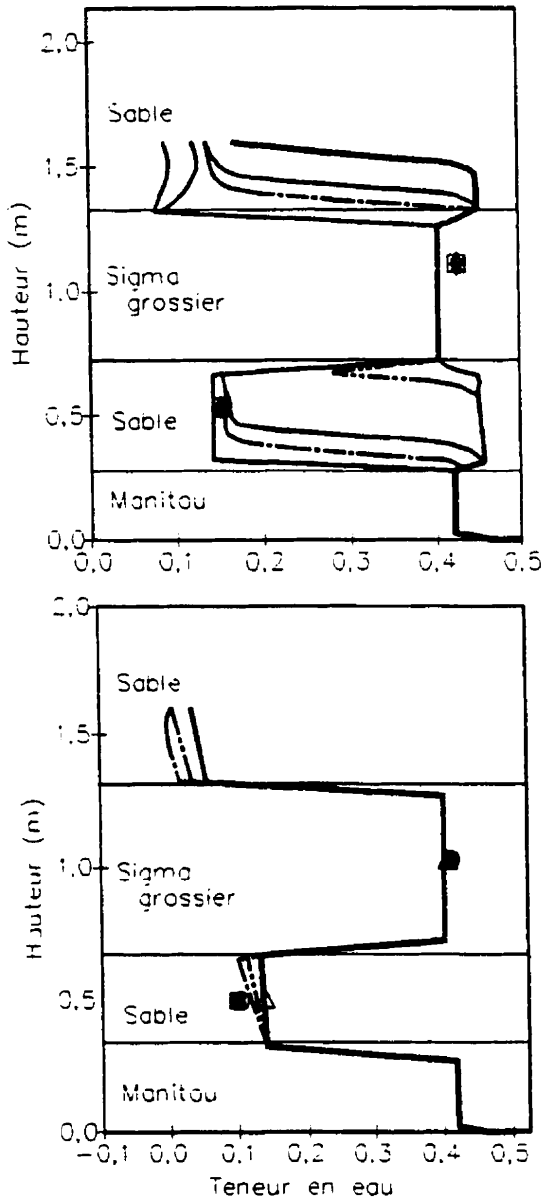


Figure 5-31 Système de recouvrement avec 40 cm de Sigma grossier comme couche capillaire, (a) profils de teneur en eau et (b) profils de pression



Calculs		Mesures	Calculs		Mesures
———	1 hre	□	———	2 jrs	+
—··—··—	2 hres	◊	———	7 jrs	△
———	6 hres		—··—··—	14 jrs	○
—·—·—	10 hres		———	30 jrs	■
———	1 jr	×	—·—·—	60 jrs	

Figure 5.32 Profils de teneur en eau calculés et mesurés pour le drainage de la colonne 1.

CHAPITRE 6 - CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

On sait depuis longtemps que les minéraux sulfureux situés à de faibles profondeurs ont tendance à s'oxyder et à générer un lixiviat acide pouvant contenir une forte concentration de métaux lourds et autres éléments toxiques. On sait aussi qu'il existe un lien étroit entre le taux d'oxydation des rejets sulfureux et la disponibilité de l'oxygène. Les divers types de recouvrement destinés à réduire le drainage minier acide visent essentiellement à interrompre le contact de l'oxygène avec les rejets miniers générateurs d'acidité. Dans le cas des recouvrements multicouches, la barrière capillaire est utilisée comme obstacle à l'oxygène atmosphérique et à l'eau de pluie. Dans ce projet sont présentées les études en laboratoire visant à évaluer les propriétés de divers matériaux meubles utilisés pour la conception des cellules expérimentales comprenant des barrières de recouvrement.

La campagne d'essai a permis de connaître les propriétés de base des divers matériaux utilisés (sigma Fin, sigma Grossier, sigma Amendé, Till, et un Sable). Les résultats de densité relative, des analyses granulométriques, des limites de consistance, des essais de compactage et des essais de consolidation sont conformes à ceux trouvés dans la littérature et aux valeurs des résidus miniers du même secteur .

Pour ce qui est des analyses des propriétés hydriques, les valeurs de conductivité hydraulique des résidus miniers dans l'ensemble concordent avec celles mesurées par Bussière (1993) et par Ricard (1994). L'équation de Kozeny-Carman, modifiée par Chapuis et Montour (1992) et identifiée par Bussière (1993) et par Ricard (1994) comme étant une bonne estimation des valeurs mesurées, a également permis d'estimer de façon satisfaisante la conductivité hydraulique des résidus miniers non-réactifs. La deuxième équation utilisée (KCPM) pour cette analyse (Aubertin et Bussière, 1996) s'avère aussi satisfaisante. Néanmoins, cette dernière est plus facile d'utilisation. En ce qui concerne

les résidus réactifs (Manitou-Barvue), ils ont présenté des traces de réactions chimiques évidentes avec des précipités pendant les essais, ce qui rend difficile les essais en laboratoire. Il a été remarqué aussi que ces équations fonctionnent moins bien pour les matériaux amendés à la bentonite et pour le sable. D'autres essais seraient nécessaires, afin de vérifier si la tendance se maintient.

Les quelques essais de gel-dégel montrent en général que les matériaux utilisés comme couche fine de la barrière de recouvrement n'ont pas été altérés significativement après 15 cycles de gel-dégel. Toutefois, le nombre d'essais étant limité, une étude plus poussée s'avère nécessaire pour valider cette constatation.

Les résultats des essais de rétention d'eau montrent bien que la valeur de l'AEV varie avec la porosité de l'échantillon et avec la granulométrie de ce dernier. La valeur de l'AEV pour un même échantillon augmente avec la diminution de la porosité qui dépend du compactage. Cette même constatation a été faite avec les modèles numériques utilisés pour prédire l'AEV des échantillons. Il a aussi été remarqué que le modèle de Kovács modifié nous donne de bonnes valeurs d'AEV pour les résidus miniers non amendés ; cependant, pour les résidus amendés à la bentonite, l'AEV donné par le modèle est surestimé. On a aussi noté que la durée de l'essai avait une influence sur l'allure de la courbe, il faut donc s'assurer de l'équilibre du drainage. Une étude sur l'influence de la durée de l'essai serait recommandée afin d'optimiser le temps de la durée des essais.

La conductivité hydraulique non saturée a été analysée avec la méthode de Fredlund et celle utilisée par le logiciel RETC. Les résultats obtenus avec le code RETC montrent une différence de 3 à 4 ordres de grandeur entre des essais différents aux fortes succions. Toutefois, dans le système multicouches, les succions au quelles les matériaux sont assujetties sont rarement grandes. On peut donc dire qu'à faible pression il y a une bonne similitude entre les deux méthodes.

Les résultats des coefficients de diffusion montrent une diminution considérable avec le degré de saturation. Toutefois, plus le degré de saturation s'approche de 100 plus l'essai est long et difficile à réaliser. En général, les résultats concordent bien avec les données de la littérature.

Les résultats des essais en colonne et des simulations numériques obtenues à ce jour supportent pleinement les hypothèses de travail : la couche capillaire constituée de rejets miniers conserve un haut degré de saturation.

Cette étude a permis de constater que les matériaux utilisés lors de la conception des cellules expérimentales ont de bonnes caractéristiques pour cet usage. Elle a également permis de bien se familiariser avec les essais de rétention d'eau et de valider diverses méthodes d'analyse des courbes obtenues.

RÉFÉRENCES

AACHIB, M., AUBERTIN M. ET CHAPUIS R.P. 1993. Étude en laboratoire de la performance des barrières de recouvrement constituées de rejets miniers pour limiter le drainage minier acide Un état de la question. *Rapport EPM/RT-93/32, École Polytechnique de Montréal.*

AACHIB, M. 1997. Étude en laboratoire de la performance des barrières de recouvrement constituées de résidus minirs pour limiter le drainage acide. *Thèse de doctorat. Département de génie Minéral, École Polytechnique de Montréal.*

ACEVEDO, N. 1996. Méthodes d'études d'un aquifère à nappe libre: Application au cas de Lachenaie. Mémoire M.Sc.A., Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal.

AKINDUNNI, F.F., GILLHAM, R.W. ET NICHOLSON, R.V. 1991. Numerical simulation to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 28 : 446-451.

ANNON. 1995. L'industrie minérale du Québec 1995. Ministère des Ressources naturelles du Québec.

ANNON. 1996. Bilan et faits saillants de l'industrie minérale du Québec, 1996. Ministère des Ressources naturelles du Québec.

ASTM, 1991. Standard test method for specific gravity of soils. ASTM D854-58, in Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, Vol. 04.08, pp. 156-158.

ASTM, 1991. Standard test method moisture-density relation of soils and soil-aggregate mixture using 4.54 kg hammer and 457 mm drop. ASTM D1557-78, in Annual Book of

ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, Vol. 04.08, pp. 206-210

ASTM, 1991. Standard test method for particle-size analysis of soils. ASTM D422-63, in Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, Vol. 04.08, pp. 87-96.

ASTM, 1991. Standard test method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils. ASTM D4318-84, in Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, Vol. 04.08, pp. 573-583.

ASTM, 1991. Standard test method for one dimensional consolidation properties of soils. ASTM D2435-80, in Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, Vol. 04.08, pp. 278-282.

ASTM, 1991. Standard test method measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. ASTM D5084-90, in Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, Vol. 04.08, pp. 62-69.

ASTM, 1991. Standard test method for permeability of granular soil, by constant head method, test D2434-68, in Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, Vol. 04.08, pp. 273-277.

ASTM, 1991. Standard test method for capillary-moisture relationship for fine- textured soils by pressure-membrane apparatus. ASTM D3152-72, in Annual Book of ASTM

Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, PA, Vol. 04.08, pp. 156-158.

AUBERTIN, M. 1991. La problématique de la gestion des résidus miniers au Québec. Collection Environnement et Géologie, *Association Professionnelle des Géologues et des Géophysiciens du Québec, Vol. 12* pp. 139-152.

AUBERTIN, M., BUSSIERE, B. 1991. Étude préliminaire - Évaluation des barrières sèches contruites à partir des résidus miniers alcalins. Rapport soumis au Centre de Recherche Minérales, Projet C.D.T. P1610, École Polytechnique de Montréal.

AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P. 1991. Considérations hydro-géotechniques pour l'entreposage des résidus miniers dans le nord-ouest du Québec. *Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides*, Montréal, Vol. 3, pp 1-22.

AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P. ET AL. 1992. Projet de recherche concernant l'évaluation des barrières sèches construites à partir de résidus miniers. *Dossiers 7125-G-033 PRVI et 23440-3-9293 SQ* (Rapports CDT P1622).

AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P. ET AL. 1993. Projet de recherche concernant l'évaluation des barrières sèches construites à partir de résidus miniers. *Dossiers 7125-G-033 PRVI et 23440-3-9293 SQ* (Rapports CDT P1622).

AUBERTIN,. M., CHAPUIS, R.P., BUSSIERE, B., AACHIB, M. 1993. Propriétés de résidus miniers utilisés comme matéraiu de recouvrement pour limiter le drainage minier acide. *Symposium International Géologie et Confinement des Déchets Toxiques, Géoconfine 93*, Montpellier, France.

AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P. ET AL. 1994. Projet de recherche concernant l'évaluation des barrières sèches construites à partir de résidus miniers. *Dossiers 7125-G-033 PRVI et 23440-3-9293 SQ* (Rapports CDT P1622).

AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P., AACHIB, M., BUSSIERE, B., RICARD, J.-F., ET TREMBLAY, L. 1995. Évaluation en Laboratoire de Barrières Sèches Construites à Partir de Résidus Miniers. *Rapport final, Projet P1622, C.D.T.*, École Polytechniqe de Montréal.

AUBERTIN, M., BUSSIERE, B., CHAPUIS, R.P., 1996. Hydraulic conductivity of homogenized tailing from hard rock mines. Canadian Geotechnical Journal 33: 470-482.

AUBERTIN, M., BUSSIERE, B., BARBERA, J-M., CHAPUIS, R., MONZON, M. ET AACHIB, M., 1997. Construction and instrumentation of in situ test plots to evaluate covers built with clean tailings. Fourth International conference on acid rock drainage. Vancouver, B.C. Canada.

AUBERTIN, M., RICARD, J-F. AND CHAPUIS R.P., 1998. A predictive model for the water retention curve : application to tailings from hard-rock mines. Can. Geotech. J. 35 .

AUBERTIN, M., MONZON, M., RICARD, J-F. AND CHAPUIS R.P., 1998b. Application du modèle Kovács modifié à la courbe de rétention d'eau de rejets miniers. 8ème Congrès de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement, Vancouver, B.C.

BATES, R.C., WAYMENT, W.R. 1967. Laboratory study of factors influencing waterflow in mine backfill. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, RI 7034.

BERNIER, L.R., Rapport d'analyses minéralogiques par diffraction des rayons-X sur des échantillons de till et de résidus miniers de mines Sigma et Manitou, Val D'Or : phase II.

BEWS, B.E., O'KANE, M.A., WILSON, G.W., WILLIAMS, D., CURREY, N., 1997. The Design of a low flux cover system, including lysimeters, for acid generating waste rock in semi-Arid environments. Fourth international conference on acid rock drainage. Proceedings, Vancouver B.C., Canada.

BOUCHENTOUF, 1996. Modélisation de l'écoulement de l'eau en milieu poreux non-saturé: cas d'une barrière de recouvrement. Mémoire M.Sc.A., Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal.

BOWLES, J.E. 1984. Physical and Geotechnical Properties of Soils. McGraw Hill.

BROOKS, R.H. ET COREY, J.C., 1964. Hydraulic properties of porous medium. Colorado State University (Fort Collins), *Hydrology Paper 3*.

BUREAU DE NORMALISATION DU QUEBEC (BNQ). 1981. Sols - Détermination de la limite de liquidité à l'aide du pénétromètre à cône suédois et de la limite de plasticité. BNQ 2501-092/1981-10-28.

BUSSIERE, B., AUBERTIN, M.,CHAPUIS, R.P., CRESPO, J.R., ET AACHIB, M. 1995. « Unsaturated Flow Modeling of Covers for Reactive Tailings». CAMI'95. Dans: *Proceedings of the Third Canadian Conference on Computer Application in the Mineral Industry*, Montréal, pp. 853-862.

BUSSIERE, B. 1993. Évaluation des propriétés hydrogéologiques de résidus miniers utilisés comme barrière de recouvrement. Mémoire M.Sc.A., Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal.

BUSSIERE, B., AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P. 1997. Écoulement Non Saturé à Travers les Couvertures avec Effets de Barrière Capillaire (CEBC): Modélisation Physique et Numérique avec Application au Drainage Minier Acide. *Technical Report EPM/RT-97/03. École Polytechnique de Montréal, 202 pages.*

BUSSIERE, B., LELIEVRE, J., OUELLET, J., BOIS D., 1995. Utilisation de résidus miniers désulfurés comme recouvrement pour prévenir le DMA : analyse technico-économique sur deux cas réels. L'exploitation minière et environnement. Compte rendu, Sudbury, Ontario, Canada.

CARMAN, P.C. 1937. Fluid flow through granular beds. Transactions, *Institution of Chemical Engineers*, London, 15: 150-166.

CARMAN, P.C. 1956. Flow of gases through porous media. *Butterworths*, London.

CASAGRANDE, A. 1948. Classification and Identification of Soils. *Trans ASCE*, vol. 113 pp.901-903

CHAPUIS, R. P. AND LEGARE, P.P, 1992. A simple method for determining the surface area of five agregates and fillers in bituminous mixtures. *ASTM-STP1147*, pp.177-186.

CHAPUIS, R.P. ET MONTOUR, I. 1992. Évaluation de l'équation de Kozeny-Carman pour prédire la conductivité hydraulique. Compte rendu, 45e Conférence Canadienne de Geotechnique, Toronto, pp. 78-1-78-10.

CHAPUIS, R.P., CRESPO, R., CHENAF, D. ET AUBERTIN, M. 1993. Evaluation of Ground water f.e.m. Software for steady and usteady state conditions. 46th Canadian Geotechnical Conference, Saskatoon, pp. 61-70.

CHENAF, J. 1997. Détections des frontières pendant la phase remontée des essais d'aquifère. *Thèse de doctorat. Département de génie Minéral, École Polytechnique de Montréal*

CHILD, E.C. ET COLLIS-GEORGE, G.N. 1950. The permeability of porous material. Proceeding of the Royal Society of London, Series A, 201 : 392-405.

CHIU, T-F. ET SHACKELFORD, C.D. 1994. Practical aspects of the capillary barrier effect for landfills. Presented at th 17th International Madison Waste Conference, September 21-22, 1994, 357-375.

COLLIN, M. 1987. Mathematical modelling of water and oxygen transport in layered soil covers for deposits of pyritic mine tailings. Licenciate Treatise. Royal Institute of Technology. Department of Chemical Engineering. S-100 44 Stockholm. Sweden.

COLLIN, M., RASMUSON, A. 1988. Gas diffusivity models for unsaturated porous media. *Soil Sciences American Journal*. Vol. 52: 1559-1565.

COLLIN, M., RASMUSON, A. 1990. Mathematical Modeling of Water and Oxygen Transport in Layered Soil Covers for Deposits of Pyritic Mine Tailings, Acid Mine Drainage: Designing for Closure. GAC-MAC Annual Meeting, pp. 311-333.

CRESPO, J.R. 1994. Modélisation des Écoulements à Travers les Ouvrages de Retenue et de Confinement de Résidus Miniers par un Logiciel d'Éléments Finis. *Thèse de Maîtrise*. Département de Génie Minéral, École Polytechnique de Montréal.

CURRIE, J.A. 1961. Gaseous diffusion in porous media, part 3. Wet granular materials. British Journal of Applied Physics. 12. pp. 318-324.

DAVID, D.J., NICHOLSON, R.V. 1995. Field Measurements for determining rates of sulphide oxidation. Mining and the Environment Conference Proceeding / L'exploitation minière et l'environnement, Compte rendu. Sudbury 1995. pp 201-210

DAY, R. W., 1996. Winter effects on hydraulic conductivity of compacted clay. Discusssion, Journal of Geotechnical Engineering. pp 85.

EIVEMARK, M.M., ROBINSON, K.E. 1989. A case history of on-going changes in tailings dam design of the initial construction. Geotechnical Aspects of Tailings Disposal and Acid Mine Drainage, Canadian Geotechnical Society (Vancouver).

FORTIN, L. 1982. Gestion appropriée des parcs à résidus miniers. *Comptes-rendus, Colloque National sur la Restauration des Parcs à Résidus Miniers*, MENVIQ, pp. 278-315.

FREDLUND D.G. ET RAHARDJO, H. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons Inc., New York, 517 p.

FREDLUND, D.G. ET XING, S. 1994. Equation for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, v.31, pp. 251-531.

FREDLUND, D.G., XING, S. ET HUANG, S. 1994. Predicting the permeability function of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal.* v. 31, pp. 533-546.

FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. 1979. Groundwater. *Prentice-Hall.*

GARGA, V.K., MCKAY, L.D. 1984. Cyclic triaxial strength of mine tailings. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No.8, pp. 1091-1105.

GEOSLOPE INTERNATIONAL, 1994. SEEP/W User's Guide. Version 3.

GUERRA, F. 1973. Characteristics of tailings from a soil engineer's viewpoint. Tailing Disposal Today, Proceedings of the First International Tailing Symposium, pp. 102-137.

GILLHAM, R.W. 1984. The capillary fringe and its effects on the water-table response. Journal of Hydrology, 67: 307-324.

HEAD, K.H. 1986. Manual of Soil Laboratory Testing. Vol. I.II.III, Ed. John Wiley & Sons.

HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. 1981. An introduction to geotechnical engineering. Ed. Prentice-Hall.

ISHIHARA, L., YASUDA, S., YOKATA, L. 1981. Cyclic strength of undisturbed mine tailings. International Conference on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, Rolla, Vol.1, pp.53-58.

KAYYAL, M.K. 1995. Effect of Moisture Evaporate Stage on the Development of Shrinkage Cracks in soils. *Unsaturated Soils/ Sols Non Saturés*, Alonso & Delage (editors). Balkema, pp. 373-379.

KISSIOVA, M. 1996. Étude des modèles de prédiction de la conductivité hydraulique des matériaux meubles non-saturés. *Projet de Maîtrise. École Polytechnique de Montréal.*

KLEINMANN, R.L.P. CRERAR, D.A. AND PACELLI, R.R. 1981. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Engineering*, 300-304.

KLOHN, E.J. 1986. Dam safety an tailing dam design. Dam Safety Seminar, pp.129-154.

KOZENY, J. 1927. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzugsber Akad. Wiss., Wien, 136(2a): 271-306.

KOVACS, G. 1981. Seepage Hydraulics. *Elsevier Scientific Pub.Cie*, Amsterdam.

KUNZE, R.J., UEHARA, G. ET GRAHAM, K. 1968. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. Soil Science Society of America, Proceedings, 32: 760-765.

L'ECUYER, M., CHAPUIS, R.P., AUBERTIN, M. 1992. Propriétés hydrogéotechniques des résidus miniers de Solbec et Cupra, Québec. Compte rendu, 45e Conférence Canadiennne de Geotechnique, Toronto, pp.79-1--79-11.

LEONG, E.C. ET RAHARDJO, H., 1997. Review of soil-water characteristic curve equations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. December 1997.

LEONG, E.C. ET RAHARDJO, H., 1997. Permeability functions for unsaturated soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. December 1997.

MABES, D.L., JAMES H.H., WILLIAMS, R.E. 1977. Physical properties of Pb-Zn mine-process wastes. Proceedings, Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials, ASCE, pp. 103-117.

MCMULLEN, J., FIRLOTTE, R., KNAPP, R., AUBERTIN, M. 1997. Les terrains aurifères site closure and rehabilitation : conceptual to construction. 29th Annual CMP Operators Conference, CIM-CMP, 273-292.

MARCOTTE, R. 1994. Inventaire, classification et coûts de restauration des sites miniers du Québec. *Ministère des ressources naturelles du Québec*. (août 1994).

MARCOTTE, R. 1996. Bilan et prospective quant à la restauration des aires d'accumulation de résidus miniers acides au Quebec. *Colloque sur le programme de neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier*. Rouyn-Noranda. pp.299-310.

MARION, J.M., OR, D., ROLSTON, D.E., KAVVAS, M.L. ET BIGGAR, J.W. 1994. Evaluation of methods for determining soil-water retentivity and unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science*, Vol. 158, 1: 1-13.

MATYAS, E.L., WELCH, D.E., READES, D.W. 1984. Geotechnical parameters and behaviour of uranium tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, pp. 489-504.

MILLINGTON, R.J., GILLHAM, R.W. CHERRY, J.A. ET REARDON, E.J. 1989. Reduction of acide generation in mine tailings through the use of moisture retaining cover layers as oxygen barriers. Canadian Geotechnical Journal. 26 :1-8.

MISHRA, S. ET PARKER, J.C. 1990. On the relation between saturated conductivity and capillary retention characteristics. *Ground Water*, 28 (5) : 775-777.

MUALEM, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522.

MUALEM, Y. 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. In A. Klute (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agron. Monogr. 9 (2nd ed.) *American Society of Agronomy*, Madison, Wisconsin, 799-823.

NICHOLSON, R.V., GILLHAM, R.W., CHERRY, J.A., REARDON, E.J. 1989. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26 No.1 pp. 1-8.

NICHOLSON, R.V., AKINDUNNI, F.F, SYDOR, R.C., GILLHAM, R.W. 1991. Saturated tailings covers above the water table: The physics and criteria for design. *Deuxième conférence internationale sur la réduction des eaux de drainage acides*, NEDEM 1991, pp. 443-460.

RICARD, J.F. 1994. Étude en laboratoire de la relation capillaire et de la conductivité hydraulique de résidus miniers. Mémoire M.Sc.A., Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal.

RICARD, J.F. 1997. Design and Construction of a Dry Cover Made of Tailings for the Closure of Les Terrains Aurifères Site, Malarrtic, Québec, Canada. Fourth *International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, B.C. 1997*, pp. 1515-1530.

RITCEY, G.M. 1989. In: Tailing Management, Problems and Solutions in the Mining Industry, Amesterdam: *ELSEVIER.*

ROWE, R.K., BOOKER, J. R. ET FRASER, M.J., 1994. *POLLUTEv6 and POLLUTE-GUI - User's Guide*. GAEA Environnmental Engineering Ltd. London, Ontario. 305 pp.

SRK 1987. Report 58903, The Technology of Uranium Mill Tailings Disposal; rapport préparé pour le programme national de recherche sur les résidus d'uranium. *Énergie, Mines et Ressources Canada*, Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie.

SRK 1991. Guide technique préliminaire sur le drainage rocheux acide. (une traduction de «Draft Acid Rock Drainage Technical Guide», 1989, BCAMD Task Force). Vol I et II, Centre de recherches minérales, Québec.

ST-ARNAULT, L., AUBE, B., YANFUL, E., 1996. Efficacité des recouvrements géologiques pour contrôler le drainage minier acide: le projet Waite Amulet. NEDEM'96. *Colloque sur le programme de neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier*. Rouyn-Noranda. pp.48-57.

TAYLOR, D.W. 1948. Fundamentals of soil mechanics, *New York: Wiley.*

TODD, D.K. 1980. Groundwater Hydrology. *John Wiley & Sons.*

TREMBLAY, L. 1995. Étude du transport de l'oxygène dans des matériaux poreux partiellement saturés. Mémoire M.Sc.A., Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal.

TREMBLAY, R. 1990. Portrait global des parcs à résidus miniers en Abitibi-Témiscamingue; problématique et état de la question. *Symposium sur l'Environnement, l'Impact des Parcs à Résidus en Abitibi-Témiscamingue*, Ordre des Ingénieurs du Québec Section Nord-Ouest.

U.S. NAVY. 1971. Soil Mechanics, Fondation, and Earth Structures. NAVFAC Design Manual DM-7.

VAN GENUCHTEN, M.TH. 1980 A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol 44 pp. 892-898.

VAN GENUCHTEN, M.TH. ET NIELSEN, D.R. 1985. On Describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. Annales Geophysicae, 3: 615-628.

VAN GENUCHTEN, M. TH., M. TH., LEIJ, F.J. ET YATES, S.R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, EPA/600/2-91/065.

VICKS, S.G. 1983. Plannig, Design, and Analysis of Tailings Dams. Ed. John Wiley & Sons.

WILSON, G.W., NEWMAN, L., BARBOUR, S.L., O'KANE, M. AND SWANSON, D.A., 1997. The cover research program at Equity Silver Mine Ltd. Fourth international conference on acid rock drainage. Proceedings,Vancouver B.C., Canada.

WISE, W.R., CLEMENT, T.P. ET MOLZ, F.J. 1994. Variably saturated modeling of transient drainage: sensitivity to soil properties. *Journal of Hydrology*, 161: 91-108.

WRIGHT, W., TURNER, A.K., KOOPER, C.E., 1987. Use of the help model in evaluating the cover design for a uranium mill tailing disposal site. EPA, Proc. Nat. Conf. on Hazardous Wastes and Hazardous Materials, Washington, D.C., 58-63.

YANFUL, E.K., 1990. Recouvrements géologiques pour contrôler le drainage minier acide. *Compte-rendu du Colloque sur la réduction et le drainage des effluents acides générés par les activités minières*, pp. 65-83.

YANFUL, E.K., 1991. Development of laboratory methodologies for evaluation the effectiveness of reactive tailings covers. *Final Report (Draft, Dec. 1991), Centre de Technologie Noranda* (DSS Contrat Number KE 144-8-4464/01-55

YANFUL, E.K. 1993. Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic tailings. Journal of Geotechnical Engineering. 119 no.8: 1207-1228.

YANFUL, E.K., ET AUBE, B. 1993. Modelling moisture-retaining soil covers. *Proceeding on the Joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering*, Montreal, 1: 373-380.

YEH, T.-C. J., GUZMAN, A., SRIVASTAVA, R. ET GAGNARD, P.E. 1994. Numerical simulation of the wicking effect in liner systems. *Ground Water*, 32